

## 城乡规划领域公众参与有效性探究

裴娜  
北京建筑大学  
北京

**摘要** 公众参与城乡规划最为关键的内容是参与的效力，参与效力的有无、高低是评价整体公众参与城乡规划的标准，而且更为重要的是，参与效力丧失还将极大的伤害参与者的积极性，长此以往使公众参与制度沦为空谈。本文将城乡规划领域公众参与之有效性问题以专章形式进行分析，希望对这一关键性问题提出良性、合理化建议。

### 序言

公众参与的有效性，指的是公众参与所发挥作用的程度以及所产生的效果。公众参与应当是有效的参与，如果公众参与不具有有效性，而只是流于形式，那么公众参与制度也就失去了存在的必要性。<sup>1</sup>因而，参与的有效性是公众参与的制度根本所在，因为“在参与走过场的阴影笼罩下，公众也会自然而然的丧失对参与制度的信任。”<sup>2</sup>

具体到城乡规划领域，公众参与有效性的考量显得尤为重要。这可以从两个层面进行分析：

第一、从公众参与规划过程本身而言，如果参与的规则不能使公众对最终的规划结果产生预期的影响力，那么一方面这样丧失了公众参与城乡规划的必要意义，另一方面也使公众参与下一次规划的积极性受挫。这两方面将使公众参与城乡规划制度沦为形式。

第二、从公众参与城乡规划的最终结果——规划方案而言，又具有两个特性：

一是相比较大多数行政行为的结果而言，城乡规划方案具有未来导向性，规划方案都是对未来的城市建设进行指导的，因此判断此次公众参与规划的有效性可能要经历一段时间的等待，即参与的效果显现具有滞后性。同时此次参与的效果又会一定程度上影响接下来公众参与的信心，因此，预先通过制度设计提

高参与有效性对城乡规划领域尤为重要。

二是长期性和广泛性。其他大量的行政行为存续期限较短，适用范围有限。而城乡规划行政行为则不然，规划方案通常期限长，适用范围非常广泛<sup>3</sup>，一旦失误后果将难以弥补，而且规划修改阶段的公众参与也非常受限。这样看来，通过加强规划制定过程中公众参与的有效性，尽可能的避免失误和错误就显得尤为重要。

### 一、参与有效性的评价机制

评价标准应该分两个层次：第一是事实层面的，评价公众参与城乡规划的有效性是否具备，即有无现实参与效力；第二是价值层面的，在参与效力产生的情况下，公众参与城乡规划的效力是高或低、效果是好或坏，即参与的质量。

#### （一）事实层面之标准

事实层面去判断公众参与城乡规划的效力主要表现为：从程序角度看，是否在既有制定法中具体设置了一系列规则（如：规划行政主体对公众参与意见的回应程序），这些程序规则的运行或多或少将使公众参与产生效力。

#### （二）价值层面之标准

判断公众参与城乡规划之有效性高低应当主要从应然情况进行考察。而这里的应然标准实际就是从价值层面对参与之有效性的判断。

1、从参与阶段来看，城乡规划领域的每个参与阶段，规划启动阶段、规划编制阶段、规划实施阶段、规划修改阶段都应该设置相应的公众参与的具体规则。

2、从参与内容来看，应当保障城乡规划体系的每个规划种类都能够成为公众参与的对象，不论是总体规划，抑或是详细性规划；

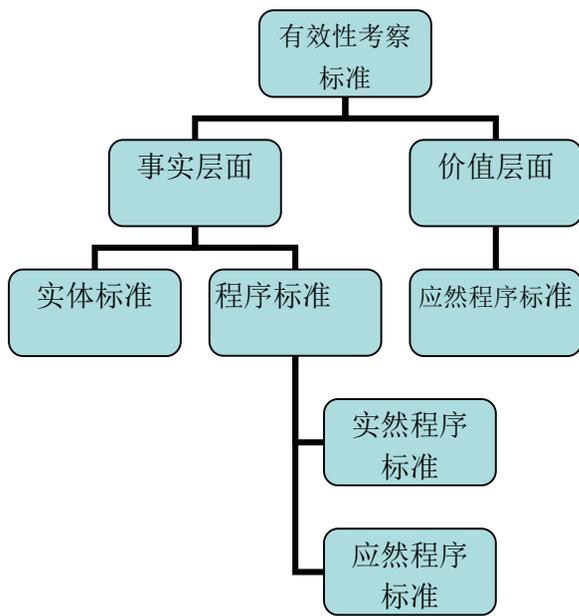
不论是控制性详细规划，抑或是修建性详细规划。

3、从参与主体来看，应当保障最广泛意义上的公众参与，不论与规划事项有无利害关系，不论是专家等特殊主体抑或是普通公众，都可以凭借恰当的方式进行参与。

4、从参与方式来看，首先应当设置一系列规则保障公众参与权，其次更重要的是设置保障这些规则实施效果的另一部分规则。例如：首先规定了听证程序，其次规定了听证后公众意见的回应机制，以保证听证的最终有效性。

我们认为，如果城乡规划领域公众参与程序设计能够符合上述四个标准，那么这样的参与程序体系是完备的、良性的，也同时会最大限度的保障在实体上实现公众参与的意见主张。

为了便于理解，将公众参与城乡规划有效性之考察标准的脉络以图示方式表示如下：



图：公众参与城乡规划有效性考察标准之脉络

## 二、提高公众参与城乡规划有效性之途径

上文分析城乡规划领域公众参与的所有内容，都是为了解决困境，提出完善路径。这也是分析城乡规划之有效性的目的所在，也是公众参与城乡规划的根基本质内容。所有的“*What*”、“*Why*”其实都是为了解决“*How*”的

问题。

需要说明的是，我们探求公众参与城乡规划的有效性问题，主要从法律制度，尤其是行政法律制度的层面。其他的诸如转变执政理念、提升公众参与热情、公众专业参与素质提高等社会或心理层面的部分不进行列举。

### (一) 参与主体层面——社区规划师的出现

北京市目前在积极试点社区规划师的参与模式<sup>4</sup>，由北京市规划委员会发起，在区县政府、街道办事处协调帮助下，由城市规划设计院的规划师直接与社区“一对一”挂钩，负责该社区公众参与规划之意见收集、规划知识讲解、规划方案的说明等工作。

社区规划师是致力于社区管理、更新和复新等事项的管理性规划师，也是服务于城市街道一级政府机构的规划师。现阶段我们的社区规划师主要的工作内容可以集中在，向社区居民提供相关规划专业内容方面的咨询服务、定期或不定期开展规划宣传和规划知识培训、为政府或规划机构进行城市研究和公共政策制定提供材料、组织居民对本社区的规划建设情况做发展评估等方面。同时社区规划师要为市民和政府之间的沟通担负起桥梁作用。<sup>5</sup>

目前社区规划师项目在北京市朝阳区双井街道办事处辖区取得了较好的参与效果，在全市推广的效果有待进一步考察。我们认为，可能出现的影响参与效力的层面是：(1) 规划师的主观意愿和时间、经费保障等因素；(2) 区县、街道办事处、社区的协调和动员机制；(3) “社区规划师”定位的准确性。与一般规划师之区别，同一规划师两种活动时之区别等；(4) 规划师的工作方法。

### (二) 参与方式层面

#### 1、规划运行中信息公开的完善

在公众参与活动中奉行公开基本原则，早已经形成共识。政府信息公开是公众参与的基础，公众参与反过来也推动着政府信息公开向广度和深度发展。<sup>6</sup>

《城乡规划法》已经明示的规定了基本的规划信息之公开（如“公告”制度，且规定期

限不少于30日)。但是由于规划是专业性、未来性的行政活动，在编制和实施中行政主体和专家的功能比较突出，普通公众则基本处于征询意见的地位。因此，信息的公开显得尤为重要。

从城乡规划领域视角看，信息公开要完善以下几个层面：

#### (1) 信息公开要具备一定的广度。

规划信息是公众参与之基础，不能只对某一阶段或某种规划进行公开，而应该除了涉及国家保密等不适宜于公开的内容外，实现全方位覆盖。尤其是规划草案的形成过程之信息公开。公众参与不一定覆盖规划的所有方面，但信息公开是可以做到的。

通过对2008年5月1日实施的《政府信息公开条例》第14条、第21条、第23条的规定，我们可以看出，在政府公开范围和事项的确定上，行政相对人只有事后的被告知决定及其理由权，没有事先的决定做出参与权。另外，政府信息以公开为原则，以不公开为例外，其“例外”的事项标准必须明确，对于政府公开信息范围的立法界定方式上，一般都是采取“概括加例外列举”的方式<sup>7</sup>，而不应该采用现在的“概括+公开列举+兜底条款+例外列举”的方式。<sup>8</sup>

#### (2) 信息公开的程度加强。

规划信息公开的内容以满足公众参与的目的和必要性为标准，“公开原则是制止自由裁量权专横行使最有效的武器。”<sup>9</sup>总体来说，除非有法律规定的特殊情形，应当无保留公开。实践中以规划专业性为由阻止公开，认为公开也没有意义的做法是重大错误，公开与否是前提问题，公众能否理解是实施完善的问题。

#### (3) 信息公开的方式转为主动公开。

规划信息公开很大程度上还表现为信息的依申请公开，如：规划调整的内容。这在实践中明显不能满足公众参与的需求。城乡规划之信息公开主要应当表现为主动公开，而且对于规划行政主体而言，这是权利亦是义务。如同行政机关在行政诉讼中“先取证、后裁决”一样，规划也应该基于一定的原理、主张而制定，这些原理主张应当公开公布，且这些信息是在制定规划时就存在的，提供并不增加额外

的成本。

#### (4) 其他相关内容的一并公开。

规划领域之信息公开绝不仅限于规划方案之公开，与规划方案编制、确定、修改相关的信息也属于公开的范畴。如：规划意见征询听证会信息之公开，听证代表的选择，主张，听证意见的取舍等都属于公开的范畴。

## 2、提升听证会的运行效力

听证会是行政领域的基本运行方式，“作为程序法的核心，听证对行政民主、法治保障人权的作用越来越突出，听证也越来越受到人们的关注，并得到广泛的运用。”<sup>10</sup>有关听证的具体运作程序和方式，本文在此不再赘述。以下仅就如何提升公众参与城乡规划听证的运行效力进行分析：

#### (1) 制衡规划行政主体在听证会中的作用

德国公法学家Larl-Heinz Ladeur指出：在19世纪自由主义法治国家传统的见解中，在范式上行政被认为是与私利相分离的，自律的，为实现公共目的而行动的（公共行政），但是在这种范式并不能理所当然的适用于现代的规划行政领域，规划行政针对社会的功能性要求，已经不具有“中立性”而成为与其他当事人相并列的“当事人”。<sup>11</sup>

与其他行政领域相比，城乡规划行政领域的行政主体表现出一定的特殊性：a是规划方案的制定主体，并控制规划的实施与修改；b规划是对社会产生长期、普适效力的行政行为；c同属行政系统内的其他行政机关行使国有土地使用权的管理职能，而城市规划很大程度上是对土地用途的再划分；d土地具有巨大经济价值的属性，是地方税收的主要来源。

因此，对于城乡规划领域的听证程序，我们非常有理由怀疑规划行政主体是否能处于“中立地位”，事实上，它已经成为或至少是“类当事人”的地位。因此，有必要在听证程序中引入制衡机制进行权力分化，这也体现出“均衡性”的参与原则。有学者提出在城乡规划领域听证活动中引入独立的仲裁机构的理念<sup>12</sup>，尽管不成熟，但至少提醒我们规划听证中主体之特殊性。

## (2)多层次“大听证”方式之建立

目前《城乡规划法》明示规定的听证等严格程序的法条表述均为：“并采取论证会、听证会或者其他方式征求专家和公众的意见”。这样表述除了将论证会顺序放在听证会之前有待商榷之外，似乎还表明了立法者的另一种思路，即这三种方式“择其一”运用，选择了听证会是否还可运行论证会，选择了论证会、听证会是否还可运行“其他方式”。立法没有明确回答，但从实践中的做法看，基本是选择一种运行。

我们认为，“大听证”模式不但不会降低行政效率，反而在提升参与效力的前提下附带提高行政效率。因为更广泛的征求意见有利于规划内容的民主性；更全面的听取看法有利于规划建议的集中；更多主体的意见表达有利于规划方案的执行。试想一下，规划方案由于意见征询不充分而仓促出台，在执行中遭遇公众巨大阻力，行政效率在制定当时是比较高，但整体来看是丧失的。

## 3、建立规划意见回应机制

公众参与城乡规划的有效性固然存在一些客观性标准，但实际上在每个参与主体内心对本次公众参与的有效性都会产生自我评判。最为关键的是意见的采纳情况以及理由的回馈。也就是说，参与渠道的通畅性是否具备，从下至上、从上至下两方面是否都顺畅？

规划意见回应机制的建立需注意以下几个问题：

### (1) 回应的内容尽可能全面

意见回应主要是表达对公众意见的最终评价结果，反馈时需要对所有意见进行回应，不能只限于采纳的意见，未采纳的意见相较而言更具有回应的必要性；另外，回应不能只是简单地说明是否采纳，必须说明理由，理由的是否充分是公众判断参与效力的关键，即使意见未被采纳，但理由可以接受，公众仍将认为参与有效。反之，即使意见被采纳，但没有说明理由，参与的效力将被大打折扣。

### (2) 回应的主体不限于提出主体

意见回应的主体不限于提出意见、建议的主体，公众参与是大众化的、全面的，意见的多样性非常丰富，未提出意见的主体可能也是

意见的受益者，即使与该意见无关联性，因为其参与了规划活动，对规划活动中的公众意见也享有知情权，也就是说，规划公众参与的意见应当向所有公众参与主体回应并公开。

### (3) 回应的具体程序明确清晰

回应机制的建立必须设置相应的程序规则来保证。“具体的信息反馈要求政府必须对每一个建议的处理情况进行说明理由：采纳建议的情况要说明原因，未接受的建议更要说明原因，并将这些意见附随说明理由一并归档，以备日后公众的查阅。”<sup>13</sup>包括回应的期限、回应的主体、回应的内容及理由以及不回应的法律后果。

## 参考资料：

- <sup>1</sup> 王青斌：《论城市规划中公众参与有效性的提高》，载《公众参与法律问题国际研讨会会议资料》，中国政法大学法治政府研究院编，2010年10月。
- <sup>2</sup> 徐文星：《行政法背景下的公众参与：公众参与机制的再评价》，载《上海行政学院学报》2007年第1期。
- <sup>3</sup> 总体规划期限可以达到20年，适用范围依据种类不同而有区别，如：城市总体规划适用于全市地域，镇总体规划适用于全镇地域。而控制性详细规划的期限一般与政府五年规划同步，即最少5年，最多不超过总体规划的20年，控制性详细规划同样也是涉及广泛群体权利与义务。
- <sup>4</sup> 北京市规划委员会网站，公众参与板块“公众如何更好的参与规划工作”  
[http://www.bjghw.gov.cn/web/static/articles/catalog\\_330100/article\\_ff8080813a4539c1013a62e2efb00112/ff8080813a4539c1013a62e2efb00112.html](http://www.bjghw.gov.cn/web/static/articles/catalog_330100/article_ff8080813a4539c1013a62e2efb00112/ff8080813a4539c1013a62e2efb00112.html)，最后访问时间2013年2月28日。
- <sup>5</sup> 郝娟：《提高公众参与能力 推进公众参与城市规划进程》，载《城市发展研究》2008年第1期。
- <sup>6</sup> 王周户：《公众参与的理论与实践》，法律出版社2011年版，第196页。
- <sup>7</sup> 山文岑：《试论我国〈政府信息公开条例〉的缺陷及其完善》，载《图书与情报》2010年第

1 期，第 72 页。

<sup>8</sup> 我国《政府信息公开条例》此种方式的具体表现为：第 2 条对政府信息进行了概括性的界定；第 9 条至第 12 条规定对行政机关主动公开的政府信息范围进行列举；第 13 条规定除本条例第 9 至 12 条规定的行政机关主动公开的政府信息外，公民、法人或者其他组织还可以根据自身生产、生活、科研等特殊需要，向政府部门主动申请获取相关政府信息；第 14 条第 4 款又规定，行政机关不得公开涉及国家秘密、商业秘密、个人隐私的政府信息。

<sup>9</sup> 王名扬著：《美国行政法》（上），中国法制出版社 1995 年版，第 109 页。

<sup>10</sup> 应松年主编：《行政程序法立法研究》，中国法制出版社 2001 年版，第 514 页。

<sup>11</sup> 参见（日）佐藤岩夫：《德国城市的“法化”和居民的自律——现代法化现象的一个断面》，载《社会科学研究》第 45 卷第 4 号（1994 年）。转引自朱芒：《论我国目前公众参与的制度空间——以城乡规划听证会为对象的粗略分析》，载《中国法学》2004 年第 3 期，第 54 页。

<sup>12</sup> 孙施文、朱婷文：《推进公众参与城市规划的制度建设》，载《现代城市研究》2010 年第 5 期。

<sup>13</sup> 胡童：《论利益保障视域下城市规划中的公众参与——基于德国双层可持续参与制度的启示》，载《研究生法学》2012 年第 2 期。

#### 作者简介：

裴娜（1978—）：女，陕西西安人，法学博士，2003 年 7 月至今任教于北京建筑大学法律系，主要从事城乡规划法学、行政法学研究。目前，独立承担省部级课题 1 项，其他课题 6 项，先后在《法学杂志》、《行政法学研究》等核心期刊发表论文 20 余篇。

## 双鱼岛工程关键性设计技术研究

金晖 柯学

(中交第三航务工程勘察设计院, 上海 200032)

**摘要:** 人工岛是人工建造而非自然形成的岛屿, 现代人工岛的建设用途非常广泛, 可用于兴建深水港、机场、电站、原油煤炭等工业基地以及新兴海上城市。双鱼岛(招商局漳州开发区人工岛)工程是经国务院审批通过的国内第一个完全用于旅游、居住和生态开发建设的人工岛, 是集城市规划和景观布局、高等级防护堤坝、生态滨水岸线、高档游艇基地、大型人工泳池、大面积回填造陆及超软土地基处理、船(水)闸、防洪排涝、内河防渗及水体交换等为一体的综合性海岸水工工程和城市开发建设工程。本文将重点介绍双鱼岛的前期填海造陆设计如何考虑与后期上盖规划之间的衔接, 并根据工程所在位置地质相对比较复杂、淤泥层厚度较大的特点, 对“确定合理的建设标准, 外护岸结构方案, 陆域形成回填料选择, 项目建设开发的整体思路”等主要关键技术作重点研究, 论证本工程的关键技术始终处于受控状态, 并已达到项目整体投资效益最佳的目的。

**关键词:** 人工岛 城市规划 回填造陆 建设标准 关键技术

### Research on the key design technology of Shuang Yu Artificial Island

Jin Hui, Ke Xue

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032)

**Abstract:** The artificial island is constructed artificially instead of forming naturally; the use of modern artificial island is very extensive, it can be used for the construction of deepwater port, airport, power plant and other industrial bases such as crude oil, coal and emerging maritime city. ShuangYu Artificial Island (Commissioned by China Merchants Group Zhangzhou Economic-Technological Development Area) is the first domestic artificial island which is approved by the State Council to be fully developed for tourism, living and ecology, it is a comprehensive coastal maritime project, city developing and constructing project which integrates city planning and landscape layout, high level protection dyke, the ecological coastline, high-end yacht base, large artificial swimming pool, vast backfilling reclamation area and extremely soft ground treatment, navigation gate(sluiice), flood control and drainage, inland river seepage proofing and water exchange. This paper particularly introduces how to consider the connection between ShuangYu Island's preceding land reclamation design and later layout and building, and

intensively researches key technology such as determining the reasonable construction standards, the structural scheme of the outer revetment, backfilling material selection of land formation, the overall idea of project development et al., according to the features that the engineering geological location is relatively complex and the thickness of silt layer is large, the key technology of the project is demonstrated to be under control and the objective of optimum overall project investment has been achieved.

**Key words: Artificial island, City planning, Reclamation, Construction standard, Key technology**

## 1、工程概况

双鱼岛（招商局漳州开发区人工岛工程）是经国务院审批通过的国内第一个完全用于旅游、居住和生态开发建设的人工岛，是漳州开发区的重要组成部分和一个新的重要亮点。工程位于漳州南太武高尔夫球场东侧大磐湾中的大磐浅滩海域，人工岛功能定位为发展该区域海上旅游业，充分发挥该地块邻近厦大漳州校区、南太武高尔夫球场的独特人文地理优势，集海上旅游休闲度假为一体，并配套发展其周边滨海旅游业，以提升其周边陆域的居民生活质量和居住品味。

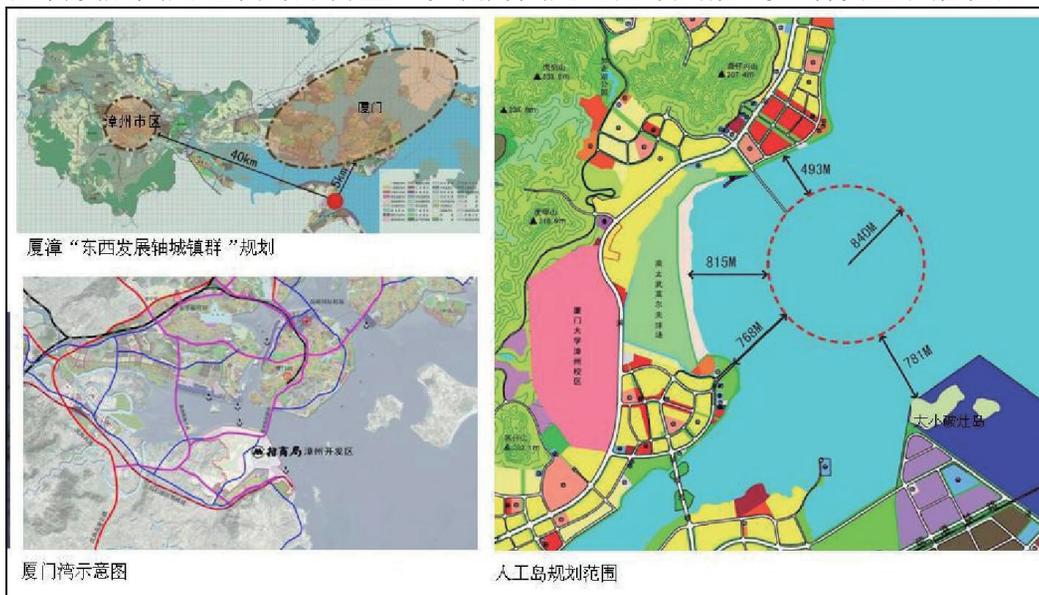


图1 工程区域位置图

人工岛基本形态为两条嬉戏的海豚形成的圆形设计方案，总面积为 221.67 万  $m^2$ ，半径为 840m，需填海及地基处理形成陆域面积为 184.07 万  $m^2$ ，人工岛规划通过两座桥梁与陆地联络，一座位于西北向，一座位于西南向。人工岛沿岸分

別布置了游艇及客运码头、人工泳池等工程。主要技术要求为防洪、防潮和排涝工程按重要城市（II）标准设计设防。

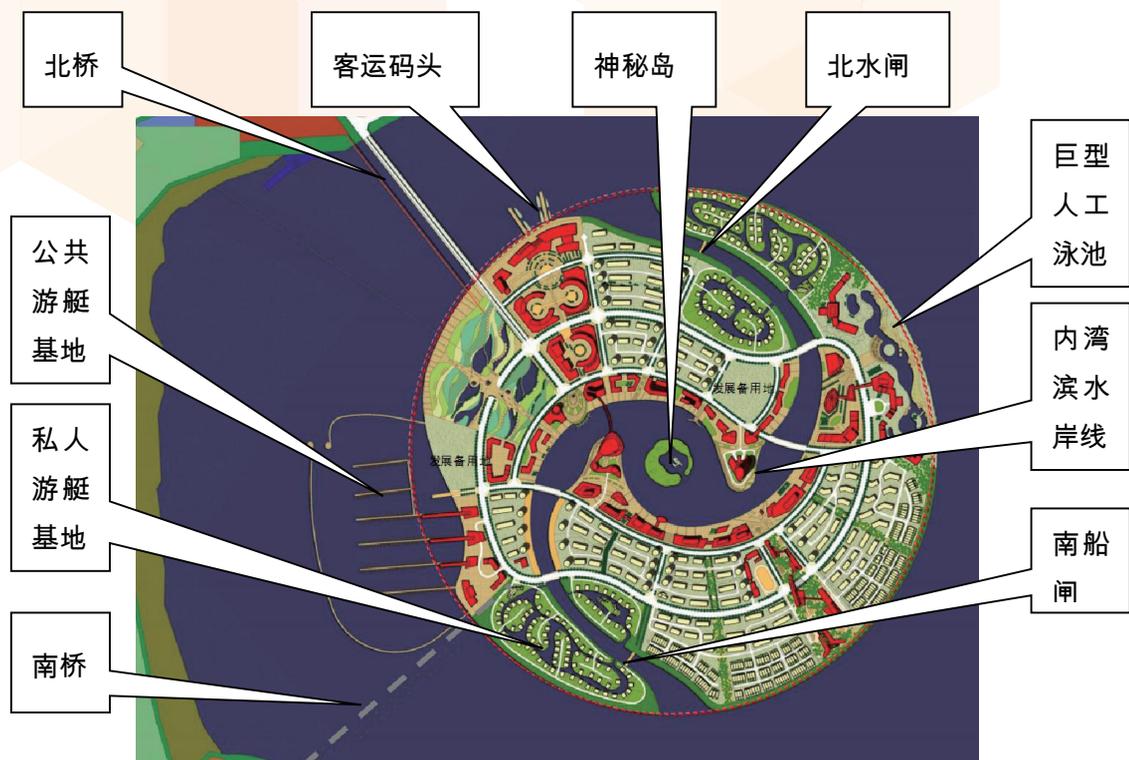


图2 双鱼岛总平面布置（方位按照“上北下南”）

## 2、自然条件

双鱼岛的自然条件可归纳为“潮差大、风浪大、地质条件差且复杂”。

潮汐属于正规半日潮流区，平均潮流速为 0~0.8m/s，工程海域重现期 50 年、100 年一遇极值潮位值如下（潮位及高程均采用 1985 国家高程基准）：

100 年一遇高水位	4.62 m
100 年一遇低潮位	-3.31 m
50 年一遇高水位	4.49 m
50 年一遇低潮位	-3.26 m

人工岛形状为圆形，外围围堤随位置不同所承受的主要波向和波高亦有明显的差异。根据工程波浪场计算专题研究，统计给出了环岛 23 个点位不同重现期的设计波要素。人工岛东侧和东南侧 100 年一遇设计波浪较大，设计高水位对应的  $H_{1\%}$  为 5.45m，N 向绕射后设计高水位对应的  $H_{1\%}$  最小为 0.77m。

从工程地质情况看,对人工岛建设产生影响的软土层主要为表层的淤泥,属于全新世海相沉积,其显著的特点是:厚度变化较大,为0.40~23.50m,分布规律是:人工岛东侧较厚,西侧较薄,南侧较厚,北侧较薄,人工岛中央厚薄分布不均,一般中心地区较厚,向二侧逐渐减薄,淤泥厚度突变处位于人工岛东南侧,落差最大接近20m(指水平10~15m距离范围内的突变)。

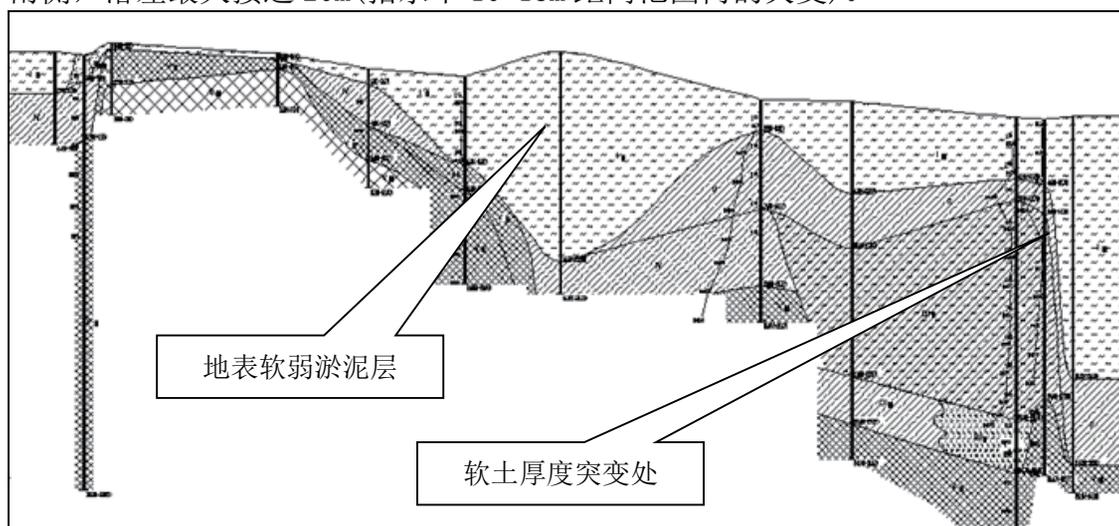


图3 人工岛东西向(左西右东)淤泥分布示意图

淤泥的工程性能差,饱和,呈流塑~软塑状,含水量较高,属高压缩性、高灵敏度、低强度软土,容许承载力为20~50KPa,压缩模量 $E_{s1-2}$ 为1.0~2.5MPa,直剪粘聚力为7~13KPa,内摩擦角为 $0.4\sim 1.5^\circ$ ,渗透系数为 $3\times 10^{-7}\sim 8\times 10^{-7}$ cm/s,是人工岛工程需着重处理的软弱土层;淤泥层下主要为中砂、粉质粘土、中粗砂、残积粘性土和风化岩层,可作为较好的持力层。

### 3、双鱼岛形态研究

人工岛的平面设计主要内容包括工程用海面积、地理位置与布局、外轮廓形状、结构型式和主要区块功能等。根据国内外建设人工岛平面布局的经验,主要采取人工岛式、分离式、多功能区块组合、曲折岸线形态等围填海方式。

双鱼岛平面形态顾名思义是二条海豚鱼,人工岛的外围设计成圆形,其顺畅的流线型人工堤可最大限度降低对海洋水动力条件的影响,并尽可能减低海域泥沙淤积程度,尽量减少了对人工岛西侧大盘湾耳形沙滩的影响;另一方面,圆形人工岛配以花园式规划布局和璀璨的夜景工程,从高处俯瞰,双鱼岛将犹如一颗镶嵌在碧海中的“明珠”,与“海上花园”鼓浪屿交相辉映;从艺术形态上,双

魚島是結合人工島的地理形態及中國傳統吉祥圖案“雙魚圖”變化設計而成，兩抽象的魚形呈旋動的水滴形，展現了雙魚島海洋文化的底蘊與特征，具有一定的國際化視野，標志中間兩條白色的魚代表著中華白海豚，以雙魚圖變化設計的標志，不但巧妙的體現了島名的主題概念，同時也體現了中國古代極具智慧的天地交泰、陰陽和合的太極雙魚圖。

從功能布局上，在雙魚島的中央布置有南北走向的內河，這和日本等先進國家築島工程項目內部大多採用水道分割極具相似性，內河也最大限度的拓展了濱水景觀岸線。內河道總體為南北走向，呈反“S”型，為保證內河道水體要有一定的流動性、增強島內潮流通道內海水自淨能力，同時還要減少內河道內的泥沙淤積，在內河道南端和北端設置水（船）閘，經過物理模型試驗驗證，內河道水體交換可以達到 90%以上。

#### 4、雙魚島總體建設標準

防洪標準（重現期）取 100 年一遇設計高潮位，波浪取 100 年一遇波要素。

外護岸的工程等級為 1 級，按允許少量越浪標準 $\leq 0.05 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ，內河護岸工程等級為 3 級。

地震抗震等級按基本烈度 7 度設防。

人工島內形成主干路網按城市次干道標準設計，工後沉降小於 50cm。

#### 5、護岸工程

人工島始終處在無掩護的敞開海域，作為人工島四周的護岸首當其沖地會遭到波浪的襲擊，因此，護岸在人工島形成和使用過程中始終起到了重要的保障作用。

##### （1）外護岸工程

人工島整體形狀為圓形，但功能岸線不規則，分布有遊艇碼頭岸線、人工泳池岸線和內河出海口等，外護岸總長度為 6465m。人工島東區承受風浪作用，外護岸高程為 6.7m，擋浪牆高程取 7.9m，西區護岸高程為 5.7m，其上設混凝土擋坎，高程取 6.0m，堤頂寬度均為 14.0m。

外護岸設計側重於結構的安全可靠性和穩定性，同時要兼顧不同功能岸線的

特殊使用要求。据此对外护岸进行多方案比选，总体采用斜坡式和直立式二种结构型式，具体可选的结构型式有：抛石爆破挤淤（自重挤淤）斜坡式结构，砂桩复合地基+抛石斜坡式结构，塑料排水板地基+抛石斜坡式结构，抛石爆破基床+沉箱直立式结构等。

在规划红线（以设计低水位与护岸相交点作为红线位置）界定的情况下，斜坡护岸会牺牲部分斜坡面的用地面积，因此，需重点比较斜坡式结构和直立式结构在工程造价以及人工岛面积最大化方面的优劣性，直立式结构虽然工序多，造价较高，但比斜坡式护岸增加用地面积约 8.12 万 m<sup>2</sup>。经经济效益评价分析，本项目土地保本转让价 60 万元/亩，折合 900 元/m<sup>2</sup>，相当于直立式护岸增加的生地价格为 7308 万元，按每延米计算相当于新增用地 1.3 万元/m；但直立式护岸（以沉箱为例）的工程直接费较斜坡式护岸（以爆破抛石挤淤堤为例）多出 5.76 万元/m，即新增土地的转让价远低于工程直接费用。

鉴于上述分析，外护岸采用抛石斜坡式结构，为尽可能减少斜坡牺牲的用地面积，适宜采用爆破抛石斜坡堤方案，在淤泥厚度较薄的区域（小于 3~5m）采用自重挤淤，淤泥较厚的区域采用爆破挤淤的处理方式。

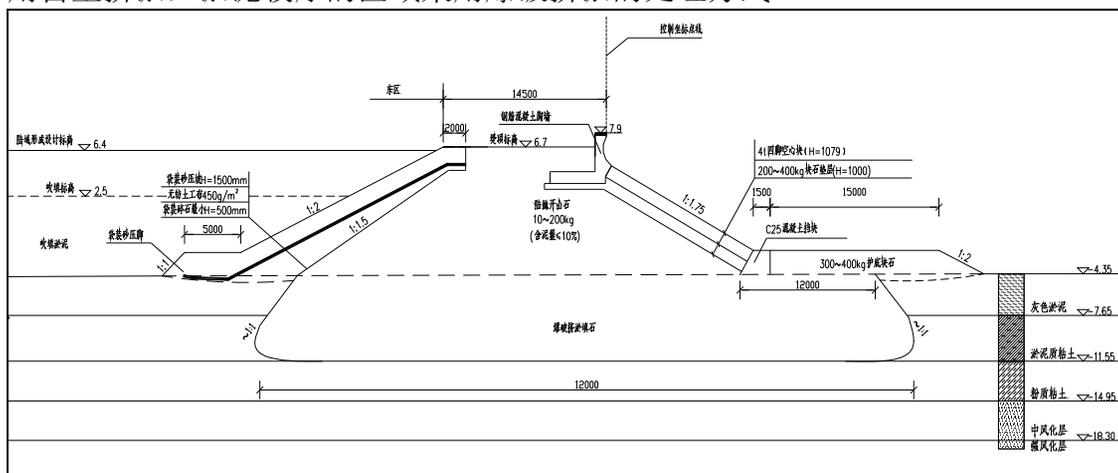


图 4 护岸典型结构图

人工岛外护岸采用抛石爆破挤淤法，抛石爆破挤淤技术是我国常用的一项地基处理技术，从地质条件以及结构型式来分析，双鱼岛护岸施工存在以下的施工难点：淤泥厚度从 5~22m 变化较大，对分段药量的控制及爆破设计参数的取用等较难，堤身落底宽度普遍较宽（40~50m），侧向挤出淤泥路径较长，淤泥挤出

的难度增大等。本工程采取了“控制加载爆炸挤淤置换法”，通过理论计算先确定爆炸施工参数，再通过典型施工试验对爆炸参数的适用性进行验证，通过典型试验和和施工中监（检）测，对不同软土厚度的堤身爆破参数确定如下：

表 1 双鱼岛外护岸爆破参数统计表

护岸分段		内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧
	处理天然淤泥厚度	22.5		15		18		13	
抛填参数	堤顶爆前抛填宽度/m	36.5	33.5	23.9	21.1	24.3	21.9	23.9	21.7
	堤顶爆前抛填标高/m	>+7.0		4.5		4.5		4.5	
	每炮抛填进尺/m	7		6		4		6	
爆炸参数	药包间距/m	2.5~3.5		2.5		2.5		2.5	
	单药包重量/kg	56		35		34		36	
	药包埋深/m	>8.0		8.1		11.8		8.3	
	一次爆炸药包个数/个	19		28		32		27	
	一次爆炸用炸药量/kg	1064		980		1088		972	

## (2) 内护岸工程

内护岸是指南北出海口水闸之内的、沿人工岛内河道两岸布置的护岸结构，受外护岸及水闸掩护，使其不受风浪影响，结构设计侧重于考虑多样性和景观性，内河沿岸分布有滨海居住区、内河文化区和闽南文化区，重点考虑滨水岸线景观空间的开放性和亲水性，体现可游性、可赏性和可参与性，设计中注重生态环境和以人为本的原则。

内护岸按 3 级水工建筑物标准设计，内护岸顶高程统一为 4.5m，内河道底标高为-1.0m，内河道通航常水位标高为 2.5m，保持通航常水深为 3.5m。内护岸略高于外海的设计高潮位，外海涨潮时，潮水通过外护岸抛石堤和陆域回填层，渗流至内护岸区，低于 4.5m 标高，基本不影响沿内护岸顶景观人行道的观光行走。另外内护岸顶高程与东区陆域高程 6.4m 高差 2.5m、与西区陆域高程 5.4m 高差 1.5m，高差均不大，可采取工程措施过渡衔接。同时，考虑在内水道运行的船舶多为观光游船，吃水不深，因此内水道常水位保持在 2.5m 左右即可通航运营，内护岸顶与内水道常水位之间，也保留有一定的高差，两侧护岸之间还可

架设观光和通车桥梁，也可满足人工岛雨水管网汇流入内水道，满足人工岛排涝要求。

内护岸设计侧重于内河滨水岸线的景观性。内护岸按内河道沿线宽度不同，分段采用直立式、斜坡式和台阶式三种型式，近期内护岸填筑采用抛石斜坡堤结构，作为陆域形成的维护建筑，远期通过在斜坡上实施二次开挖和改造，可以形成多样式的永久滨水岸线结构。

## 5、陆域形成

双鱼岛工程规划红线内的总面积为 221.67 万 m<sup>2</sup>，扣除内外护岸区、人工泳池、游艇码头区等占用面积，实际形成陆域面积为 149.05 万 m<sup>2</sup>。人工岛陆域高程的确定主要考虑外海高潮位的影响以及与外护岸防浪墙顶高程之间的关系。

设计公式：陆域高程=设计高水位+超高值=3.08+1.5~2.0=4.58~5.08(m)

复核公式：陆域高程=极端高水位+超高值=4.49+0~0.5=4.49~4.99(m)

本工程陆域形成高程宜取在 4.5m 或以上，同时，陆域形成高程还需考虑与胸墙顶高程的关系（高差宜控制在 1.0~1.5m 以内，形成良好的视野和海景观效果）。由此确定：人工岛陆域呈“东高西低”的空间形态，东区陆域平均高程取 6.4m（胸墙顶高程为 7.9m），西区陆域平均高程取 5.4m（胸墙顶高程为 6.0m），各区陆域最终设计高程结合区域用地功能和景观建筑要求确定。

陆域形成按回填料来源于以下渠道：工程地点附近的鼎仔内山体有大量可开采的土石方约 1500~1700 万方，土石比例约为 3:7；九龙江提供的砂源，以中、细砂为主；人工岛西侧游艇航道挖泥，以满足航道通行和一定水深景观要求，约有 300 万方，以超软淤泥质土为主。

陆域形成的总体思路为：淤泥较薄的西侧区采用直接回填开山土石料和吹填部分海砂成陆，淤泥较厚的东侧区大部分回填海砂，留出个别区域容纳航道挖泥，造陆形成后，再对天然淤泥地基和吹填淤泥进行加固处理。

设计中特别注意了人工岛近期填海和远期规划设计对标高的要求，人工岛造地标高和将来的上部建筑基础标高是二个概念，造地目的是形成一个陆上施工平台，为后续的建筑施工提供合理的工作面；而规划确定的建筑基础标高在平台基

础上还需再回填平均 3.5~14.0m 左右，构成一个层次高低错落有致的“馒头形”建筑群基础，填筑高程越高，未来人工岛开发使用的景观视线效应越佳，但意味着施工期分级填料和使深层软土地基沉降固结和强度增长的时间越长，而软土强度的不断增长也是人工岛不断填高的保障，按照一般经验，当填筑高程达到 20m 或以上，填料及地基预压处理时间将达到 2~3 年以上，且会造成护岸不断增加的侧向变形，当护岸累计位移值超过 20~25cm，对护岸的整体稳定性需采取预警措施。因此，设计规定，人工岛规划陆域高程小于 20m 按原规划高程实施，超过 20m 的暂定填筑至高程 20m，在 20m 标高平面上的填筑结构变形和稳定均可控的情况下，可以允许人工岛局部区域继续适当再加高，将来规划应以实际可允许填筑高程为准。

## 6、地基处理

根据地质勘探资料揭露，双鱼岛海底地面标高约为-3.54~-7.22m，地基表层软弱淤泥厚度为0.40~22.50m。按照陆域形成方案，除了直接回填开山石和海砂的区域，个别岛区吹填航道疏浚淤泥造陆，吹填厚度约为10m左右，加之天然软土层的厚度，导致整个软土处理的深度深，最深处超过30m，且软土厚度起伏变化很大，对工后沉降和不均匀沉降的控制带来很大的难度。

地基处理标准必须和人工岛规划土地使用要求相适应。人工岛规划用地以建筑、道路及场地为主，大面积地基处理标准为：岛内地基工后沉降不大于500mm；20米范围内的差异沉降不大于100mm，地表承载力在80KPa以上。

双鱼岛地基处理采用常规的排水预压固结法，首先陆域形成达到 6.4m（东区）和 5.4m（西区）的统一高程，对于吹填航道疏浚土的区域，吹填标高至平均水位处，经晾晒落淤后铺设排水砂垫层至陆域设计高程。在陆域高程以上利用开山土石料回填进行堆载预压，根据现有地质资料，将岛区细分为若干子区，每个子区的吹填淤泥厚度和天然淤泥厚度相近，原则上可以采取统一长度的排水板处理深度，以及统一厚度的堆载土石料进行预压，各子区采取统一的预压时间的卸载标准，方便现场施工控制、管理和计量，平均堆载厚度为 8~12m。经计算分析，在堆载自重作用下，地基推算固结度达到 90%以上（相当于工后沉降小于

50cm)，地基连续 10 日的沉降速率为小于 1.5mm/d，地基已达到设计固结要求，对堆载料进行高挖低填，不足部分再由外购补充，形成人工岛最终馒头状的规划使用高程。

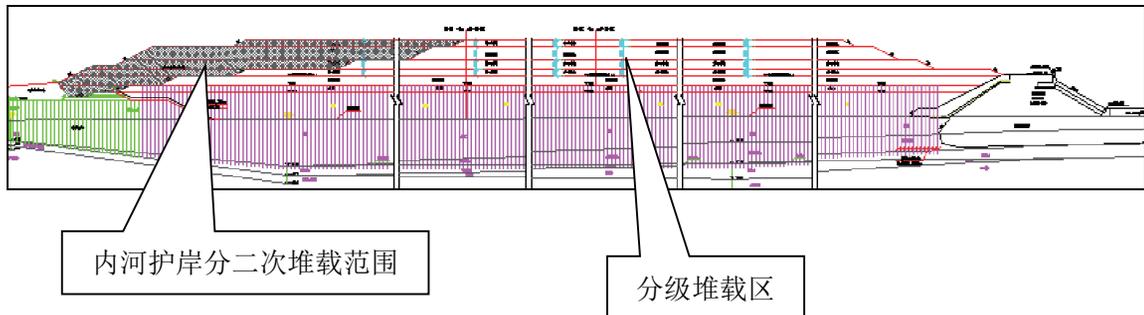


图 5 地基处理典型断面图

## 7、人工泳池

参照智利 Algarrobo 的 SanAlfonsodelMar 度假村世界最大的人工海水泳池（长度 1013m，面积 8 万平方米），在双鱼岛东北侧设置人工泳池。采用与外海连通的开放式泳池方案，泳池南北狭长走向，沿海长度约为 580m，面积约为 5.2 万 m<sup>2</sup>。泳池划分为浅、深水区，浅水区位于南北二端，面积合计约 1 万 m<sup>2</sup>，与外海封闭，泳池水面高程与外



海高水位齐平，水深为 2m，并设置水闸，泳池使用时水闸关闭，与外海隔断，需要补给水时开启；泳池中央区与外海连通，形成浅水、中水和深水之渐变式泳区，其中深水区比外海低潮位低 2m 以上，确保落潮时深水区还具备使用的条件，深水区与外海分界处设置岛礁，减少波浪的侵袭，并形成天然的景观。通过上述平面布置，大部分时间段泳池能满足全天候使用的要求，在台风季、或外海水质不良期，南北封闭的浅水泳区仍能维持使用，浅水和深水区还可通过高低自然排水，形成与外海之间自然的水体交换，大大降低未来的管理运营成本。



## 8、公共游艇码头

公共游艇泊位用海总面积为 28.35 公顷，其中由防波堤围成的游艇码头区

水域面积 28.0 公顷，客运码头水域面积 0.35 公顷。南、北二条防波堤为斜坡堤，港池口门位于西侧，口门宽度 55.0m。防波堤顶宽 5m，堤头分别设半径为 16m 的圆形平台。防波堤顶标高 4.5m，与双鱼岛已建外护岸相衔接，总长度 1207m。

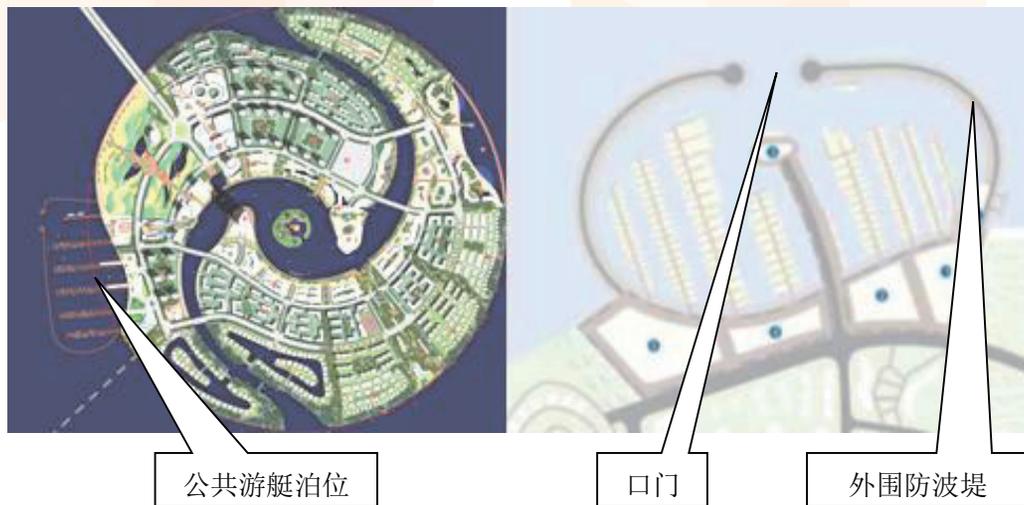


图 6 公共游艇泊位平面图

主进港航道沿双鱼岛外围自岛东向西、向北进入西港区，垂直进入港池口门。主进港航道底标高-6.0m，有效底宽 55m；港池底标高为-7.0m。港池内布置 20 英尺至 80 英尺各种不同规模的游艇（帆船）泊位共 501 个，其中含 2 个加油泊位、4 个旅游泊位、1 个接待泊位。游艇泊位的栈桥主要由钢引桥、浮动平台、主浮桥、次浮桥和支浮桥组成。护岸设置钢引桥与游艇码头浮桥连接。

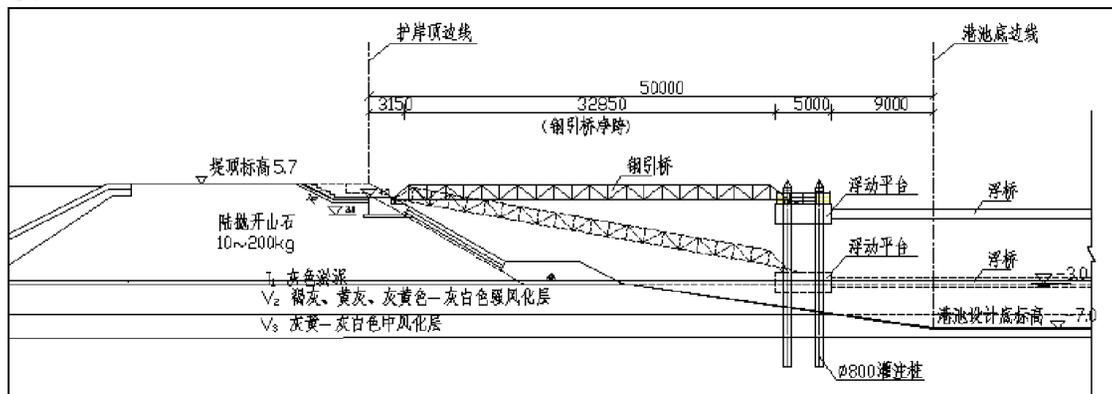


图 7 游艇码头护岸结构图

游艇上下岸采用移动式游艇起重机工艺方案，配置 1 台移动式游艇起重机，起重能力为 50t，负责大、中型游艇的上下岸，配置 1 台游艇叉车，起重能力为

5t, 负责小型游艇的上下岸。

## 9、内河防渗研究

内河道在南北出海口设置水（船）闸，与外海隔断，旨在形成内河常水位，常水位水深在 3~3.5m，以满足中小船舶在内河行驶观光的要求。双鱼岛陆域主要由开山土石料及海砂填筑而成，砂石料本身具有较强的透水性，在外海与内河水位差的作用下产生渗流，造成内河水量流失，水位下降；在局部区域陆域纵深较窄，可能产生较大的渗透坡降，存在渗透变形发展成为渗透破坏的可能性。为验算能否满足内河常水位形成效果以及发生渗透破坏的可能性，本工程完成了双鱼岛内河道防渗专题研究，确定出防渗措施和防渗范围。

防渗计算包括无防渗措施下的自然渗流计算和有防渗措施的人工渗流计算。在自然渗流计算中，对不利工况下的整个渗流场内，渗流水头在-2.35~2.5m 之间成梯度变化，渗透坡降较大值出现在南侧游艇别墅区域以及南北闸门两侧，整个流场内渗透坡降最大值为 0.423；对正常工况进行非稳定渗流计算，得到由于渗流引起的内河道 24 小时水位下降值为 55.9cm。

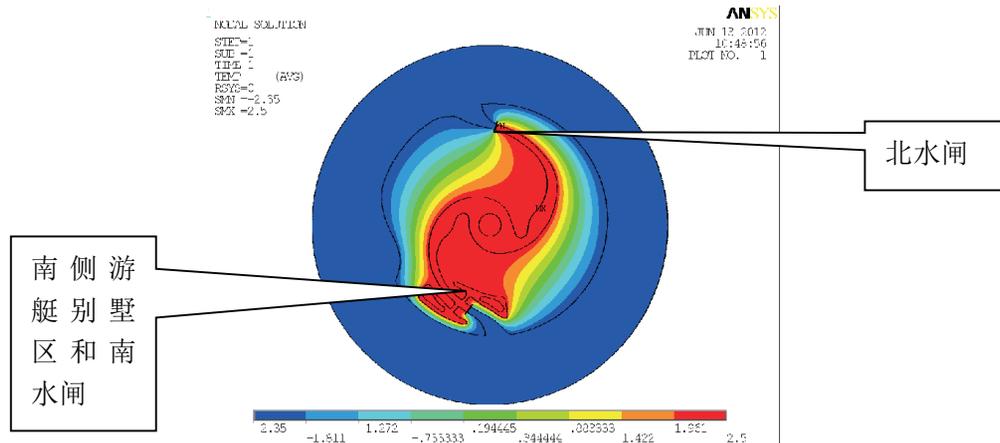


图 8 无防渗措施渗流场水头分布

由此分析出防渗的重点区域为游艇别墅区域以及南北闸门两侧，渗流控制措施主要有：铺盖、防渗斜墙、垂直防渗墙、锥探灌浆、盖重、淤背、填塘、减压井（沟）、滤层等。通常情况下垂直防渗体的防渗效果是水平防渗体的 3 倍，结合人工岛工程特点，外海潮位可能高于或低于内河水位，即存在双向渗流，设置水平防渗体并不合适，所以设计采用垂直防渗体以达到“前堵”的目的，而在抛石堤内侧设置的反滤层可以起到排水滤土的作用，以达到“后排”的目的。拟定防渗

平面方案如下图：

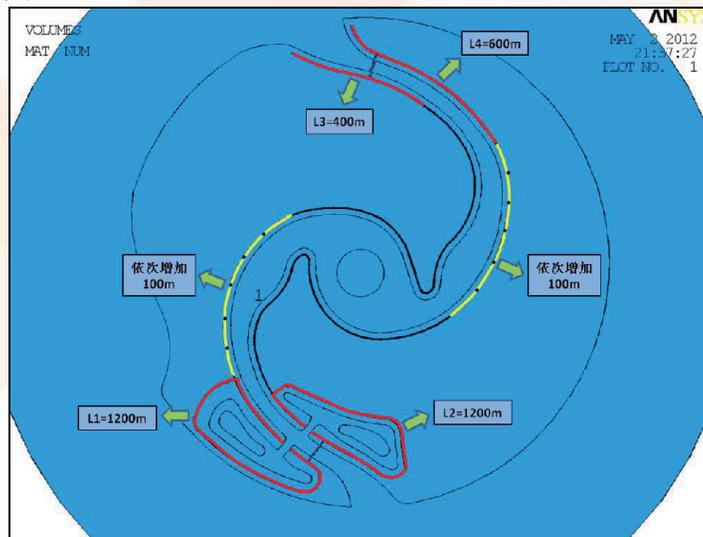


图 9 防渗方案平面图

红色区段为防渗措施建议必做的区段，设为 A 方案，黄色区段以 100m 为间距平分为 6 段，依次增加 100m 长度分为 B1 到 B6 共 6 个方案。经过模型计算，A 方案及 B1~B6 方案中局部区域渗透坡降最大值为 0.12，小于允许坡降 0.5；渗透坡降最大值均为 1.32 左右，出现在垂直防渗体处，由于垂直防渗体的允许坡降一般大于 50，甚至超过 100，所以不会发生渗透破坏；对正常工况进行非稳定渗流计算，得到不同防渗方案下的内河道水位下降值，其中 A 方案对应的水位下降值为 26.0cm，并反之确定了防渗计算长度如下表。

表 2 不同渗流量控制标准对应防渗方案

渗流量控制标准	24 小时水位下降 30cm	24 小时水位下降 20cm	24 小时水位下降 10cm	24 小时水位下降 5cm
防渗方案	A	B1	B3	B5
防渗长度 (m)	3400	3600	4000	4400

### 10、内河水体交换研究

人工岛内河道考虑了亲水景观和岛内游船通航要求，同时兼顾雨季蓄洪排涝等功能。为了控制内河水位，保证水质，通过开启河道两侧闸门，利用内外水位差进行水体的自然交换。本研究目的为确定标准工况下水体交换时间、交换量和流态特征，并指导后期使用。

内河道的换水是在内河已设置防渗的前提下进行，水体交换原则上为先开闸

排水、再于外海高潮位时引水方式，排水和引水均为单向流动，为确保水体交换的充分性，通过数值模拟计算分析，标准工况为引水时内河水位从 1.0m 上升到 2.5m，排水时内河水位从 2.5m 下降到 1.0m 或 0.0m。主要结论如下：

(1) 排水：落潮时开南闸门，选择外海大潮期潮型，内河、外海水位均为 2.5m 时排水，得到排水至内河水位 1.0m 时历时为 69min 左右，排水至内河水位 0.0m 时历时为 138min 左右，排干历时为 220min 左右。

(2) 引水：涨潮时开北闸门，选择外海平均高潮位潮型，内河、外海水位均为 1.0m 时引水，得到引水至内河水位 2.5m 时历时为 108min 左右。

(3) 由换水分析可知，第一个换水周期，换水量占原内河道的 43%左右；第二个换水周期，外海新进的水体由北闸门逐渐涌向南闸门，原河道的水体大部分由南闸门排出，当内河道水体由设计常水位 2.5m 下降到 1.0m 时，大约有 80% 的原内河道水体被排出。

(4) 由流态分析可以看出内河道最大流速不超过 1.0m/s，双鱼岛的两个鱼嘴部位比其他地方狭窄，其流速比其他部位相对要大，可以此作为不同区域内河底材料的选择依据。

## 11、景观岸线

城市或城市区域的自然环境特色是产生城市空间特征，从而形成城市特有面貌的重要因素之一，尤其是滨水景观，如何在滨水区将本地市民的生态游憩空间结合滨水区各自的特色进行规划与设计，形成一个生机勃勃的城市公共的开敞空间，应该是在人工岛滨水游憩景观中要重点考虑的问题。

滨水护岸有外护岸和内护岸组成。外护岸环绕整个岛，与进岛大桥相交接，主要与游乐度假区、游艇基地、码头区、滨海特色区、滨海休闲度假区、滨海特色居住区毗邻，将对环岛交通和堤岸景观产生作用；内护岸主要与内湾艺术文化区、闽南商业文化区毗邻，将和附近的休闲广场相互补，其规划理念是：开放性、亲水性、可游性、可赏性、可参与性、生态性和以人为本。

滨水护岸景观规划的具体原则是：

(1) 场地适宜原则：考虑内河水域宽度有限，内护岸总体以直立式为主，

适当布置斜坡式和台阶式。

(2) 生态优先原则：外护岸强调注重维护滨水护岸、防止水土流失；内护岸强调结合城市生态群落，提供适合人活动和呼吸的绿色环境。

(3) 经济合理性原则：在填海造岛的阶段就融入环境景观建设的理念，提升周边地块价值；充分利用地形条件和竖向坡度现状，力图在最少的地形整治前提下（土方二次原地利用），减少工程造价，同时创造出丰富多变的滨水空间景观。

## 12、水闸和船闸

本工程拟建设水闸船闸各一座。水闸位于内河道北侧入海口，用于内河道换水时引水及暴雨排水；船闸位于内河道南侧入海口，用于游艇通航及内河道换水时排水。

船闸用于进出南侧游艇别墅区游艇，设计综合考虑了游艇船型、船闸口门区水流、波浪控制标准、引航道和口门区安全航行条件（波浪、风力、雾、降雨等），确定船闸级别为1级，船闸主要建筑物——闸首、闸室、导航墙、翼墙等永久建筑物均按1级水工建筑物，相应临时建筑物为4级建筑物。

船闸枢纽布置于内河道南侧入海口，为双线船闸，并列布置，闸室轴线间距13m，双线船闸共用上下游引航道。船闸本体段主要由上闸首、闸室、下闸首组成。上闸首兼作外海挡水建筑物，单个闸室平面尺度为8m×30m，上、下游导航墙平面布置均采用半椭圆型，上下游引航道长度布置均大于72m。上游东西两侧翼墙均兼作外海挡水建筑物。

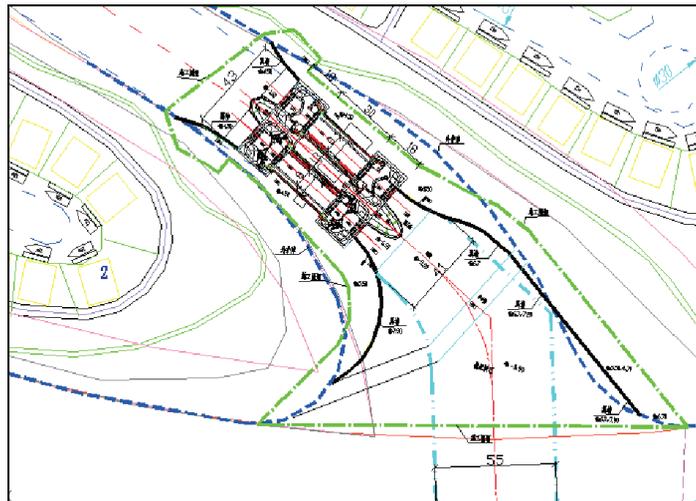


图 10 船闸及航道平面图

此船闸布置能满足单个闸室最大设计船型一次一艘过闸要求。船闸承受双向水头作用，上闸首（临海侧）和下闸首（内港池）工作闸门均采用双扇对开三角门，在操作运行上，两座船闸可独立控制。

水闸位于内河道北侧入海口，水闸及主要建筑物级别也定为1级，规模为3孔×8m，总净宽24米，满足150m<sup>3</sup>/s的泄流要求。

### 13、总体施工组织设计

本工程按陆域分区造地、分阶段交地的总建设流程进行，护岸和陆域形成作为二大主要工序，按同步交错、不间断流水作业法进行，另有水闸、船闸、泳池、游艇码头等各种构筑物的施工穿插其间。岛区面积大，施工工序多，主要施工节点及工期安排为：外护岸爆破抛石挤淤施工（工期约 9.5 个月）→陆域分区整体吹（回）填施工（工期约 17 个月）→陆上施打塑料排水板+堆载预压（工期约 25 个月）→内护岸基础及结构施工（工期约 8 个月）→规划路网基础强夯加固施工（工期约 2 个月）。

施工组织安排设计中还考虑了土石方平衡，设计利用线性规划模型对实际工程的土石方平衡问题进行分析研究，得出土石方平衡的最优方案：即经计算将人工岛陆域划分 12 个子区，按 5:7 比例，其中 5 个子区采取先期超载预压，超载填料厚度平均为 3.0m，经超载预压后，分别卸载至后续施工区，倒载总方量为 177.1 万 m<sup>3</sup>，理论上做到无卸载料运出人工岛。

### 14、人工岛建设对周边环境的影响分析

根据人工岛项目潮流泥沙数模、物理模型试验等研究成果，研究分析了人工岛建设对周边动力、泥沙回淤环境影响，主要评价结论如下：

（1）人工岛修建后使水动力向东侧集中，对东侧厦门进港航道、东南侧后石港区附近含沙量与泥沙年淤强变化影响均甚小。

（2）人工岛建成后西侧通道水流有所增强，但由于波浪动力减弱会造成一定的淤积，年回淤强度 5~10cm/a 左右；人工岛南侧和北侧由于水流动力减弱将会出现一定程度的淤积，对于人工岛防护是有利的；人工岛东侧流速增强且处

于迎浪侧将出现一定程度的冲刷，一般天气条件下回淤率为 10~23cm/a。

(3) 人工岛西侧波浪掩护条件较好，淤积量并不大，港池、航道水深可维护性较好。

(4) 人工岛的实施将占用一定面积的海域，与南部岸线仍有约 2.5km 的距离，不会明显影响岸区的正常泄洪。

## 15、小结

本工程作为国内第一例完全用于旅游、居住和生态开发建设的人工岛，设计的主要内容是填海工程，但又不同于一般的、简单的填海造陆，而是将护岸、陆域形成、软基处理、人工沙滩、游艇客运码头、内河道城市景观布局、水（船）闸等多项内容融合在一起的一项大规模、综合性建设工程。

本工程的主要建设特点和要求是近期的填海造陆需和后期人工岛规划开发有机的结合起来，这对人工岛主体结构方案，尤其涉及到建设标准、工程投资、安全可靠性以及功能需求等技术方案，必须进行多全面综合考虑；对关系到人工岛后期使用的一些关键技术参数（例如工程地质对使用的影响、波浪要素及越浪标准、高等级护岸结构的选型、人工岛回填料的选择及处理方式等）必须作充分的分析确定，同时进行相关的模型试验。

漳州双鱼岛填海工程延伸和拓宽了一般滩涂围垦工程和单一使用功能人工岛的建设内涵，融规划、设计、施工、景观、使用为一体，对我国将来大规模开发可居住人工岛提供了先例和范本，具有里程碑式的意义。

### 参考文献：

- 1、《地基处理手册》曾国熙等主编 中国建筑工业出版社 1998 年 8 月
- 2、《中国围海工程》陈吉余主编 中国水利水电出版社 2000 年 10 月
- 3、《软土地基处理》中崛和英(日本)主编 人民交通出版社 1982 年 3 月
- 4、《地基处理》叶书麟主编 中国建筑工业出版社 1988 年 8 月
- 5、金伟等. 爆破挤淤法处理深厚软基的典型试验研究 中国港湾建设 2012 年 10 月
- 6、席明军等. 外海人工岛工程施工技术 中国港湾建设 2009 年 8 月
- 7、刘挺 deng. 关于人工岛设计中的研究方法探讨 华中建筑 2010 年 6 期

# 深圳港蛇口太子灣郵輪碼頭改造工程研究

金暉

(中交第三航務工程勘察設計院有限公司，中國 上海 200032)

## 摘要

由於郵輪具有“高貴”的特點和品質，對提升城市對外形象的作用非常明顯，因此，郵輪港的規劃和建設備受其所在地政府的重視。郵輪港口作為承擔郵輪產業發展的基礎設施，除需滿足其自身的營運要求外，其整體規模及其規劃佈局對提升城市形象有著舉足輕重的作用。因此，在開工建設前對其建設規模、規劃方案、佈局形態等關鍵技術進行研究具有極其重要的意義。本文從國內外主要郵輪母港的現狀調研入手，就蛇口客運港區建設中郵輪母港規劃的建設規模等關鍵性技術問題進行相關研究，並對原規劃設計方案做了優化研究。

## 關鍵字

港口 郵輪碼頭 規劃設計 方案優化

## 一、概述

隨著中國經濟實力的迅速提升，上海、深圳、青島、廈門等沿海各主要港口城市均開始著手規劃、建設國際郵輪碼頭<sup>[1]</sup>。深圳蛇口客運港區具有發展成為國際郵輪母港的條件和優勢，故深圳市應把握機會，加速郵輪母港及其配套設施的規劃和建設，在未來郵輪經濟的發展中搶佔先機。深圳市發展郵輪母港的主要優勢分析如下：

- (1) 優越的地理位置和便利的集疏運條件。
- (2) 良好的經濟發展條件。
- (3) 優越的港口條件。
- (4) 較為便利的通關條件。

目  
錄

臺  
灣

中  
國

日  
本

澳  
門

香  
港

(5) 深圳市產業結構調整，為郵輪產業的興起帶來契機。

因此將蛇口客運港區建設為深圳乃至華南地區的國際郵輪母港具有優勢，具備條件。作為國際郵輪母港，其規劃建設必須具有高起點、前瞻性。為此，本文主要對蛇口客運港區郵輪母港規劃建設中的關鍵技術問題進行研究。

## 二、國內外郵輪港口的特點

根據調研，中國國內已建、在建、擬建的郵輪碼頭項目，起點均較高，規模大多以 1 個 8 萬至 14 萬噸級（GT）泊位為起步工程，並考慮最終規模為 2~3 個郵輪泊位。例如上海已基本建成了公平路郵輪碼頭，可同時靠泊 3 艘 8 萬噸級船舶，泊位岸線總長度達 880 米。根據規劃，上海市在吳淞口外建設了 2 個等級超過 8 萬噸級（GT）的大型郵輪泊位。海南三亞鳳凰島郵輪碼頭現已建成 1 個 10 萬噸級（GT）郵輪泊位，續建 5 萬和 22 萬噸級（GT）的郵輪泊位各 1 個。廈門港郵輪碼頭已建成 1 個 14 萬噸級（GT）郵輪泊位，岸線 463 米，並且還預留了未來進一步發展的空間。天津市也規劃在東疆保稅港建設國際郵輪碼頭，擬建 3 個泊位，岸線總長 800 米。

郵輪碼頭選址大多靠近城市中心，並且與周邊地區有良好的交通聯接。在郵輪碼頭位置的選擇方面，國內郵輪碼頭選址大多靠近城市中心，並且與周邊地區有良好的交通聯接。例如上海的郵輪碼頭選址於北外灘，屬於城市黃金地段，交通便利。廈門的郵輪碼頭亦建在城市中心，與湖濱北路商務中心區緊密相連，碼頭至廈門中山路、鷺江道等傳統中心區域也不過 5 分鐘車程。碼頭交通便利，建有一條專用通道與疏港路直接相連，車輛能直接開進碼頭聯檢大樓的二樓平臺，距廈門高崎國際機場不到 10 分鐘車程。三亞市的郵輪碼頭雖然建在填海造地形成的鳳凰島上，但是通過後方的三亞灣大橋與城市中心區域相連，距離三亞最著名的旅遊景點下龍灣車程在半小時之內。天津市郵輪碼頭雖然距離城市中心有一定的距離，但是根據天津市政規劃，規劃郵輪碼頭所處區域未來將建成天津市的濱海新城區。

國內郵輪碼頭周邊建有（或規劃有）完善的配套服務設施。在配套及輔助設施的規劃建設方面，三亞、廈門、上海、天津等除了利用碼頭周邊現有的休閒、娛樂設施外，陸域都建設或規劃了相關的客運、港口配送、商務辦公、酒店、免稅商店、餐飲娛樂等功能區以及供郵輪遊客親水休閒、觀光場所，其功能設計可滿足國內外郵輪到港所需的各種配套功能要求。

高起點的郵輪碼頭建設規模，先進的碼頭選址和配套及輔助設施規劃理念，彰顯了上海、三亞、廈門和天津等我國內地城市大力發展郵輪經濟的勃勃雄心。與國內的郵輪碼頭專案相比，國外郵輪港口發展歷史長，規劃建設的理念比較成熟，國外郵輪港的規劃具有以下的共同特點<sup>[2][3]</sup>，可作為深圳蛇口郵輪港建設之參照：

（1）國外先進郵輪碼頭的位置大多都毗鄰城市中心，與城市有著便捷的交通聯繫。

（2）國外先進郵輪碼頭所在港口，均為世界上重要的航運或旅遊樞紐城市，坐落於航運網的中心，其郵輪碼頭均擁有良好的岸線、水域、通暢的航道。例如紐約、邁阿密、巴賽隆納等郵輪港口所處的城市，均為世界上重要的航運或旅遊樞紐城市，坐落於航運網的中心，其郵輪碼頭均擁有良好的水域和通暢的航道。

（3）國外先進郵輪碼頭的泊位規模均較大，岸線均較長。歐、美先進郵輪母港的規模均較大，郵輪泊位數量至少在 3 個以上（有的還分成好幾個郵輪港區），泊位岸線總長均在 1400 米以上，甚至更長。亞洲地區的已建郵輪碼頭規模相對偏小，這主要是與郵輪碼頭所處國家或地區的經濟發展水準和郵輪航線服務範圍相適應。

（4）國外先進郵輪港口的地塊佈置形式，多以簡潔、實用為宗旨，以充分提高地塊利用率；郵輪泊位的佈置形式，多以順岸直線佈置為主，以充分提高泊位利用率。國外先進郵輪港口的地塊佈置，多為常見的突堤形或島形，地塊佈置形式以簡潔、實用為宗旨，主要目的是為了提高地塊的利用率，最大程度地發揮地塊的潛力。郵輪泊位的佈置形式，不論是突堤式碼頭還是順岸式碼頭，其泊位佈置基本上都盡可能地採用了直線佈置，以增加不同等級郵輪的靠泊

組合，提高泊位的適用性。

(5) 國外先進郵輪碼頭，均有便捷的交通轉運或換乘功能，完善的服務配套設施、高品質的公共空間，並有能吸應郵輪遊客的周邊特色旅遊景點。國外先進郵輪母港除了毗鄰機場、地鐵或火車站外，另外還需考慮提供另外一種重要的交通工具—汽車。包括旅行社或郵輪公司提供的大巴，計程車，以及私家車等，因此，郵輪港口都建有大型停車場。國外先進郵輪母港均配備了完善的客運、商貿、賓館、購物等功能區，例如巴賽隆納郵輪碼頭後方的大型購物街等。

(6) 國外先進郵輪碼頭大多都擁有高品質的公共空間和特色旅遊景點，例如邁阿密郵輪碼頭附近的陽光海灘和濱海棧橋，巴賽隆納郵輪碼頭後方的親水休閒設施和場所等。由於歐、美先進郵輪母港大多都選址城市中心區域，故與所在城市融為一體，便於滿足郵輪遊客的吃、住、行、遊、購、娛等方面的需求。

### 三、蛇口郵輪港建設規模及方案論證

郵輪母港的規模是由腹地範圍和經濟發展水準決定的。世界主要郵輪母港的建設規模和發展歷程可以為深圳蛇口客運港區郵輪碼頭的建設規模和等級的確定，提供有意的借鑒。

鑒於上述國內各郵輪碼頭的競爭態勢，結合深圳市發展郵輪經濟的優越條件，深圳市郵輪碼頭的建設應遵循高起點、前瞻性的原則，以建設國內一流郵輪母港為目標，其硬體設施的建設標準要高於三亞和廈門的郵輪碼頭，不低於上海郵輪碼頭；通關環境和軟體設施應以香港郵輪碼頭為標準，不低於香港郵輪碼頭。

基於上述分析，參照國外主要郵輪母港的發展規模和經驗，考慮到深圳郵輪業巨大的發展潛力和廣闊的發展前景，根據郵輪船型分析結論，並充分考慮蛇口客運港區建設郵輪母港的戰略目標，綜合考慮後，研究認為本工程郵輪母港的建設規模為：5 萬噸級（GT）郵輪泊位 1 個（碼頭結構可靠泊 8 萬噸級（GT）船舶）、10 萬噸級（GT）郵輪泊位 1 個（碼頭結構可靠

泊 12 萬噸級 (GT) 船舶), 16 萬噸級 (GT) 郵輪泊位 1 個 (碼頭結構可靠泊 22 萬噸級 (GT) 船舶)。

深圳蛇口客運港區客運中心為適應遠期客運業務的發展, 規劃方案中, 擬建設 10 個 800 噸級 (GT) 高速客船泊位 (其中國內線泊位 4 個, 港澳線泊位 6 個)。具體如下:

**表 1 原規劃各航線的高速客船泊位分配情況**

航線	國內線		港澳線			
	珠海線	海口線	香港線	迪士尼線	香港機場線	澳門線
需求泊位數	3 個	1 個	2 個	1 個	2 個	1 個

經過調研分析, 規劃的 10 個 800 噸級 (GT) 高速客船泊位從總量而言, 能夠滿足蛇口客運港區未來相當長時期的除郵輪外的水上客運發展需求, 但是在未來航線的結構和各航線泊位的具體安排上, 可以進一步深化。

根據對深圳蛇口客運港區郵輪泊位建設規模、等級的研究論證結果, 作為郵輪母港, 郵輪泊位數量宜調整為 3 座 (規劃方案安排 2 座), 相應地對港區的平面形態佈置做了適當調整, 基本形態仍同規劃方案, 其泊位數量、岸線的局部佈置形式、客運中心的位置亦相應作為適當調整。規劃方案與研究調整方案的比較, 詳見表 2。

**表 2 規劃方案與研究後方案比較一覽表**

項目	規劃方案	研究後方案
郵輪碼頭建設規模	(1) 泊位數共 2 個, 包括 1 個 5 萬噸級 (GT) 郵輪泊位, 1 個 15 萬噸級 (GT) 郵輪泊位 (2) 規劃地塊總面積 60.8 公頃	(1) 泊位數共 3 個, 包括 5 萬噸級 (GT) 泊位 1 個 (兼靠 8 萬噸級), 10 萬噸級 (GT) 泊位 1 個 (兼靠 12 萬噸級), 16 萬噸級 (GT) 泊位 1 個 (兼靠 22 萬噸級)。 (2) 地塊規劃總面積為 59.5 公頃
地塊及岸線形態佈置	地塊及岸線佈置形態曲折, 深水岸線及地塊開發利用率不高。	“大突堤”的形態, 使得岸線順直, 地塊規整, 符合“簡潔、實用”的宗旨, 充分提高地塊利用率。

<p>新客運碼頭選址</p>	<p>新客運碼頭佈置在大突堤的最南端，距離後方地鐵遠，交通不甚便利。</p>	<p>新客運中心佈局應靠近後方地鐵，主幹道，使客運中心擁有便捷的交通轉運、換乘功能毗鄰周邊的繁華商業中心，即有利於旅客的出行便利，也有利於提高該處地塊的價值。</p>
<p>濱水岸線及景觀效應</p>	<p>(1) 濱水岸線面南朝海，且形態曲折。 (2) 郵輪泊位面向二突堤生產泊位，景觀較差</p>	<p>按大、中、小設置了三條郵輪岸線，國內和港澳線也佈置在現客運中心處，將豪華郵輪、城市生活岸線、濱水步道、客運碼頭融為一體，主要面向東北側的深圳美景，景觀設置上取得了更好的效果。相應的，濱水岸線更有價值，地塊開發及升值潛力大。</p>
<p>對規劃的優化程度</p>	<p>研究後方案遵循規劃，僅是對規劃方案進行了適當調整。</p> <p>(1) 大突堤的南端駁岸前沿線位置，基本同規劃方案，並未將岸線外推。</p> <p>(2) 客運中心的泊位數量也同規劃報告中的規模（10 個），能滿足今後的客運發展所需；</p> <p>(3) 規劃總面積也為 59.5 公頃，不超越規劃方案中 60.8 公頃面積。</p>	

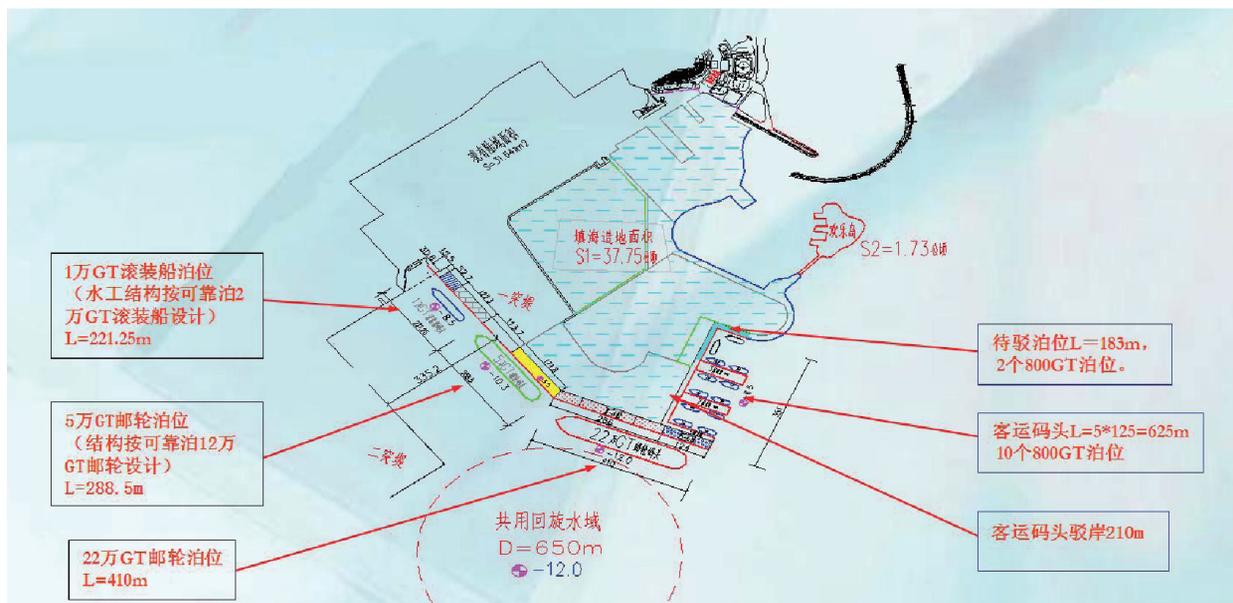


圖 1 蛇口郵輪港規劃研究後方案平面圖

#### 四、蛇口郵輪港建設方案論證

本工程位於深圳蛇口太子灣片區，東臨南海酒店及豪華遊艇基地，西臨二突堤碼頭，北

接南山區港灣大道，南望香港。工程範圍東起目前的客運碼頭港澳線，西至一突堤西側岸線，北至港灣大道，南側則根據陸域回填和碼頭建設的規模向外海側拓展。

本工程的地塊及岸線的開發應統籌考慮，體現工程實施的靈活性，滿足分期實施、滾動開發以及開發週期的要求，減小對於營運工程的影響。從平面形態看，為一個規則的大突堤形態，地塊及岸線的平面佈置“簡潔、實用”，陸域形成和碼頭施工可分期實施，且基本不影響客運碼頭及一突堤生產泊位的營運。實施計畫安排初步建議如下：

(1) 先施工新客運碼頭，利用原客運碼頭，通過引橋接長，端部建設圓形島，泊位呈放射狀佈置。由於此時，其它區域的施工還未開始，施工水域開闊，因此在新建客運碼頭的同時，原客運碼頭仍可利用周邊水域作為進出航道，保持運營。新建客運碼頭水工部分的施工工期約為半年，在此期間，原有的一突堤西側泊位仍可繼續生產，東側及南側泊位則有足夠的時間進行生產泊位的搬遷，以利下一步對一突堤向東南側拓展。

(2) 開工實施大突堤東側區域的陸域形成以及 10 萬噸級 (GT) 郵輪碼頭。水工結構施工工期約為一年，在碼頭施工期間，對已有一突堤碼頭西側泊位的運營無影響，對一突堤的南側泊位及水域有一定影響 (對東側泊位及水域影響較大)，屆時一突堤東側及南側的生產泊位應搬遷。

(3) 在東側的 10 萬噸級郵輪泊位建成後，按計劃開始建設一突堤南側 5 萬噸級 (GT) 郵輪泊位和西側 16 萬噸級 (GT) 郵輪泊位。並逐步完善後方陸域上的上蓋物業及各功能配套設施。

上述施工計畫安排有二根主線：大突堤的陸域回填和原一突堤岸線改造，改造工程受外界影響因素較多，因此大突堤的東區開發宜作為首期實施工程，東區彙聚了客運中心和 10 萬噸級郵輪岸線，已基本能適應蛇口郵輪母港的起步發展需求。而大突堤西南區的填海造陸與岸線拓展，與大突堤東區的回填完全獨立，可分期實施，互不影響。

回填造陸的施工設想為：大突堤東部區可考慮部分挖除或不挖除天然淤泥，利用港池疏浚土或開山土石料等吹(回)填造陸，並通過合適的地基加固手段，達到上部結構的使用要求；大突堤南部區面積較小，郵輪噸位較大，後方使用荷載要求高，可考慮清淤換填等工藝造陸，加

快成陸進度。

規劃方案的施工工期、施工平面組織和實施順序、各道工序和節點工期如下圖 2。總工期預計為 3.5~4 年左右。

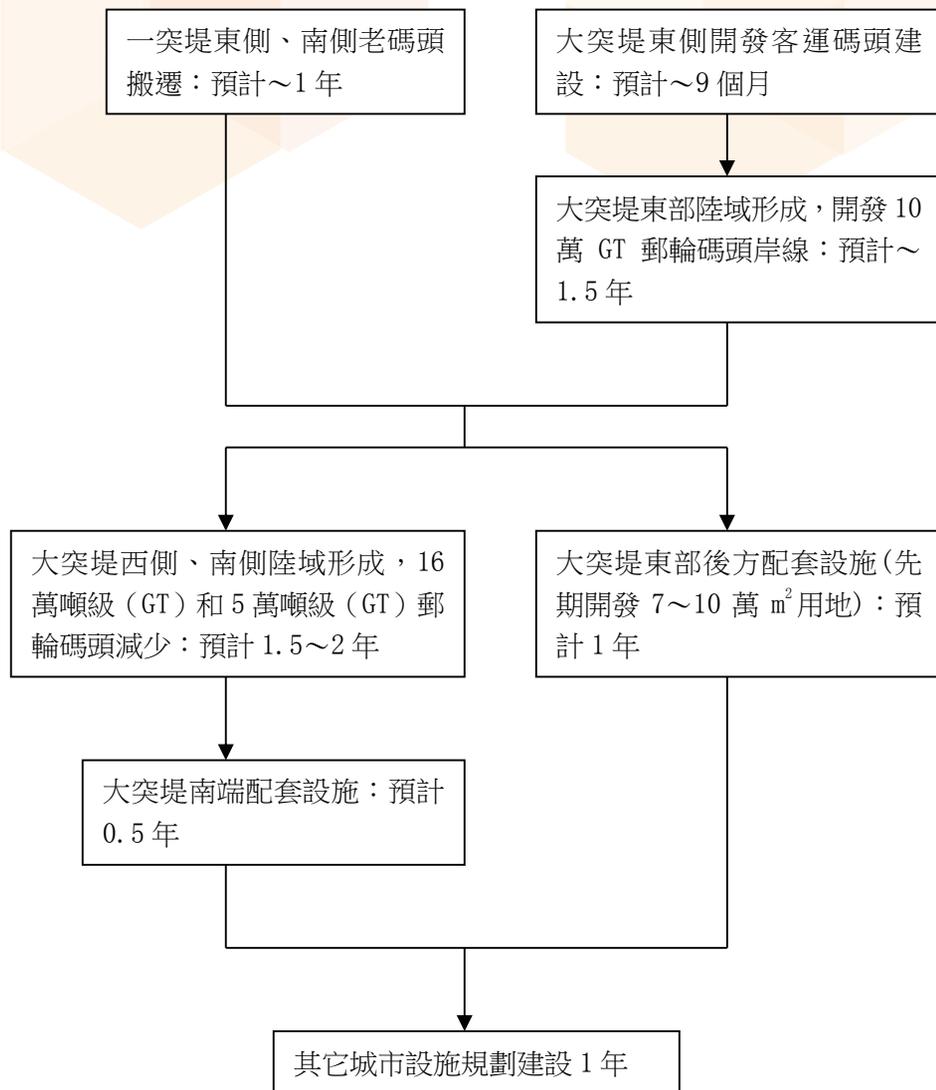


圖 2 施工組織安排

## 五、結論及建議

本文從國內外主要郵輪母港的現狀調研入手，就蛇口客運港區建設中郵輪母港規劃的建設規模等關鍵性技術問題進行相關研究。深圳蛇口客運港區郵輪碼頭的規劃應具有高起點、前瞻性，圍繞著建設國際郵輪母港的戰略發展目標，合理安排建設規模、建設方案和施工組織。

## 參考文獻

- [1] 謝凌峰, 趙彬彬, 陳有文· 廣東省郵輪碼頭佈局規劃[J]. 水運工程, 2012 5(5): 65-67.
- [2] 歐洲郵輪理事會. European Cruise Council 2011/2012 Report[R]. 歐洲郵輪理事會.2011.
- [3] 餘科輝, 劉志強. 世界郵輪旅遊目的地與郵輪母港研究[J]. 商業經濟, 2007 (7): 94-95.
- [4] 顧皓. 現代郵輪的發展與郵輪碼頭的經濟效益[J]. 中國港口, 2008 (11): 56-57.

目  
錄

臺  
灣

中  
國

日  
本

澳  
門

香  
港

# 高速公路滾石风险评估

李罡<sup>1</sup>, 周建昆<sup>2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海, 200092; 2. 中国铁道科学研究院, 北京, 100081.)

**摘要:** 公路滚石灾害是西部山区道路中经常发生的一种地质灾害。近年来随着我国西部经济的快速发展, 大量的山区高速公路工程也正在建成并投入运营。由于自然天气、人类活动及施工或运营管理的影响, 山区高速公路建设及运营中经常发生滚石灾害。本论文依托于云南省水麻高速公路工程, 通过工程现场实地考察, 分析了滚石的特征、原因及发生机理, 并统计了已经发生的滚石事故, 计算了该工程中滚石发生的概率, 探讨了滚石的运动规律, 针对工程中的滚石区段进行了风险评估研究, 得到了标段滚石区内的风险等级。论文的研究工作对公路沿线遭遇滚石的区段划分、风险分析等研究具有一定的参考价值。

**关键词:** 高速公路; 边坡; 滚石; 风险分析

**中图分类号:**

**文献标识码:**

## Risk analysis of rock fall on Freeway

LI Gang<sup>1</sup>, ZHOU Jiankun<sup>2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, shanghai 200092 P.R.China)

(2. China academy of railway science, Beijing 100081 P.R.China)

**Abstract:** In the western mountain area rock fall is a very common geological disaster. In recent years with rapid economic development in western area, a large number of mountain freeway projects has been completed and put into operation. Because of natural weather, human activity, construction or management of operation, there are a lot of rock fall disasters during the construction of mountain expressway. In the paper, basing on the project of Shui Ma expressway of Yunnan province, the accident statistics will be collected, and the rock fall probability will be got. Basing on the on-site inspection of Shui Ma project, the risk of potential rock fall will be analyzed. The research work of this paper has some reference value of measuring off the freeway project and the analysis of the risk.

**Keyword:** freeway; rock fall; risk assessment

## 1 引言

滚石问题是常见的边坡工程问题。但一直以来, 对于边坡问题的研究主要是以边坡整体的稳定问题为主, 例如崩塌、滑坡等, 滚石问题因其单次规模小, 发展相对缓慢而未得到应有的重视。因为在现象上滚石与边坡崩塌类似, 不少学者将滚石归为小型崩塌, 但从形成条件以及产生的危害上, 滚石与崩塌有很大差别, 应当单独归为一类边坡问题。

滚石形成后, 在边坡上滚下, 轻则损毁路面重则造成车毁人亡, 若是知名的公路还将产生隐形的社会影响。具体来讲公路滚石灾害的表现形式主要为: (1)下落的滚石冲击停靠在路边的车辆; (2)下落的滚石冲击行驶的车辆; (3)下落的滚石冲击过路人(包括行人, 骑自行车者、施工人员、公路维护人员等)的危害; (4)滚石的冲击引起路面及设施的损坏; (5)行驶中的车辆撞到路面上停留的滚石; (6)当路面上的滚石数量较多或体积较大时还可因堵路而引起交通中断; (7)产生不良的社会影响, 如在司机的概念中形成死亡公

路等黑色印象；(8)滚石对公路沿线的环境产生负面影响。

滚石灾害的主要成因是岩层受到扰动和降水的影响。此外不同路段，不同的岩块大小，滚石发生的概率以及造成的损失也是千差万别的，因此对滚石灾害的风险分析主要集中在以下两个方面，一是滚石发生的概率，二是滚石可能造成的潜在危害<sup>[1][2]</sup>。

由于山区高速公路一般都较长，且公路沿线边坡状况复杂，对滚石进行单独的分析，一方面由于具有潜在危险的石块可能达到成千上万，而使得工作量非常大。另一方面，对公路沿线的滚石进行一一处理，设计和施工也都将非常困难。本文以工程应用为目的，以滚石区为研究对象，从概率与损失的相关因素着手，提出一套滚石灾害风险评估体系。其基本流程如下。

- 1) 通过信息量统计原理预测滚石区。
- 2) 按滚石成因相关因素量化分级得到滚石概率等级。
- 3) 按滚石灾害损失相关因素量化分级得到潜在损失等级。
- 4) 通过滚石风险评估矩阵得到滚石区风险等级。

## 2 滚石风险评估体系

### 2.1 滚石区的划分

滚石区的划分可以按照信息量统计原理进行确定。信息量统计预测原理是基于统计数据的基础上，对新建模型对象进行评估预测，其核心是数据库的制作。即通过已有的滚石数据(主要包括岩组，坡角，坡高，岩体结构)计算出与滚石区相关因素的信息量，如公式(1)所示。在此基础上，实地调研所要评估道路的边坡性状(岩组，坡角，坡高，岩体结构)，对应已得到的各因素信息量，进行求和计算，便得到边坡的信息总量。按信息总量的大小可以推测滚石区的位置。如本文采用的数据库中滚石的记录共有98662m<sup>3</sup>，滚石区的沿线长度为131000m，其中岩组一项中滚石是灰岩组的有54087m<sup>3</sup>。滚石是灰岩组边坡长度为4672m。按照信息量计算公式(1)可以得到灰岩组的信息量为1.18671。

$$I(x_i, B) = \lg \frac{V_i/V}{L_i/L} \quad (1)$$

式中： $I(x_i, B)$ —— $x$ 因素 $i$ 状态下提供事件

$B$  (滚石) 发生的信息量；

$L_i$ ——有因素 $x_i$ 的线路长度；

$L$ ——研究线路总长度。

其它因素信息量的计算方法类似。信息量计算工作完成后，调研需评估的工程边坡性状得到信息总量，进而预测滚石区。限于篇幅本文仅列出水麻高速公路9~14标滚石区预测成果，详见表1。

表1 滚石区预测

Table.1 The prediction of rockfall area

	K51+	K55+	K58+	K59+	K62+
桩号	940~	600~	520~	060~	396~
	K52+	K56+	K58+	K59+	K62+
	200	200	670	690	590
信息量分区	较不稳定	不稳定	不稳定	不稳定	不稳定
桩号	K70+	K77+	K82+	K84+	K85+
	246~	200~	100~	000~	130~
	K70+	K77+	K82+	K84+	K85+
	370	300	500	200	820
信息量分区	不稳定	不稳定	不稳定	较不稳定	不稳定

### 2.2 滚石概率等级的划分

国内外对滚石的发生概率分级各有不同，但滚石发生的概率与滚石的成因密切相关，基于统计学基本原理，同时考虑到现行的评价分级方法，本文将滚石发生的概率分为五个等级，并针对滚石问题的特点将区间概率转换成一年内滚石发生的次数，如表2所示。

表2 风险发生概率等级标准

Table.2 Rank criterion of risk probability

等级	语言描述	区间概率	滚石次数 (次/年)
1级	不可能	$P < 0.01\%$	$N=0$
2级	很少发生	$0.01\% \leq P < 0.1\%$	$N=1$
3级	偶尔发生	$0.1\% \leq P < 1\%$	$1 < n \leq 4$
4级	可能发生	$1\% \leq P < 10\%$	$4 < n \leq 36$
5级	频繁	$P \geq 10\%$	$n > 36$

影响滚石成因的因素主要是以下六个方面降雨、坡角、岩性、岩块嵌程度、块体形状、岩块尺寸，本文统计了水麻高速公路的滚石滚石数

据同时参考了其他学者的相关文献<sup>[3]~[11]</sup>，综合表 3 所示。整理后按与滚石频率相关的各因素，量化分级如

表3 滚石概率评价因子及概率标准  
Table.3 Factors and criterion of rockfall probability

评价因子	级别				
	1 级(0,1]	2 级(1,2]	3 级(2,3]	4 级(3,4]	5 级(4,5]
	赋值 1	赋值 2	赋值 3	赋值 4	赋值 5
A1:雨季月降雨量/mm	(0,500]	(500,1000]	(1000,2000]	(2000,4000]	4000 以上
A2:边坡角度 <sup>0</sup>	(0,28]	(28,45]	(46,60]	(61,70]	70 以上
A3:岩性	页岩	千枚岩	厚板岩	辉长~辉绿岩	灰岩、砂岩
A4:岩块嵌入程度	石块被泥土覆盖	少半暴露裂隙间胶结泥土	大半附着岩层较碎裂	岩层较破碎岩块相互附接	岩层破碎岩块暴露在外
A5:块体形状	片状	层状	条状	块状	球状
A6:岩块尺寸/m <sup>3</sup>	(0,0.001]	(0.001,0.5]	(0.5,1]	(1,2]	2 以上

按两两比较法得到以上六个因素的比较矩阵，通过计算矩阵的特征向量并进行一致性检验可确定六个因素的权重，其结果为 WA=(0.29825,0.20966,0.17774,0.17774,0.093,0.04359)

以上分级方法虽然是基于相关专家学者描述性语言得出的，但仍具有相当大的主观性，因此需要修正。对于运营期的高速公路我们认为每一段道路工程的滚石发生概率等级由两部分相乘而得，一部分是由以上分级方法得到的计算等级，另一部分是“补增系数”，主要是运用反演法，通过运营期实地调查对道路沿线滚石活动的痕迹对滚石发生频率做出相应的估算，再折算成系数。路段滚石风险事故的概率为两者之积。反演法得出的相关系数见表 4。

表4 反演法系数

Table.4 Coefficient of the inversion method

现象	描述	滚石区频率估计	相应系数 $\gamma_1$
非雨季路面上有明显砸痕	>1 处	1 次/2 月	1.16
路面及公路两侧设施上有明显的砸痕	1 个滚石	1 次/3 月	1.11
边坡上有岩体破坏的痕迹	较多新砸痕	1 次/6 月	1.05
植被上有滚石冲击痕迹	较少新砸痕	1 次/2 月	1.16
	较多旧砸痕	1 次/3 月	1.11
	较少旧砸痕	1 次/10 月	1.02
	痕迹较新	1 次/2 月	1.16
	痕迹较旧	1 次/3 月	1.11
	痕迹较新	1 次/3 月	1.11
	痕迹较旧	1 次/5 月	1.06

这样滚石发生的概率等级可表示为：

$$D_1 = \left( \sum_{i=1}^n D_{Ai} \times W_{Ai} \right) \times \gamma_1$$

其中： $D_{Ai}$  取值范围为 0 到 5，表示指标  $i$  的级别；

$W_{Ai}$  为各项指标的权重；

$\gamma_1$  为运营期的反演系数，在未通车时期取值 1。

### 2.3 滚石灾害潜在损失

与滚石概率等级的划分类似，我们首先进行滚石灾害风险辨识，找出与滚石灾害相关的因素，然后对各因素量化分级，最后定出各因素的相对权重，进而得到滚石的潜在损失等级。

#### 2.3.1 滚石灾害及相关因素

评估滚石区的风险等级除了要考虑滚石发生的概率等级外，还需要知道滚石发生后可能造成的潜在危害。滚石的大小、运动路径及滚石区下方道路环境不同，滚石造成的损失也是不同的。例如滚石直接掉入路线外围将不会阻碍交通也不会对路基产生灾害，但如果滚石砸到运行的公路上轻则损毁路面重则造成车毁人亡，若是知名的公路还将产生隐形的社会影响。与这些灾害密切相关的主要是六个因素，既滚石源高度、滚石区长度、公路车道，车流量、滚石路段环境、滚石区公路的知名度。

#### 2.3.2 滚石灾害潜在损失等级的划分

由于滚石影响因素众多，且相互交杂，此项工作也具有相当大的不确定性。这里对于每一指标，我们假定各影响因素之间互不干涉，在划分等级时笔者参考了相关学者的相关成果<sup>[5]~[11]</sup>，并进行统计整理，按其特性量化分了五个级别。为增强准确度，本文与云南省实际的工程结合，针对水麻高速公路，按相关学者提供的方法进行了一定的数学拟核，综合各方面的信息笔者于表 5 列出了相关因素量化分级的指标。

对于滚石源的高度而言，不同高度具有的破坏能力是不同的，一般来讲滚石源越高，滚石具有的势能越大，滚石落下后具有的冲击能也就越大，其潜在的损毁能力也就越大。根据笔者 5 月份在云南水麻高速公路沿线做的滚石灾害调查统计表明，造成巨大损失的（如砸坏桥墩，破坏 T 型梁）基本上都位于 80 米以上。但通过滚石运动学分析，我们可以得知超过 80 米高的石块坠落，足以砸穿桥梁板，因此对于 80 米以上的滚石其坠落后可能造成的损失已和 80 米无太多差别，我们不再予以量化分级。

对于运营期的高速公路，车道及车流量的不同，滚石形成灾害后造成的损失将是不同的，这里主要考虑了滚石砸到路面后阻碍交通的时间。根据笔者统计的国内外砸到路面上的滚石大小，最大的约 9 立方米，我们考虑最不利的

情况，即 9 立方米的石块完全坠落在公路上，就国内的设计规范来讲最多将阻碍两个车道，这样对于双向单车道的情况将是致命的，而对于双向四车道的情况则相对较好。同样对车流量小的公路滚石阻碍路面的损失要比交通量大的损失好的多，车流量及车道量化分级指标见表 5。

在云南水麻高速公路的调研中，有四个标段（8 标，17 标，18 标，23 标）的总工表示有超过一公里以上的滚石路段，那么心里的感受是“非常恐惧”，而 100 米左右长度的滚石区在水麻线路上“太平常了，心里没有什么感觉”。水麻沿线自古以来就是滚石问题的多发地，因此过往的百姓与车辆多有防范意识，通过对附近村落的百姓调查，100 米左右长度的滚石区已经是司空见惯。

根据对水麻高速公路附近施工人员的调研统计，我们将超过一公里以上的滚石区长度定为五级，将 100 米以下的滚石区长度定为二级。其它的一些指标定义方法类似，产生的主观上的偏差将根据后期反馈数据予以修正。

表5 潜在危害评价因子及分级标准

Table5 Classification criterion of potential factors

评价因子	等级				
	一级(0,1]	二级(1,2]	三级(2,3]	四级(3,4]	五级(4,5]
	赋值 1	赋值 2	赋值 3	赋值 4	赋值 5
E1:滚石源高度/m	(0,10]	(10,40]	(40,80]	(80,100]	100 以上
E2:滚石区长度/m	0	(0,100]	(100,500]	(500,1000]	1000
E3:公路车道	双向三车道以上	双向三车道	双向双车道	双向单车道	单向单车道
E4:车流量辆/D <sup>-1</sup>	(0,1000]	(1000,5000]	(5000,10000]	(10000,15000]	15000 以上
E5:公路重要等级	一般公路	国道	省内主干道	国内知名公路	国际知名公路
E6:滚石路段环境重要等级	一般绿化,沿线无文化遗迹	地市级旅游景点	省级旅游资源	具有国家重点保护遗迹	具有世界文化遗产

按照两两比较法可以得到以上六个损失因素的相对权重向量：

$$W_E = (0.29825, 0.20966, 0.17774, 0.17774, 0.09$$

3, 0.04359)。

### 2.3.3 其潜在损失因素及影响系数

其它的一些相关因素由于不易量化分级，这里按照其相对重要程度的不同，折算成不同的增补系数。

如桥梁因素，滚石砸毁桥梁与滚石砸毁普通路基造成的损失明显是不同的，仅就修复时间而言，修复受损的桥梁就要比修复受损的路基用的时间要多。因此滚石区下方有桥同滚石区下方是普通路基相比，风险是不同的。但将桥梁因素量化为五级又有较大困难，因此我们初步将桥梁的影响因素做一系数。隧道同样按此方法考虑，但与桥梁不同由于隧道出入口处滚石源不易被司机发觉，因此隧道影响系数要相应的大一些。

通过对水麻高速公路几个标段的技术顾问咨询，专家一致认为如发生滚石灾害以上各因素中，桥隧的权重将是最大的，如若按上述方法划分五级，桥隧的存在至少可使滚石区的危害等级上升一级，在此我们通过对专家建议的系数进行整理统计，取隧道口上方滚石区增强系数为 1.3,桥梁上方滚石区增强系数为 1.2。

这样灾害的潜在等级  $D_2$  可以采用如下表式表示

$$D_2 = (\sum_{i=1}^b D_{Ei} \times W_{Ei}) \times \gamma_2$$

其中： $D_{Ei}$  取值范围 1-5，表示指标  $i$  的级别；

$W_{Ei}$  为各项指标的权重；

$\gamma_2$  为隧桥的影响系数，普通公路取值 1。

### 3 滚石灾害风险评估

至于何种条件下的风险是可以接受的，何种条件下的风险是不可接受的，这是国内外近年来一个令人关注的学术问题。笔者认为，可接受风险水平的标准是因时、因地而异的，并且也与一个国家的国情是密切相关的。本文采用目前普遍使用的风险评估矩阵的方法<sup>[12]</sup>。

表6 风险评估矩阵

Table.6 Matrix of risk assesment

风险		潜在损失等级 $D_2$				
		1.可忽略	2.需考虑	3.严重	4.非常严重	5.灾难性
发生概率等级 $D_1$	1: $P < 0.01\%$	1A	2A	3A	4A	5A
	2: $0.01\% \leq P < 0.1\%$	1B	2B	3B	4B	5B
	3: $0.1\% \leq P < 1\%$	1C	2C	3C	4C	5C
	4: $1\% \leq P < 10\%$	1D	2D	3D	4D	5D
	5: $P \geq 10\%$	1E	2E	3E	4E	5E

表7 风险分级评价标准

Table.7 Evaluation criterion of risk classification

滚石区风险等级	控制对策
一级	滚石风险可忽略
二级	滚石风险可容许，需引起注意，进行常规管理
三级	滚石风险可接受，需引起重视，采取措施进行监控
四级	滚石风险部分可接受，需要采取一定的控制措施方可接受
五级	滚石风险不可接受，需高层进行管理和决策，采取措施进行规避或转移

### 4 滚石风险等级

第二指挥部其它滚石风险的等级如图 1 所示。

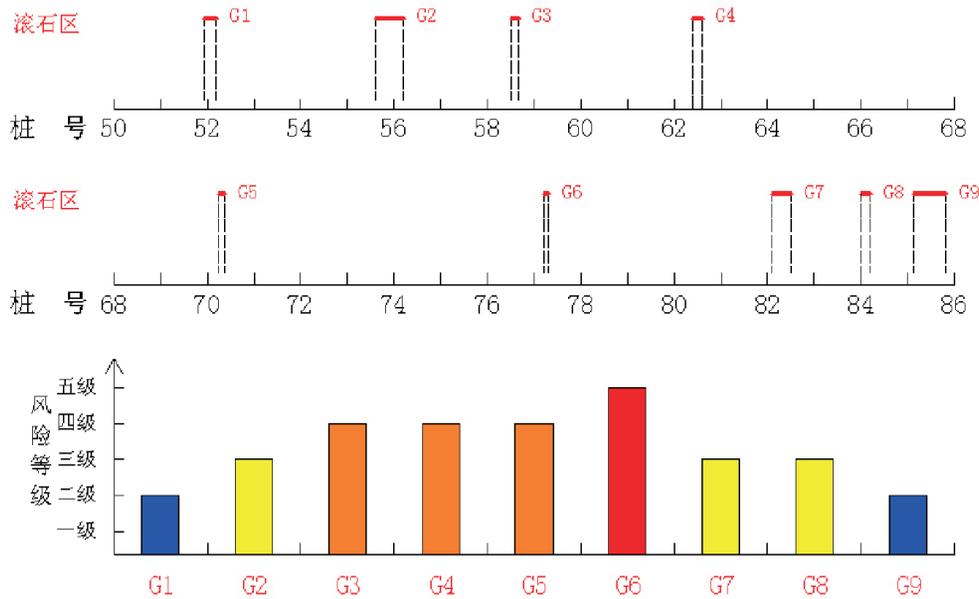


图1 第二分指 9~18 标滚石区段风险等级  
Fig.1 Risk rank of rockfall near bid 2

## 5 结论

本文以滚石问题为研究对象,通过收集、统计及分析相关资料,提出了山区高速公路滚石灾害风险评估体系,根据信息量预测原理,得出水麻高速公路 9~18 标段内的滚石区风险等级。通过与实际滚石灾害的对比,证明该体系较为科学规范,具有一定的工程实用价值。

### 参考文献

- [1] 陈洪凯,欧阳仲春.三峡库区危岩综合治理技术及应用[J].地下空间,2002,2(22):97-107.(Chen Hong Kai,Aoyang Zhongchun.Complex control of dangerous rock and collapse in three gorges reservoir areas[J].Chinese Journal of Underground Space, 2002,2(22):97-107.(in Chinese))
- [2] 黄宏伟.隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J].地下空间与工程学报,2006,1(2):13-20.(Huang Hongwei.Advance in risk management study of tunnel and underground projects[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2006,1(2):13-20.(in Chinese))
- [3] 胡厚田.崩塌与落石[M].北京:中国铁道出版社,1989,1-174.(HU Houtian.Landslide and rockfall[M]. Beijing:China Railway Publishing Company, 1989,1-174.(in Chinese))
- [4] 张路清,杨志法,许兵.滚石与滚石灾害.工程地质学报[J],2004,12(3):225-231.(ZHANG Luqing,YANG Zhifa,XU Bing.Rock falls and rock fall hazards[J]. Journal of Engineering Geology,2004,12(3):225-231.(in Chinese))
- [5] 张路青.滚石机理及滚石灾害评价研究[D].北京:中国科学院地质与地球物理研究所.2003.(ZHANG Luqing.The mechanism of rockfall and the research of rockfall hazard[D].Beijing:Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences(in Chinese))
- [6] 吕庆,孙红月,翟三扣等.边坡滚石运动的计算模型[J].自然灾害学报,2003,12(2):79-84.(LU Qing,SUN Hong-yue,ZHAI San-kou etc.Evaluation models of rockfall trajectory[J].Journal of Natural Disasters, 2003,12(2):79-84.(in Chinese))
- [7] 吕庆.边坡工程灾害防治技术研究[D].杭州:浙江大学.2006.(LU Qing. Study on Prevention and Treatment Technology of Slope Engineering Disasters [D]. Hangzhou:Zhejiang University 2006.)
- [8] 张路青,许兵,尚彦军等.川藏公路南线八宿-林芝段滚石灾害的工程地质调查与评价[J].岩石力学与工程学报,2004,23(9):1551-1557.(ZHANG Luqing,XU Bing,Sang Yan-Jun etc.Engineering geological investigation and assessment on rockfall hazard along Basu-Linzhi section of south line of Sichuan-Tibet

- highway[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(9):1551-1557.(in Chinese)
- [9] 张路清,杨志法.公路沿线遭遇滚石的风险分析—案例研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21):3700-3708.(ZHANG Luqing, YANG Zhifa,Risk analysis of encountering rockfalls on a highway-a case study[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(21):3700-3708.(in Chinese))
- [10] 赵旭,刘汉东.水电站高边坡滚石防护计算研究[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3742-3748.(ZHAO Xu,LIU Han-dong.Research on protective structures for high slopes rockfall around a hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3742-3748.(in Chinese))
- [11] 张路清,杨志法.公路沿线遭遇滚石的风险分析—方法研究[J].岩石力学与工程学,2005, 24(增):5543-5548.(ZHANG Luqing, YANG Zhifa,Risk analysis of encountering rockfalls on a highway and method study[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005, 24(supplement):5543-5548.(in Chinese))
- [12] 地铁及地下工程建设风险管理指南[R].北京:中国建筑工业出版社,2007.(Guideline of Risk Management for Construction of Subway and Underground Works[R].Beijing:China Architecture Publishing Company(in Chinese))

# 超大直径盾构 水中进洞风险分析

李罡<sup>1</sup>, 黄宏伟<sup>1</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海, 200092)

**摘要:** 盾构进洞是盾构施工的一道关键收尾工作, 也是极易出现风险问题的阶段。上海长江隧道采用水中进洞方案, 技术新颖风险性大, 依照上海长江隧道提供的进洞施工方案, 本文采用模糊层次分析法及专家信心指数法, 对其进行风险分析, 确定了进洞施工过程中的风险点及其权重, 并基于风险分析的结果提出了相应的风险规避措施。

**关键词:** 长江隧道; 进洞; 模糊层次分析; 风险分析

**中图分类号:**

**文献标识码:**

## Risk analysis on arriving shaft of super large diameter shield machine under water

LI Gang<sup>1</sup>, HUANG Hong-wei<sup>1</sup>

(Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092 P.R.China)

**Abstract:** Shield tunnel is developing towards large diameter which brings more risks during reception of shield. The reception of shield is very important in tunneling. Based on the engineering project of Yangtze River Tunnel, the author analyses all kinds of risks we may meet during the construction and provides corresponding strategies by studying the critical construction steps of the reception of shield.

**key words:** Yangtze river tunnel; break through; FAHP; risk assessment

### 1 引言

盾构进洞是极易出现风险问题的阶段, 在进洞施工过程中, 应确保盾构按照设计线路贯通, 防止盾构在隧道贯通过程中出现坍塌, 保持周围土体稳定, 同时保证进洞段管片衬砌不渗水。盾构进洞施工环节多, 工作量集中, 各工种交叉施工频繁, 设备、人员众多, 工作凌乱, 就以往工程案例来看盾构在进洞过程中多多少少都存在着许多问题<sup>[1]-[5]</sup>。

上海长江隧道从浦东五号沟到长兴岛采用超大型  $\Phi 15.43\text{ m}$  泥水平衡式盾构一次性掘进完成, 盾构接收井位于长兴岛, 接收井平面尺寸为  $49.0\text{ m} \times 24\text{ m}$ , 设计洞门直径为  $16\text{ m}$ , 洞门中心标高为  $-11.125\text{ m}$ , 盾构进洞处最小顶覆土厚度仅为  $0.5$

倍直径, 接收井临近长江入海口, 地下水极丰富, 采用常规进洞方法易造成接收井坍塌, 经多次专家会议讨论上海长江隧道指挥部决定采用水中进洞方案, 主要步骤如图 1 所示。鉴于水中进洞的方法国内外使用较少, 风险性大, 因此对上海长江隧道水中进洞方案进行风险分析具有重大的工程意义。

### 2 上海长江隧道进洞方案

上海长江隧道盾构进洞按井内灌水, 盾构机直接切削地下连续墙的方案实施, 在切削洞门阶段由隧道内部向外注浆, 封堵洞门与盾构间间隙, 按原施工组织设计二次封盾尾方式进行盾尾封堵。流程大致可归纳为如下七个步骤, 工序如图 1 所示。

(1) 调整盾构推进轴线。隧道纵向坡度由  $2.9\%$

收稿日期:

作者简介: 李罡 (1984.9-), 男, 同济大学在读硕士研究生, 主要从事公路隧道风险、施工建设风险管理以及相关领域的科研工作。E-mail: gangzi840912@hotmail.com

调整为 2.85%。水平沿设计轴线 14m 割线进洞，盾构机在进入加固区前右偏轴线 40mm，之后最大偏移量逐渐减小。

(2) 盾构进入加固区。千斤顶行程 1821mm 时盾构机下不受限开始接触到搅拌桩加固体。

(3) 盾尾同步注浆的调整。盾尾距离加固区约 3m，从 3729 环开始同步注浆改用早强同步浆液。

(4) 切削地下连续墙。盾构机在 3731 环时刀盘下部开始切削接收井的地下连续墙。

(5) 预应力管片张接。盾构进入工作井后，正前方水土压力消失，无法提供挤压管片间的防水层。所以在施工中采用预应力特殊管片通过拉杆张拉紧密，从而提供充分的挤压力来形成防水。

(6) 泥水压力调整。盾构推进至 3722 环开始，正面泥水压力由 2.5bar 降至 2.2bar，以后逐步降低。

(7) 注浆设备配置。在隧道内和长兴岛接收井内各配备一套双液注浆泵和聚氨酯注浆泵并准备好相应施工材料。

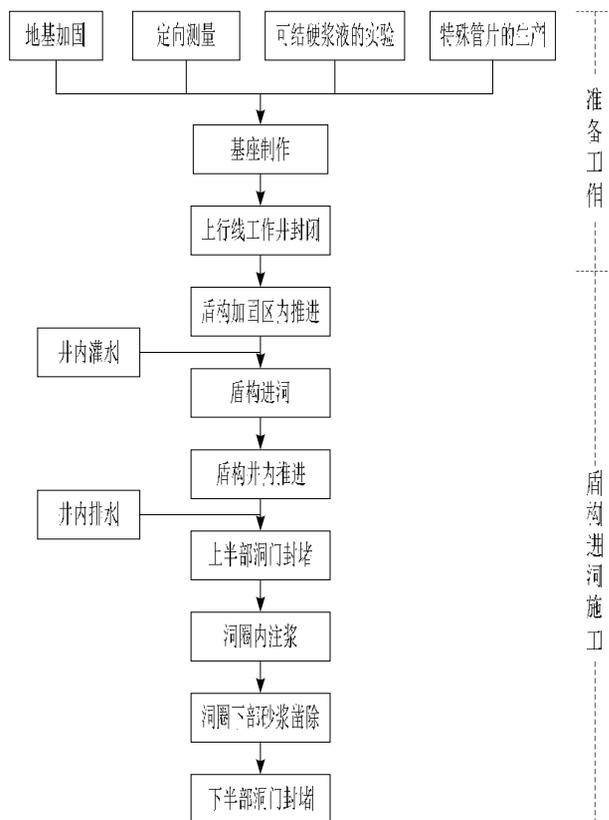


图 1 进洞施工工序

Fig. 1 The arriving shaft scheme

### 3 模糊层次分析评估简介

FAHP 主要算法主要包括三个部分如下：

首先建造风险递阶层次结构模型计算各层因子权重。本文结构模型图如图 2 所示，任取一个递阶层次结构模型的风险节点，例如  $B_1$ ，这里有  $F=3$  个下层节点与  $B_1$  相关。两两比较这些下层节点的相对重要性，求得风险节点  $B_1$  的综合判断矩阵  $J_N$ ， $J_N=(j_{m,n})_{F \times F}$ ；其中  $j_{m,n}$  表示  $J_m$  比  $J_n$  的相对重要程度，判断矩阵  $J_N$  采用 T.L.Saaty 提出的 1-9 数字标度予以构建。通过计算矩阵  $J_N$  的特征向量得到  $B_1$  权重并依据最大特征值  $\lambda_{max}$  进而可以进行一致性检验，同理可以计算出递阶层次结构模型中其他风险节点的单层权重向量。若需知道某一风险因子在一层中所占的权重，仅需从上往下依次相乘就可以得到<sup>[6]-[9]</sup>。

其次计算各层因子的隶属度，计算隶属度时按照从下到上的次序，对于离散的因子通过专家评估法，连续型因子通过隶属函数法从下向上逐层计算各节点的评语隶属向量  $S$ 。例如本文分了 A、B、C、U 四层，首先计算 U 层各节点的评语隶属向量；然后依次计算 C、B、A 层各风险节点的评语隶属向量<sup>[8]-[9]</sup>。

最后从下到上依次计算风险隶属度向量  $R=WS$ ，并按照隶属度取大原则确定风险等级。

### 4 施工方案模糊层次分析

基于进洞施工方案，并根据前人的研究成果<sup>[1]-[4]</sup>，通过大量的调查研究，构建长江隧道盾构进洞施工风险递阶层次图如图 2 所示，底层风险因子如表 1 所示，通过层次计算分析。

$$W_A = (0.0533, 0.7944, 0.1522);$$

$$W_{B1} = (0.6250, 0.1365, 0.2385);$$

$$W_{B2} = (0.4, 0.4, 0.4, 0.2, 0.2, 0.4);$$

$$W_{B3} = (0.5000, 0.2500, 0.2500);$$

式中： $W_A$  表示系统风险层因子权重；

$W_{B1}$  表示施工质量问题因素权重；

$W_{B2}$  表示施工技术问题因素权重；

$W_{B3}$  表示施工管理问题因素权重。

风险因子的权重经过从上向下逐层相乘计算列于表 1。

风险因子隶属度的计算，主要是依据近几个月长江隧道的监理数据统计分析得到，对离散型因素，针对长江隧道工程特点以及已有的施工技术水平，邀请甲方，施工方专家对各风险因素按照信心指数法进行评估<sup>[10]</sup>，并计算各风险因素的评语隶属向量；对于其他连续型因子主要依据隶属函数计算其隶属度，其中评语集与长江隧道动态风险分析中采用的评语一致，为五级见表 1。

表 1 风险事故损失等级

Tab.1 Risk factors and the weight

等级	描述	控制对策
1	可忽略	需进行管理审视
2	需考虑	注意，进行常规管理
3	较严重	重视，采取措施进行监控
4	严重	需采取控制措施风险方可接受
5	灾难性	风险不可接受，规避与转移

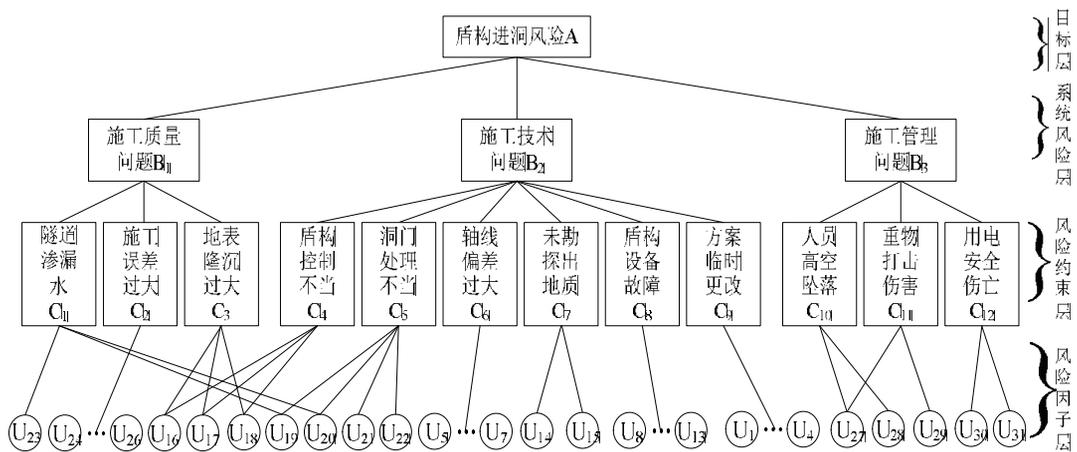


图 2 盾构进洞风险递阶层次图  
Fig.1 Hierarchy model of receive's risk

表 2 风险因子 Ui 及其权重

Tab.2 Risk factors and the weight

编号	风险因素 Ui 的定义	权重	编号	风险因素 Ui 的定义	权重
1	洞门设计方案不当	0.0324	17	泥水压力过大	0.0808
2	地基加固方案不当	0.0220	18	注浆压力过大	0.0826
3	井内灌水方案不当	0.0212	19	洞门凿除损害	0.0313
4	井内排水方案不当	0.0211	20	洞圈密封失效	0.1159
5	轴线测量误差过大	0.0102	21	施工降水不到位	0.0117
6	盾构工作室控制不当	0.0251	22	洞门混凝土强度偏高	0.0536
7	盾构机机头沉陷	0.0519	23	密封条未充分挤压	0.0630
8	泥水供水系统故障	0.0110	24	隧道整圆度不够	0.0046
9	管片拼装机械故障	0.0110	25	轴线偏差过大	0.0018
10	注浆及盾尾密封故障	0.0110	26	管片不平整	0.0008
11	动力及推进系统故障	0.0110	27	违章作业	0.0870
12	刀头过度磨损	0.0318	28	高空路湿滑发生意外	0.0140
13	其它设备故障	0.0020	29	机械故障失控	0.0127
14	流沙或管涌	0.0818	30	触电身亡	0.0204
15	暗浜地层空洞	0.0184	31	电焊烧伤	0.0127
16	盾构纠偏扰动	0.0452			

表3 风险因子隶属向量

Tab.3 Membership degree vector of risk factor

编号	风险因子隶属向量
1	(0.00,0.39,0.36,0.17,0.08)
2	(0.00,0.24,0.40,0.19,0.11)
3	(0.00,0.29,0.21,0.43,0.07)
4	(0.00,0.21,0.46,0.27,0.06)
5	(0.09,0.27,0.14,0.33,0.17)
6	(0.33,0.29,0.17,0.21,0.00)
7	(0.14,0.37,0.32,0.17,0.00)
8	(0.08,0.31,0.36,0.17,0.08)
9	(0.15,0.16,0.39,0.19,0.11)
10	(0.16,0.17,0.37,0.18,0.12)
11	(0.17,0.17,0.36,0.17,0.13)
12	(0.00,0.18,0.19,0.63,0.00)
13	(0.15,0.15,0.40,0.30,0.00)
14	(0.13,0.14,0.21,0.52,0.00)
15	(0.07,0.09,0.33,0.38,0.13)
16	(0.10,0.11,0.32,0.34,0.13)
17	(0.14,0.37,0.32,0.17,0.00)
18	(0.14,0.37,0.23,0.17,0.09)
19	(0.08,0.09,0.15,0.62,0.06)
20	(0.07,0.09,0.33,0.38,0.13)
21	(0.16,0.17,0.37,0.18,0.12)
22	(0.14,0.37,0.23,0.17,0.09)
23	(0.16,0.17,0.37,0.18,0.12)
24	(0.14,0.37,0.23,0.17,0.09)
25	(0.07,0.12,0.33,0.48,0.00)
26	(0.00,0.33,0.37,0.30,0.00)
27	(0.07,0.19,0.36,0.38,0.00)
28	(0.14,0.37,0.23,0.17,0.09)
29	(0.08,0.31,0.36,0.25,0.00)
30	(0.07,0.09,0.33,0.51,0.00)
31	(0.08,0.31,0.36,0.25,0.00)

## 4 上海长江隧道风险规避

### 4.1 风险因子重要性分析

通过计算可以看到  $U_{20}$  洞门密封失效、 $U_{27}$  违章作业、 $U_{18}$  注浆压力过大、 $U_{14}$  流砂及管涌、 $U_{17}$  泥水压力过大、 $U_{23}$  密封条未充分挤压、 $U_{22}$  洞门混凝土强度偏高、 $U_7$  盾构机沉陷这八个风险因素的权重值较大,需要重点考虑,建议制定规避措施和事故预案以有效控制风险。其中  $U_1$  洞门设计方案不当、 $U_{16}$  盾构过大纠偏扰动、 $U_{19}$  洞门凿除损坏、 $U_{12}$  刀头过度磨损、 $U_6$  盾构工作室控制不

当,  $U_{30}$  触电伤亡,这6个风险因素也有着不可忽略的影响。

### 4.2 风险性分析

根据FAHP方法,计算各层次的风险等级。

$$R_{C1}=(0.0207;0.0240;0.0663;0.0748;0.0245)$$

$$R_{C2}=(0.0008;0.0022;0.0019;0.0019;0.0004)$$

$$R_{C3}=(0.0274;0.0654;0.0593;0.0431;0.0133)$$

$$R_{C4}=(0.0274;0.0654;0.0593;0.0431;0.0133)$$

$$R_{C5}=(0.0200;0.0351;0.0596;0.0747;0.0232)$$

$$R_{C6}=(0.0165;0.0292;0.0223;0.0175;0.0017)$$

$$R_{C7}=(0.0119;0.0131;0.0233;0.0495;0.0024)$$

$$R_{C8}=(0.0065;0.0149;0.0231;0.0284;0.0048)$$

$$R_{C9}=(0.0000;0.0285;0.0346;0.0245;0.0078)$$

$$R_{C10}=(0.0080;0.0217;0.0345;0.0354;0.0013)$$

$$R_{C11}=(0.0071;0.0205;0.0359;0.0362;0.0000)$$

$$R_{C12}=(0.0024;0.0058;0.0113;0.0136;0.0000)$$

$$R_{B1}=(0.0196;0.0309;0.0558;0.0573;0.0185)$$

$$R_{B2}=(0.0292;0.0689;0.0796;0.0795;0.0198)$$

$$R_{B3}=(0.0064;0.0174;0.0291;0.0302;0.0006)$$

$$R_A=(0.0252;0.0590;0.0706;0.0708;0.0168)$$

依据隶属度取大的原则得到如下结果,原水中进洞风险等级为四级,系统风险层中施工质量风险等级为四级施工技术风险等级为三级,施工管理风险等级为三级。整体施工方案可行,但需要采取相应的控制措施。

### 4.3 风险规避

依据风险因子重要性分析中得到的结果以及风险性分析中的结论,对原方案中的风险点进行风险规避,具体措施如下。

(1)施工进洞前召开进洞施工专题会议,强化风险意思,加强施工安全管理;

(2)进入加固区100米前对盾构设备进行全面检修重点是泥水及注浆系统检修;

(3)现场抽样检查洞门混凝土强度;

(4)在盾构机头部完全进入加固区后,保证泥水循环正常运行的情况下,将切口水压逐步降低,直至盾构破洞的前两环,切口水压可逐步降低至1~1.2bar;

(5)加固区盾构推进速度调整为15~20mm/min;

(6)盾构进洞时,切口高程及平面需控制在-10mm~+10mm,保证盾构顺利准确的进洞;

(7)凿除洞门分三步,第一步凿除内排钢筋保护层,从上而下左右对称依次凿除。第二步割除内排钢筋。第三步按要尺寸要求一次凿除到外排钢筋处。

(8)此外针对 $U_{16}$ 盾构过大纠偏扰动、 $U_{12}$ 刀头过度磨损等风险因素,监控室工作人员应密切观

察刀盘力矩等盾构参数的变化情况，一旦发现异常情况应立即停止推进，采取相应应急措施。

## 5 结论

本文通过信心指数法及模糊层次分析得到上海长江隧道水中进洞的风险等级为四级，定量得到了各关键节点重要性排序及风险等级，并提出了相应的规避措施。

在采用本文第四部分给出的风险规避措施后，经过计算分析上海长江隧道水中进洞的施工方案风险等级降低到三级。

按照本文所提供的风险规避措施及时调整参数，上海长江隧道盾构机已于2008年顺利进洞，充分证明本文采用信心指数法及模糊层次分析进行风险评估是切实可行的，提出的风险规避措施是有效的。

### 参考文献

- [1] 吴韬.大型盾构进出洞施工技术及其加固土体受力机理分析[D].上海:同济大学,2006.(Wu Tao.Research on Construction Technique and Mechanism of Reinforced Soil for Departure and Reception of Large Scale Shield [D].Shanghai:Tongji University,2006.)
- [2] 冯卫星,杨开志.湾坞隧道右线进洞方案[J].岩石力学与工程学报,2004,4(23):1209-1211.(Feng Weixing, Yang Kaizhi.Tunnel Starting Scheme of Right Line of Wanwu Tunnel[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,4(23):1209-1211.(in Chinese))
- [3] 韦良文,吴韬,张庆贺.大直径盾构隧道出洞段土体稳定性分析[J].低温建筑技术,2006,110(2):85-86. (WEI Liang-wen, WU Tao, ZHANG Qing-he. Stability Analysis Of Soil Body Of Shield Starting Shaft In Large-diameter Shield Tunneling [J]. Low Temperature Architecture Technology,2006,110(2):85-86.(in Chinese))
- [4] 赵峻,戴海蛟.盾构法隧道软土地层盾构进出洞施工技术 [J]. 岩石力学与工程学报 ,2004,7(3):5147-5152.(in Chinese)) 技术 [J]. 岩石力学与工程学报 ,2004,7(3):5147-5152.(ZHAO Jun,DAI Hai-jiao. Shield Break-In and Break-Out Techniques in Soft Soil for Shield Driven Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,7(3):5147-5152. (in Chinese))
- [5] Luise Vassie. Health and Safety Management in UK and Spanish SMEs: A Comparative Study. Journal of Safety Research, 2000, 31(1):35 – 4.
- [6] 王彩华,宋连天.模糊论方法学[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.(WANG Cai-hua,SONG Lian-tian. Methodology of Fuzzy Theory[M]. Beijing:China Architecture and Building Press, 1998. (in Chinese) )
- [7] 宋飞,赵法锁.地下工程风险分析的层次分析法及MATLAB应用[J].地球科学与环境学报,2008,9(3):292-296.(SONG Fei,ZHAO Fa-suo.Application of Analytical Hierarchy Process and MATLAB Program for Risk Analysis of Underground Engineering[J]. Journal of Earth Sciences and Environmen,22008,9(3):292-296.(in Chinese))
- [8] 陈贇,吴竹青,刘君健.基于模糊层次分析法的公路工程 项目 风险 评价 [J]. 长沙交通学院学报 . 2008,9(3):44-48.(CHEN Yun,WU Zhu-qing,LIU Jun Jian. Risk Evaluation of Highway Engineering Rroject Based on the Fuzzy-AHP[J].Journal of Chang Sha Communication University.2008,9(3):44-48.(in Chinese))
- [9] 段秉乾,司春林. 基于模糊层次分析法的产品创新风险评估模型 [J]. 同济大学学报,2008,7(7):1002-1005.(DUAN Bing-qian,SI Chunlin. Comprehensive Risk Assessment Model of Complex Product Systems Innovation Based on Fuzzy AHP [J].Journal of Tong Ji University. 2008,7(7):1002-1005. (in Chinese))
- [10] 陈龙,黄宏伟. 软土盾构隧道施工期风险损失分析 [J]. 地下空间与工程学报,2006,2(1):74-78. (CHEN Long, HUANG Hong-wei. Risk Loss Analysis During Construction of Soft Soil Shield Tunne[J] Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006,2(1):74-78. (in Chinese))

# 粒狀材料临界状态的颗粒级配效应

李 罡<sup>1,3</sup>, 刘映晶<sup>1,2</sup>, 尹振宇<sup>1,2\*</sup>, Christophe DANO<sup>1</sup>, Pierre-Yves HICHER<sup>1</sup>

(1. 南特中央理工大学土木与力学学院, 南特 44300; 2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院土木工程系, 上海 200240; 3. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 20003)

**摘要:** 采用理想颗粒材料 (DEM 理想球体)、人工颗粒材料 (玻璃球) 和天然颗粒材料 (Hostun 砂), 通过数值和室内常规三轴排水试验研究了颗粒材料级配对其应力-应变响应和临界状态的影响规律。试验结果表明: 在相同加载初始条件下 ( $e_0 = 0.574$ ,  $p'_0 = 400$  kPa), 随着不均匀系数  $C_u$  ( $d_{60}/d_{10}$ ) 的增大, 试样在  $q - \varepsilon_1$  平面上从剪胀变为剪缩, 在  $\varepsilon_v - \varepsilon_1$  平面上表现出由应变软化转变为应变硬化的特性。通过不同围压下的三轴排水试验, 在  $e - p'$  和  $q - p'$  平面上分别对不同级配的颗粒材料集合体绘制了临界状态线,  $e - p'$  平面随着  $C_u$  的增大临界状态线往下偏移, 而在  $q - p'$  平面上临界状态线不随  $C_u$  的改变而改变。

**关键词:** 颗粒级配; 离散单元法; 三轴排水试验; 临界状态; 粒状材料

**中图分类号:** TU411      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000 - 4548(2014)03 -

**作者简介:** 李罡(1984 - ), 男, 博士研究生, 主要从事土力学研究。E-mail: engineer.ligang@gmail.com。

## Grading effect on critical state behavior of granular materials

LI Gang<sup>1,3</sup>, LIU Ying-jing<sup>1,2</sup>, YIN Zhen-yu<sup>1,2</sup>, DANO Christophe<sup>1</sup>, HICHER Pierre-Yves<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Civil and Mechanical Engineering, UMR CNRS, 6183, Ecole Centrale Nantes, Nantes 44300, France; 2.

Department of Civil Engineering, School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

200240, China; 3. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** By adopting the idealized granular materials (DEM sphere), artificial materials (glass bead) and natural materials (Hostun sand), the grading effect on the stress-strain and the critical state behavior of granular materials is investigated through numerical and conventional drained triaxial tests. The results reveal that for the samples with the same initial loading conditions ( $e_0 = 0.574$ ,  $p'_0 = 400$  kPa), granular materials with a wider particle distribution display more contractive behavior and also strain hardening upon shearing. Furthermore it is found that the critical state line in the  $e - p'$  plane shifts downward as grading broadens with an increase of the coefficient of uniformity  $C_u$ , whereas the critical state line in the  $q - p'$  plane appears to be independent of the coefficient of uniformity  $C_u$ .

**Key words:** grain size distribution; DEM; triaxial drained test; critical state; granular material

## 0 引 言

颗粒材料在土木工程中有广泛的应用,如堆石坝、碎石路基、铁路道砟等,大部分颗粒材料在外力的作用下很容易产生颗粒破碎<sup>[1-3]</sup>,在工程实践中发现颗粒破碎往往会进一步引发结构物的大变形严重的甚至导致结构整体失稳<sup>[4-5]</sup>。通过研究发现,颗粒材料的破碎导致颗粒级配的变化,进而会引起颗粒材料力学性质的改变,例如: Coop<sup>[6]</sup>和 Verdugo 等<sup>[7]</sup>发现,加载过程中颗粒破碎导致的颗粒级配的变化将引起的试样体积收缩以及峰值强度的降低。此外 Biarez 等<sup>[8]</sup>, Daouadji 等<sup>[9]</sup>和 Hu 等<sup>[1]</sup>发现,随着颗粒破碎的增加,不均匀系数  $C_u$  逐步增大,相应的临界状态线 (CSL) 在  $e - p'$  平面上逐渐降低;尹振宇等<sup>[10]</sup>综合探讨了粒状

材料的颗粒破碎的本质是颗粒级配的变化,指出颗粒破碎可以由反映颗粒级配变化的破碎因子来描述;采用 PFC<sup>3D</sup> 模拟颗粒级配材料应力应变特性和临界状态的影响,得到临界状态线的位置随着不均匀系数  $C_u$  的增大而下移。

临界状态理论是目前工程设计计算时所采用的诸多本构模型的基本理论依据,因此,研究级配效应对临界状态的影响具有重要的科研和工程价值。

需要指出的是上述结论都是基于易破碎材料的研

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41240024, 51161130523); 欧盟玛丽居里行动计划 (PIAPP-GA-2011-286397); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20110073120012); 上海市浦江人才计划项目 (11PJ1405700)

**收稿日期:** 2013 - 03 - 12

\*通讯作者

究得到的，而颗粒破碎引起的级配变化是一个动态过程，很难定量建立级配变化与临界状态的关系。因此有必要采用坚硬的非破碎材料通过改变其初始级配并保持在加载过程中级配不变来研究级配效应对临界状态的影响，进而为破碎问题的研究提供依据与旁证。

Muir Wood 等<sup>[11]</sup>采用二维离散单元法 (2D-DEM) 证实了在不考虑破碎材料的情况下，圆盘颗粒的临界状态线在  $e - p'$  平面上的位置会随着试样的初始不均匀系数  $C_u$  的增大而降低。Yan 等<sup>[12]</sup>采用三维离散单元法 (3D-DEM) 也进一步证实这一结论。然而这些研究采用的不均匀系数  $C_u$  都相对较小 ( $C_u < 2.6$ )，另外其提供的室内试验数据与 DEM 的关联性不够强。此外按照美国试验标准规范 (ASTM Standards, D 2487-83)，土体材料按其直径大小的不同可分为砾石 (Gravel)、砂 (Sand)、粉土 (Silt)、黏土 (Clay)，以往的室内试验为了突出级配效应，多采用粉土和砂的混合物来研究级配对临界状态的影响<sup>[13]</sup>，很明显粉土和砂土的力学性能是迥然有别的，因此应当按照规范采用一种材料进而突出级配效应。

有鉴于此，笔者采用三维离散单元法，通过三轴排水试验研究了理想颗粒材料级配对其力学性能的影响。此外本文参照美国试验标准规范分类标准取直径范围在 0.08~2 mm 的砂颗粒作为研究对象，选取两种在试验过程中可认为没有破碎的坚硬颗粒材料 (人工材料玻璃球；天然材料 Hostun 砂)，配置更广的级配分布，通过室内常规三轴排水试验进一步研究，验证了颗粒材料的级配对其力学性能的影响。

## 1 试验方案

试验采用颗粒级配的分布为  $C_u=1.1\sim 20$ ，并控制所有级配的  $d_{50}$  一致，级配曲线如图 1 所示。这里需要指出的是由于受到计算时间的限制，对于数值三轴试验，试样的最大不均匀系数取到 5.0。

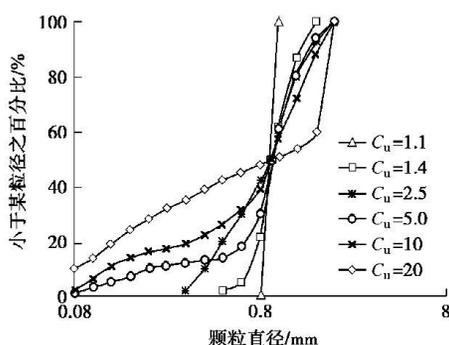


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution

### 1.1 理想材料三轴试验

对于 DEM 数值三轴试验，笔者应用 PFC<sup>3D</sup>，按照图 1 所示的级配，通过随机生成不同直径大小的球单元来模拟理想颗粒材料，采用墙单元模拟边界条件。球单元之间以及球单元与墙单元之间的接触关系采用简单线弹性接触模型，为了减少墙体刚度对颗粒集合体刚度的影响，墙体刚度取球体刚度的 0.1 倍。具体的模型参数如表 1 所示。

表 1 DEM 参数

参数	密度 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	法向接触刚 度/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	切向接触刚 度/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	摩擦 系数
球	2630	$1.5\times 10^8$	$1.5\times 10^8$	0.5
墙体	0.0	$1.5\times 10^7$	$1.5\times 10^7$	0.0

首先试样按照指定的孔隙率，采用直径膨胀法初步生成，然后通过自动伺服机制施加指定的三维等向固结应力 (100, 200, 400 kPa) 进行等向固结直至平衡。在试样生成以后，保持水平方向应力不变的情况下通过控制上下两面墙单元的竖向移动速率来模拟排水剪切试验，数值实验中没有考虑水的影响。

### 1.2 人工及天然材料三轴试验

对于室内常规三轴试验，本文采用的试验材料是人工材料玻璃球和天然材料 Hostun 砂。这两种材料的抗压强度较高，试验后量测的破碎系数  $B_r$ <sup>[11]</sup> 近乎为 0。因此在给定的加载条件下可以认为没有产生颗粒破碎，进而表明加载过程中试样的级配不发生改变。

需要指出的是，对于人工材料玻璃球，由于是采用标准化生产，因此其颗粒的形状几乎一致。然而对于 Hostun 砂，由于其是天然材料 (由天然的 Hostun 岩块破碎产生)，颗粒形状并不能保持完全一致，尤其是不同粒径下的颗粒形状<sup>[14]</sup>。颗粒的形状对于材料的力学性质影响很大，研究发现：随着颗粒材料的形状不规则程度的增加，最大孔隙率  $e_{\max}$  和最小孔隙率  $e_{\min}$  会增大<sup>[8]</sup>；试样的刚度会减小<sup>[15]</sup>；临界状态摩擦角  $\varphi_{cs}$  会增大<sup>[15]</sup>。甚至有研究表明，颗粒的形状会影响临界状态线在  $e - p'$  平面上的位置<sup>[8, 16]</sup>。因此，为了突出研究颗粒级配对颗粒材料临界状态的影响，试验所用的材料必须排除颗粒形状因素的影响。

本文基于法国南特中央理工大学的扫描电镜 (Scanning Electron Microscope) 获取了不同粒径下 Hostun 砂的形状参数  $\beta$ <sup>[17]</sup>，并通过统计对比分析了其相似性。 $\beta$  值的定义如下：

$$\beta = L_M/L_m, \quad (1)$$

式中， $L_M$ ,  $L_m$  分别是单颗粒最小外切矩形的长边和短边，如图 2 (c) 所示。颗粒的图像分析过程主要分为以下两个步骤：图像处理 (获取每个颗粒的  $\beta$  值) 和

数学统计 (分析  $\beta$  值的分布)。

图像处理分为以下两个步骤 (如图 2 所示): ①通过扫描电镜获取颗粒图片; ②利用开源软件 ImagJ 二值化处理图片并自动获取颗粒最小外切矩型的长边值和短边值。

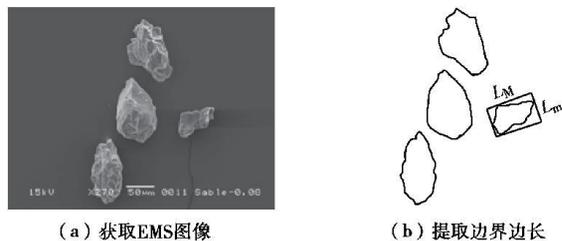


图 2 颗粒图像处理

Fig. 2 Process of digital image processing

图 3 展示了在 0.08~2 mm 范围内 Hostun 砂  $\beta$  值的数学统计结果 (共 860 颗)。从统计图中可以看出  $\beta$  值基本上位于 1.0~1.4 之间, 相应的累积频数超过了 80%。基于以上分析结果, 可以认为在采用此直径范围内的 Hostun 砂的形状是相似的, 能够满足试验要求。

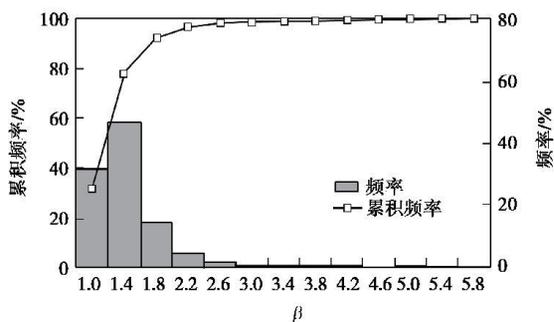


图 3 颗粒形状参数统计直方图

Fig. 3 Histogram of particle analysis

为了减少加载过程中的局部化应变, 本文采用湿砂分层法<sup>[18]</sup>制作松散的试样, 试样的直径为 100 mm, 高 200 mm。室内三轴排水试验通过控制应变速率进行加载, 对同一级配的试样分别做 3 组不同围压(100, 200, 400 kPa) 下的剪切试验。

## 2 试验结果及分析

本文按照从理想材料到天然材料的框架, 完整分析了颗粒级配对颗粒材料应力应变特性的影响。通过数值试验研究了相同加载初始条件下 (相同初始孔隙率和围压) 的颗粒材料应力应变响应, 并通过室内试验进行推广验证。

### 2.1 颗粒材料级配对应力应变关系的影响

采用离散单元法可以避免常规室内试验量测的缺陷, 能够精确的控制所需试样的初始条件, 包括初始

孔隙率和围压。利用 DEM 的这一优点, 本文配置相同初始孔隙率和围压的不同级配的试样, 对颗粒材料级配对应力应变关系的影响进行研究。

图 4 展示了不同级配下颗粒材料的应力应变响应。由图可见, 在相对较高的应变水平下 (轴向应变高于 25%), 所有的试样都到达了所谓的临界状态。

图 4 (a) 给出了轴向应变与偏应力的关系, 从图中可以看出, 在相同的初始加载条件下 ( $e_0=0.574$ ,  $p_0'=400$  kPa) 所有的试样的临界状态偏应力均相同而与级配无关, 然而偏应力的峰值表现出级配相关性: 不均匀系数  $C_u$  小的试样 ( $C_u=1.4$ ), 其最大剪切强度值较大, 而对于不均匀系数  $C_u$  较大的试样 ( $C_u=5.0$ ), 剪切强度值较小 (为残余强度也即临界强度)。随着不均匀系数  $C_u$  的增大, 偏应力峰值随着降低, 材料由应变软化转变为应变硬化的特性。

图 4 (b) 展示出, 3 种级配试样在剪切到较大应变水平 (20%) 后, 其体积应变保持不变, 轴向应变一直在发展; 随着不均匀系数  $C_u$  的增大, 试样在  $\varepsilon_v - \varepsilon_1$  平面上表现出从剪胀到剪缩转化的规律。

图 4 (c) 显示, 尽管初始孔隙率相同, 不同级配的试样到达临界状态时的最终孔隙率不同, 然而临界状态下的平均有效应力相近。

从图 4 (d) 可见, 随着试样不均匀系数  $C_u$  的增大, 其峰值应力比逐渐下降, 意味着峰值摩擦角在减小。在达到临界状态时, 不同级配的颗粒材料的应力比是相同的, 也即临界状态摩擦角不随级配的改变而改变。

### 2.2 基于级配效应的极限状态线研究

图 5 分别展示了, 3 种颗粒材料在  $q - p'$  平面 (图 5 (a)、5 (b)、5 (c)) 和  $e - p'$  平面 (图 5 (d)、5 (e)、5 (f)) 上不同级配的试样在不同围压下达到的临界状态点 (每一个点代表一个三轴试验结果), 如图中虚线所示。

在  $q - p'$  平面上的临界状态线采用线性方程拟合, DEM、玻璃球试验和 Hostun 砂试验的直线斜率分别是 0.79, 0.8 和 1.1。  $e - p'$  平面上的临界状态线按照 Li 等<sup>[9]</sup>建议的如下公式拟合:

$$e_c = e_{ref} - \lambda \left( \frac{p'}{p_{at}} \right)^\xi \quad (2)$$

式中,  $e_c$  是平均有效应力  $p'$  对应的临界状态孔隙率,  $e_{ref}$  是参照孔隙率, 确定了临界状态线的高低,  $\lambda$  确定了临界状态线的斜率 ( $\xi$  是材料参数通常取为 0.9<sup>[12]</sup>,  $p_{at}$  是大气压力, 取为 101.3 kPa)。

由图 5 (a) ~ 5 (c) 可以看出, 在  $q - p'$  平面上, 同一种材质不同级配材料的临界状态点都落在同一临

界状态线上, 临界状态线并不随着材料不均匀系数  $C_u$  的改变而改变, 也即材料的临界应力比相同。由此可知材料的临界状态摩擦角并不随级配的改变而变化。

由图 5 (d) ~5 (f) 可以看出与临界状态应力比

不同, 在  $e - p'$  平面上, 对于相同材质级配相同的材料, 临界状态线是唯一的, 均可用式 (2) 描述; 而对于相同材质而不均匀系数  $C_u$  不同的材料, 随着颗粒材料不均匀系数  $C_u$  的逐渐增大, 临界状态线逐渐下移。

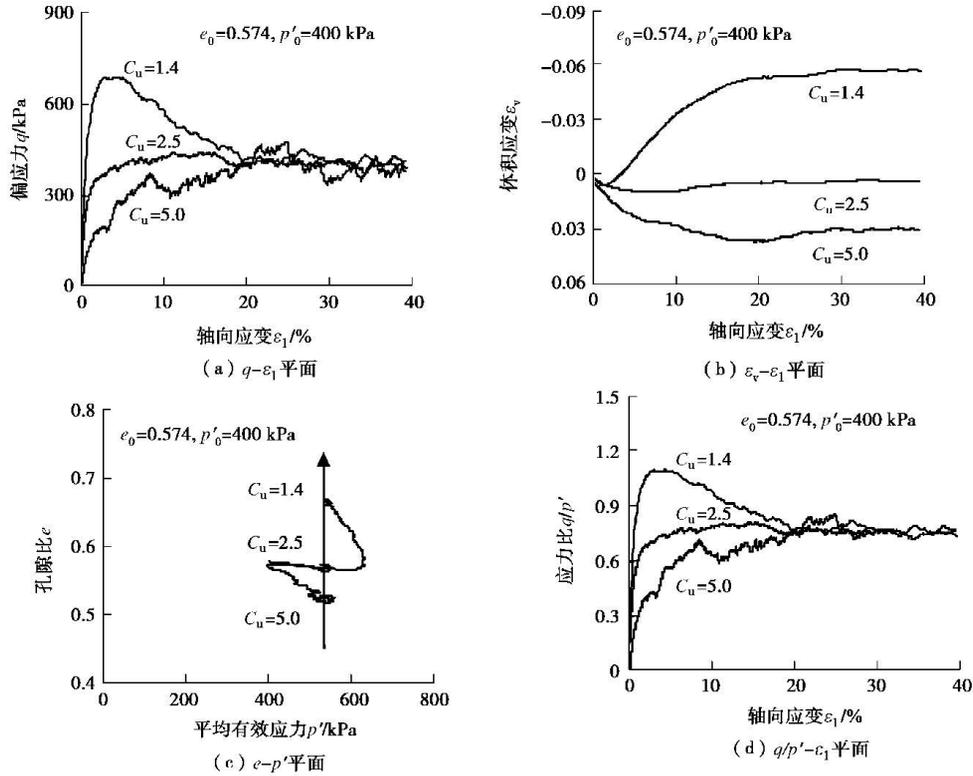


图 4 数值模拟颗粒级配对应力应变响应的影响

Fig. 4 Numerical simulation of GSD effect on stress-strain responses

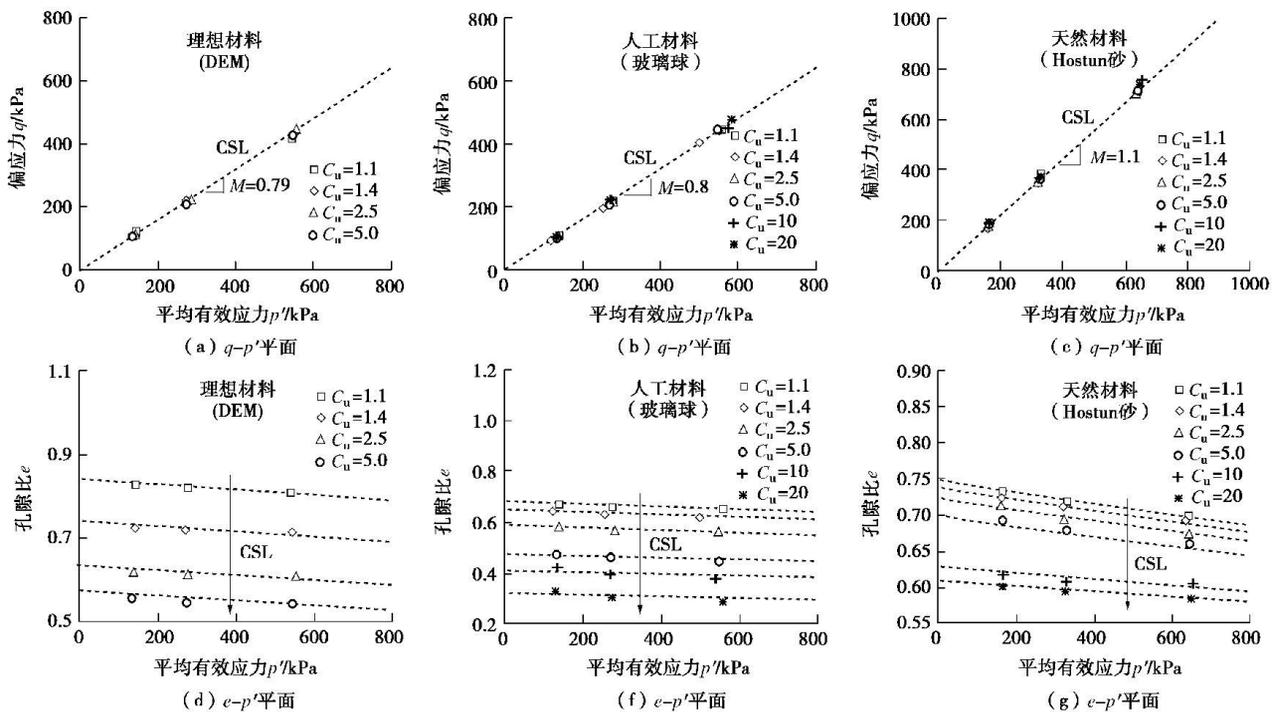


图 5 三种材料的临界应力状态线

Fig. 5 Critical state lines of three materials

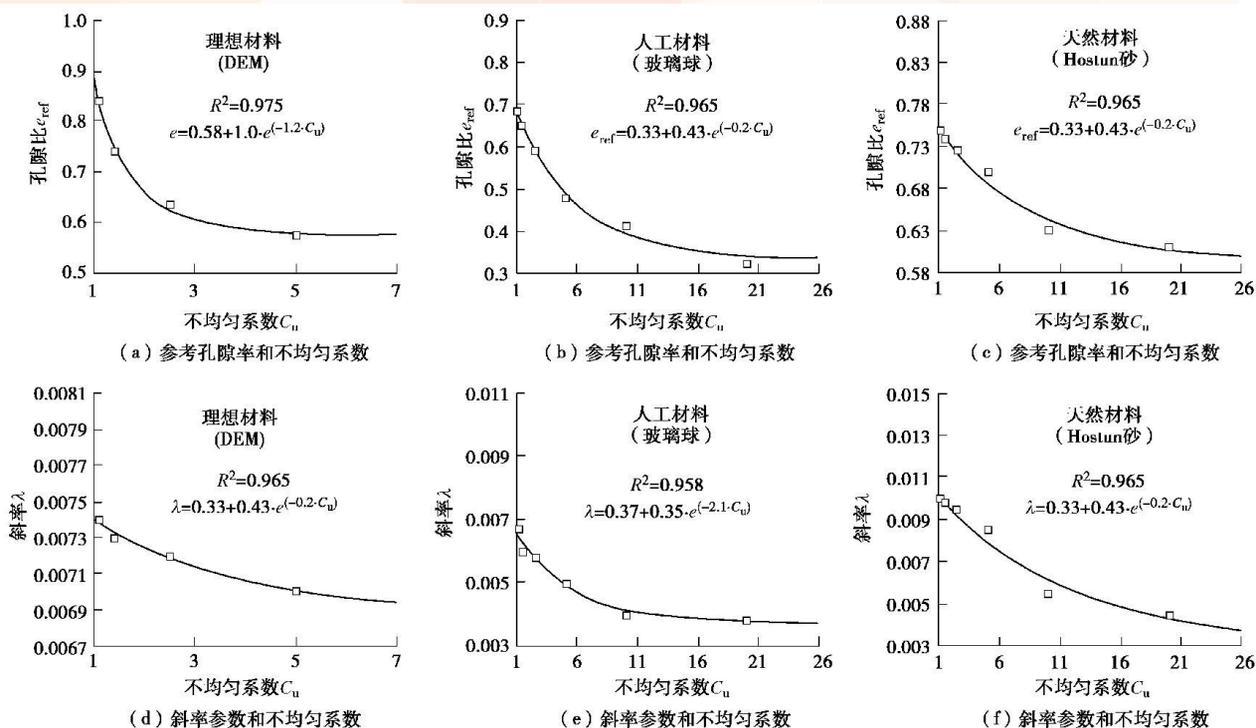


图 6 临界状态系数随不均匀系数变化规律

Fig. 6 Relationship between critical state parameters and coefficient of uniformity

由公式 (2) 可知, 对于给定的材料, 当  $p_{at}$  和  $\zeta$  给定时, 临界状态线可以通过两个参数确定 ( $e_{ref}$  和  $\lambda$ ), 拟合参数如表 2 所示。

图 6 按照指数形式的方程拟合了参照孔隙率 ( $e_{ref}$ ) 以及斜率  $\lambda$  和不均匀系数  $C_u$  的关系。由图可知随着不均匀系数  $C_u$  的逐步增大, 参照孔隙率  $e_{ref}$  和斜率  $\lambda$  逐渐下降。对于玻璃球和 Hostun 砂, 在  $C_u$  高于 10 以后, 参照孔隙率  $e_{ref}$  以及斜率  $\lambda$  逐渐趋于平缓。

表 2 3 种颗粒材料的临界状态线系数

Table 2 Critical state parameters of three granular materials

$C_u$	DEM		玻璃球		Hostun 砂	
	$e_{ref}$	$\lambda$	$e_{ref}$	$\lambda$	$e_{ref}$	$\lambda$
1.1	0.840	$7.4 \times 10^{-3}$	0.685	$6.7 \times 10^{-2}$	0.750	$1.0 \times 10^{-2}$
1.4	0.740	$7.3 \times 10^{-3}$	0.650	$6.0 \times 10^{-3}$	0.740	$9.8 \times 10^{-3}$
2.5	0.635	$7.2 \times 10^{-3}$	0.590	$5.8 \times 10^{-3}$	0.725	$9.5 \times 10^{-3}$
5.0	0.575	$7.0 \times 10^{-3}$	0.477	$5.0 \times 10^{-3}$	0.700	$8.5 \times 10^{-3}$
10			0.410	$4.0 \times 10^{-3}$	0.630	$5.5 \times 10^{-3}$
20			0.320	$3.8 \times 10^{-3}$	0.610	$4.4 \times 10^{-3}$

### 3 结 论

本文分别采用理想材料、人工材料、天然材料, 通过数值和室内三轴排水试验, 研究了颗粒级配对颗粒材料应力应变特性和临界状态力学特性的影响, 得到了以下结论:

- (1) 颗粒级配对临界状态线在  $e-p'$  平面上的位置影响明显, 随着不均匀系数  $C_u$  的增大, 临界状态线在  $e-p'$  平面上逐步降低。
- (2) 在排水条件下颗粒级配并不影响临界状态线在  $q-p'$  平面上的位置, 也即临界状态应力与级配无关, 颗粒级配并不影响临界状态摩擦角。
- (3) 在相同加载初始条件下, 颗粒级配对材料应力应变关系的影响显著, 随着不均匀系数  $C_u$  的增大, 在  $q-\varepsilon_1$  平面上试样由应变软化转变为应变硬化。
- (4) 在相同加载初始条件下, 在  $\varepsilon_v-\varepsilon_1$  平面上随不均匀系数的增大, 试样由剪胀特性转变为剪缩特性。
- (5) 临界状态参数参照孔隙率  $e_{ref}$  以及斜率  $\lambda$  和不均匀系数  $C_u$  存在幂函数变化规律。

#### 参考文献:

[1] HU W, YIN Z Y, DANO C, 等. A constitutive model for granular materials considering grain breakage[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(8): 2188 - 2196.

[2] 刘汉龙, 孙逸飞, 杨 贵, 等. 粗粒料颗粒破碎特性研究述评[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 361 - 369. (LIU Han-long, SUN Yi-fei, YANG Gui, et al. A review of particle breakage characteristics of coarse aggregates[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(4): 361 - 369. (in Chinese))

- [3] 孙海忠, 黄茂松. 考虑颗粒破碎的粗粒土临界状态弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(8): 1284 - 1290. (SUN Hai-zhong, HUANG Mao-song. Critical state elasto-plastic model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(8): 1284 - 1290. (in Chinese))
- [4] FOURIE A B, PAPAGEORGIOU G. Defining an appropriate steady state line for Merrriespruit gold tailings[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, **38**(4): 695 - 706.
- [5] HU W. Contribution a l'etude de l'effet d'echelle dans les materiaux granulaires[D]. Nantes: Ecole Centrale de Nantes, 2009. (HU W. Contribution to the scale effect of granular materials[D]. Nantes: Central University of Nantes, 2009. (in French))
- [6] COOP M. The mechanics of uncemented carbonate sands[J]. Géotechnique, 1990, **40**(4): 607 - 626.
- [7] VERDUGO R, HOZ K. Strength and stiffness of coarse granular soils[C]// Proceeding of Geotechnical Symposium Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis Rome, 2007: 243 - 252.
- [8] BIAREZ J, HICHER P Y. Influence de la granulométrie et de son évolution par ruptures de grains sur le comportement mécanique de matériaux granulaires[J]. Revue Francaise de Genie Civil, 1997, **1**(4): 607 - 631. (Influence of grains breakage on the mechanical behaviors of granular materials [J]. Journal of French Civil Engineering, 1997, **1**(4): 607 - 631. (in French))
- [9] DAOUADJI A, HICHER P Y, RAHMA A. An elastoplastic model for granular materials taking into account grain breakage[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2001, **20**(1): 113 - 137.
- [10] 尹振宇, 许强, 胡伟. 考虑颗粒破碎效应的粒状材料本构研究: 进展及发展[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2170 - 2180. (YIN Zhen-yu, XU Qiang, HU Wei. Constitutive relations for granular materials considering particle crushing: review and development[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2170 - 2180. (in Chinese))
- [11] MUIR WOOD D, MAEDA K. Changing grading of soil: effect on critical states[J]. Acta Geotechnica, 2007, **3**(1): 3 - 14.
- [12] YAN W, DONG J. Effect of particle grading on the response of an idealized granular assemblage[J]. International Journal of Geomechanics, 2011, **11**(4): 276 - 285.
- [13] BELKHATIR M, ARAB A, SCHANZ T, et al. Laboratory study on the liquefaction resistance of sand-silt mixtures: effect of grading characteristics[J]. Granular Matter, 2011, **13**(5): 599 - 609.
- [14] YUDHBIR, ABEDINZADEH R. Quantification of particle shape and angularity using the image analyzer[J]. Geotechnical Testing Journal, 1991, **14**(3): 296 - 308.
- [15] CHO G, DODDS J, SANTAMARINA J. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(5):591 - 602.
- [16] MAEDA K, FUKUMA M, NUKUDANI E. Macro and micro critical states of granular materials with different grain shapes[C]// Proceeding of The 6th International Conference on Micromechanics of Granular Media. Golden, 2009: 829 - 832.
- [17] CAVARRETTA I. The influence of particle characteristics on the engineering behaviour of granular materials[D]. London: Imperial College, 2009.
- [18] ISHIHARA K. Liquefaction and flow failure during earthquakes[J]. Géotechnique, 1993, **43**(3): 351 - 415.
- [19] LI X S, WANG Y. Linear representation of steady-state line for sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(12): 1215 - 1217.

# 水上基坑围护结构方案设计与分析

丁勇春, 杭建忠, 顾群, 程泽坤

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 结合某紧邻高桩码头的大型水上客运综合体深基坑工程的方案设计, 提出一种既满足围护结构水上施工作业条件, 又能最大限度减少前方码头结构设计变更的复合钢板桩基坑围护方案。针对地下连续墙和复合钢板桩两种水上基坑围护方案, 采用 Plaxis 软件分别建立平面应变有限元计算模型, 分析了不同施工工况下两种方案围护结构的变形及受力特性。研究表明, 复合钢板桩能与前方码头结构同步进行水上施工, 该方案减小了码头后方接岸斜坡堤回填与基坑开挖工程量, 基坑开挖阶段降低了作用于围护结构的土压力, 对基坑变形控制及稳定均有利。基坑开挖至坑底时复合钢板桩最大侧向变形仅为地下连续墙的 1/3, 变形性状也明显优于地下连续墙。此复合钢板桩基坑围护方案可为类似基坑工程的设计和施工提供有益参考。

**关键词:** 水上基坑; 地下连续墙; 复合钢板桩; 高桩码头; 斜坡堤

**中图分类号:** TU473; U656

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 4548(2012)07 - 1338 - 06

**作者简介:** 丁勇春(1979 - ), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事基坑工程、港口水工建筑物的设计与研究。E-mail: ycding@163.com。

## Schematic design and performance of retaining structure for waterfront excavation

DING Yong-chun, HANG Jian-zhong, GU Qun, CHENG Ze-kun

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** In combination with the schematic design of a large-scale waterfront deep excavation for passenger station adjacent to the front wharf on piles, a kind of composite steel sheet pile retaining structure scheme for the foundation excavation is proposed to satisfy the waterfront construction condition of retaining structure and to minimize the design alteration of the front wharf on piles. The two-dimensional finite element numerical models are established with Plaxis to study the deformation and mechanical performance of the two feasible waterfront retaining structure schemes, including diaphragm walls and composite steel sheet piles. The calculated results show that the composite steel sheet piles can be constructed in parallel with the front wharf on piles in water so as to avoid massive backfill and subsequent excavation. This leads to the decrease of earth pressure loading on the retaining structure during inside excavating and strutting, which brings positive effects on deformation control and overall stability of the excavation. The maximum lateral deflection of the composite steel sheet piles is only one third of the diaphragm walls when the pit is excavated to the bottom, which means the steel sheet piles with two rows and the cast-in-place concrete can exert the stiffness of the composite load-carrying structure effectively. The proposed composite steel sheet pile retaining structure scheme can provide a useful reference for the design and construction of similar waterfront excavation projects.

**Key words:** waterfront excavation; diaphragm wall; composite steel sheet pile; wharf on piles; slope embankment

## 0 引言

随着沿海经济的高速发展, 港口及岩土工程领域涌现出越来越多的水上基坑建设项目。水上基坑由于处于水陆交界处或直接位于水域, 工程受潮流、波浪、回填的影响极大, 基坑的整体稳定、地下水渗流、变形控制及环境保护等往往成为工程成败的关键, 这也决定了陆上基坑的常规设计与施工方法不适用于水上基坑<sup>[1-3]</sup>。水上基坑如采用灌注桩或地下连续墙等作为

基坑围护结构, 一般应先筑岛(堤)创造干施工条件, 然后进行围护结构施工。当水深较大时, 采取大面积回填本身就不经济, 而且回填料具有一定的松散性, 灌注桩成孔或地下连续墙成槽的稳定性难以保证, 需要采取特殊的孔(槽)壁加固技术措施, 使得这类基坑围护方案的应用受到一定限制<sup>[4-7]</sup>。双排钢板桩围堰

收稿日期: 2011 - 07 - 07

结构是由两侧钢板桩及中间填充体构成具有一定宽度的重力式复合墙体，钢板桩可直接在水上打插，并采用砂土作为钢板桩内部填充物，以钢板桩的结构强度和内部填充物的自重及抗剪能力来共同抵抗外部荷载，因而常用于水上基坑开挖的临时支护、码头岸壁结构或围海造地的围护结构<sup>[8]</sup>。但双排钢板桩围堰结构为满足自立性，常需要较大的断面宽度和大量的回填砂，当基坑边界范围控制要求严格或回填砂来源不足时，其适用性也受到了限制。

本文结合某紧邻邮轮码头及客运码头的客运综合体大型水上基坑工程，提出一种复合钢板桩水上基坑围护结构方案。该方案能克服地下连续墙基坑围护方案必须陆上施工的缺点，又能解决双排钢板桩围护结构为满足自稳定需在两排钢板桩间大量回填砂的不足。钢板桩内部浇筑混凝土既减小了钢板桩围护结构的断面厚度，又有效增加了其抗弯刚度，使双排钢板桩与混凝土共同构成一种受力合理的复合基坑围护结构。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

某港区客运综合体位于拟建邮轮码头及客运码头后方，是由多栋高层建筑组成的建筑群，设3层地下室，基坑平面呈不规则L形，面积约 $6 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，深度约15 m。目前规划场地为海域，基坑南侧为拟建5万GT和22万GT邮轮码头，东侧为拟建客运码头，码头形式均为高桩梁板结构，驳岸结构为重力式挡墙及抛石斜坡堤，基坑北侧为拟建陆域吹填区围堰。邮轮码头宽度25 m，排架间距9 m，每樁排架5根桩，均为 $\phi 1.2 \text{ m}$ 预应力混凝土管桩，码头与后方采用筒支板过渡。

基坑南侧邮轮码头、东侧客运码头及北侧陆域吹填区均已完成施工图设计。该工程无常规陆上基坑的施工条件，项目的最大难点在于如何采取经济合理的基坑围护方案来维持基坑周边水土荷载的平衡，并尽最大限度利用前方码头与驳岸，减小基坑施工对码头结构的影响。根据设计规划，综合体基坑开挖边线南侧距邮轮码头前沿40 m，东侧距客运码头前沿25 m。基坑平面布置及周边环境如图1所示。

方案设计初期曾考虑采用中心岛逆作方案实施基坑施工，即坑内回填采用吹填砂管袋压坡，中心岛部分主体地下结构先行施工，再利用地下结构层顶板和底板作为基坑围护墙的内支撑，逐步向下开挖并施工四周地下结构。该方案为保证中心岛结构施工时坑内作业面干燥，坑内必须降水至坑底以下，此时围护

墙在无内支撑状态下要独立承受基坑内外超过16 m水头差压力、斜坡堤土压力及堤顶荷载作用。经初步计算，围护墙水平变形超过200 mm，基坑变形过大，基坑的整体稳定性也不能满足设计要求，因此中心岛逆作方案并不适用。

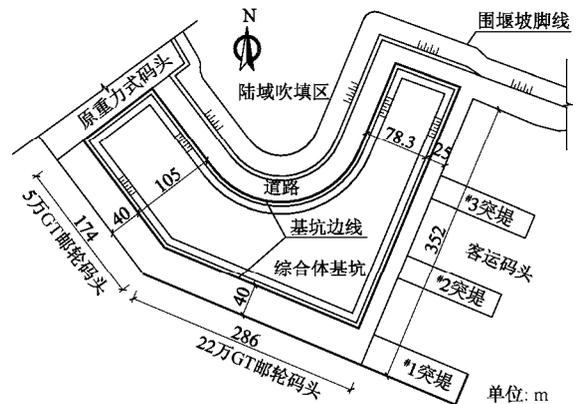


图1 基坑平面布置及周边环境

Fig. 1 Layout of excavation and surroundings

经多方案综合比选论证，初步确定基坑北侧陆域吹填区基坑围护结构采用0.8 m厚地下连续墙，基坑南侧邮轮码头区基坑围护结构考虑下列两种方案：方案一在距邮轮码头前沿40 m处采用1 m厚地下连续墙作为基坑围护结构。为满足地下连续墙成槽施工作业条件，码头后方需加宽驳岸斜坡堤，并将原全抛石斜坡堤改为吹填砂管袋加抛石的组合形式；方案二在距邮轮码头前沿30 m处采用复合钢板桩作为基坑围护结构。两排U形钢板桩中心间距1.5 m，钢板桩间采用混凝土填充，构成复合钢板桩基坑围护结构。该方案由于围护结构可与高桩码头同步进行水上施工，基坑边界可外延10 m，约增加4500 m<sup>2</sup>基坑面积。

基坑围护结构顶标高为2.5 m，顶圈梁施工时适当接高，坑底标高为-12.5 m，坑内设3道钢筋混凝土水平支撑(Z1~Z3)，支撑中心标高分别为0.0, -5.0, -10.0 m，支撑断面尺寸均为1 m×1 m，按水平间距6 m原则布置。两种方案的支护结构混凝土强度等级均为C30，钢板桩钢材牌号为Q235。

### 1.2 工程地质及水文地质条件

拟建场地泥面以下勘探深度范围内地基土均属第四纪海相冲积层，下伏燕山期细粒花岗岩风化残积层、全风化花岗岩、强风化花岗岩。22万GT邮轮码头区前沿设计泥面标高约-12.5 m，该区各地层自上而下主要分布为②<sub>1</sub>淤泥、③<sub>1</sub>粉质黏土、④<sub>1</sub>粉质黏土、④<sub>2</sub>淤泥质粉质黏土及⑥<sub>2</sub>强风化花岗岩。各土层物理力学性质指标如表1所示。

本工程位于珠江口东岸，属弱潮型河口，为不规则半日潮型，年平均潮差为0.97~1.70 m。工程海域

设计水位如下（黄海基面）：设计高水位 1.59 m（高潮累积频率 10%），设计低水位-0.91 m（低潮累积频率 90%），极端高水位 2.69 m（50 a 极值高水位），极端低水位-1.61 m（50 a 极值低水位）。

表 1 主要土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

编号	$\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	$c$ /kPa	$\varphi$ /(°)	$E_{s0.1-0.2}$ /MPa	$E_{50}^{ref}$ /MPa	$E_{oed}^{ref}$ /MPa	$E_{ur}^{ref}$ /MPa
② <sub>1</sub>	14.7	2.3	3.9	1.46			
③ <sub>1</sub>	19.1	27.9	12.9	5.27	26.4	13.2	131.7
④ <sub>1</sub>	18.9	17.5	11.1	5.20	26.0	13.0	130.0
④ <sub>2</sub>	17.5	14.5	8.8	3.69	18.5	9.3	92.3
⑥ <sub>2</sub>	20.0	50.0	25.6	50.0			

## 2 围护结构设计方案及模型

### 2.1 计算模型及参数

本工程基坑安全等级高，施工周期较长，基坑一旦发生损坏，其后果将是灾难性的，因此基坑外设计水位取 50 a 极值高水位，暂不考虑波浪作用对基坑支护结构内力及变形的直接影响。基坑外侧及码头结构施工荷载按 10 kPa 均载考虑。

由于基坑的开挖及降水，基坑围护墙两侧土压和水压的平衡即被破坏，使基坑围护结构产生变形，围护墙及支撑等相继承受作用力，整个基坑开挖、降水及支护结构施工过程中，支护体系呈现复杂的变形及受力状态，基坑设计规程所采用的弹性地基梁方法难以反映此复杂变化情况<sup>[6, 9]</sup>。因此本工程基坑方案设计采用能反映支护结构动态变形与受力的平面应变有限元软件 Plaxis 进行计算分析，并采用启明星基坑软件 FRWS 进行校核。

土体本构模型采用 Hardening-Soil 模型(简称 HS 模型)，该模型可同时考虑剪切硬化和压缩硬化，并采用 Mohr-Coulomb 破坏准则。HS 模型共有 11 个参数，这些参数可以通过三轴试验和固结试验确定。计算中各土层物理力学参数见表 1，其中刚度参数和高级参数等则根据相关工程的变形反分析确定。

### 2.2 地下连续墙方案

地下连续墙方案在距高桩码头前沿 40 m 处设 1 m 厚地下连续墙，地下连续墙深度约 39 m，墙底进入⑥<sub>2</sub> 强风化花岗岩层 1 m。为满足地下连续墙成槽施工条件，要求高桩码头与驳岸先行施工，待斜坡堤形成后，在斜坡堤中地下连续墙两侧采用三轴水泥土搅拌桩进行地基预加固，以保证砂性土中地下连续墙成槽施工的整体及局部稳定性，同时也作为一道附加止水帷幕。为满足坑内干施工作业条件，开挖前坑内回填砂至-2.5 m。坑内水位根据计算工况降至相应水位，采用调整浸润线位置考虑水位的变化，基坑内外

水头差造成的水压力由基坑围护墙承受。

高桩码头基桩、横梁及地下连续墙均采用线弹性板单元模拟，基桩及墙体两侧设接触单元，内支撑采用锚锭杆单元模拟。考虑施工因素影响，混凝土弹性模量为 24 GPa，泊松比为 0.2。坑内三轴水泥土地基裙边加固断面为 5 m×5 m，加固体本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型<sup>[10]</sup>，重度为 20 kN·m<sup>-3</sup>，黏聚力为 0.3 MPa，内摩擦角为 30°，泊松比为 0.25，弹性模量为 500 MPa。地下连续墙方案基坑计算断面如图 2 所示，计算工况如表 2 所示。

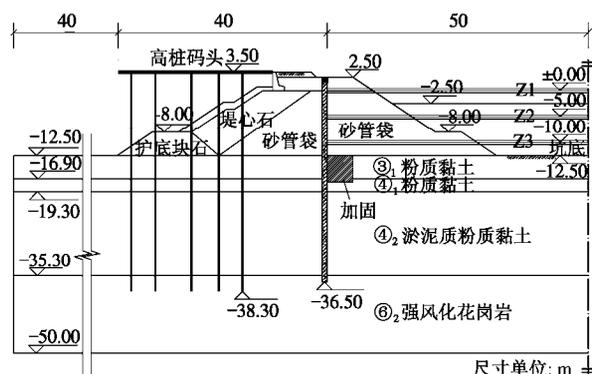


图 2 地下连续墙方案断面

Fig. 2 Cross section of diaphragm wall scheme

表 2 地下连续墙方案计算工况

Table 2 Calculating steps of diaphragm wall scheme

工况	施工内容
1	码头高桩梁板、驳岸施工，后方回填至-2.5 m
2	地下连续墙施工（计算后位移清零）
3	降水至-3.5 m，局部开挖至 0.0 m
4	施工第 1 道撑(0.0 m)，降水至-6.0 m，开挖至-5.0 m
5	施工第 2 道撑(-5.0 m)，降水至-11.0 m，开挖至-10.0 m
6	施工第 3 道撑(-10.0 m)，降水至-13.5 m，开挖至-12.5 m

### 2.3 复合钢板桩方案

复合钢板桩方案在距码头前沿 30 m 处设置双排钢板桩，钢板桩中心间距 1.5 m，桩间水下浇筑 C30 混凝土，使结构整体受力，并满足墙体抗渗要求。两排钢板桩均进入⑥<sub>2</sub> 强风化花岗岩层，水下混凝土底标高需进入④<sub>2</sub> 层 3 m 以上，混凝土底标高约-23 m，混凝土底面以下进行高压注浆止水。钢板桩外侧（坑外）分别在-8 m 和-5 m 标高设置宽度为 5 m 和 13 m 的水下抛石护坡平台，坡度均为 1：1.5。钢板桩内侧（坑内）与外侧抛石同步进行填砂，填砂护坡平台顶标高也为-5 m，平台宽度 20 m，坡度为 1：1.5，从而使钢板桩两侧平衡压载。为满足坑内干施工作业条件，开挖前坑内也回填砂至-2.5 m。

复合钢板桩也采用线弹性板单元模拟，并在墙体两侧设接触单元，U 形钢板采用法国 V 型，钢板弹性

模量为 200 GPa, 泊松比为 0.3, 标高-23 m 以上墙体抗弯刚度由钢板和混凝土刚度叠加, 标高-23 m 以下仅考虑钢板绕墙体中心的抗弯刚度, 其它参数均与地下连续墙方案相同。复合钢板桩方案基坑计算断面如图 3 所示, 计算工况如表 3 所示。

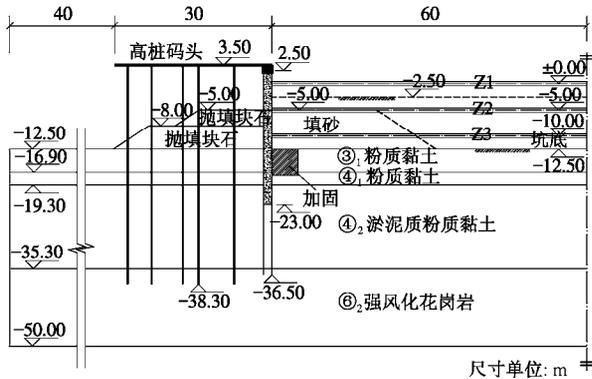


图 3 复合钢板桩方案断面

Fig. 3 Cross section of composite steel sheet pile scheme

表 3 复合钢板桩方案计算工况

Table 3 Calculating steps of composite steel sheet pile scheme

工况	施工内容
1	码头高桩梁板、复合钢板桩施工 内外坡同步回填至-5.0 m(计算后位移清零)
2	坑内回填至-2.5 m
3	坑内降水至-3.5 m
4	施工第 1 道撑(0.0 m), 降水至-6.0 m, 开挖至-5.00 m
5	施工第 2 道撑(-5.0 m), 降水至-11.0 m, 开挖至-10.0 m
6	施工第 3 道撑(-10.0 m), 降水至-13.5 m, 开挖至-12.5 m

地下连续墙方案与复合钢板桩方案计算工况存在一定差异: 地下连续墙方案先施工斜坡堤, 然后在斜坡堤中施工地下连续墙, 因而基坑开挖及降水前围护墙不产生变形; 复合钢板桩方案先施工复合钢板桩, 然后在钢板桩两侧同步抛石及填砂, 且钢板桩内侧(坑内)回填高度大于外侧(坑外), 因而基坑开挖及降水前围护墙已产生变形。

### 3 方案计算结果及分析

#### 3.1 基坑变形

不同工况下地下连续墙水平位移曲线如图 4 (a) 所示, 工况 6 基坑水平位移云图如图 5 所示。工况 3 和工况 4 围护墙变形呈“悬臂梁”形, 两种工况下围护墙变形曲线差别不大, 工况 4 墙顶最大水平位移为 68.8 mm。随着开挖深度的增加, 围护墙变形逐步过渡为“深层凸鼓”形, 由于 3 道水平支撑的支点作用, 墙顶水平位移稍有下降。工况 6 围护墙最大水平位移为 147.7 mm, 最大水平位移点标高约-20.0 m, 位于坑底以下 7.5 m。当基坑浅层土体开挖时, 由于支撑刚度发挥具有一定滞后效应, 围护墙最大水平变形点

位于墙顶, 尽管后期开挖及降水时支撑刚度增加, 但由于 1 m 厚地下连续墙抗弯刚度有限, 在基坑内外 16.19 m 的水头差压力、斜坡堤土压力及堤顶荷载的共同作用下, 基坑围护墙产生过大水平位移, 不能满足基坑变形控制要求。

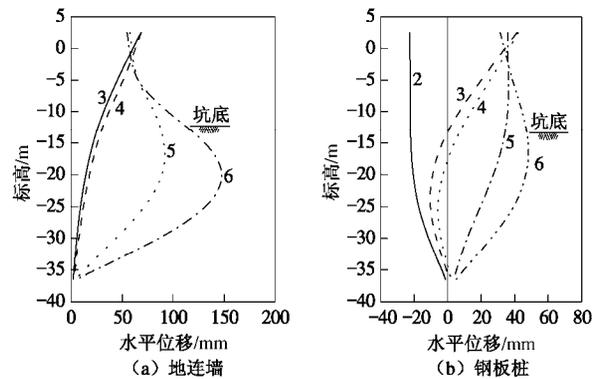


图 4 不同工况围护墙水平位移

Fig. 4 Lateral deflection of retaining wall at different stages

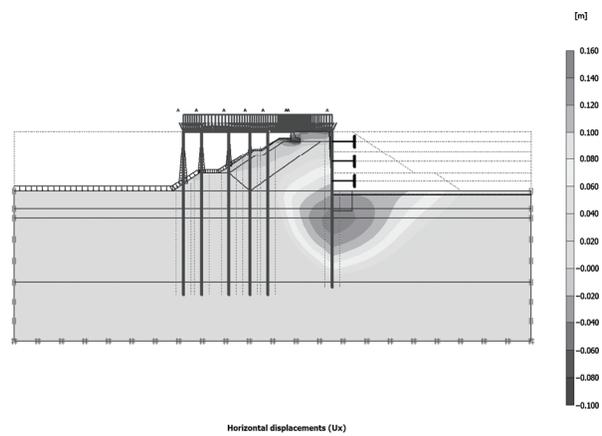


图 5 工况 6 地下连续墙方案基坑水平位移云图

Fig. 5 Lateral displacement contours of diaphragm wall scheme at stage No. 6

地下连续墙的经济厚度一般为 0.6~1.2 m, 并根据成槽机规格、墙体抗渗要求、墙体受力及变形等因素综合确定。本工程如采用地下连续墙方案, 为满足地下连续墙的成槽施工条件, 必须将原全抛石斜坡堤调整为部分吹填砂管袋斜坡堤, 同时增加斜坡堤宽度并进行槽壁加固, 而基坑开挖阶段斜坡堤又作为外荷载作用于地下连续墙, 既增加了工程施工工艺难度, 又会对基坑围护墙受力产生不利影响。

不同工况下复合钢板桩水平位移曲线如图 4 (b) 所示, 工况 6 基坑水平位移云图如图 6 所示。工况 2 复合钢板桩在基坑内侧大面积回填土压力作用下向基坑外侧变形, 桩顶向坑外产生的最大水平位移为 -22.3 mm, 而桩底嵌固作用明显。工况 3 和工况 4 由于坑内降水和浅层土体开挖, 桩顶又向坑内产生变

形, 工况 4 桩顶最大水平位移为 42.2 mm。后续工况由于坑内开挖及降水深度的增加, 钢板桩最大水平位移点逐步下移, 变形形态也从“悬臂梁”过渡为“深层凸鼓”, 但钢板桩在坑底以下“凸鼓”部分的挠曲形态明显优于地下连续墙。工况 6 钢板桩最大水平位移为 48.2 mm, 位于基坑底面附近。

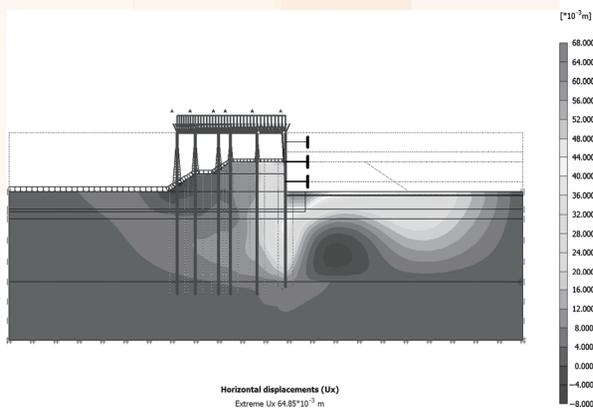


图 6 工况 6 钢板桩方案基坑水平位移云图

Fig. 6 Lateral displacement contours of composite steel sheet pile scheme at stage No. 6

根据研究<sup>[11-12]</sup>, 基坑最大相对侧向变形与抗隆起稳定安全系数及支护结构刚度间可建立经验关系, 支护体系刚度越大, 基坑最大相对变形越小。本工程 1.5 m 厚复合钢板桩抗弯刚度为 1 m 厚地下连续墙刚度的 6.8 倍, 最不利工况下复合钢板桩最大变形仅为地下连续墙变形的 1/3。复合钢板桩方案绕最下道内支撑抗隆起稳定安全系数为 2.9, 地下连续墙方案安全系数为 2.5。水土分算时, 复合钢板桩方案绕最下道内支撑抗倾覆稳定安全系数为 1.77, 地下连续墙方案安全系数为 1.45。可以看出, 钢板桩方案基坑的变形与稳定性明显改善: ①复合钢板桩方案无需在码头后方先行施工斜坡堤, 减小了基坑开挖阶段作用于围护墙上的土压力, 同时也避免了大量的土石方回填与开挖; ②钢板桩外侧护底块石仅抛填至 -5 m, 坑外竖向及水平向土压力的减小及复合钢板桩刚度的增加明显降低了围护墙的变形, 同时提高了基坑的抗隆起稳定与抗倾覆稳定安全系数。

### 3.2 支护结构内力

两种方案最不利工况下围护结构弯矩和剪力包络图对比如图 7 所示。地下连续墙最大正弯矩和最大负弯矩分别为 2767 kN·m/m 和 -2397 kN·m/m, 复合钢板桩最大正弯矩和最大负弯矩分别为 2313 kN·m/m 和 -3399 kN·m/m。两种方案围护结构最大正弯矩比较接近, 但复合钢板桩最大负弯矩为地下连续墙弯矩的 1.42 倍, 且最大负弯矩点位置明显深于地下连续墙, 主要是由于复合钢板桩方案是先施工钢板桩再进行

回填。当坑内大面积回填至标高 -2.5 m 时, 复合钢板桩外侧护底块石抛填标高仅为 -5 m, 外侧护底块石对围护结构的反压作用不如地下连续墙方案明显, 从而使复合钢板桩产生较大的负弯矩, 最大正弯矩也稍小于地下连续墙。但这种受力状态对基坑的变形控制反而是有利的, 图 4 (b) 中工况 2 围护结构顶部向坑外产生 -22.3 mm 的水平位移正说明了这一点。

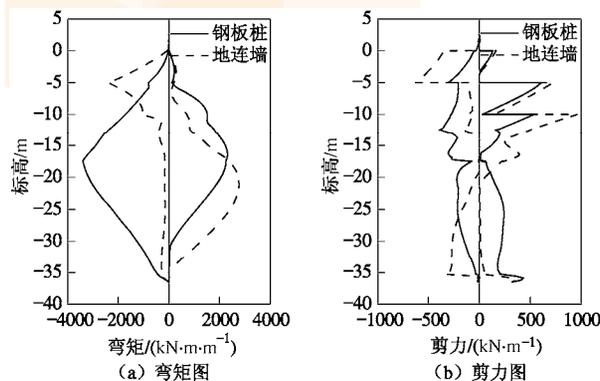


图 7 两种方案围护结构内力包络图

Fig. 7 Envelope diagrams of internal forces under different retaining structures

复合钢板桩最大剪力为 609 kN/m, 地下连续墙最大剪力为 963 kN/m。复合钢板桩方案内支撑最大轴力为 912 kN/m, 地下连续墙方案支撑最大轴力为 1178 kN/m。两种方案基坑支护结构内力计算结果表明, 基坑围护结构抗弯刚度越大, 墙身弯矩也越大, 但墙身剪力和支撑轴力会减小。

## 4 结 论

(1) 地下连续墙方案需要在码头后方形成较宽的接岸斜坡堤, 同时不能采用全抛石堤身, 地下连续墙两侧一定范围内必须采用吹填砂管袋堤身, 以满足地下连续墙成槽施工作业条件。该方案需要在地下连续墙成槽施工前对槽壁进行三轴水泥土搅拌加固, 以满足砂性土中地下连续墙成槽施工的局部稳定, 既增加了施工难度, 又增加了施工工期及工程造价。

(2) 复合钢板桩可与码头结构同步进行水上施工, 并减小码头后方接岸斜坡堤回填与基坑开挖工程量, 缩短了施工工期, 为尽可能避开台汛期施工创造了有利条件。该方案减小了基坑开挖阶段作用于基坑围护结构上的土压力, 可有效控制基坑变形并改善围护结构挠曲变形形态, 同时增加基坑的抗隆起与抗倾覆稳定性。

(3) 复合钢板桩最大正弯矩稍小于地下连续墙, 但复合钢板桩最大负弯矩为地下连续墙的 1.42 倍, 最大负弯矩点位置也明显深于地下连续墙。复合钢板桩方案外侧护底块石对围护结构的反压作用不如地下连

续墙方案明显,这种受力状态对基坑的变形控制是有利的。

(4)本工程推荐采用复合钢板桩作为水上基坑的围护结构,但是本方案仍有许多方面有待进一步研究,主要包括:波浪荷载作用模式、钢板桩选型与防腐、水上钢板桩施工、水下混凝土浇筑与分隔、墙底抗渗止水加固、坑内支护与地基加固、信息化施工监测等,下阶段将结合施工图设计进行深化分析。

致谢:本文的研究工作得到了莫景逸教授级高工和刘家才教授级高工的指导及帮助,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] 李小军, 陈映华, 宣庐峻. 采用水上深基坑围护法建造特大型船坞坞口的创新设计[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊 1): 1560 - 1564. (LI Xiao-jun, CHEN Ying-hua, XUAN Lu-jun. Creative design of super large dry-dock head construction by means of deep steel sheet piling excavation in water area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S1): 1560 - 1564. (in Chinese))
- [2] JTJ 213—98 海港水文规范[S]. 1998. (JTJ 213—98 Code of hydrology for sea harbour[S]. 1998. (in Chinese))
- [3] 李耀良, 王理想, 余振栋, 等. 超大面积港池基坑的陆上和水上开挖施工技术[J]. 建筑施工, 2008, **30**(10): 848 - 850. (LI Yao-liang, WANG Li-xiang, YU Zhen-dong, et al. Excavation technology under water and on land for ultra large foundation pit of harbor basin[J]. Building Construction, 2008, **30**(10): 848 - 850 (in Chinese))
- [4] GB 50286—98 堤防工程设计规范[S]. 1998. (GB 50286—98 Code for design of levee project[S]. 1998. (in Chinese))
- [5] SL 435—2008 海堤工程设计规范[S]. 2008. (SL 435—2008 Code for design of sea dike project[S]. 2008. (in Chinese))
- [6] JGJ 120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 1999. (JGJ 120—98 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 1999. (in Chinese))
- [7] DING Yong-chun, WANG Jian-hua. Numerical modeling of ground response during diaphragm wall construction[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2008, **13**(4): 1 - 6.
- [8] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [9] 丁勇春, 王建华, 徐 斌. 基于 FLAC<sup>3D</sup>的基坑开挖与支护三维数值分析[J]. 上海交通大学学报, 2009, **43**(6): 976 - 800. (DING Yong-chun, WANG Jian-hua, XU bin. Three-dimensional numerical analysis of braced excavation based on FLAC<sup>3D</sup>[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, **43**(6): 976 - 800. (in Chinese))
- [10] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (GONG Xiao-nan. Ground improvement manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000. (in Chinese))
- [11] MANA A I, CLOUGH G W. Prediction of movements for braced cuts in clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1981, **107**(6): 759 - 777.
- [12] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]// ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No. 25. New York, 1990: 439 - 470.

# 开发引导+可持续性控制---中等城市新型城镇化规划方法

---以广东省吴川市暨兰石镇总体规划为例

丁郑飏

广东省建筑科学研究院  
广东省广州市

## 摘要

笔者通过主持的吴川市域内的一城一镇方案设计，形象地描绘了对新型城镇化模式在规划设计中的理解和认识，提出开发引导和可持续性控制并举的“疏导性”规划理念，具体在规模弹性、用地方向选择、轴线打造和引导、星型形态、绿楔网络生态体系等方面和手法上予以体现。

## 1. 序言

新型城镇化，是我国城镇化今后一个时期的研究热点，是转变增长方式这一基本国策在城市规划行业的关键议题。对于快速发展的人口高密度地区中等城市规划形态选择，规划师必须避免“摊大饼”，该趋势将导致未来诸多大城市病，规划师必须立足公众和社会的立场，利用专业特长，探索物质空间管控手段，正确利用和引导地产开发的规模、方向、形态和强度，控制城市发展，保持可持续、健康、弹性的城市形态。本人通过主持的两个代表项目实践，探索思考，总结感悟，与大家交流共享。

## 2. 正文

### 2.1 新型城镇化模式---城、镇、村和谐共融

广东省城市化目前步入人口向珠江三角洲集聚与向粤北、粤西、粤东扩散同时并行的时期，伴随交通设施快速改善，在粤西的湛江市6个县市中，作为经济和人口密度排名位列第一的吴川，必然迎来今后10-20年城市规模快速扩张期，但其作为中小城市，以往的发展规划管控缺失，放任无

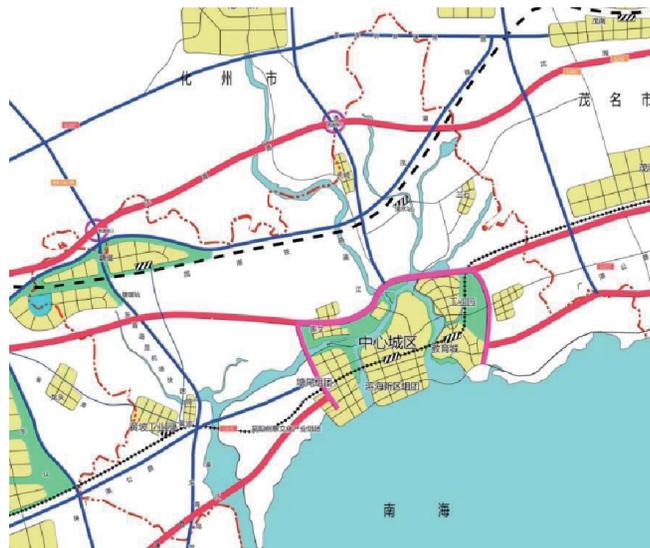
序，出现浪费和城区环境品质恶化状况，受宏观政策摆动影响，城镇建设出现反复：

“热”---1980年~1995年，社会投资人群对经济的预期判断失误，导致沿海村镇投资过热，出现大量烂尾楼；

“冷”---1996年~2004年，新区发展缓慢，经济发展缓慢；

“热”---2005年~至今，旧区依赖完善的服务设施，见缝插针，建筑和人口密集，交通阻塞，居住生活环境恶化；

上述历程可以看出，由于是工业化的起步期，发展扩容的趋势明显，但在发展中有波动。



图片1. 吴川市城市总体规划（2013-2030）市域城镇体系规划图

目前中心城区为20万人，从小城市向中等城市发展成为必然，为了避免大城市发展中出现的人口迁移、城区规模无序蔓延扩张、乡村废弃的传统模式，在人口高密度地区，可以通过改善公共交通，使城、镇，以致村庄和谐共融，共同发展，避免乡村荒弃，有效利用已建村庄建筑，维护原村镇社会结构和稳定，实现低碳生态的新型城镇化。

各镇、村寻求机遇，职能分工，功能提升，差异化发展，焕发活力。

## 2.2 中心城区开发引导和可持续性形态控制

规划方案中重点处理好开发引导和形态控制的关系。

### 2.2.1. 以开发带动发展，拉动城市新区建设，疏解旧城

充分利用轨道交通和快速路建设，形成TOD带动城区发展模式，在拟发展的新区组团中心边缘规划轻轨站点，连接旧城中心，形成中心序列秩序景观轴线，四个新轴线向外放射，打造四个新区中心，提升新区中心活力，吸引旧区居住向外疏解，最终形成城市空间发展“四轴拉动”清晰的脉络结构。



圖片2. 吴川市城市总体规划（2013-2030）中心城区规划结构分析图

利用有实力的企业集团，统一规划，整体开发，进行居住用地的首先外迁，拉动市商业中心的空间外移，从而达到城市中心功能分化分离、疏解旧城的目的。

### 2.2.2. 采取合理的生态形态，增强城区规划方案的弹性

生态城市是组团城市，它以组团斑块的形式嵌入绿地基质中，绿地系统最终形成风水绿楔、生态绿廊、休闲绿道、特色绿岛四种绿地形态，形成网络体系，共同担负城区生态维护架构任务。

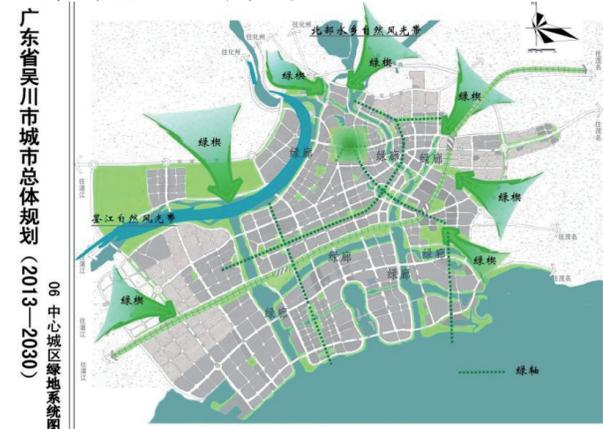
吴川，是欠发达地区、受外部经济和政策波动影响大的中小城市，在新型城镇化政策影响下，规模预测始终是个难题，根据预测，规划期末在35-70万人之间，规模相差一倍。

星状城市，是生态城市的一种形态，它尊重了未来城区规模的不确定性，对于吴川这种受经济和政策波动因素多、影响大的中小城市非常适应，保证了在发展中，自然生态绿地基质始终保持与城区的

结合，使规划形态具有开放性，城区规划方案具有弹性，为不可预见的未来城区发展设施预留了不可预见需求用地和廊道，为未来公众生产、生活质量提高后产生的新的需求准备了足够的承载空间。保证城区健康可持续发展，星状是中小城市可持续性发展的形态首选。

风水绿楔：尊重、保护、显露了城市传统岭南沿海水乡外部形胜和景观特色，尊重了农业田园自然要素，生成和引导了岭南湿热地区郊区风进入城区，缓解热岛效应。

生态绿廊：尊重吴川“江海”城市的自然特色，以江河为廊，两侧放大绿地和开放空间，布置公共设施，减少居住等私有用地，给公众更多的、完整的连续感受城市特色的空间系列。



圖片3. 吴川市城市总体规划（2013-2030）中心城区绿地系统结构分析图

休闲绿道：可以突出吴川足球之乡的品牌特色，轴线内部绿道中布置小型足球运动场，为居民提供和谐宜居的物质外部环境，彰显城市文化特色品牌，提升公众幸福感。

特色绿岛：隔离岛是生态变异进化的物质基础，绿岛（包括了广场、街心公园），是城市历史特征典型地段，承载了多重文化内涵，是城市的客厅和公共活动的节点，是城市文化生态空间的主要物质基础。

### 2.2.3. 加强特色小镇建设，提高吸引力，走新型城镇化道路

以吴川兰石镇为例，利用新城思想，营造比吴川市区更高的人居环境、提供公共服务质量更好、使人与自然更和谐，实现宜居宜游宜业现代化新镇，职住平衡，形成对大中城市的反磁力效应。

倡导乡土文化、一村一品、农业景观、田园风光，与大中城市错位发展，实现新的职能定位和更新提升。功能上的差

异，形成景观品质的丰富多样，遵从了生态可持续发展的原则。

该镇传统岭南建筑装饰艺术突出，改革开放以来，孕育了众多的建筑业开发商；该镇水域面积广阔，水乡文化浓厚，历史积淀了丰厚的民俗、戏剧、绘画、文学艺术遗产。

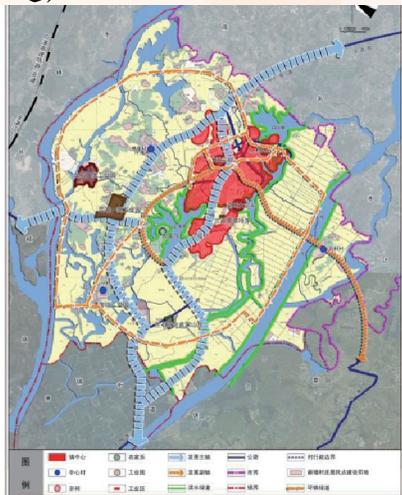


圖4. 吳川蘭石鎮總體規劃（2013-2030）鎮域村鎮體系規劃圖

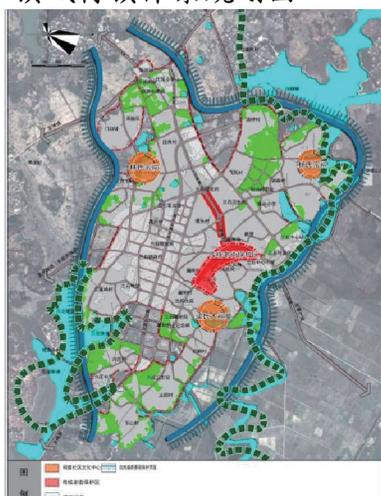


圖5. 吳川蘭石鎮總體規劃（2013-2030）鎮區景觀系統規劃圖

規畫定位為以建築裝飾工藝生產為主的省級工業專業鎮，是環境優美的廣東粵西傳統水鄉風貌文化名鎮。鎮域加強水系兩側綠化，保護水系，限制工業用地規模，規畫雙環綠道，為當地人群和城區市民提供休閒觀光的旅遊線路。

鎮區規模按3萬人控制，保證環境品質，鎮區重視對於自然景觀要素——“邊緣”的保護，尊重現有村莊多組團的格局，在中部集中打造新中心服務區，重點完善服務設施，提高基礎設施服務水平。

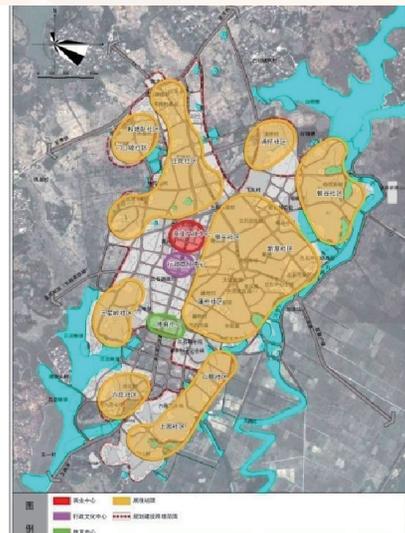


圖6. 吳川蘭石鎮總體規劃（2013-2030）鎮區功能分區規畫圖

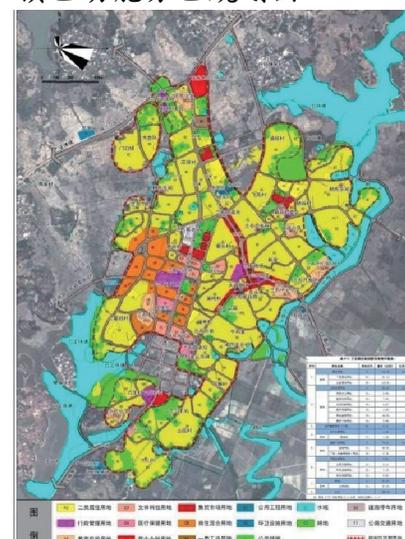


圖7. 吳川蘭石鎮總體規劃（2013-2030）鎮區土地利用規畫圖

### 參考資料

1. 《廣東省吳川市城市總體規劃（2013-2030）初步方案》，丁鄭飈，2013.12.
2. 《吳川市蘭石鎮總體規劃（2013-2030）》，丁鄭飈，2013.12.
3. 城鎮化應守住哪些“底線”，仇保興，2014.2.

### 作者簡介

丁鄭飈，高級城市規畫師、注冊城市規畫師，廣東省建科建築設計院總規畫師，中國生態城市委員會青委會副主任委員，擅長城市總體規畫，主持編制規畫成果和發表演論文數十項。

## 應用於土木工程之鋼拉桿型式與施工實例

北澤理史<sup>1</sup> 林威宏<sup>2</sup>

1. 日本合鐵產業株式會社 建材部部長 日本大阪
2. 社團法人台灣營造工程協會 秘書長 台灣高雄

### 摘要

鋼拉桿 (Steel Tie Rod) 是一種用於用於板樁式構築物中連接前端板樁與拉牆、鋼管板樁的抗張力材料。一般土木工程與海事工程使用之鋼拉桿，按工程項目需求區分為【一節型】【兩節接桿型】及【四節接桿型】等之型式，主要用於港口或河川相關項目。在港口主要用於碼頭、護岸、防波堤的基礎部分；在河川主要用於護岸，堰堤，導流壩，水門，防護壁的基礎部分。施工法有鋼板樁法、鋼管樁法及雙重鋼板樁法。鋼拉桿作為這些板樁式結構的前樁和固定樁，板樁壁和扶壁，或者板樁之間的張力材料而使用，在結構的安全和穩定性是不可缺少的建築材料。

### 1. 序言

日本合鐵產業株式會社 (Gotetsu Sangyo Co., Ltd.) 成立於 1947 年 7 月 (前身為近畿木材工業株式會社，歷經多次業務調整及整併，於 2002 年 7 月與當時合鐵建材株式會社合併，正式改名為合鐵產業株式會社)，跨足鋼鐵製品、鋼鐵原生材料、建材、工程服務等領域，其中以生產土木工程所用鋼拉桿 (Steel Tie Rod)、鋼拉桿的預組裝 G K 施工法、沉箱吊筋、基礎螺栓、建築用張力桿(鋼拉桿)之建材部最廣負盛名，1999 年通過 ISO9001 認證 (圖 1)，在嚴格的質量管理體制下，進行從原料至加工、檢驗、塗裝與發貨的一系列工藝都在高品質規範中進行質量管理體制。會社長期投入致力土木工程材料研發，目前已研製開發了無需熱處理的鋼拉桿 (NHT690G) 技

術，且已廣泛運用於土木工程項目，並獲得業界好評。

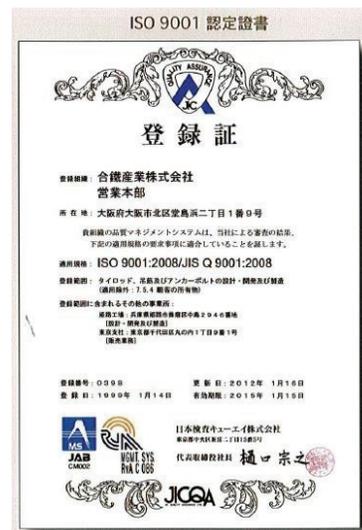


圖 1. ISO 9001 認定證書

### 2. 本文

#### §2-1 鋼拉桿介紹

鋼拉桿係一種運用於土木工程之板樁式構築物中連接前板樁與拉牆、鋼管板樁的抗張力材料。

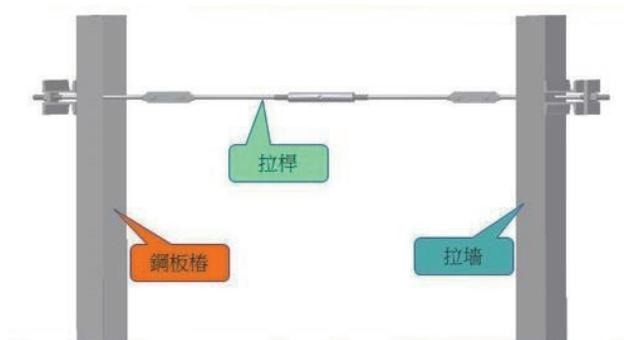


圖 2. 鋼拉桿運用示意圖

鋼拉桿主要特徵為螺紋部位與環形部位的強度均大於桿體的強度，如圖3所示，即a區域之 $D < D1$ 。

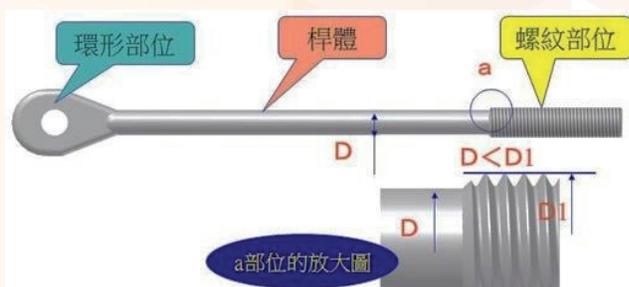


圖3. 鋼拉桿特徵即a區域之 $D < D1$

鋼拉桿之材料成份，以往及現有之技術並普通鋼 SS400，日本合鐵產業株式會社致力研發無需熱處理的鋼拉桿 (NHT690G)，不同於傳統高張力鋼拉桿只能鍛造後加以熱處理才能滿足鋼板樁施工準則規範所定之機械力學性能之強度規定 (表1)，採用非調質處理鋼，不加以熱處理就能滿足規範強度 (尺寸限直徑 42 毫米以上)，具縮短產製時間，降低等貨期、減少生產成本及降低二氧化碳排放之特性 (表2)。

SS400	NHT690(G)
普通鋼	高張力鋼
屈服點 大于235N/mm <sup>2</sup> φ 25~38 大于215N/mm <sup>2</sup> φ 42~90	屈服點 大于440N/mm <sup>2</sup> φ 25~90

表1. 拉桿的鋼種別對比表

拉桿的鋼種別對比表		
	SS400	NHT690(G)
施工性能	良	優
交貨期	早	晚
經濟效果	良	優
*NHT690G:採用非調質處理鋼		

表2. 拉桿的鋼種別對比表

因 NHT690G 材料係使用富於韌性的非調質處理鋼，因此軋鋼後結晶粒呈現細粒，對此加熱並加以鍛鍛加工後，結晶粒雖然呈現粗大化，但是鍛鍛加工後再加以強冷卻工藝就可回復原來的細粒結晶狀態，異於傳統高張力鋼拉桿 NHT690 經鍛鍛加工後，需連續熱處理爐對整體桿體加以正火處理而成為富於韌性的鋼拉桿之材質更具穩定之品質 (圖4)



圖4. 上圖為 NHT690G 下圖為 NHT690



### §2-1 鋼拉桿之配件構成

鋼拉桿之配件構成主要有鋼拉桿桿體 (圖5)、套筒螺母 (圖6)、六角頭螺栓、螺帽、墊圈 (圖7) 及環形板 (圖8) 等四項。

§2-1-1 鋼拉桿桿體是鋼拉桿本體，端部按不同的連接方法有不同的形狀，亦兼備調整與栓緊之作用。

#### ● 鋼拉桿桿體

是鋼拉桿本體。端部按不同的連接方法有不同的形狀，亦兼備調整與緊張的作用。

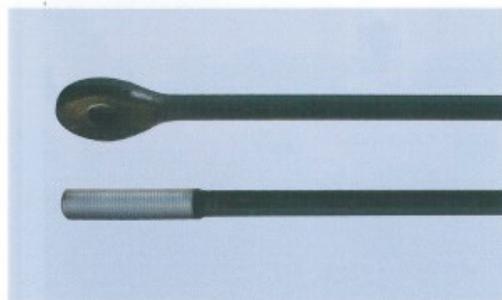


圖5. 鋼拉桿桿體

§2-1-2 套筒螺母是在桿體較長的狀況下所使用的配件,將鋼拉桿長度的調整留量要大的時候不可缺少的配件。

#### ●套筒螺母

是在桿體較長的場合下使用的配件。將鋼拉桿長度的調整留量要大的時候亦不可缺少的配件。



圖 6. 套筒螺母

§2-1-3 六角頭螺栓、螺帽、墊圈係用於環形板的連接使用。

#### ●六角頭螺栓，螺帽，墊圈

用於環形板的連接  
(照片為六角頭螺栓)。



圖 7. 六角頭螺栓、螺帽、墊圈

§2-1-4 環形板係對於鋼板樁之上下振動或下沉予以緩衝作用之配件，一般在海事工程之港灣項目施工中被廣泛地使用。

#### ●環形板

對鋼板樁的上下振動或下沉予以緩衝作用的配件。一般在港口與漁港的施工都被廣泛地使用。

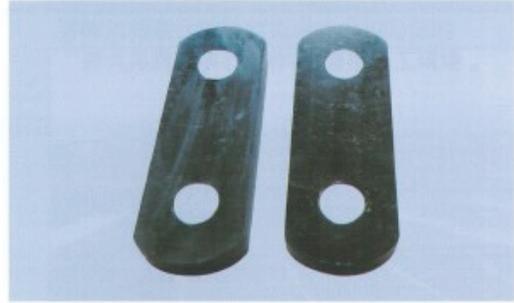


圖 8. 環形板

§2-2 土木工程用鋼拉桿之構成型態

一般土木工程運用之鋼拉桿構成型態區分為一節型、兩節接桿型及四節接桿型等三種常見樣式(圖 9)。



圖 9. 土木工程用常見之鋼拉桿構成型態

§2-2-1 一節型係一支拉桿桿體，以緊固用螺母連結固定兩端板樁式結構(圖 10)。



圖 10. 一節型鋼拉桿型態

§2-2-2 兩節接桿型係二支拉桿桿體，中間以套筒螺母連接，兩端以緊固用螺母連結固定板樁式結構式結構（圖 11）。



圖 11. 兩節接桿型

§2-2-3 四節接桿型係四支拉桿桿體，中間二桿體連接採兩節接桿型型態連接，但左右兩端各以環形部位與另一組同具環形部位之拉桿桿體以環形板連接，串連四支拉桿桿體，兩末端以緊固用螺母連結固定板樁式結構式結構（圖 12）。



圖 12. 四節接桿型

§2-2-4 上述三種常見之鋼拉桿構成型態之長度可經由鋼拉桿桿體螺絲、套筒螺母內絲之調整產生長度微調之功能。按不同工程項目，鋼拉桿可經由不同之配件構成組合 2 節至 6 節拉桿之不同型態，以滿足相異工案之需求（表 3）。

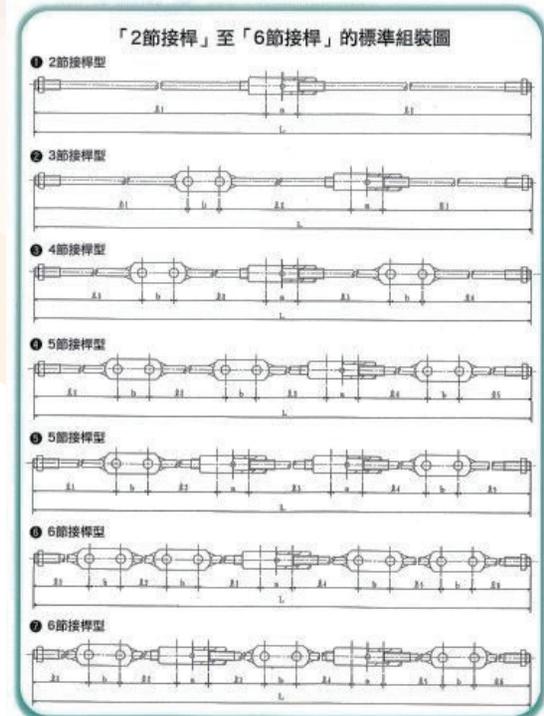


表 3. 2 節至 6 節拉桿之不同型態

### §2-3 鋼拉桿使用須知

#### §2-3-1 正確的使用方法

1. 在鋼拉桿桿體及其配件直至在地組裝之前，皆勿打開原廠包裝，若不得已需長期堆置於露天儲存時，務必要覆蓋防雨罩。
2. 鋼拉桿以與鋼板樁呈直角安裝為原則，如果對鋼板樁傾斜地安裝時，應放傾斜墊圈，使螺母與鋼拉桿中心線呈直角為準。
3. 使環形連接板能夠上下轉動而安裝。
4. 在緊固桿體端的螺帽時，使桿體端的螺紋牙以至少往外露三個牙為準。

#### §2-3-2 嚴禁熔斷、焊接與熔敷

1. 在調整桿體長度或修補螺紋牙的損傷時，切勿採用熔或熔敷之方法進行修補。
2. 勿將電防蝕材料等之零部件焊接在桿體。
3. 在施工現場進行焊接時，勿將鋼拉桿放電弧，或者在鋼拉桿上連接拉地線。

### §2-4 製造工藝

鋼拉桿從原料之訂購開始，依序使用電

爐、連續鑄造機與軌鋼機生產原材料（圓鋼）後再對原材料進行鍛鍛加工、切削螺紋、穿孔、檢驗及表面處理等製造工藝，進行一貫性之生產，確保產品品質之質量並符合項目施工規範（圖 13）。

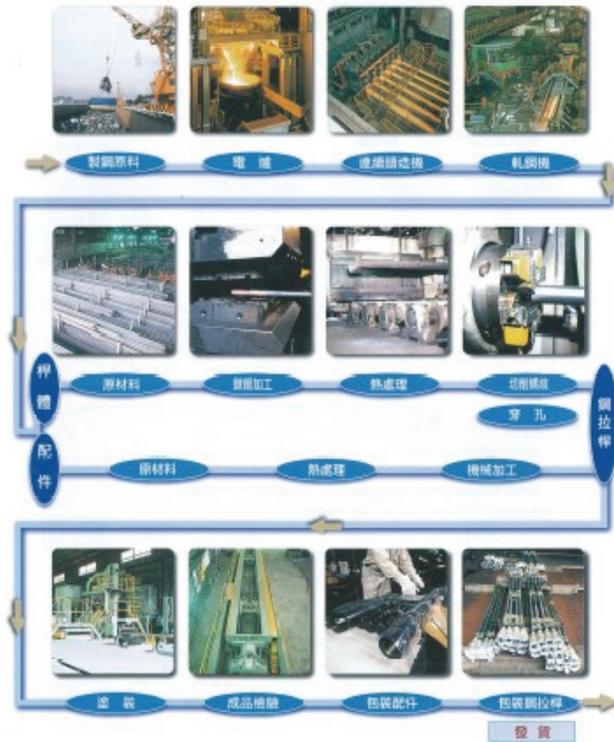


圖 13. 鋼拉桿製造工藝

## §2-5 鋼拉桿桿體螺紋切削之種類

### §2-5-1 鍛鍛（鍛造成型）加工（圖 14）

鍛鍛加工方法係較高規格亦即日本合鐵產業株式會社鋼拉桿製成標準技令【1】，本加工方式係經過鍛鍛加工，使端部粗大而進螺紋切削加工。由於螺紋內徑大於桿體直徑，則可以按照桿體直徑進行設計，由於鍛鍛過程中使用模具，因此桿體直徑及其螺紋長度是固定的，棒徑共有 19 個種類，直徑自 25 毫米至 90 毫米。

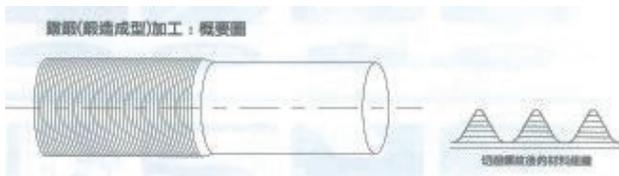


圖 14. 鍛鍛（鍛造成型）加工概要圖

### §2-5-2 直接切削螺紋加工（圖 15）

直接切削螺紋加工方法係直接切削桿體並加以螺紋，經過螺紋切削工藝，螺紋內徑小於棒徑，因此不能按照棒徑進行設徑。雖然本加工方法是最簡單之方法，但是當使用時，要考慮機械力學性能，必須採用比鍛鍛加工品更大加工鋼拉桿粗之直徑。

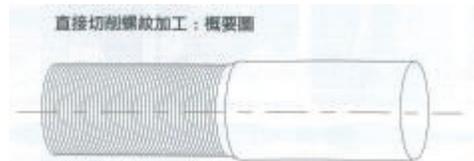


圖 15. 直接切削螺紋加工概要圖

## §2-6 鋼拉桿材料之種類及其機械力學性能與容許應力強度

### §2-6-1 機械力學性能（比較普通鋼及高張力鋼材料）（表 4）

種類	屈服點 斷面尺寸	抗拉強度		伸長率	
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	斷面尺寸	%
普通鋼	JIS G3101 SS400 直徑16mm以上-40mm以下 直徑40mm以上-100mm以下	235以上	400~510	直徑25mm以下	20以上
		215以上		直徑25mm以上	22以上
高張力鋼	NHT690 NHT740	440以上	890以上	19以上	
		540以上	740以上	18以上	

●一經地來鋼,SS400與NHT690被廣泛地使用。(NHT690相當於NHT690)  
(NHT740相當於NHT740)

表 4. 機械力學性能

### §2-6-2 容許應力強度（比較普通鋼及高張力鋼材料）（表 5）

種類	斷面尺寸	平均	
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
普通鋼	JIS G3101 SS400 直徑16mm以上-40mm以下 直徑40mm以上-100mm以下	94	141
		86	129
高張力鋼	NHT690 NHT740	176	264
		216	324

表 5. 容許應力強度

### §2-7 鋼拉桿與配件標準尺寸，以 NHT690G 及

NHT690 為例（表 6、7）。



**表 10. 鋼拉桿表面積簡表**

§2-9-2 鋼拉桿防蝕塗裝之種類 (表 11)

§2-9-2-1 基底處理之 1 種防銹，係經砂布、噴砂器與噴丸機處理，使金屬露出原色之加工法

§2-9-2-2 基底處理之 2 種防銹，係經鋼絲刷與砂布處理，使氧化皮棕色的銹得以清除之加工法。

**鋼拉桿防蝕塗裝之種類**

塗裝名稱	塗料名稱	基底處理	該公司使用的塗料名稱	備 註
助 漆	助漆防銹			
黑 漆	黑漆	按客戶要求處理	黑漆 S 塗層 NO.16	用於一次塗裝。塗兩次黑漆時，用 S 塗層厚塗一次。
漆 青 環 氧 富 錳 塗 裝	取頓 2300F 黑色	1 種防銹	取頓 2300F 黑色	
無 機 富 錳 富 錳 塗 裝	3DC 塗層 402T 環保	1 種防銹	3DC 塗層 402T 環保	
非 環 氧 富 錳 塗 裝	漆 青 帶 O.L. NIPPE 少亮 1000P	1 種防銹	漆 青 帶	
漆 青 塗 裝	3DC 塗層 201 S 塗層	2 種防銹	3DC 塗層 201	

**表 11. 鋼拉桿防蝕塗裝之種類**

§2-10 一般用公制螺紋標準尺寸 (表 12)

**一般用公制螺紋的標準尺寸**

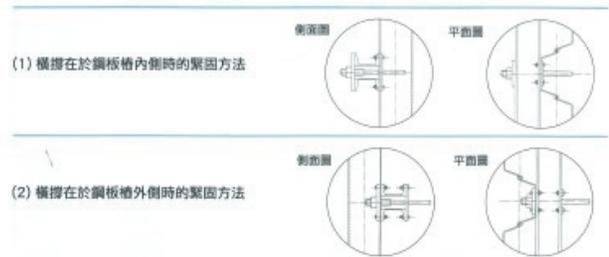
螺紋規格		螺 距	旋合 高度	外 螺 紋			內 螺 紋			備 註
1	2			外 徑	有效直徑	螺紋內徑	螺紋內徑	有效直徑	內 徑	
M 24		3	1.624	24.000	22.051	20.752	24.000	22.051	20.752	一般用 公制螺紋
	M 27	3	1.624	27.000	25.051	23.752	27.000	25.051	23.752	
M 30		3.5	1.894	30.000	27.727	26.211	30.000	27.727	26.211	
	M 33	3.5	1.894	33.000	30.727	29.211	33.000	30.727	29.211	
M 36		4	2.165	36.000	33.402	31.670	36.000	33.402	31.670	
	M 39	4	2.165	39.000	36.402	34.670	39.000	36.402	34.670	
M 42		4.5	2.436	42.000	39.077	37.129	42.000	39.077	37.129	
	M 45	4.5	2.436	45.000	42.077	40.129	45.000	42.077	40.129	
M 48		5	2.706	48.000	44.752	42.587	48.000	44.752	42.587	
	M 52	5	2.706	52.000	48.752	46.587	52.000	48.752	46.587	
M 56		5.5	2.977	56.000	52.428	50.046	56.000	52.428	50.046	
	M 60	5.5	2.977	60.000	56.428	54.046	60.000	56.428	54.046	
M 64		6	3.248	64.000	60.103	57.505	64.000	60.103	57.505	
	M 68	6	3.248	68.000	64.103	61.505	68.000	64.103	61.505	
M 72		6	3.248	72.000	68.103	65.505	72.000	68.103	65.505	
	M 76	6	3.248	76.000	72.103	69.505	76.000	72.103	69.505	
M 80		6	3.248	80.000	76.103	73.505	80.000	76.103	73.505	
	M 85	6	3.248	85.000	81.103	78.505	85.000	81.103	78.505	
M 90		6	3.248	90.000	86.103	83.505	90.000	86.103	83.505	
	M 95	6	3.248	95.000	91.103	88.505	95.000	91.103	88.505	
M 100		6	3.248	100.000	96.103	93.505	100.000	96.103	93.505	

**表 12. 一般用公制螺紋標準尺寸**

§2-11 鋼拉桿之安裝方法

§2-11-1 緊固於前板樁的方法

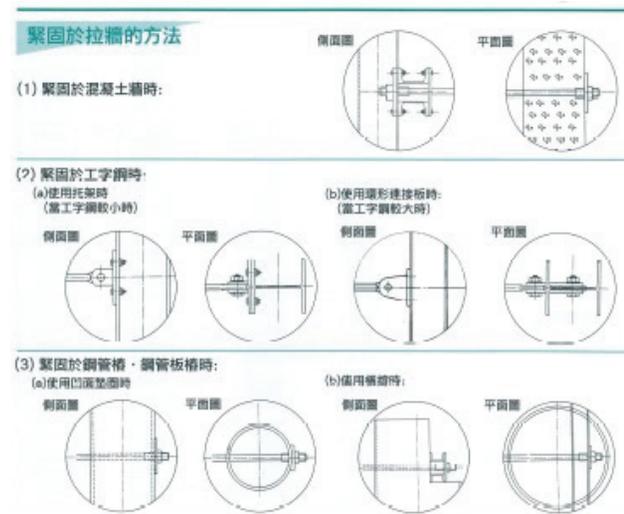
鋼拉桿要緊固於鋼板樁內側或外側所安裝之橫撐材料上 (一般為槽鋼) (圖 16)，當緊固時，必須與鋼板樁的法線呈直角緊固為原則，上述之橫撐材料是為了用鋼板樁做成的牆壁之【一體化】及其凸凹之【矯正】而使用的，基此，做完牆壁後必須及時安裝橫撐材料，而橫撐材料的安裝方法有緊固於鋼板樁內側或外側的兩種方法。



**圖 16. 緊固於前板樁的方法**

§2-11-2 緊固於拉牆的方法

緊固於拉牆的方法有：【緊固於混凝土牆時】、【緊固於 H 型鋼時】、【緊固於鋼管樁、鋼管板樁時】等三種方法 (圖 17)，但無論如何，必須考慮各種條件狀況，對於鋼材的種類與尺寸進行充分之強度計算，以保證高於鋼拉桿之強度。



**圖 17. 緊固於拉牆的方法**

§2-12 合鐵產業株式會社研製開發之鋼拉桿 預先組裝法

鋼拉桿預先組裝法 (GK 施工方法) 是目

前鋼拉桿材料運用於港灣工程可在最短時間內，用最簡單的方式之施工法，作為鋼板樁或鋼管板樁等的背拉材料而使用的鋼拉桿，隨著港口的大型化開發需求，其所需材料長度亦日趨增長，接頭也越來越多，直徑越來越大，施工更為耗時，為了解決上述問題而研發【預先組裝 GK 施工法】，其運用之程序，係於陸地預先組裝配件，再裝預先組裝好之鋼拉桿用特殊開發之【長大吊具】裝於工作船，運抵施工現場後使用【長大吊具】安裝鋼拉桿，此工法不僅工作簡便、施工時間短，更能確保現場施工人員之安全，有效降低工安意外（圖 18）。

在短時間內能夠簡單地做好的施工法  
鋼拉桿預先組裝法(GK施工方法)

作為鋼板樁或鋼管板樁等的背拉材料而使用的鋼拉桿，隨著港口的大型化，其長度越來越長(接頭也越來越多)，直徑越來越大，施工需要較長的時間。為了解決這些問題，我公司研製開發了「預先組裝GK施工法」。

工作程序

①預先組裝(套筒螺母)



在地置場預先組裝配件。

②裝於工作船



將預先組裝好的鋼拉桿用我公司開發的「長大吊具」裝於工作船，運抵施工現場。

由於預先組裝法簡單，  
「工作簡便」  
「施工時間短」

而且

「能夠確保安全」

因此，施工人員能夠比以前更舒服地進行工作。

③在工地安裝(1)



在工地使用長大吊具併安裝鋼拉桿。

④在工地安裝(2)



圖 18. 鋼拉桿預先組裝法 (GK 施工方法)

§2-13 施工實例

一般鋼拉桿廣泛運用於港灣工程施作，全世界皆有實作案例（表 13）、（圖 19-25），近期在台灣亦被使用於台北港及基隆港台灣

國際造船（股）公司船塢等相關工程中，施工成效良好，其耐用性更勝於其他異種材料。

1	蘇丹 Aliab & Kitiab 泵站	11	瓦努阿圖共和國 Tanna島碼頭修建
2	台灣 台灣國際造船（股）基隆造船廠	12	洪都拉斯共和國 Tegucigalpa橋樑
3	菲律賓 Kananava 防汛及排水整修工程	13	多米尼加共和國 Roseau港港修建
4	台灣 台北港第二散雜貨中心擴建	14	越南社會主義共和國 海防港修建
5	菲律賓 棉蘭老島Taganito碼頭擴建	15	新加坡 裕廊島新建第三期工程
6	阿爾及利亞 東西道路	16	英屬邦Antigua & Barbuda國 Saint John's 漁港卸貨暨配送中心
7	馬達加斯加共和國 Ehoala港擴建	17	多米尼加共和國 漁港修建
8	新加坡 裕廊島 Universal Oil Terminal	18	菲律賓 棉蘭老島 General Santos港
9	埃及 Bah rYusef運河灌溉用水堰堤	19	菲律賓 馬尼拉 Bitas泵站
10	菲律賓 Batangas港碼頭擴建	20	印度尼西亞 Paiton熱電站

表 13. 施工案例（列舉）

緊固於橫樑部位



橫樑在預板時

橫樑在拉桿時

鋼拉桿的施工情況（部分）

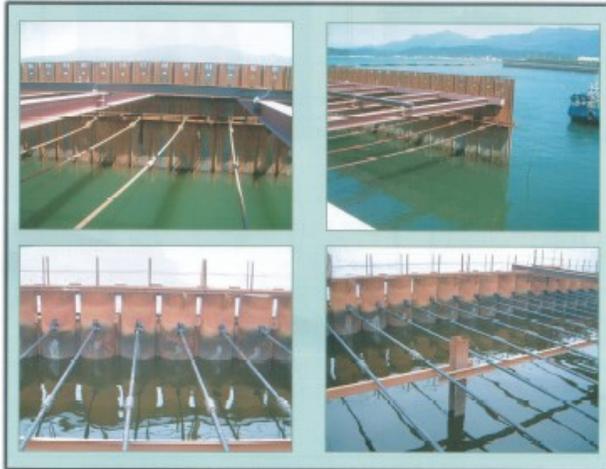


圖 19. 施工實例



圖 20. 施工實例-海上施工

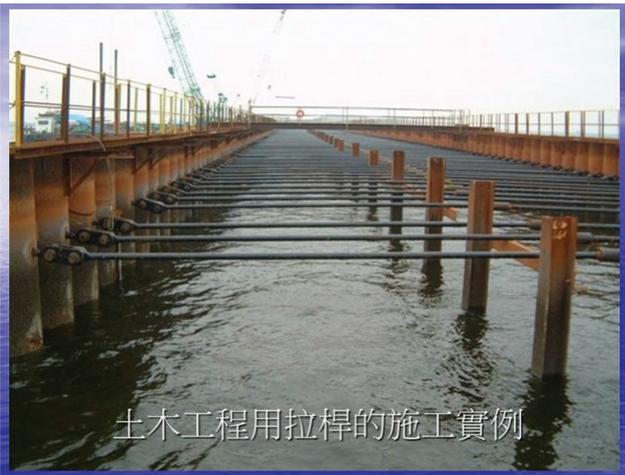


圖 21. 施實例

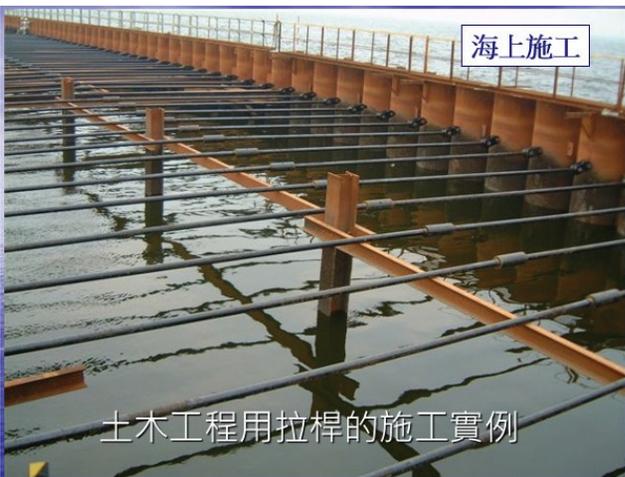


圖 22. 施實例-海上施工

圖 23. 施實例-陸上施工

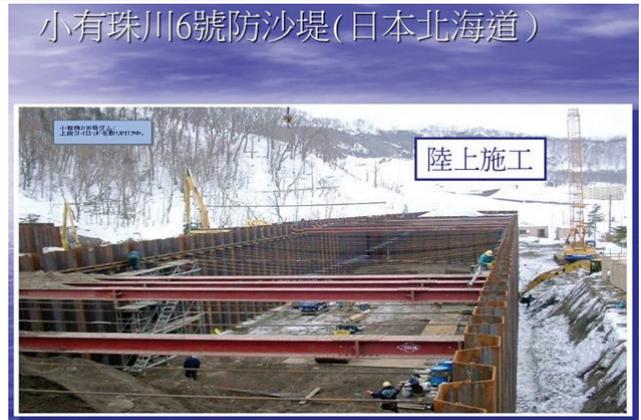


圖 24. 施實例-埃及灌溉用水堰堤



圖 25. 施實例-北海道小有珠川 6 號防沙堤

### 3. 總結

鋼拉桿廣泛運用於土木工程項目已行之

目錄

臺灣

中國

日本

澳門

香港

有年，在全球各地之港口、碼頭、護岸、防波堤之基礎、河川護岸、堰堤、導流壩、水門、防護壁基礎皆有成功案例。日本合鐵產業株式會社整合所屬鋼鐵製品、鋼鐵原生材料、建材、工程服務等部門，致力研發及生產結構安全和穩定性極佳之無需熱處理的鋼拉桿（NHT690G）新技術材料，經由施工實例回饋技術跟進開發鋼拉桿預先組裝法（GK施工方法），有效提升施工效率並降低工安事故，開展鋼拉桿材料技術運用之更新境界。

E-mail :

[lin.luciano@yahoo.es](mailto:lin.luciano@yahoo.es)

lucianowei@gmail.com

#### 4. 參考文獻

【1】 鍛鍛（鍛造成型）加工之鋼拉桿規格標準，平時：屈服點的 40%；地震時：屈服點的 60%-日本港灣協會編【關於港灣設施的技術標準・解說】。

#### 5. 作者簡介

##### 1. 北澤理史

日本合鐵產業株式會社建材部部長

日本北九州大學外國語學院中文系

綜合性貿易商社從事國際貿易工作長達 31 年，分別被派駐中國上海、大連、北京、深圳及菲律賓馬尼拉。

目前擔任日本合鐵產業株式會社建材部部長，負責拉桿工程材料研發及海外市場開拓。

E-mail : s.kitazawa@go-sun.co.jp

##### 2. 林威宏

社團法人台灣營造工程協會秘書長

國立台灣大學管理學博士

Universidad Complutense de Madrid ,España

企業管理碩士、藝術創作碩士

2014 亞太城市建設論壇籌備會秘書長

## 石油運輸管道表面裂紋的疲勞擴展計算

楊楊<sup>1</sup>；高冠鵬<sup>2</sup>；林智超<sup>3</sup>

<sup>1</sup>博士研究生, <sup>2</sup>副教授, <sup>3</sup>助理教授, 澳門大學土木和環境工程系

澳門, 中國

### 摘要

本文基於線彈性斷裂力學原理計算裂紋擴展的應力強度因子(SIF), 應用Paris' law, 研究含裂紋石油運輸管道在循環拉應力下的洩漏週期和疲勞極限。為了符合實際裂紋的增長情況, 從表面裂紋擴展到部分穿透裂紋一直到最後的完全穿透裂紋均考慮在模擬裂紋發展過程內。通過對各相關參數的研究, 表明管道結構洩漏期限決定於疲勞荷載的加載速率以及初始表面裂紋的長度。並將研究結果運用於一具體的海洋平台建築和荷載情況的分析, 得到對於此構建進行洩漏檢測(FMD)的間隔週期為3年。

**關鍵字:**洩漏週期; 疲勞極限; 石油運輸管道; 斷裂力學; Paris' law; 洩漏構建檢測

### 1. 序言

2013年11月22日, 中國山東省青島市黃島區一起中國石化公司輸油管道洩漏, 起火及爆燃

事故, 導致62人死亡, 136人受傷, 造成大約3000平方米海面原油污染。2010年4月20日英國石油公司一鑽油平台故障出現原油洩漏並發生爆炸, 造成11名工作人員死亡及17人受傷。據估計每天平均12000到100000桶原油洩漏到墨西哥灣, 這就是引起世界轟動的墨西哥灣漏油事故。顯而易見, 運輸石油的管道從建成到投入使用, 都會存在不同程度的瑕疵和細微裂紋。在管道投入使用期間會受到外部荷載作用, 這些表面裂紋在荷載的作用下出現增長, 直至裂紋穿透管壁, 造成運輸的物體出現洩漏, 如果這些洩漏未被工作人員及時發現, 裂紋會在荷載作用下繼續擴展導致最後管道沿裂紋擴展面斷裂, 引起整個結構破環。而不管是石油洩漏或是整個結構斷裂破壞都會造成很大的事故及傷亡, 因此對投入使用的石油運輸管道進行及時監測, 評估裂紋的擴展情況具有十分重要的意義。

1999年, Ahn<sup>[1]</sup> 提出一條計算外部周圍表面裂紋在彎曲應力作用下 SIF 的公式。結合 Paris' law 和 SIF 得到外部表面裂紋管狀結構的洩漏週期。同年, Yoo<sup>[2]</sup> 運用相同理論, 提出計算內部周圍表面裂紋 SIF 的計算公式, 並得到內部表面裂紋管狀結構在彎曲應力作用下的洩漏週期。而這兩者都基於一個假設, 只要裂紋穿透管道遠處的壁, 裂紋就被定義為完全穿透裂紋, 也就是在管道厚度方向兩壁上裂紋長度相等。然而當裂紋剛剛穿透管道遠處壁時, 裂紋的長度是從一點慢慢發展直到與另一壁上的長度相等, 而這一過程在管道裂紋擴展中被認為是非常重要的階段, 在本文中將這一階段定義為部分穿透裂紋。將表面裂紋發展為部分穿透裂紋直至完全穿透裂紋整個過程考慮在內, Kou<sup>[3,4]</sup> 得出外部表面裂紋在遠處疲勞拉應力荷載作用下穿透管狀結構的疲勞分析。在運輸石油管道中, 裂紋從內部擴展直至穿透也是一種經常存在且重要的情況, 因此本文著重研究, 內部表面裂紋石油管道結構在疲勞拉應力荷載作用下的疲勞極限。在早期研究中, 作者已經得到石油管道內部表面裂紋, 部分穿透裂紋以及完全穿透裂紋在拉應力作用下的標準化 SIF (NSIF), 並通過曲線擬合方法將 NSIF 用含有管道結構及裂紋幾何參數((1) 裂紋深度(a)和管道厚度(T)的比率(a/T);(2)

管道外半徑(R)和管道厚度(T)的比率(R/T);(3)裂紋長度(c)和管道外半徑( $\pi R$ )的比率( $c/\pi R$ ))的方程表示。本文運用這些計算 NSIF 的公式以及 Paris' law 和 BS7910<sup>[5]</sup> 中的相關參數預測石油管道內部表面裂紋在循環拉應力作用下的增長形態和疲勞極限。並運用本文中的方法計算 EQE Ltd<sup>[4]</sup> 提供的一深海石油管道投入運營的洩露檢測週期。

## 2. 斷裂管狀結構的疲勞分析

本文運用 Paris' law(公式(1))和裂紋增長的 SIF 對鋼管管狀結構進行疲勞分析。在 Paris' law 中,  $A^b$  和  $m$  是管狀結構材料常數從 BS7910 中取值列於表 1。根據變化的 SIF,  $\Delta K$ , 裂紋增長可以被分為兩個階段:  $\Delta K$  小於  $290\text{N}/\text{mm}^{3/2}$  為階段 A, 大於此值的為階段 B。

$$\frac{da}{dN} = A^b (\Delta K)^m \quad (1)$$

表 1 疲勞分析常數取值與 BS7910

Yield stress $\sigma_y$		350N/mm <sup>2</sup>
Stage A	$A^b$	$2.10 \times 10^{-17}$
	$m$	5.1
Transition $\Delta K$		290N/mm <sup>3/2</sup>
Stage B	$A^b$	$2.02 \times 10^{-11}$
	$m$	2.67
Toughness $K_{IC}$		2500, 4250, 8000 N/mm <sup>3/2</sup>

由於本文模擬裂紋實際擴展過程, 裂紋增長經過表面裂紋, 部分穿透裂紋和完全穿透裂紋過程, 因此對這三個過程逐一進行疲勞分析。

### 2.1 表面裂紋疲勞分析

圖 1 為管狀結構周圍表面裂紋模型。由於裂紋在增長過程中，裂紋長度和深度都在同時增長，因此運用沿著裂紋面最表面點和最深處點作為參考點來定義裂紋的位置。

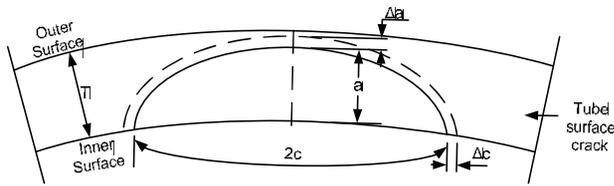


圖 1 管狀結構表面裂紋增長

每一次循環荷載加載下，增長的裂紋長度  $\Delta c$  和裂紋深度  $\Delta a$  對於表面裂紋最表面點和最深處點運用 Paris' law 可根據公式(2)計算得到。其中  $\Delta K_{sa}$  和  $\Delta K_{sc}$  分別代表裂紋最深處點和最表面點的 SIF 值，它是基於目前裂紋尺寸根據早期研究計算 NSIF 的公式計算得到。對於每一次循環荷載， $\Delta K_{sa}$  和  $\Delta K_{sc}$  假設為定值。

$$\left. \begin{aligned} da &= \int_0^1 A^b (\Delta K_{sa})^m dN = A^b (\Delta K_{sa})^m \\ dc &= \int_0^1 A^b (\Delta K_{sc})^m dN = A^b (\Delta K_{sc})^m \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta K_{sa} &= S\sqrt{\pi c} F_{sa} \\ \Delta K_{sc} &= S\sqrt{\pi c} F_{sc} \end{aligned} \right\} (3)$$

計算之後，得到以  $a+\Delta a$  為短軸長， $c+\Delta c$  為長軸長的新半橢圓表面裂紋用虛線在圖 1 中表示出來。重複計算直到表面裂紋剛好穿透管道外表層達到部分穿透裂紋狀態。

## 2.2 部分穿透裂紋疲勞分析

對於部分穿透裂紋，由於模擬的裂紋深度大於管道厚度，因此將採用一個虛擬的裂紋深度。採用沿裂紋表面距離管道內壁  $0.99T$  處的垂直

增長高度  $\Delta e$  來替代裂紋最深處點的增長作為裂紋深度的增長量，裂紋長度增長量與表面裂紋長度增長量相同如圖 2 所示。運用相同的原理，每一次荷載加載下，部分穿透裂紋的幾何增長量由公式(4)計算得出。重複計算直到部分穿透裂紋發展為外表面長度與內表面長度相等即為完全穿透裂紋。

$$\left. \begin{aligned} de &= \int_0^1 A^b (\Delta K_{pe})^m dN = A^b (\Delta K_{pe})^m \\ dc &= \int_0^1 A^b (\Delta K_{pc})^m dN = A^b (\Delta K_{pc})^m \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta K_{pe} &= S\sqrt{\pi c} F_{pe} \\ \Delta K_{pc} &= S\sqrt{\pi c} F_{pc} \end{aligned} \right\} (5)$$

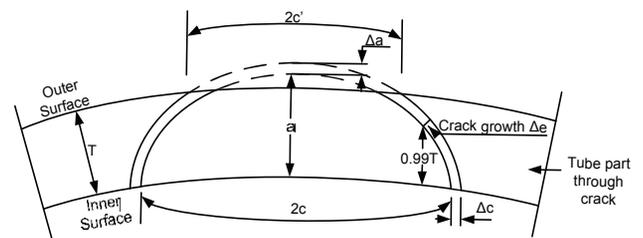


圖 2 管狀結構部分穿透裂紋增長

## 2.3 完全穿透裂紋疲勞分析

在此階段，假設沿裂紋面的 SIF 為一定值並等於最大值。在這個假設下，只需考慮裂紋在圓周方向的增長量如圖 3 所示，運用公式(6)和(7)計算得到。裂紋持續增長直至結構破壞發生。

$$dc = \int_0^1 A^b (\Delta K_{tc})^m dN = A^b (\Delta K_{tc})^m (6)$$

$$\Delta K_{tc} = S\sqrt{\pi c} F_{tc} (7)$$

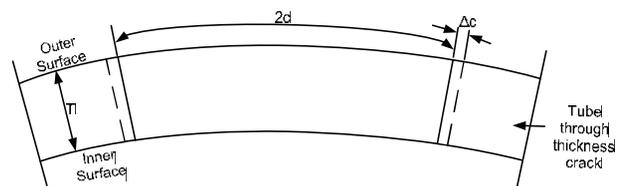


圖 3 管狀結構完全穿透裂紋增長

## 2.4 斷裂評估

從表面裂紋增長直到最終結構斷裂破壞，總的荷載循環次數將被計算出來。而對於每一次裂紋增長，新的裂紋尺寸會用第 3 級斷裂評估圖表(FAD)<sup>[5,6]</sup>(公式(8))如圖 4 來檢測。在公式(8)中， $K_{app}$ 是在現荷載情況下，斷裂構建的最大 SIF， $K_{mat}$ 和  $\sigma_y$ 分別是構建材料的韌性和屈服強度。 $\sigma_{eff}$ 是有效截面倒塌應力<sup>[7]</sup>。通過比較在現荷載情況下計算得到的 SIF(K)和  $K_{app}$ ，來判斷構建是否破環。如果 K 小於  $K_{app}$ ，則擁有現在裂紋尺寸的管狀結構還在安全範圍以內，則工作人員有足夠的時間對管道上的裂紋進行修補工作，避免裂紋持續擴展。相反，則現在的裂紋尺寸足以導致管狀結構斷裂破壞。通過圖 4 可以看到，任意低於 3 級 FAD 線的點 S，對於構建仍處於安全階段，然而點 F 位於 3 級 FAD 線之上則會導致構建的斷裂破壞。

$$\left. \begin{aligned} K_r &= (1 - 0.14L_r^2)\{0.3 + 0.7e^{-0.65L_r^6}\} \\ K_r &= \frac{K_{app}}{K_{mat}} \\ L_r &= \frac{\sigma_{eff}}{\sigma_y} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

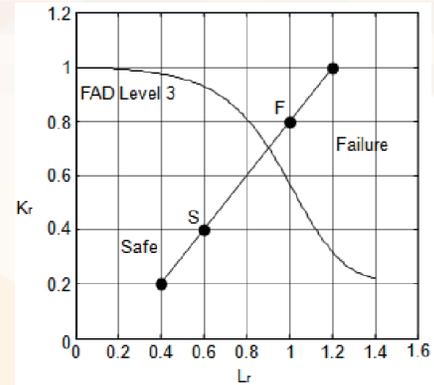


圖 4 3 級斷裂評估圖表

## 3. 疲勞分析結果

分別將裂紋擴展的三個階段連接起來就可以顯示裂紋發展的整個形態。以內部圓周半橢圓表面裂紋  $a/T=0.8$ ， $c/\pi R=0.074$  為例，此裂紋在循環荷載 100MPa 拉應力作用下從表面裂紋增長直到斷裂的整個過程用圖 5 表示出來。整個增長過程被兩條豎線分為三個階段，即表面裂紋，部分穿透裂紋和完全穿透裂紋。在第一階段，表面裂紋在圓周方向和深度方向同時增長，小幅度的內壁裂紋長度的增長反映出裂紋深度的增長速率高於長度增長速率。經過一定量循環荷載加載之後，裂紋穿透管道外壁，增長為部分穿透裂紋。在此階段，外壁裂紋長度增長迅速在很短週期內趕上內壁裂紋增長速率，因此部分穿透裂紋的外壁裂紋增長速率大於內壁裂紋增長速率，直到內外壁裂紋長度相等裂紋發展為完全穿透裂紋。裂紋繼續發展當達到臨界裂紋長度時，構建斷裂破壞。從部分穿透裂紋的開始到最終斷裂破壞的過程被

記為洩漏週期。

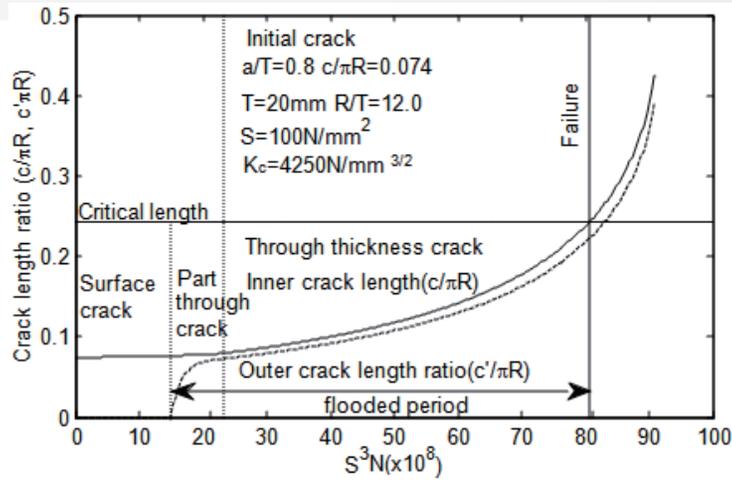


圖 5 管道構建的裂紋增長過程

研究中各種獨立參數都會對裂紋增長有不同程度的影響，因此對參數影響做了具體分析，結果表示在圖 6 到圖 10 中。從這些圖中可以看出，隨著初始裂紋長度，深度以及 R/T 的增長會降低整個管道的疲勞極限。然而增加管道的材料韌性會提高疲勞極限。增大循環荷載可以降低循環應力頻率，從而提高疲勞極限。這些獨立參數不僅影響管道的疲勞極限也對管道的臨界裂紋長度有一定的影響，這些影響在圖 7 到圖 10 中表示出來。斷裂管道的臨界裂

紋長度隨著 R/T, S 的增加而減小，只有增加  $K_c$  才會使臨界裂紋長度增加。

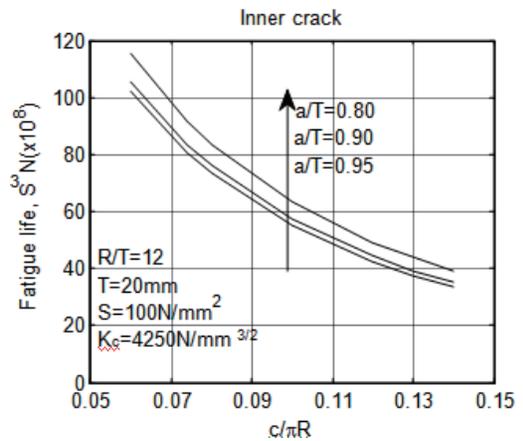


圖 6 疲勞極限隨  $c/\pi R$  的變化

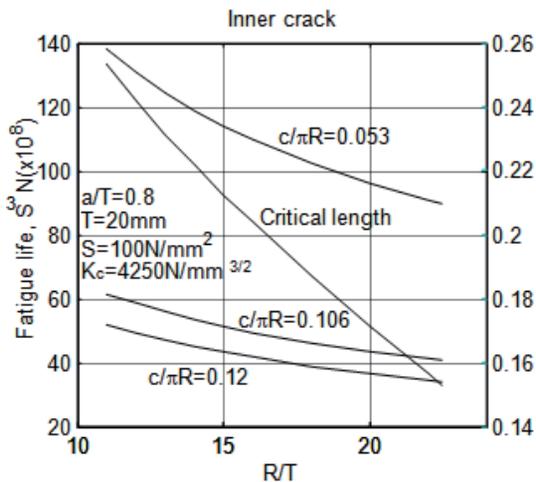


圖 7 疲勞極限隨 R/T 的變化

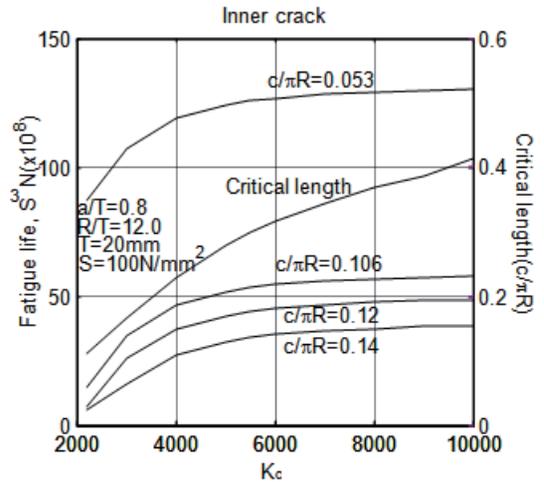


圖 8 疲勞極限隨  $K_c$  的變化

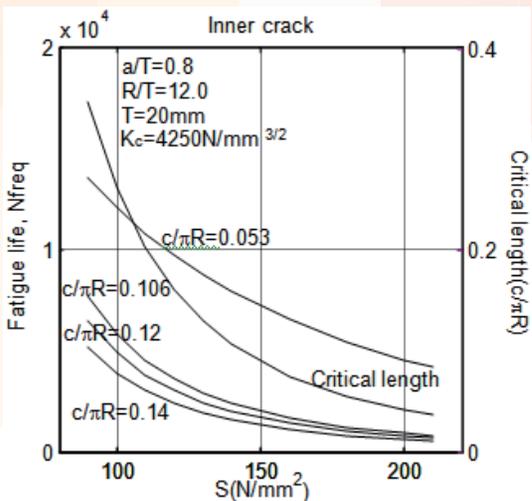


圖 9 疲勞極限隨 S 的變化

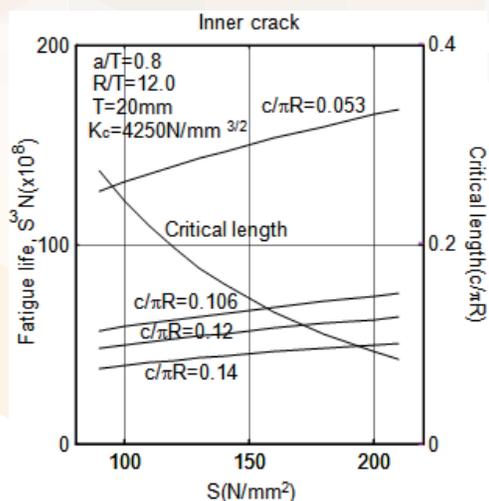


圖 10 疲勞極限隨 S³N 的變化

#### 4. 案例分析

FMD 通常是建立在一個時間間隔的基礎上。為了設置一個合理的時間間隔，除了需要上文的計算之外，還需要構建在投入使用期所統計的實際荷載。這部分通過一個案例分析來計算對於 FMD 的實際洩漏週期。一系列就地統計的數據包括海浪的高度，及海浪的拍打循環次數

由 EQE Ltd<sup>[4]</sup> 提供。表 2 給出每一海浪高度所對應的循環次數。根據這些統計數據所提出的關於海浪高度及應力的經驗公式在公式(9)中給出。總的疲勞破壞可以根據公式(10)計算得出。由於這些數據是一年內統計所得，因此根據這些數據可以預測出一年的總的破壞量。

表 2 就地統計海浪循環次數由 EQE 提供

Wave height(m)	0.0-0.9	1.0-1.9	2.0-2.9	3.0-3.9	4.0-4.9
Number of cycles	5350296	2977386	1204273.5	485462.1	200179.9
Wave height(m)	5.0-5.9	6.0-6.9	7.0-7.9	8.0-8.9	9.0-9.9
Number of cycles	85229.8	37390.2	16977.8	8002	3922.8
Wave height(m)	10.0-10.9	11.0-11.9	12.0-12.9	13.0-13.9	14.0-14.9
Number of cycles	2001.1	1059.9	580	325.5	186
Wave height(m)	15.0-15.9	16.0-16.9	17.0-17.9	18.0-18.9	19.0-19.9
Number of cycles	107.3	62.1	36	20.7	11.8
Wave height(m)	20.0-20.9	21.0-21.9	22.0-22.9	23.0-23.9	24.0-24.9
Number of cycles	6.7	3.7	2	1.1	0.6

$$\left. \begin{aligned} S &= LH^{1.8} \\ H &= \text{wave height} \\ L &= \text{constant} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} S_1 & N_1 & S_1^3 N_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ S_i & N_i & S_i^3 N_i \\ \dots & \dots & \dots \\ S_n & N_n & S_n^3 N_n \end{aligned} \right\} \quad \text{Total damage} = \sum S_i^3 N_i \quad (10)$$

假設設計的應力是材料屈服應力的一部分，則總的破壞所需要的應力就可以通過公式(11)-(13)得到。最後得到一年總的破壞是關於設計應力的一個方程。應用這個結果和上文得出的用  $S^3N$  表示的洩漏週期根據公式(14)，就可以得出這個具體案例的洩漏週期。

$$\left. \begin{aligned} \text{Design stress} &= X\sigma_y \\ X\sigma_y &= LH_{max}^{1.8} \\ L &= \frac{X\sigma_y}{H_{max}^{1.8}} \\ S &= \left( \frac{X\sigma_y}{H_{max}^{1.8}} H^{1.8} \right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Total damage:

$$\begin{aligned} &= \sum S_i^3 N_i \\ &= \sum \left( \frac{X\sigma_y}{H_{max}^{1.8}} H^{1.8} \right)^3 N_i \\ &= \left( \frac{X\sigma_y}{H_{max}^{1.8}} \right)^3 \sum (H^{1.8})^3 N_i \\ &= \left( \frac{X\sigma_y}{H_{max}^{1.8}} \right)^3 \sum H^{5.4} N_i \\ &= X^3 \left( \frac{\sigma_y}{H_{max}^{1.8}} \right)^3 \sum H^{5.4} N_i \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{From data } \sum N_i H_i^{5.3} &= 6.77 \times 10^9 \\ H_{max} &= 25 \\ \sigma_y &= \frac{350N}{mm^2} \\ \text{Total damage} &= 8.2 \times 10^9 \times X^3 \end{aligned} \quad (13)$$

Flooded life in years

$$= \frac{\text{Flooded life in } S^3N}{\text{Total damage } 8.2 \times 10^9 \times X^3} \quad (14)$$

這個案例研究，洩漏週期以年為單位表示。選擇與上文相同的材料和裂紋參數，初始的內表面圓周表面裂紋  $a/T=0.8$ ,  $R/T=12$ ,  $Kc=2500N/mm^{3/2}$ ,  $T=20mm$  在外部循環荷載

100Mpa 循環拉應力下，當裂紋長度與圓管周長比率增長為 0.12 時，也就是裂紋長度大概為 181mm 時，得出這個含裂紋管道的洩漏週期為 3 年，結果在圖 11 中表示出來。而對此裂紋情況傳統的斷裂前洩漏(LBB)的方法只能計算到  $c/\pi R$  為 0.10 而相對應的洩漏週期為 5 年左右，對於  $T=20mm$  的情況用 LBB 計算得到的洩漏週期則少於本文所以出的方法算的結果。

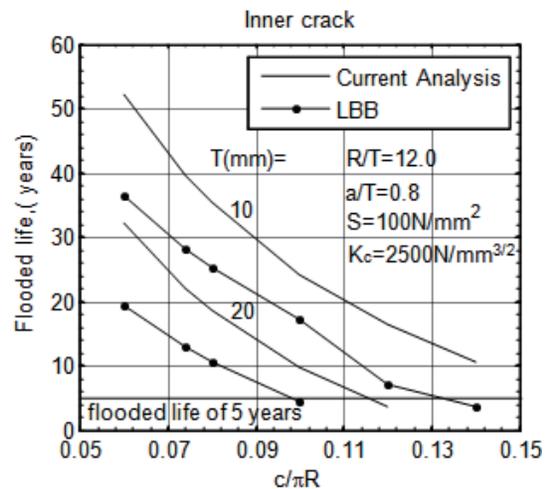


圖 11 計算得到的洩漏週期與 LBB 方法比較

通過以上案例分析得到結論：運用本文所提供的方法和實際統計的循環荷載數據得到對於剛剛投入使用運用新型建築材料以科學的建造方法搭建而成的海洋平台建築，FMD 檢測時間間隔可以設為 3 年為保守時間間隔。然而要特別注意的是，對於投入使用時間長久，具有較低韌性建築材料並且加工工藝不精細老舊的海洋平台建築，為了確保裂紋發展不造成結構破壞且有足夠的時間去修補洩漏，需將 FMD 檢測時間間隔縮短。

## 5. 總結

本文研究運輸石油管道表面裂紋在外部循環荷載作用下擴展為部分穿透裂紋直至完全穿透裂紋的實際發展過程，結合線彈性斷裂力學原理計算得到的裂紋擴展 SIF 並應用 Paris' law 計算含裂紋管道結構的洩漏週期及

疲勞極限。並將這種研究方法應用於實際海洋平台建築在海浪拍打作用下的洩漏週期的預測，得到對於剛剛投入使用具有新型建築材料和建造工藝的海洋平台建築 FMD 檢測時間間隔可以為 3 年為保守檢測時間間隔，而對於老舊的海洋平台建築 FMD 檢測時間間隔需縮短。

## 參考資料

- [1] Ahn SH, Hidaka A, Anko K. Fatigue crack growth and penetration behaviours in a pipe subjected to bending load. In: Beynon JH, Brown MW, Lindley TC, Smith RA, Tomkins B, editors. Engineering Against Fatigue. Balkema; 1999. p. 73-82.
- [2] Yoo YS, Ando K. Circumferential inner fatigue crack growth and penetration behavior in pipe subjected to a bending moment. Fatigue Fract Engng Mater Struct 1999; 23:1-8.
- [3] Kou, K.P. and Burdekin, F.M. Stress intensity factors for a wide range of long-deep semi-elliptical surface cracks, partly through-wall cracks and fully through-wall cracks in tubular members, Engineering Fracture Mechanics, 73, 2006, p1693-1710.
- [4] Kou, K.P. and Burdekin, F.M., The applicability of leak-before-break on flooded member detection for offshore structures under fatigue, Engineering Fracture Mechanics, 75, p31-40, 2008.
- [5] BS7910, Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures. BSI, 2005
- [6] PD6493, Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures. BSI, 1991.

[7] Frederick Kiwanuka, The ultimate strength of cracked tubes and its effect on flooded member detection for offshore structures. PhD Thesis, UMIST, 1999

目  
錄

臺  
灣

中  
國

日  
本

澳  
門

香  
港

## 數值分析 CFRP 複合材料單面修補切口梁裂紋後的疲勞恢復

李琛<sup>1</sup>；林智超<sup>2</sup>

<sup>1</sup>碩士研究生，<sup>2</sup>助理教授，澳門大學土木和環境工程系  
澳門，中國

### 摘要

切口梁的切口部分由於長期受彎，應力集中從而因疲勞破損產生對結構具有威脅的裂紋。與傳統修補方法對比後，碳纖維增強複合材料在很多鋼結構補強疲勞問題方面被優先選擇用來修補裂紋。鋼結構中裂紋的疲勞強度取決於應力強度因子（Stress intensity factor）。本文簡單的介紹了鋼結構補強方面的有關內容，並著重於展示纖維增強複合材料在修補鋼結構中的作用。在運用三層殼理論的有限元分析中，詳細模擬了碳纖維增強複合材料（CFRP）單面修復切口梁裂紋。通過有限元分析結果與試驗結果的對比，因趨勢相同和可接受的誤差值，可證明 CFRP 單面補強修復切口梁裂紋的有限元分析是有效可行的。各項結果可得，CFRP 單面補強粘接修復鋼結構切口梁裂紋具有良好的效果，垂直裂紋的 CFRP 修補效果最好，CFRP 補片層數和修補後的效果不成正比。

關鍵詞：鋼結構單面補強；切口梁；碳纖維增強複合材料；裂紋修補；有限元分析；應力強度因子。

### 1. 序言

在工程結構中，鋼結構作為一種常用結構形式在不同的領域中被廣泛的應用。一些跨度較大的結構、多層高層建築、荷載重量很大的建築、有較大振動的結構、高溫車間的結構、密封要求很高的結構，要求能活動或經常裝拆的可展開結構、高塔和桅杆結構、橋樑、底層結構、門式鋼架等，都會採用鋼結構。鋼材作為建築材料其優點是：強度高，重量輕，容易控制方便運輸；耐熱性較好，正確維護下的鋼結構有較長的使用壽命；穩定性好，性質幾乎不隨時間變化；材質均勻，塑性、韌性好，不會輕易忽然破壞失效；擁有良好的加工性能和焊接性能；密封性好；可重複使用，有較高的回收率。但也存在耐火性差、耐腐蝕性差和低溫冷脆傾向等缺點。

在鋼結構中存在大量受彎的部件由於疲勞或腐蝕，這些部件經常會發生不同程度的損傷。銹蝕對鋼結構有著很大的危害，不僅表現為杆件截面的減薄降低結構的承載能力，而且由於銹蝕可以對鋼材產生銹坑，促使結構脆性破壞，尤其是在衝擊荷載的作用下，銹坑將使鋼材的抗脆性能力

下降。對於鋼結構防銹主要採用在鋼結構表面塗料的方法，不僅效果好價格低廉，而且塗料品種多，選擇範圍廣（Duggal 2009）。

鋼結構的維護保強，除銹蝕問題外，還有焊縫和螺栓連接的缺陷、結構和構件變形等引起的疲勞破損。鋼結構的疲勞破損過程本質上是細微裂紋的萌生、緩慢擴展和最終迅速斷裂的過程。金屬結構本體內不可避免的微小材質缺陷本身就是微裂紋，再加上長期的承受荷載和形變，導致微裂紋緩慢發展，一段時間後，當結構的強度、剛度和穩定性不能滿足使用要求時，則應對鋼結構進行加固和修復，以延長鋼結構的使用壽命和承載能力。鋼結構的補強方法有：

1. 減輕荷載：改用輕質材料及其他減小荷載的方法。
2. 改變結構計算圖形：調整原有結構中的應力，使符合設計需要的內力重新分配，改善被加固構件內的受力情況，以減少加固工作量。
3. 加大原結構構件截面和連接強度。
4. 阻止裂紋擴展。

隨著科學技術的發展和研究，亦可採用其它加固方法。

在土木工程界對鋼結構的疲勞斷裂的修復已經變成重要的問題之一。本文後面主要探討了運用纖維增強複合材料阻止裂紋擴展修復裂紋的補強鋼結構方法。通過數值分析與前人實驗的對比，驗證纖維增強複合材料在疲勞裂紋修復方面的作用，以便將其運用與實際的工程中。

## 2. 裂縫修補與加固

### 2.1 簡介

目前，很多鋼結構由於過度荷載和疲勞損耗累積後產生裂紋，根據裂紋的大小，傳統的修補方法有重新焊接、鑿槽法和鉗止裂孔等。通過焊接來修復鋼結構疲勞構件的方法，大量研究都表明，這種方法在一定程度上恢復構件疲勞性能的同時會引起焊接的殘餘應力，增加焊接節點的疲勞敏感性，引進新的應力損傷源，使鋼結構疲勞性能不能得到明顯改善。爲了克服傳統的方法中缺點，各個領域都在積極地致力於這方面的尋找和探索。而現如今，用纖維增強複合材料（FRP）修補裂縫的方法，經過長期的研究而得到了當今學術界的關注。

複合材料是將兩種以上的材料組合成型，有別於單獨素材所不能發揮性質的材料。複合材料的構成，一般是以一種材料的特殊的很小的形態，再分散到其他材料之中後所得到的形式（Taichi Fujii and Masaru Zako 1978）。複合材料可分爲纖維增強、夾層、細粒、混雜四大類。纖維增強複合材料的主要優點是有很高的抗拉強度質量比（Strength to weight ratio）和較好的抗腐蝕性（Corrosion resistance）。纖維增強複合材料已經在應用在航空工業很多年了，而這種材料的優勢也是衆所周知的。在當時，這種材料的價格普遍較高。現如今，隨著科技的發展，複合材料的價格也隨著急劇下降，使得其也可以廣泛的應用於土木工程

中。

在土木建築的鋼筋混凝土結構的修復方面，例如對路易莎蓋伊堡橋的修復。路易莎蓋伊堡橋位於美國亞拉巴馬州西北部的勞倫斯縣，是一座有多跨鋼板梁橋橫貫在大桑迪河之上。中間的四個跨度是由現澆（Cast-in-place）鋼筋混凝土梁和現澆混凝土橋面組成。在日常檢查中，特別是橋中間整個鋼筋混凝土部份，發現了彎曲裂縫（Flexural crack）。產生這些裂縫很大的原因是平時橋上經過的超重運貨汽車。橋的承受荷載界限為大約 712kN，一系列的分析證明橋樑的平時使用量已經超過了標準。所以橋樑修復是不得不做的事情。

經過對幾種修復方法研究後，最終決定使用高強度的 Sika 公司生產的碳纖維增強複合材料板。這種特別技術的優點是：在短時間內便可完工；需要的人力最少，基本只需要兩個技術好的工人就可以完成；在修補過程中交通依然可以保持通暢不受影響。整個工程總共花費美元 19500，比其他方法減少許多。從 2003 年開始，裂紋測量儀器被安裝在不同部位用來檢測裂縫的位移，沒有一個發現任何明顯的裂紋變化，足以說明 CFRP 在修補裂紋方面起到的作用（Hollaway and Teng 2008）。

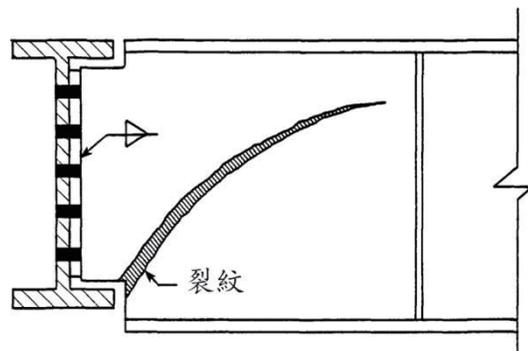
## 2.2 問題敘述

在鋼結構裡，當框架梁和主樑在同一個水平面上或為了提供足夠的支援空間經常需要切掉梁端部的翼緣和部份腹板，如圖一所示。



圖一. 切口梁

在切割過程中，切口梁腹板邊緣會產生一些性質變化。由於剛結構硬脆的特性，可能會存留一些微小的細紋在板層中。再加上切割過程中的殘留應力引起的高屈服強度，使得裂紋十分容易在切口處發展如圖二所示，對結構有很大的危害，對結構的穩定性造成威脅。



圖二. 切口梁裂紋

為瞭解決這一個問題，除了傳統的修補方法，隨著科技的發展，本文用有限元方法對已經用碳纖維增強複合材料（CFRP）修補過的切口梁進行疲勞強度的分析，探討 CFRP 對切口梁裂紋的發展影響，藉以提出 CFRP 修補切口梁的實用設計方法和建議，並對照加拿大阿爾伯他大學的 CFRP 修補切口梁疲勞恢復的實驗，已驗證本文方法的準確性和適用性。

## 2.3 實驗背景

運用碳纖維增強複合材料 (CFRP) 進行對切口梁的疲勞恢復試驗是由 Holden et al. 在 2012 年完成的 (Holden 2012)。幾何參數包括修復偏心率 (eccentricity) (單面 vs. 雙面)、修復方向 (Orientation of repair) 和有效厚度比 (Effective thickness ratio)。修復方向分為三個：水平方向、45 度傾斜和 0 度、45 度和 90 度多方向。有效厚度比 (ETR) 定義為：

$$ETR = \frac{E_{CFRP} t_{CFRP}}{E_S t_S} \quad (1)$$

其中  $E_{CFRP}$ 、 $E_S$  分別是碳纖維增強複合材料和剛梁的彈性模量， $t$  是材料的厚度。最後，研究學者選擇了六根標準為 W410×54 的工字梁來進行此項試驗，如表格一所示。

編號	偏心率	CFRP 方向	CFRP 層數	ETR
NH	無	無	無	無
SHA3103C	單面	45°	3	0.132
SHA6103C	單面	45°	6	0.264
SHL3103C	單面	0°	3	0.093
SHO3103C	單面	多向	3	0.106
DHA3103C	雙面	45°	3	0.264

表一. 試驗樣品的具體規格

實驗中，工字梁由兩個直角支架用螺栓固定在梁左端的切口部份，在梁另一端一定距離處用滑動支座支撐，使得試驗只測試一邊的切口處。通過對梁的靜態測試後，為了產生預先的初始裂紋，40kN 和 200kN 交替施加在切口梁中間。當裂紋產生並達到 10mm，施力停止，開始進行 CFRP 修補。

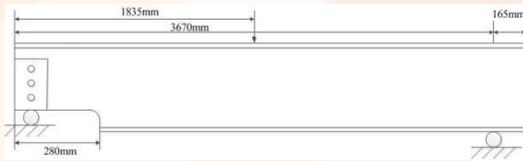
用於進行裂紋修補的 CFRP 類型是 Sika Wrap Hex 103C (Sika Canada 2012)，長度為 300mm，寬度為 150mm。在附著 CFRP 之前，先把腹板表面打光，塗上 Sikadur®330 (Sika Canada 2012) 底層塗料。把已經在飽和劑浸泡過的碳纖維材料，放置在還未幹的底層塗料上，並用滾筒刷整理完畢。當一切準備工作就緒後，重新對梁施加循環荷載，力的大小和裂縫長度用應變測量儀時刻檢測。

實驗完成後，通過實驗數據，得到荷載循環次數與裂紋發展長度曲線。根據分析可知，切口梁裂紋粘貼碳纖維增強複合材料進行加固後，裂紋處應力重新分佈，CFRP 承擔了部分應力，裂紋處鋼材應力明顯降低，導致腹板裂紋處應力集中係數的降低，從而改善了切口部位的疲勞性能，增加了修復後樑承受荷載力的迴圈次數。從結果中還可以進一步的看出，單面 CFRP 修復比修復前增加了微小的疲勞壽命，雙面 CFRP 修復後的疲勞壽命是修復前的三倍等。再加上對修復效率的比較分析，從而詳細的瞭解到各個參數 (偏心率、修復方向和 ETR) 在對修復裂紋效果方面的影響和規律。在裂紋方向方面，裂紋的角度自預先微裂紋後的變化十分不明顯，所以從視覺上很難區分。

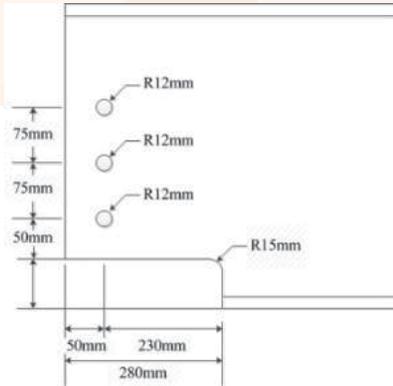
## 2.4 有限元分析

有限元分析採用有限元程式 ABAQUS 軟件對切口梁和碳纖維增強複合材料進行模擬。有限元分析切口梁模型的幾何尺寸細節如圖三、圖四和圖五所示，梁長、橫切面規格和切

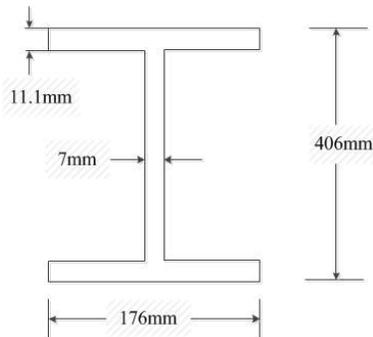
口部份基本於試驗相符。



圖三. 梁模型的整體詳情



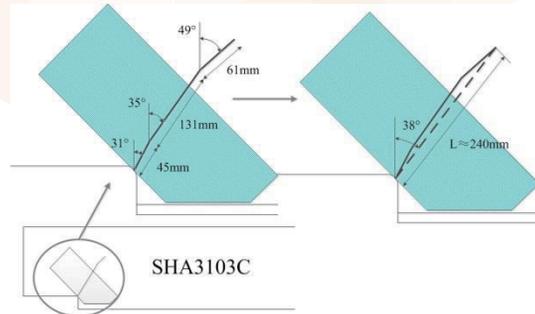
圖四. 切口部份尺寸規格



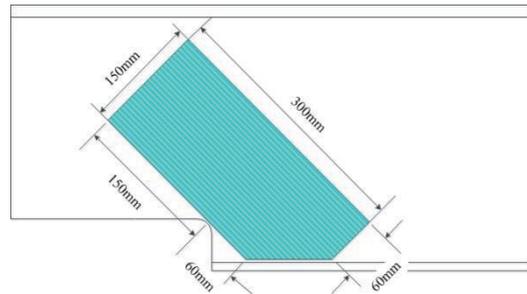
圖五. 橫截面的尺寸規格

本文對碳纖維增強複合材料修復切口梁裂縫的有限元模型分析是基於 2010 年 Holden et al. (Holden 2012) 的試驗，但也有所合理的修改和選擇。有限元分析主要關注在角度變化、單面分析、CFRP 層數和兩個修補方向(傾斜和水平)上，所有具體規格在表格二中展示。其中 SHA3103C-原型是完全依照試驗中裂紋角度變化模擬有限元中的裂紋，其餘的模型則按照裂紋變化最終始末端連線的平均角度來模擬，如圖六所示。圖七是 CFRP 補片傾斜修復的詳情，複合材料長 300mm 寬 150mm，與水平方向成 45°，長邊於切口部份相切，中點置於裂紋處。圖八

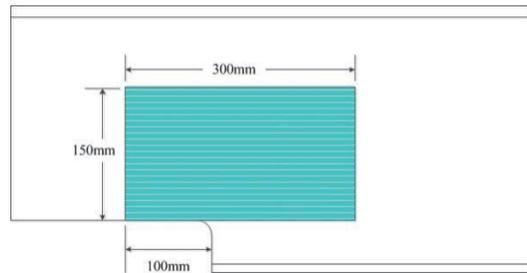
是 CFRP 補片水平修復的詳情，比較簡單且清晰明瞭。



圖六. 試驗裂紋角度和模型平均角度



圖七. 傾斜修復



圖八. 水平修復

在設定材料屬性中，根據試驗所述，碳纖維使用了 SikaWrap® Hex 103C，其彈性模量為 235000MPa，與飽和劑 Sikadur® 300 混合後彈性模量性質變為 1724MPa，並呈現線彈性的拉伸性能。經過檢測，三層和六層 CFRP 的彈性模量和極限強度分別為 70100MPa、687.8MPa 和 71800MPa、636.1MPa。具體的材料屬性設定如表格三所示，其中 CFRP 補片的屬性根據複合材料的力學分析 (Mechanical analysis of composite material) 計算得到。

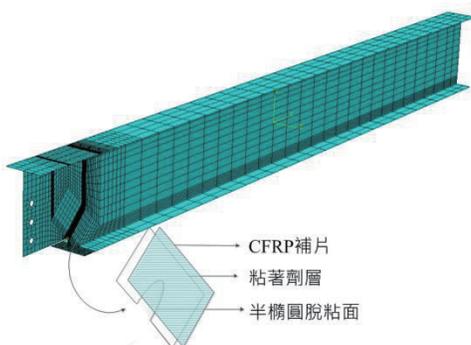
編號	偏心率	CFRP 方向	CFRP 層數	ETR	裂紋角度
NH	無	無	無	無	40°
SHA3103C-原型	單面	45°傾斜	3	0.132	31°-35°-49°
SHA3103C	單面	45°傾斜	3	0.132	38°
SHA6103C	單面	45°傾斜	6	0.264	38°
SHL3103C	單面	0°水平	3	0.132	39°

表二. 有限元分析中的樣品具體規格

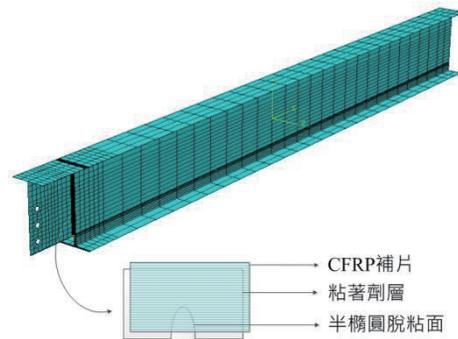
材料類型	厚度(mm)	材料規格
鋼樑腹板	7.00	E=209.6GPa, v=0.3
鋼樑翼緣	11.10	E=204.7GPa, v=0.3
粘著劑	0.10	E=2000MPa, v=0.3
三層 CFRP	2.76	E <sub>1</sub> =70.1GPa, E <sub>2</sub> =2430MPa, V <sub>12</sub> =0.32, G <sub>12</sub> =935MPa
六層 CFRP	5.394	E <sub>1</sub> =71.8GPa, E <sub>2</sub> =2456MPa, V <sub>12</sub> =0.32, G <sub>12</sub> =935MPa

表三. 模型中鋼樑、粘著劑和 CFRP 材料性質

在 ABAQUS 程式裡模擬 CFRP 修補切口梁中，分別對梁、CFRP 補片進行映射網格劃分，整個模型網格劃分最終如圖九和圖十所示。模型採用有限元程式中的 Shell S8R 八節點四邊殼單元模擬腹板、翼緣、粘著劑層和 CFRP 補片，此單元能夠很好地用於薄殼和中厚殼的分析。



圖九. 傾斜修復模型網絡劃分



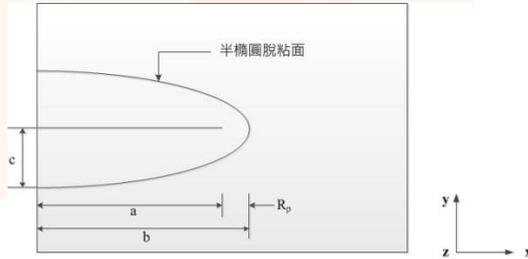
圖十. 水準修復模型網絡劃分

網絡劃分圖中，粘著劑層上顯示的半橢圓部份是脫粘面，是在 CFRP 修復中層與層之間連接最弱的部份，也是試驗結果中驗證過的。根據之前研究，本文假設粘著劑層和腹板之間的脫粘面為半橢圓形，如圖十一所示。裂紋長度  $a$ 、半長軸  $b$  和半短軸  $c$  之間的關係為

$$b = a + R_p \quad (2)$$

$$c = \frac{b}{5} \quad (3)$$

其中  $R_p = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K}{2\sigma_y} \right)^2$ ， $\sigma_y$  是屈服應力。



圖十一. 半橢圓脫粘面

最後通過 Equation 命令耦合腹板粘著劑和 CFRP 補片相關的節點。腹板粘著劑和 CFRP 補片之間的約束運用了基於 Mindlin 假設的三層殼體技術。Mindlin 板理論假設在板厚度中的位移是線性的，並且考慮了板的剪切變形。1996 年由 Naboulsi 和 Mall (Naboulsi and Mall 1996) 提出的三層殼體技術，假設存在裂紋的腹板、粘著劑層和 CFRP 層的厚度之間為線性位移，並滿足一下關係 (圖十二)：

腹板與粘著劑層

$$\bar{u}_x^a - \bar{u}_x^w - \varphi_y^a \frac{t^a}{2} - \varphi_y^w \frac{t^w}{2} = 0 \quad (4)$$

$$\bar{u}_y^a - \bar{u}_y^w - \varphi_x^a \frac{t^a}{2} - \varphi_x^w \frac{t^w}{2} = 0 \quad (5)$$

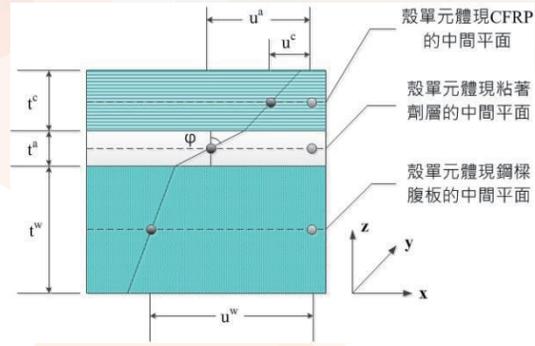
$$\bar{u}_z^a = \bar{u}_z^w \quad (6)$$

CFRP 補片與粘著劑層

$$\bar{u}_x^c - \bar{u}_x^a - \varphi_y^c \frac{t^c}{2} - \varphi_y^a \frac{t^a}{2} = 0 \quad (7)$$

$$\bar{u}_y^c - \bar{u}_y^a - \varphi_x^c \frac{t^c}{2} - \varphi_x^a \frac{t^a}{2} = 0 \quad (8)$$

$$\bar{u}_z^a = \bar{u}_z^c \quad (9)$$



圖十二. 三層殼之間的位移關係

2.5 結果分析與比較

通過 ABAQUS version 6.10-1 的有限元模型分析後，在 DAT 文件中得到應力強度因子 (SIF) 的數值結果，如圖十三所示。在線彈性斷裂力學範圍內，應力強度因子能恰當地描述裂紋尖端的應力場強度。當裂紋長度很小的時候，修補前和修補後的 SIF 變化不大，裂紋越長 SIF 減少量越多，說明裂紋越長 CFRP 的作用越顯著。修補後 SHA3103C 的 SIF 值與 SHA3103C 幾乎接近，只在 100mm 到 200mm 之間有很小的差異。裂紋角度按試驗變化的 SHA3103C-原型結果與裂紋為平均角度模型 SHA3103C 的結果幾乎相同，但在裂紋為 240mm 時發生了巨大變化，從 240mm 裂紋位移圖 (圖十四) 中可以清晰的知道，因為角度問題，有限元分析中裂紋卡住，近乎全部閉合，導致 SIF 值驟然變小。

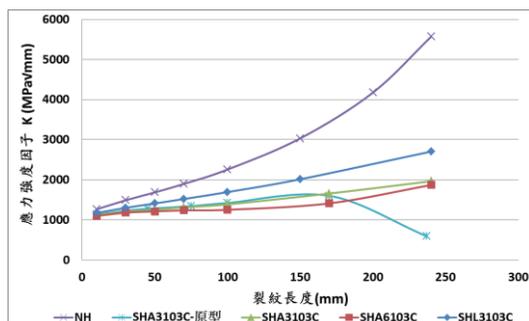
圖十五是 SHA3103C、SHA6103C 和 SHL3103C 中 CFRP 補片上距離 10mm 裂紋相同長度的應力曲綫對比。經過檢驗，由應力得到的 CFRP 與腹板中的內力之和同其在未修復前腹板中相同。從圖中可以看出，CFRP 補片有效的降低了切口梁切口部份的應力集中問題。

水平修復中 CFRP 補片分擔的應力比其傾斜修復中的少，說明傾斜修復的效果比水平修復好，而六層的 CFRP 補片分擔的應力比三層補片多，說明層數越多修復效果越好。進一步的分析在疲勞壽命中會更詳細的討論。

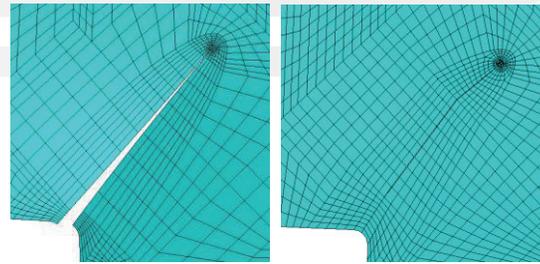
應力強度因子 SIF 不僅表示裂紋尖端附近彈性應力場的強度，也控制

裂紋擴展速率  $\frac{da}{dN}$  的主要參量，即  $\frac{da}{dN}$  與

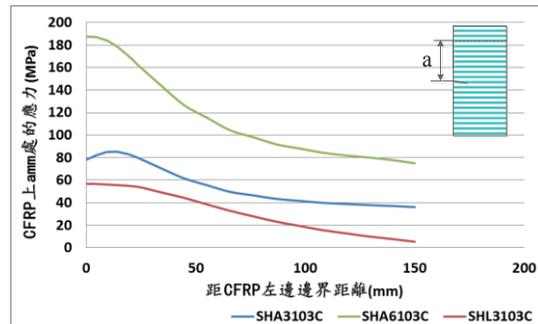
應力強度因子  $\Delta K$  幅度存在一定的函數關係。根據 SIF 經過計算可以得到裂紋由 10mm 擴展到 240mm 的荷載循環數，裂紋生長長度與疲勞壽命（即荷載循環數）的曲線如圖十六所示。經有限元分析得修補前後的各個樣品從左到右的疲勞壽命分別為 105830 周次、218080 周次、355920 周次和 458640 周次。與試驗結果（圖十七）對比後發現有限元分析的荷載循環數結果比試驗結果趨勢相同但數值普遍偏大，其試驗與有限元分析的結果比值分別為 0.67(SHL3103C)、0.46 (SHA3103C) 和 0.37 (SHA6103C)。模型模擬是在完全不考慮任何阻力環境條件的完美狀況下進行，所以偏大現象在情理之中。



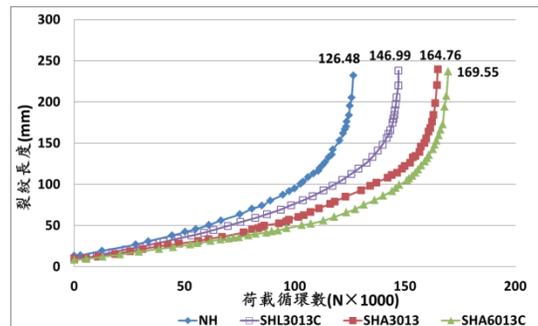
圖十三. 有限元分析中應力強度因數結果



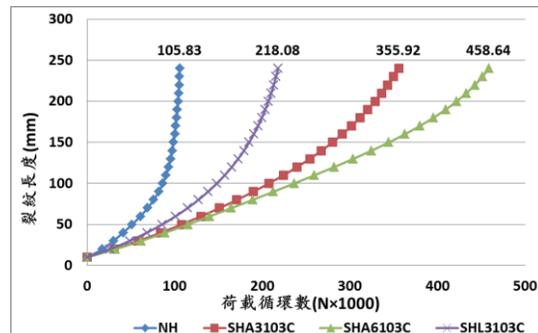
圖十四. SHA3103C 和 SHA3103C-原型的裂紋為 240mm 時的形變位移對比



圖十五. CFRP 補片距離 10mm 的裂紋 a mm 位置的應力分佈



圖十六. 有限元分析中裂紋生長 vs. 疲勞壽命的曲線結果



圖十七. Holden 試驗中裂紋生長 vs. 疲勞壽命的曲線結果

### 3. 總結

(1) 通過 CFRP 單面補強修復鋼結構切口梁裂紋疲勞恢復研究發現，修補後的裂紋疲勞循環次數得到了提高。這表明 CFRP 補強粘接修復鋼結構切口梁裂紋具有良好的效果。

(2) 經過有限元分析 CFRP 單面補強修復切口梁裂紋結果綜合得知，在修補方向方面，單面傾斜修補效果比水平修補好，特別是接近垂直於裂紋時。在修補層數方面，CFRP 補片層數越多修補後效果越好，但不成正比。

(3) 通過結果對比，運用平均角度，忽略角度變化，更符合試驗結果，與試驗中所說變化十分不明顯一致。

(4) 本研究分析結果與試驗結果對比後，因趨勢相同和可接受的誤差值，可證明 CFRP 單面補強修復切口梁裂紋的有限元分析是有效可行的。

### 參考資料

S. K. Duggal. **2009**. "Design of steel structure." Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, Paper No.3.

Taichi Fujii and Masaru Zako. **1978**. "Fracture and mechanics of composite materials." Jikkyo Shuppan Co., Ltd., Paper No.2-10.

L. C. Hollaway and J. G. Teng. **2008**. "Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre reinforced polymer (FRP) composites." Woodhead Publishing Limited, Paper

No.352.

T. A. Holden. Spring **2012**. "Fatigue rehabilitation of coped steel beams using carbon fibre reinforced polymers." Edmonton, Alberta.

Sika Canada Inc. **2012**. "SikaWrap® Hex 103C and Sikadur® 300." Product Data Sheet.

Naboulsi. S and Mall. **1996**. "Modeling of a cracked metallic structure with bonded composite patch using the three layer technique." Elsevier Science Ltd, 295-308, Paper No.35.

# 數值分析表層嵌貼 (NSM) 纖維增強塑膠 (FRP) 板加固技術對於砌體結構抗剪性能的提升

王軒<sup>1</sup>；林智超<sup>2</sup>

<sup>1</sup>碩士研究生, <sup>2</sup>助理教授, 澳門大學土木和環境工程系

澳門, 中國

## 摘要

本研究用數值模擬的方法分析 NSM FRP 板加固下磚砌體牆的面內抗剪性能。利用有限元模型中的簡化微觀模型模擬砌體牆, 再把 FRP 板連接到砌體網格中來模擬加固砌體牆。有限元模型能模擬出加固砌體牆對角拉伸/剪切實驗中的關鍵特性包括: 荷載-位移回應, 破壞形態的發展和 FRP 板的加固貢獻。有限元模型還用來預測加固砌體牆在壓剪力作用下的抗剪性能。結果顯示在 NSM FRP 板加固下砌體牆的抗剪性和延展性都有顯著提高。此結果表明此表層嵌貼加固技術非常適用於砌體結構的加固。本文最後對澳門傳統建築物進行案例分析, 探索了表層

嵌貼加固技術在實際工程中的應用。

**關鍵字:**數值分析; 砌體; 表層嵌貼法; FRP; 有限元; 案例研究

## 1. 序言

砌體結構的歷史悠久, 然而隨著結構老化、使用功能變更、意外損壞等情況, 對砌體的加固和維修問題的研究越來越受到世界各國的普遍關注。纖維增強聚合物 (fiber-reinforced polymer, 簡稱 FRP) 以其高強、輕質、耐腐蝕和抗疲勞性能好等諸多優於建築鋼材的特點, 在各國被廣泛應用於結構加固工程中。近年來, 國外研究人員提出了“表層嵌貼法” (near surface mounted, 簡稱 NSM) 加固技術, 即在構件需

加固部位的表面開槽，將 FRP 筋或板條填入其中，利用粘結劑使 FRP 與構件緊密結合，達到提高構件性能的目的，是一種具有廣闊工程應用前景的加固方法。與“表面粘貼”（externally bonded, 簡稱 EB）加固技術比，表層嵌貼法除同樣具有高強、高效、耐腐蝕等優點外，還有以下幾方面的優勢：

- ①減少了砌體表面處工作量，節省工期；
- ②FRP 與混凝土的黏結表面積增加，提高了 FRP 的利用率和加固效率；
- ③對建築外觀破壞較少，具有較高的美學價值。

FRP 加固抗剪砌體牆在不同的面內載入力條件下已有人做過不少實驗，包括：單調的橫向載入條件下，來回的橫向載入條件下和動態橫向載入條件下。但是幾乎所有這些研究人員都使用 EB 條狀或片狀 FRP 加固砌體牆，只有少數的研究測試了 NSM FRP 加固砌體牆，如 Petersen 等<sup>[1,2]</sup>測試了一系列 NSM FRP 加固砌體牆對角拉伸/剪切試驗（圖 1）。另一方面，一些研究者<sup>[3]</sup>通常將 FRP 安排在水平方向或者網格加固。但應用 EB FRP<sup>[4]</sup>條在垂直方向上的測試結果表明，牆的抗剪性能將

增加。然而，目前還沒有任何可用的實驗結果和設計模型對加固在砌體剪力牆在垂直方向上的 NSM FRP 的貢獻做出估計。

本研究用數值模擬的方法分析了加固磚砌體牆，研究在垂直 NSM FRP 板加固下砌體牆的面內抗剪性能。本文對建立有限元模型的方法進行了詳細描述，模擬結果與加固砌體牆對角拉伸/剪切實驗中的結果對比，確定了該模擬方法的準確性和合理性。有限元模型還用來預測加固無洞砌體牆在壓剪力作用下的抗剪性能。最後，有限元模型模擬了澳門傳統建築中的一面牆進行案例分析，探索了表層嵌貼加固技術在實際工程中的應用。

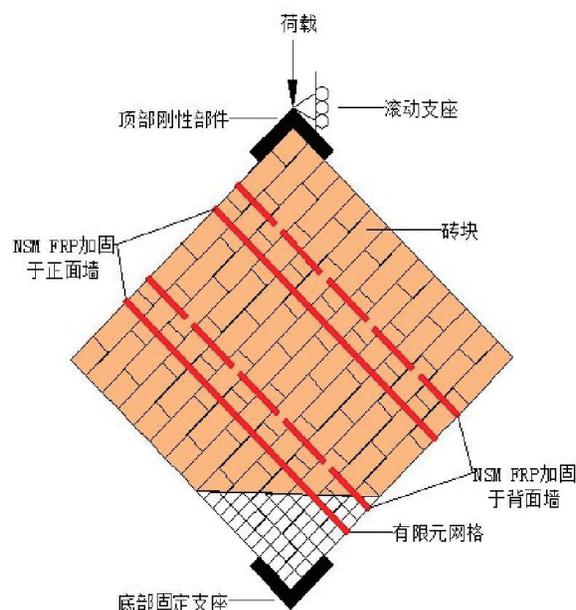


圖 1 NSM FRP 加固牆對角拉伸/剪切試驗

## 2. 有限元模型

Petersen 等<sup>[2]</sup>提出一個有限元模型用於模擬 NSM FRP 板加固下砌體牆。有限元模型基於簡化微觀模型與材料測試實驗確定相關參數。此模型能模擬出加固砌體牆對角拉伸/剪切实驗中的關鍵特性。商用有限元分析軟體 DIANA 9<sup>[5]</sup>用於運行這個模型。所有的牆板模擬只是在二維平面(牆的平面)內，因此牆面外的影響在本研究中不作考慮。

Lourence<sup>[6]</sup>提出的多面介面模型被用來模擬磚石。磚被模擬成彈性連續單元，磚漿和磚漿與磚塊的介面被集中模擬成磚漿介面單元且為零厚度，潛在的磚內開裂也被模擬成介面單元放置於磚塊中央。由於磚漿介面單元厚度為零，磚單元的幾何尺寸在模擬中也相應擴大以保持整個牆面的完整性。磚塊模擬採用八節點，二次的，長方形，平面應力單元。介面單元(砂漿介面及潛在磚裂介面)採用六節點，二次的，長方形，平面應力介面單元。圖 1 與圖 2 顯示了部分牆與磚的網格劃分演示。砂漿介面單元中的非線性特性使用 DIANA 9 中的開裂-剪切-壓縮材料模型進行模擬。該模型是基於多面的可塑性，包括：庫倫摩擦模型(模擬剪切開裂和剪切

摩擦)；張力截止模型(模擬張力開裂)；和一個橢圓形壓縮蓋模型(模擬壓縮剪切)。該模型還考慮了包括由於滑動(膨脹)產生的裂縫張開。潛在磚裂紋介面單元採用線性張力軟化模型來模擬，此介面單元最初是高剛度的，拉伸開裂後變成零剪切剛度。FRP 板採用兩個節點的線性杆單元。NSM FRP 到砌體模型中的連接使用粘結介面單元，在圖 2 中演示。NSM FRP 與磚的粘結介面單元中的剪切特性使用 Petersen 等<sup>[7]</sup>的拉力測試得出的粘結-滑移關係。跨過砂漿介面 FRP 與 FRP 節點的連接使用介面單元模擬。在模型中 FRP 的貢獻主要來自於透過張力抑制砂漿和磚的開裂擴張和板的抗彎剛度。

用以上的建模策略建立有限元模型，NSM FRP 板加固砌體牆的有限元結果與實驗結果做了對比，無論是負載位移(圖 3)，破壞形態的發展都相似，直到有限元模型中出現大型的滑動破壞或磚塊粉碎性失效。有限元結果和實驗結果都顯示在 NSM FRP 板加固下，砌體牆的抗剪性和延展性都有顯著提高。

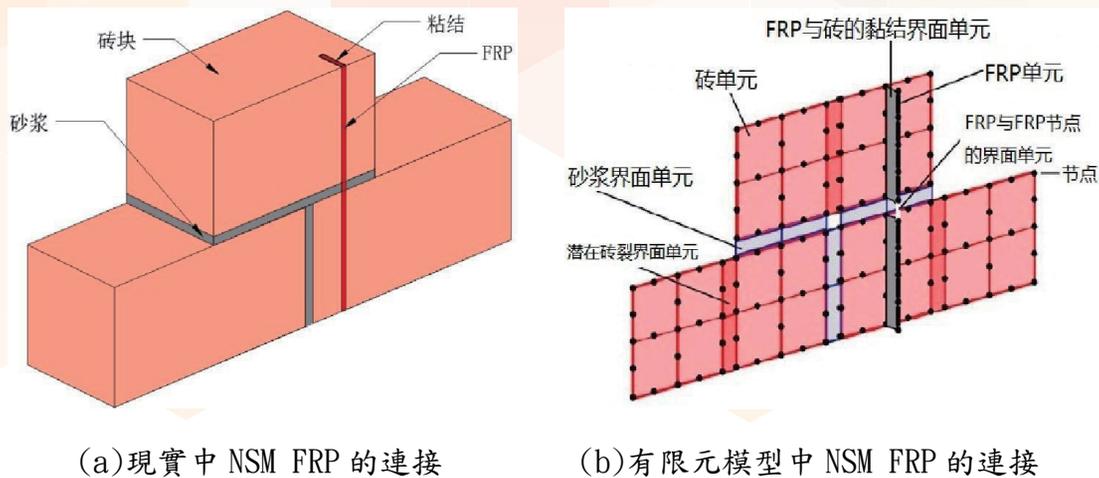


圖 2 NSM FRP 連接的模擬演示

### 3. NSM FRP 加固砌體剪力牆

Raijmakers<sup>[8]</sup>和 Vermeltfoort<sup>[9]</sup>進行了幾個砌體牆抗剪測試。砌體牆的尺寸為  $990 \times 1000 \text{ mm}^2$ ，由 18 層磚塊組成。其中頂層磚夾在施力鋼樑中，底層磚固定在底層鋼樑中（圖 4）。牆體採用尺寸為  $210 \times 52 \times 100 \text{ mm}^3$  的實心粘土磚的 10 毫米厚的砂漿。砌體受豎向預荷載和橫向單調水平荷載，圖 4 中  $p$  是垂直均勻分佈在頂部的預荷載， $d$  是在牆的頂部水平荷載。

當中未加固砌體牆且豎向預荷載為  $1.21 \text{ N/mm}^2$  記為 J6D。本研究為預測加固砌體牆在壓剪力作用下的抗剪性能，J6D 被模擬成用 NSM FRP 條進行豎向加固。在有限元模型

中，砌體的材料性質基於 Lourenco 的研究<sup>[6]</sup>。FRP 條的材料特性是基於對 Petersen 的研究<sup>[6]</sup>。作為結果，圖 5 顯示了 J6D 牆和加固牆在頂峰負載狀態下的開裂圖形。對於 J6D 牆，即未加固砌體牆，斜向滑動開裂致使牆崩潰。同時伴隨部分磚內部開裂與牆體左下角磚粉碎。對於 NSM FRP 加固牆出現的裂縫較為分散。大部分的裂縫出現在中部區域，並且延 FRP 條的外部形成一個滑動面，即從左側頂部區域開始和在右底部區域結束。有限元分析取得在不同 NSM FRP 加固方案下砌體牆的荷載相對位移曲線（圖 6）。與未加固砌體牆比，加固牆的高峰負荷有微幅增加。同時，未加固牆的高峰負荷發生在

水平位移大約 7 毫米時，而加固牆的高峰負荷發生在較大的水平位移時（大於 10 毫米），這代表牆的延展性顯著增加。這一結

果表明，NSM FRP 加固技術在增加砌體牆的延展性方面比增加負荷承載能力有更重要的意義。

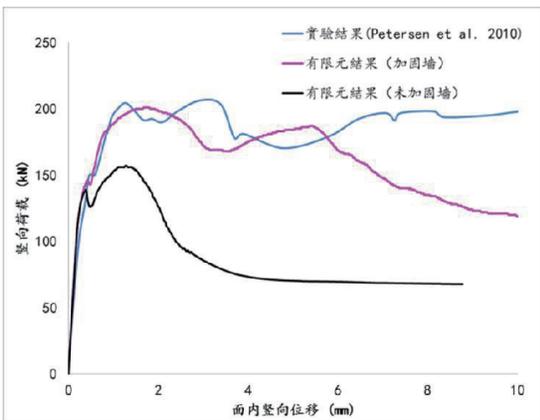


圖 3 荷載-位移曲線比較：未加固和加固砌體牆

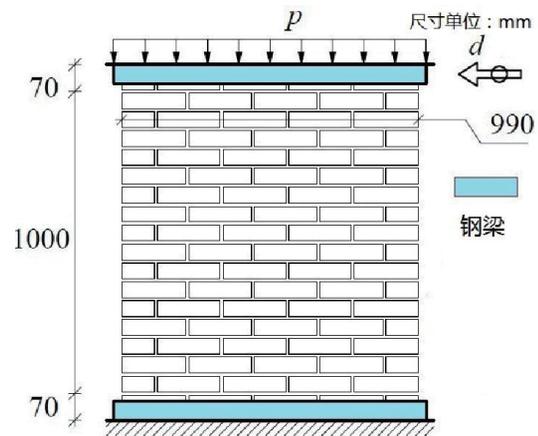
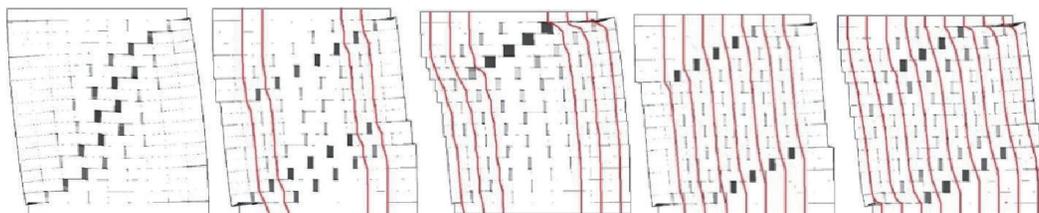


圖 4 測試砌體剪力牆的尺寸和載入條件



(a) J6D (b) JD4FRP (c) JD6FRP (d) JD7FRP (e) JD9FRP

圖 5 未加固牆和加固牆在頂峰負載時的開裂圖形（變形比例=30，豎向紅線代表 NSM FRP 板加固）

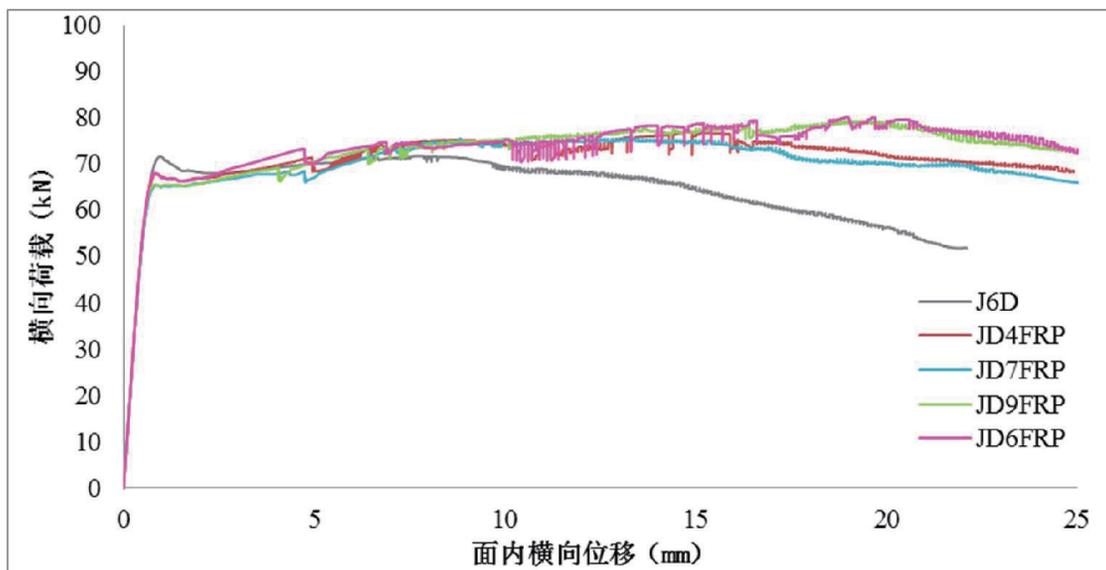


圖 6 幾種 NSM FRP 加固策略下砌體牆的荷載 - 位移曲線

#### 4. 案例分析

澳門城市的興起始於 16 世紀中葡萄牙人的東來，逐漸將澳門發展成為一個中西貿易港。在這個由主要葡萄牙人發展出的城市內部，又交織著許多華人的建築。至今這些建築很多依舊保存了下來，成為澳門有別於其他城市的獨特城市形態。福隆新街位於澳門最繁盛的商業街新馬路以西，是昔日澳門著名的紅燈區（圖 7a）。今天這一帶已成為食店、旅館林立的觀光之處。街道兩側的民居大多建於 19 世紀的八九十年代後，呈現出當時典型的嶺南風格建築特色。福隆圍位於福隆新街的西側，為福隆新街的後巷，立面較福隆新街簡單、質樸，是保存完整的歷史建築片區。

福隆圍主要由磚塊砌築，其中連接主街道的那面牆被標記為福隆圍 22 號牆。在建立有限元模型對福隆圍 22 號牆研究前，需要做一些測量和假設。首先，砌體牆的幾何尺寸來源於現場觀測（圖 7b）和王維仁<sup>10</sup>建

築團隊繪製的建築圖（圖 7c）。砌體塊長度加兩側砂漿測量為 250 毫米，砌體塊高度加兩側砂漿測量為 66 毫米，砂漿厚度測量為 10 毫米。因此模型中磚單元的尺寸為  $240 \times 56 \times 100$  [mm<sup>3</sup>]。其次，牆的一些部分比如門和窗，已被混凝土或石條加固。由於整個建築主要為磚塊和砂漿組成，所以這些加固在分析中暫不考慮。最後，牆底部的邊界條件簡化為固定支座，牆頂部的屋頂被簡化為豎向均勻分佈的  $1 \text{ N/mm}^2$  預荷載。使用之前使用的有限元建模策略和材料性質模擬砌體，FRP，和砌體、FRP 之間的連接。

首先對福隆圍 22 號未加固牆進行有限元分析。有限元結果在圖 8a 中顯示未加固牆在破壞狀態時的開裂圖形，主要的開裂標記在紅圈內。結果顯示開裂主要發生在窗左上角的磚塊，此種現象在現場觀測中得到了印證（圖 7d）。另一種鋸齒形斜裂縫發生在窗和門之間的磚塊，而此種情況似乎已被先前的建造者預見到或者修補過，使用了混凝土

和長石條進行加固(圖 7e)。與現實類似開裂圖形意味著有限元結果是合理。

根據先前對福隆圍 22 號未加固牆的分析結果,加固應集中在窗和門附近和牆外圍的磚上。圖 8b 顯示,在一個可行的 NSM FRP 板加固策略下,福隆圍 22 號加固牆在破壞狀態時的開裂圖形。有限元結果表明,在 NSM FRP 板加固下,每個裂縫大小變得更小,牆上的裂縫的出現更分散。當牆上出現更多更小的裂縫,表明更多的能量被消散了,也意味著牆有更高的抗剪能力。圖 9 顯示了未加固牆和加固牆的主壓應力的有限元結果比較。未加固牆上可以清楚的觀察到一些應力

集中的區域而 NSM FRP 板加固牆有較高絕對值的平均應力但更少的應力集中。這個結果表明 NSM FRP 加固重新分配整個牆的應力使其更加均勻。相信這種應力佈局的牆有較大的抗剪性和延展性。

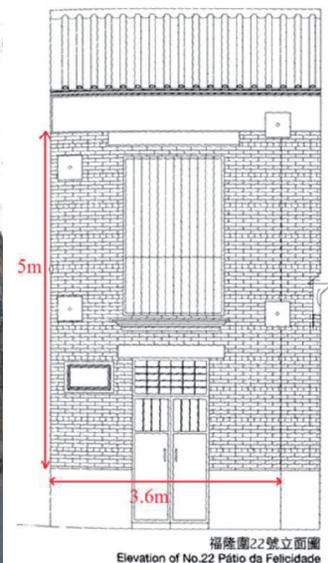
圖 10 顯示了有限元分析取得的未加固牆和加固牆的荷載相對位移曲線的比較。加固牆最大橫向載荷為 157 千牛,對比未加固牆增加了 39% 的最大橫向載荷。荷載位移曲線的形態比較也顯示了在 NSM FRP 加固下,牆的延展性得到了提高。以上結果表明,NSM FRP 加固技術採用在真實的砌石牆上,對於提高牆的抗剪性和延展性都有顯著效果。



(a) 街區平面圖



(b) 整體結構



(c) 建築立面圖 (王維仁, 2010)

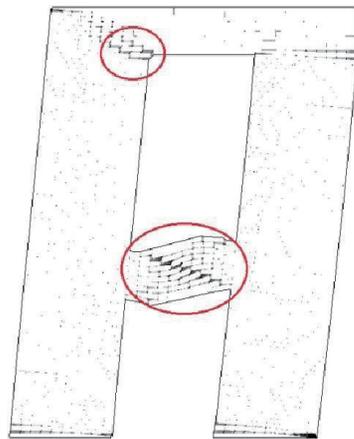


(d) 現場觀測到的磚塊開裂

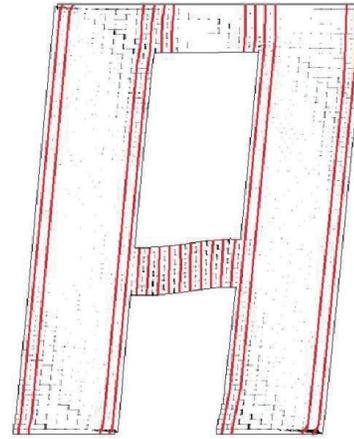


(e) 混凝土和長石條加固

圖 7 調查福隆圍 22 號牆

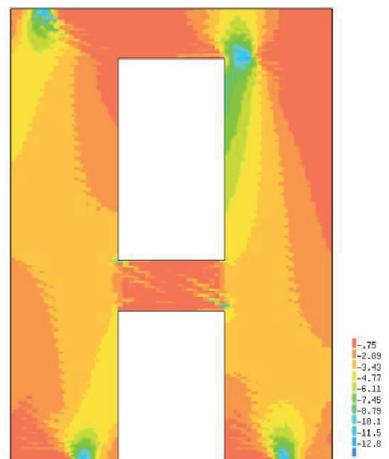


(a)

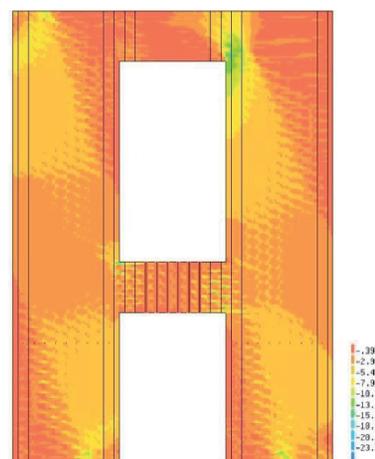


(b)

圖 8 有限元結果：破壞狀態時（水平位移=50mm）的開裂圖形（變形比例=30，豎向紅線代表 NSM FRP 板加固）(a) 未加固牆 (b) NSM FRP 加固牆



(a)



(b)

圖 9 有限元結果：破壞狀態時（水平位移=50mm）的應力雲圖（N/mm<sup>2</sup>）(a) 未加固牆 (b) NSM FRP 加固牆

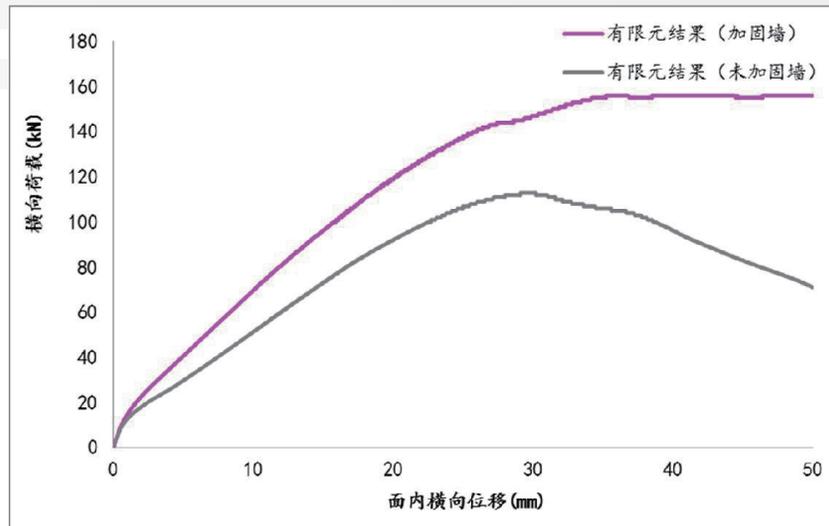


圖 10 未加固和加固砌體牆的荷載 - 位移曲線

## 5. 總結

NSM FRP 板加固是一個有吸引力的替代傳統加固的新技術,特別是在希望加固對砌體結構的美學影響最小化及減少 FRP 脫膠的情況下。本研究通過數值模擬證明了 NSM FRP 板加固對於提高砌體牆的抗剪性和延展性都有顯著效果。

NSM FRP 板加固有潛力成為一個有用的技

術,不但可以對砌體結構進行特定小範圍加固,而且也可以對整個砌體結構進行大範圍加固。但是相對確定實驗結果的欠缺是阻止這一技術研究發展的一個瓶頸,下一步的工作是進行更多的實驗項目專注於 NSM FRP 板加固技術在砌體結構中使用。

## 參考資料

- [1] Petersen, R. B., Masia, M. J., and Seracino, R., In-plane shear behavior of masonry panels strengthened with NSM FRP strips. I: Experimental investigation. *J. Compos. Constr.* 14(6), 754 - 763, 2010.
- [2] Petersen, R. B., Masia M. J, and Seracino. R., In-plane shear behavior of masonry panels strengthened with NSM FRP strips. II: Finite element model. *J. Compos. Constr.* 14(6):764 - 74, 2010.
- [3] Y Zhuge., FRP-Retrofitted URM Walls under In-Plane Shear: Review and Assessment of Available Models. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 14, No. 6, 2010.
- [4] Wei, C., Zhou, X., and Ye, L., Experimental study of masonry walls strengthened with CFRP. *Struct. Eng. Mech.*, 25(6), 675 - 690, 2007.
- [5] De Witte, F. C., DIANA 9 users manual, D. Tno, ed., Delft, The Netherlands, 2005.
- [6] Lourenço P B., *Computational strategies for masonry structures*. PhD thesis, Delft University of Technology, Stevinweg 1, 2628 CN Delft, The Netherlands, 1996b.
- [7] Petersen, R. B., Masia, M. J., and Seracino, R., Bond behavior of NSM FRP strips bonded to modern clay brick masonry prisms: Influence of strip orientation and compression perpendicular to the strip. *J. Compos. Constr.*, 13(3), 169 - 178, 2009.
- [8] RAIJMAKERS, T.M.J. and VERMELTFOORT, A.Th. (1992) *Deformation controlled tests in masonry shear walls (in Dutch)*. Report B-92-1156, TNO-Bouw, Delft, The Netherlands.

- [9] VERMELTFOORT, A. Th. and RAIJMAKERS, T. M. J, *Deformation controlled tests in masonry shear walls, Part 2* (in Dutch). Report TUE/BK0/93.08, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, 1993.
- [10] Wang, W. J and Cheong C. K., *Study of Macao' s Historical Urban Fabric*, Vol.1, pp. 47-51, 2010

目  
錄

臺  
灣

中  
國

日  
本

澳  
門

香  
港

## Life Cycle Carbon Measurement of Locally Used Building Materials: Portland Cement and Ready-Mixed Concrete

Jack C. P. Cheng<sup>1</sup>, Irene M. C. Lo<sup>1</sup>, Jing L. Zhang<sup>1,2</sup>, Shelley W. W. Zhou<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Department of Civil and Environmental Engineering,  
The Hong Kong University of Science and Technology*

<sup>2</sup>*Construction Industry Council*

<sup>3</sup>*The Hong Kong Jockey Club*

### Abstract

Construction activities account for much of the energy consumption and carbon emissions. According to WWF, the construction sector was the second largest contributor of the Hong Kong carbon emissions in 2007, and 85% of the carbon emissions from the sector was external in nature. The carbon footprint embodied in each building material varies considerably under different conditions. This study develops and illustrates a methodology framework to calculate embodied carbon footprints of building materials. The framework uses a “cradle-to-site” life cycle boundary which includes the processes of raw materials extraction, manufacturing and transport until the building material reaches the construction site. Data were collected from manufacturers in local and nearby regions. Portland cement and ready-mixed concrete were selected as examples in this study to demonstrate the calculation steps. The results indicate that for Portland cement, calcination is the largest contributor to the total GHG emission over the cement life cycle, followed by coal combustion. For ready-mixed concrete, the major contributor is the cement manufacturing. The methodology presented in this paper can be modified and extended to other building materials, thereby helping lower the carbon footprint of construction activities by providing a benchmark for the selection of green materials.

**Keywords:** *Building materials, Carbon footprint, Cradle-to-site, GHG emission, Portland cement, Ready-mixed concrete*

## 香港本地建材的生命週期碳評估：

### 以矽酸鹽水泥為例

鄭展鵬<sup>1</sup>，勞敏慈<sup>1</sup>，張婧靚<sup>1,2</sup>，周雯雯<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> 香港科技大學土木及環境工程系

<sup>2</sup> 建造業議會

<sup>3</sup> 香港賽馬會

#### 摘要

建築活動產生大量能源消耗和碳排放。根據世界自然基金會2007年的統計，建造業是香港的第二大碳排放源，其中有85%的碳排放從本質來說都是外源的，即是隱含在進口之物料及服務中。隱含在每種建築材料中的碳足跡會因為具體情況的不同而有所改變，而這項研究則致力於發展一個計算建築材料碳足跡的方法框架。該框架採納了“從搖籃到使用地”的生命週期邊界，這個生命週期邊界包括了原材料的開採、產品的生產以及運輸直到建築材料抵達使用場地的過程，而用於計算的數據則來自香港和周邊區域的建材製造商。

在本文中，矽酸鹽水泥被選作實例來闡述該計算框架。結果表明在矽酸鹽水泥的生命週期裡，最大的碳排放源是煨燒，其次是煤的燃燒。本文介紹的計算方法框架可以修改和擴展到其他建築材料，從而有助於提供一個選擇綠色建材的標準來幫助降低建築活動中的碳足跡。

關鍵詞：建築材料，碳足跡，從搖籃到使用地，溫室氣體排放，矽酸鹽水泥

## 1. Introduction

In recent years, climate change and global warming issues have attracted increasing concern around the world. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) states that anthropogenic greenhouse gas (GHG) emission is the major cause of global warming phenomenon (Pachauri and Reisinger, 2007). In response to demands for sustainable development, industry has a responsibility to lower energy consumption and GHG emission over the manufacturing life cycle. Within the industrial sector as a whole, construction activities account for much of the energy consumption and carbon emissions. According to the WWF's Hong Kong Ecological Footprint Report 2010 (Cornish *et al.*, 2011), in 2007 the construction sector contributed the second largest carbon footprint in Hong Kong, of which 85% was embodied in imported goods and services. In addition to direct emissions from the construction sector, this footprint includes emissions from all upstream material inputs to the construction activities.

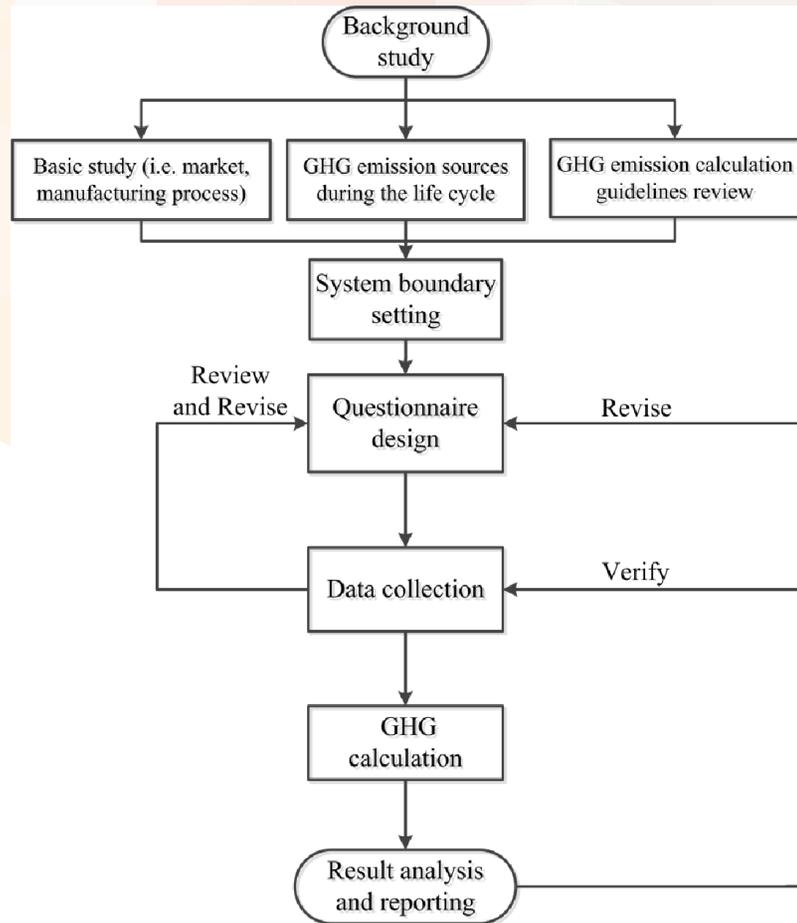
This study aims to investigate the methods for calculating embodied carbon footprint of building materials. After reviewing various carbon footprint calculation methodologies for building materials, a modified methodology framework has been developed with consideration of regional factors, with the intention to develop a carbon inventory of the building materials commonly used in Hong Kong. The results of this study will help lower the carbon footprint of the construction industry in Hong Kong by providing a benchmark for the selection of green materials.

This paper describes our methodology framework and illustrates the steps to be taken in life cycle carbon measurement of building materials. Portland cement and ready-mixed concrete were selected as examples in this study in order to demonstrate the methodology framework, which can serve as a reference for the study of other types of building materials. Based on the concept of Life Cycle Assessment (LCA) and with reference to the ISO 14040 standard, the system boundary of this study is set as “cradle-to-site”, which evaluates the life

cycle environmental impact (i.e. carbon footprint) of building materials from the stages of raw materials extraction, product manufacture, and transport (ISO, 2006; Hammond and Jones, 2008).

## 2. Methodology Framework

The framework of this study is shown in Figure 1. To develop a region-specific inventory, the manufacturing processes for cement and concrete in local and nearby areas were studied, the GHG emission sources over the specified life cycle were identified, and the standard GHG emission calculation guidelines were reviewed. Based on the information obtained from the background study above, detailed system boundaries describing the manufacturing processes from “cradle-to-site” were determined for cement and concrete, respectively. Questionnaires specific to local and nearby manufacturers were then designed and distributed, with the aim to collect first-hand data. This data collection stage was the key to the whole study because the availability, quality and completeness of the data could influence the accuracy and reliability of the final results. In the data collection work, iterative review and revision of the questionnaires can be conducted in response to the feedbacks from industry. GHG emissions of the building materials were then calculated with reference to the relevant guidelines and standards. Finally, the results were analyzed, compared, and reported, which summarized the whole study.

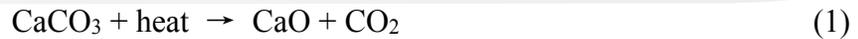


**Figure 1.** The methodology framework of this study

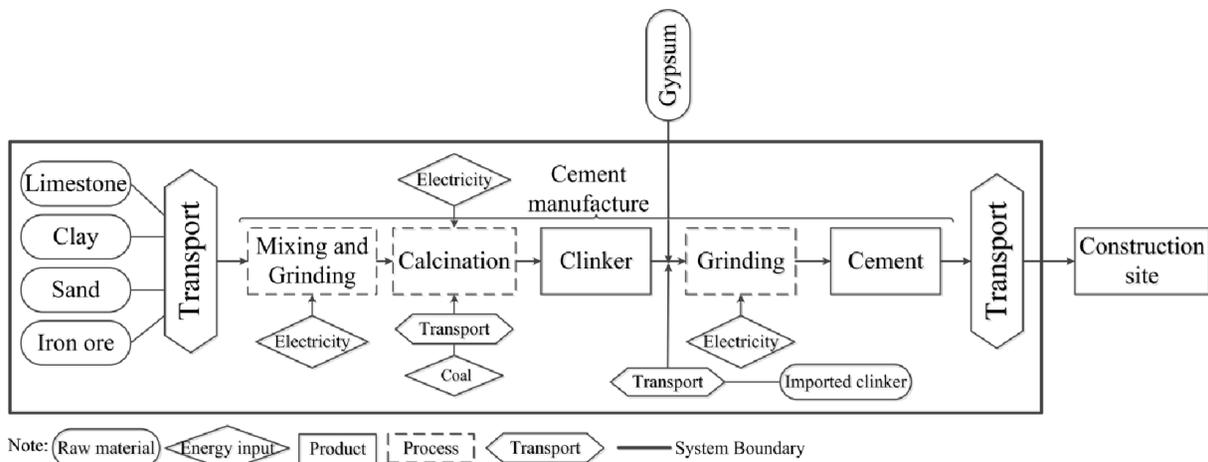
### 3. System Boundary

This section presents the “cradle-to-site” life cycle system boundaries for Portland cement and ready-mixed concrete in this study. As shown in Figure 2, the “cradle” of the system boundary for Portland cement refers to the extraction and quarrying of the four raw materials – limestone, clay, sand, and iron ore (Duggal, 1998). The raw materials are transported to manufacturing plants and then separately ground to fine powder and mixed. Calcination, a combustion process that consumes fuel is then performed. Due to the chemical reaction of the carbonates at a high temperature of 1400 °C to 1500 °C, CO<sub>2</sub> is directly emitted during calcination and clinker is produced (Duggal, 1998). During the production of clinker, limestone, which is mainly calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>), is heated, or calcined, producing lime

and CO<sub>2</sub> (Eggleston *et al.*, 2006). The chemical equation is given in Eq. 1.



In some factories, self-manufactured clinker cannot satisfy the demand for cement production, so clinker may be imported from other manufacturers. The GHG emissions from the production and transport of imported clinker are included in our system boundary for cement. After clinker preparation, gypsum is added for strengthening the performance of cement. Then the final grinding process produces the cement product. The last phase in the system boundary is the transport of the cement products. As shown in Figure 2, electricity and coal are the energy inputs during the cement manufacture process and account for GHG emissions.

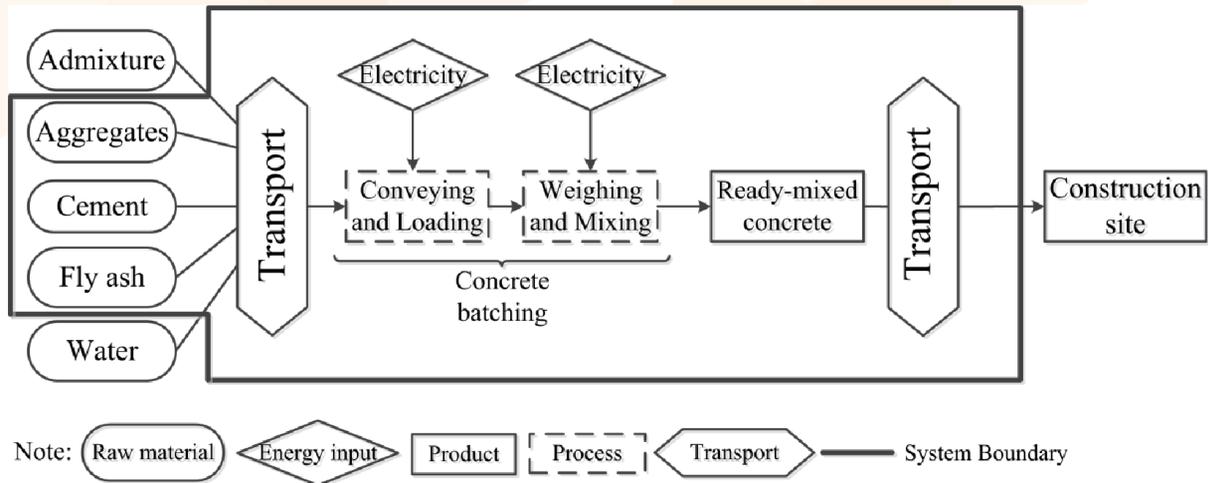


**Figure 2.** System boundary of Portland cement

All direct and indirect GHG emissions associated with each phase shown in Figure 2 are covered in this study. They are (1) the GHG emissions generated from each upstream material extraction process and production, (2) the GHG emissions from the transport of upstream materials, fuels, imported clinker and products, and (3) the GHG emissions during the cement manufacture process at factory (i.e. calcination, fuel combustion, electricity consumption, and imported clinker). However, the emission from the gypsum production is excluded since gypsum is a by-product of the desulfurization process in power plants.

Figure 3 shows the “cradle-to-site” life cycle system boundary of ready-mixed concrete. The raw materials include admixture, aggregates, cement, fly ash, and water (Richard, 2004).

After being transported to concrete batching plants, the raw materials are conveyed and loaded into silos for storage in the plants. The raw materials are then weighed in specific ratios for mixing. After mixing, the fresh ready-mixed concrete is transferred to construction sites using mixing trucks. Electricity is the energy input during the batching process.



**Figure 3.** System boundary of ready-mixed concrete

The GHG emissions for concrete were calculated using the methods similar to those used for Portland cement. However, the “cradle” of the system boundary for concrete does not cover the extraction and production of admixture and water, because the admixture production and water use have an insignificant impact on the total GHG emission, according to Flower and Sanjayan (2007).

#### 4. Questionnaire Design and Data Collection

Based on the information obtained from the background study and the literature review, a set of bilingual questionnaires (in English and Traditional Chinese) for cement and ready-mixed concrete manufacturers were developed. Following the system boundaries as described above, the main body of the questionnaires covers three major parts – (1) raw materials extraction and production, (2) consumption of fuels and electricity, and (3) transport of upstream materials, fuels and products.

**Table 1. Basic information of the cement manufacturing factory example illustrated in this study (raw materials, fuel and electricity consumption, production, and transport)**

<b>Material</b>	<b>Quantity (t/yr)</b>	<b>Source location</b>	<b>Transport type</b>
Limestone	416,000	Guangdong, China	Ship (inland water)
	624,000	South Japan	Ship (international marine)
Sand	130,000	Guangdong, China	Ship (inland water)
Clay	104,000	Guangdong, China	Ship (inland water)
Iron ore	26,000	South Japan	Ship (international marine)
Imported clinker	100,000	Vietnam	Ship (international marine)
<b>Energy</b>	<b>Quantity</b>	<b>Source location</b>	<b>Transport type</b>
Coal	237,900 (t/yr)	Indonesia	Ship (international marine)
Electricity	87 (kWh / t clinker)	NA	Local grid
	135 (kWh / t cement)	NA	Local grid
<b>Product</b>	<b>Quantity (t/yr)</b>	<b>Distance</b>	<b>Transport type</b>
Clinker	1,300,000	NA	NA
Cement	1,500,000	100 km	Barge
		100 km	Truck

To collect first-hand information about the locally used cement and concrete products, bilingual questionnaires were distributed to the manufacturers in Hong Kong and nearby regions that supply cement and concrete products to the Hong Kong market. For illustrative purposes, this paper shows the examples from one of the cement manufacturers and one of the ready-mixed concrete manufacturers. As requested, the manufacturers' names and the information sources are kept anonymous due to confidentiality. Some information and numbers are also hidden or slightly modified due to confidentiality. The modified raw material quantities, production data, and transport information for the cement and concrete illustrative examples are summarized in Table 1 and Table 2.

As shown in Table 1 and Table 2, compared to the concrete production example, the cement production example involves more materials imported from overseas regions such as Japan and Vietnam, resulting in longer transport distances. However, the concrete production example involves more types of transport means. Both transport distances and transport means types are considered in the GHG emission calculation.

**Table 2. Basic information for the ready-mixed concrete batching plant illustrated in this study (raw materials, production and transport)**

<b>Raw material</b>	<b>Quantity (t/yr)</b>	<b>Source location</b>	<b>Transport type</b>
Cement	530,000	Hong Kong/China	Cement tanker
Aggregate	2500,000	Hong Kong/China	Truck/Conveyor/Barge
Fly ash	99,000	Hong Kong	Tanker/Barge
Admixture	6,486	Hong Kong	Truck
<b>Product</b>	<b>Quantity (m<sup>3</sup>/yr)</b>	<b>Diesel oil (L/yr)</b>	<b>Transport type</b>
Ready-mixed concrete	1,300,000	300000	Truck

## 5. Calculation of CO<sub>2</sub>-e for Portland Cement

The results of our GHG emission calculation are expressed in terms of carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e), which refers to the global warming potential (GWP) with respect to one unit of carbon dioxide. Expressing all GHG emissions in terms of CO<sub>2</sub>-e allows the different greenhouse gases to be grouped together (British Columbia Ministry of Environment, 2013). Usually, the six greenhouse gases identified in Kyoto Protocol are considered when measuring GHG emissions in terms of CO<sub>2</sub>-e. They are carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>), nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), hydro-fluorocarbons (HFCs), per-fluorocarbons (PFCs), and sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>). In this study, the three major ones (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) among the six were considered in calculation. The CO<sub>2</sub>-e for a gas is derived by multiplying the weight of the gas by the corresponding GWP value, as expressed in Eq. 2 (USEPA, 2012).

$$\text{kg CO}_2\text{-e} = (\text{kg of a gas}) * (\text{GWP of the gas}) \quad (2)$$

IPCC has updated the GWP values for various greenhouse gases in 2007 and released the latest GWP values over a 100-year period in the IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (Foster *et al.*, 2007). This study uses the latest GWP values released by IPCC in 2007, as summarized in Table 3. According to 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, biogenic CO<sub>2</sub> emission is excluded for reporting in the Energy sector due to its neutral impact on the greenhouse effect (Eggleston *et al.*, 2006). However, according to the IPCC Fourth Assessment Report in 2007, biogenic CH<sub>4</sub> emission should be taken into account

as sequestration of CO<sub>2</sub> with a GWP value of 22.5 (Frischknecht, 2012), as shown in Table 3.

<b>Gas type</b>	<b>GWP</b>
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	1
Methane from fossil source (CH <sub>4</sub> fossil)	25
Methane from biogenic source (CH <sub>4</sub> bio)	22.5
Nitrous oxide (N <sub>2</sub> O)	298

The GHG emission calculation for Portland cement over its “cradle-to-site” life cycle consists of three parts: (1) extraction and production of upstream materials (raw materials and fuel), (2) cement manufacture at factory, and (3) transport of upstream materials and products.

**(1) Upstream materials:** For each upstream material, the emission factors in terms of different greenhouse gases are summarized in Table 4. To ensure that the results were region-specific, local data were selected as much as possible. For some data which could not be obtained from local sources, average values based on a global range from widely recognized inventories were adopted. The emission factors in terms of CO<sub>2</sub>-e per kg of upstream material were calculated based on the GWP values shown in Table 3. As shown in the last column of Table 4, the CO<sub>2</sub>-e value of coal is almost four times the CO<sub>2</sub> value, indicating the significant impact of CH<sub>4</sub> emission during coal mining.

<b>Upstream material</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/kg material</b>	<b>kg CH<sub>4</sub> fossil/kg material</b>	<b>kg CH<sub>4</sub> bio/kg material</b>	<b>kg N<sub>2</sub>O/kg material</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/kg material</b>
Limestone	$4.83 \times 10^{-3}$	$1.71 \times 10^{-5}$	$5.59 \times 10^{-9}$	$6.78 \times 10^{-7}$	$5.45 \times 10^{-3}{}^a$
	NA	NA	NA	NA	$4.11 \times 10^{-3}{}^b$
Sand	$2.29 \times 10^{-3}$	$2.66 \times 10^{-6}$	$5.84 \times 10^{-8}$	0	$2.36 \times 10^{-3}{}^c$
Clay	$2.84 \times 10^{-3}$	$1.87 \times 10^{-6}$	$5.21 \times 10^{-9}$	0	$2.89 \times 10^{-3}{}^d$
Iron ore	$4.29 \times 10^{-3}$	$4.06 \times 10^{-6}$	$4.74 \times 10^{-8}$	0	$4.39 \times 10^{-3}{}^e$
Coal	$2.56 \times 10^{-2}$	$3.06 \times 10^{-3}$	$4.68 \times 10^{-7}$	0	$1.02 \times 10^{-1}{}^f$

<sup>a</sup>CLCD China, 2009; <sup>b</sup>JEMAI Japan, 2011; <sup>c</sup>Ecoinvent Swiss, 2010; <sup>d</sup>Ecoinvent Swiss, 2003; <sup>e</sup>Ecoinvent Global, 2007; <sup>f</sup>Ecoinvent Central Planned Asia and China, 2010.

**(2) Cement manufacture:** As presented in Figure 2, GHG emissions are mainly from

the chemical reaction in calcination and the associated energy inputs (coal combustion and electricity consumption). Table 5 shows the emission factors for each process of clinker and cement production. For calcination, the value was obtained based on the first-hand data provided by the factory with reference to the IPCC Guideline (Eggleston *et al.*, 2006) and the Cement Sustainability Initiative (CSI) standard (CSI, 2012). According to the factory, the consumption of coal is  $3.6 \times 10^{-3}$  GJ/kg clinker. Emission factors for coal combustion were obtained from the Energy sector of the IPCC Guideline (Eggleston *et al.*, 2006). Electricity consumption for clinker and cement are 87 kWh/tonne clinker and 135 kWh/tonne cement, respectively. The CO<sub>2</sub>-e emission factor for electricity consumption refers to the local power plant which supplies power to the surveyed cement factory. In cement production, GHG emissions from imported clinker should be considered. According to the CSI Standard, the embodied carbon of imported clinker is 0.865 kg CO<sub>2</sub>-e/kg imported clinker (CSI, 2012). Referring to the annual coal consumption amount and annual production quantities shown in Table 1, the GHG emissions during the cement manufacture process were calculated as 0.950 kg CO<sub>2</sub>-e per kg of clinker produced and 0.917 kg CO<sub>2</sub>-e per kg of cement produced.

**Table 5. Emission factors for the Portland cement manufacture**

<b>Clinker</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/unit</b>	<b>kg CH<sub>4</sub>/unit</b>	<b>kg N<sub>2</sub>O/unit</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e /unit</b>
Calcination	0.551	0	0	0.551 kg/kg clinker
Coal	96 kg/GJ	0.01 kg/GJ	0.0015 kg/GJ	96.70 kg/GJ
Electricity	NA	NA	NA	0.59 kg/kWh
<b>CO<sub>2</sub>-e/kg clinker</b>				<b>0.950</b>
<b>Cement</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/unit</b>	<b>kg CH<sub>4</sub>/unit</b>	<b>kg N<sub>2</sub>O/unit</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e /unit</b>
Calcination	0.478	0	0	0.478 kg/kg cement
Coal	96 kg/GJ	0.01 kg/GJ	0.0015 kg/GJ	96.70 kg/GJ
Electricity	NA	NA	NA	0.59 kg/kWh
Imported clinker	0.865	0	0	0.865 kg/kg imported clinker
<b>CO<sub>2</sub>-e/kg cement</b>				<b>0.917</b>

**(3) Transport of upstream materials and products:** As shown in Table 1, inland

water shipping and international marine shipping are the two major transport types for raw materials in the illustrative example. The inland water shipping distance from Guangdong Province of mainland China to the factory was estimated, and the international marine shipping distances from Southern Japan, Vietnam, and Indonesia to the factory were extracted from a Japanese database which provides the travel distances among major ports in the world (JEMAI, 2012). The emission factor for inland water shipping in China was obtained from a Chinese LCI database (CLCD, 2010), while the emission factor for international marine shipping was obtained from World Resources Institute (WRI) (WRI, 2011). After unit conversion, Table 6 presents the transport emission factors in SI units.

The factory delivers cement products by barge and by truck with an estimated travel distance of 100 km. The emission factors of barge delivery were obtained from WRI (WRI, 2011). The emission factors of diesel oil truck delivery were obtained from the Hong Kong Environmental Protection Department (HKEPD) (HKEPD, 2010) and the Electrical and Mechanical Services Department (EMSD) (EMSD, 2012).

<b>Table 6. Emission factors for the transport of upstream materials and cement products</b>					
<b>Materials</b>	<b>Distance (km)</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/t.km</b>	<b>kg CH<sub>4</sub>/t.km</b>	<b>kg N<sub>2</sub>O/t.km</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/t.km</b>
Limestone	250	$1.25 \times 10^{-2}$	$5.97 \times 10^{-5}$	$6.16 \times 10^{-7}$	$1.42 \times 10^{-2}{}^b$
	3202 <sup>a</sup>	$3.29 \times 10^{-2}$	$2.81 \times 10^{-6}$	$9.60 \times 10^{-7}$	$3.33 \times 10^{-2}{}^c$
Sand	250	$1.25 \times 10^{-2}$	$5.97 \times 10^{-5}$	$6.16 \times 10^{-7}$	$1.42 \times 10^{-2}{}^b$
Clay	250	$1.25 \times 10^{-2}$	$5.97 \times 10^{-5}$	$6.16 \times 10^{-7}$	$1.42 \times 10^{-2}{}^b$
Iron ore	3202 <sup>a</sup>	$3.29 \times 10^{-2}$	$2.81 \times 10^{-6}$	$9.60 \times 10^{-7}$	$3.33 \times 10^{-2}{}^c$
Imported clinker	1764 <sup>a</sup>	$3.29 \times 10^{-2}$	$2.81 \times 10^{-6}$	$9.60 \times 10^{-7}$	$3.33 \times 10^{-2}{}^c$
Coal	3555 <sup>a</sup>	$3.29 \times 10^{-2}$	$2.81 \times 10^{-6}$	$9.60 \times 10^{-7}$	$3.33 \times 10^{-2}{}^c$
<b>Product</b>	<b>Distance (km)</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/t.km</b>	<b>kg CH<sub>4</sub>/t.km</b>	<b>kg N<sub>2</sub>O/t.km</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/t.km</b>
	100 (Barge)	$3.29 \times 10^{-2}$	$2.81 \times 10^{-6}$	$9.60 \times 10^{-7}$	$3.33 \times 10^{-2}{}^b$
Cement	100 (Truck, diesel oil)	2.614 kg CO <sub>2</sub> /L	$1.45 \times 10^{-4}$ kg CH <sub>4</sub> /L	$7.20 \times 10^{-5}$ kg N <sub>2</sub> O/L	2.64 kg CO <sub>2</sub> -e/L <sup>d</sup>

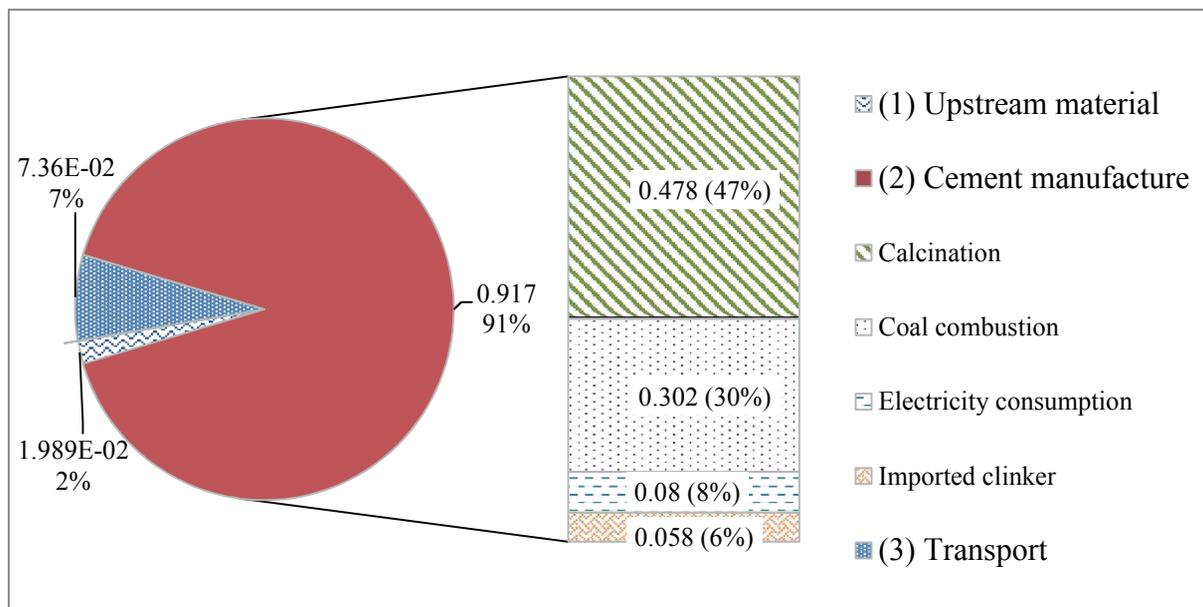
<sup>a</sup>JEMAI Japan, 2012; <sup>b</sup>CLCD, 2010; <sup>c</sup>WRI, 2011; <sup>d</sup>HKEPD, 2010.

**Table 7. Results comparison of CO<sub>2</sub>-e for each part of Portland cement life cycle**

<b>(1) Upstream material</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/kg clinker</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/kg cement</b>
Limestone	$3.718 \times 10^{-3}$	$3.222 \times 10^{-3}$
Sand	$2.358 \times 10^{-4}$	$2.043 \times 10^{-4}$
Clay	$2.309 \times 10^{-4}$	$2.002 \times 10^{-4}$
Iron ore	$8.785 \times 10^{-5}$	$7.614 \times 10^{-5}$
Coal	$1.868 \times 10^{-2}$	$1.619 \times 10^{-2}$
<b>Total CO<sub>2</sub>-e in part (1)</b>	<b><math>2.295 \times 10^{-2}</math></b>	<b><math>1.989 \times 10^{-2}</math></b>
<b>(2) Cement manufacture</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/kg clinker</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/kg cement</b>
Calcination	0.551	0.478
Coal combustion	0.348	0.302
Electricity consumption	0.051	0.080
Imported clinker	NA	0.058
<b>Total CO<sub>2</sub>-e in part (2)</b>	<b>0.950</b>	<b>0.917</b>
<b>(3) Transport</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/kg clinker</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/kg cement</b>
Limestone	$5.225 \times 10^{-2}$	$4.528 \times 10^{-2}$
Sand	$3.544 \times 10^{-4}$	$3.071 \times 10^{-4}$
Clay	$2.835 \times 10^{-4}$	$2.457 \times 10^{-4}$
Iron ore	$2.130 \times 10^{-3}$	$1.846 \times 10^{-3}$
Imported clinker	$4.474 \times 10^{-3}$	$3.877 \times 10^{-3}$
Coal	$2.163 \times 10^{-2}$	$1.875 \times 10^{-2}$
Cement	$3.770 \times 10^{-3}$	$3.267 \times 10^{-3}$
<b>Total CO<sub>2</sub>-e in part (3)</b>	<b><math>8.489 \times 10^{-2}</math></b>	<b><math>7.357 \times 10^{-2}</math></b>
<b>Overall total CO<sub>2</sub>-e emission</b>	<b>1.058</b>	<b>1.010</b>

After determination of the emission factors for each part, the CO<sub>2</sub>-e calculation per unit of clinker and cement could be calculated. By multiplying the quantities shown in Table 1 by the CO<sub>2</sub>-e emission factors for each material or each process, the total CO<sub>2</sub>-e emissions were calculated. The per unit GHG emissions were then calculated by dividing the total CO<sub>2</sub>-e emissions by the clinker production quantity and the cement production quantity. Table 7 and Figure 4 present the final results and percentage distribution of each part, which clearly indicate that the cement manufacture part accounts for most of the GHG emissions over the “cradle-to-site” life cycle of Portland cement. The bar chart in Figure 4 shows that in the

cement manufacture part, calcination is the largest contributor, followed by coal combustion.



**Figure 4.** GHG emission distribution of each part for Portland cement (kg CO<sub>2</sub>-e/kg cement)

## 6. Calculation of CO<sub>2</sub>-e for Ready-Mixed Concrete

Similar to the study and calculation for Portland cement, this section presents the calculation of GHG emissions in terms of CO<sub>2</sub>-e for ready-mixed concrete. The calculation consists of three parts: (1) extraction and production of upstream materials, (2) concrete batching at plants, and (3) transport of upstream materials and products.

**(1) Upstream materials:** As discussed above in Section 3, only three types of raw materials for ready-mixed concrete are included in the system boundary in this study. Emission factor for cement manufacture (0.917 kg CO<sub>2</sub>-e/kg cement) referred to the previous calculation for Portland cement, as shown in Table 7. Emission factor of aggregate ( $3.07 \times 10^{-3}$  kg CO<sub>2</sub>-e/kg aggregate) was extracted from a report provided by the surveyed concrete batching plants. As for fly ash, since no local data was available, the emission factor ( $4.00 \times 10^{-3}$  kg CO<sub>2</sub>-e/kg fly ash) was obtained from a report published by Mineral Products Association in 2011 (Mineral Products Association, 2011).

**(2) Concrete batching:** The concrete batching process only consumes electricity as the

energy input and is relatively simple compared to the cement manufacture process. According to the surveyed plants, electricity at the plants is provided by two suppliers. One supplier accounts for 98% of the electricity supply with a total annual consumption of 3,300,000 kWh, whereas the other supplier accounts for the remaining 2%. The emission factors of the first and the second electricity suppliers are 0.59 kg CO<sub>2</sub>-e/kWh and 0.81 kg CO<sub>2</sub>-e/kWh, respectively.

**(3) Transport:** Raw materials are transported to the concrete batching plants using road transport (trucks and tankers). The emission factor of concrete product road transport is the same as that of cement product road transport (HKEPD, 2010; EMSD, 2012), as shown in Table 6. Cement and fly ash are transported to the plants close to the raw material suppliers by pipeline and transported to other plants by truck. The emission factor of pipeline transport is 0.005 kg CO<sub>2</sub>-e/t.km, as suggested by McKinnon and Piecyk (2010). Aggregates are transported by conveyor for the batching plants near the quarry site. In this case, GHG emissions due to conveyor transport are included in the electricity consumption. Barge delivery is needed when the supplier or batching plant is located on an island. The emission factor of barge delivery is 0.033 kg CO<sub>2</sub>-e/t.km.

Applying the emission factors determined in the above three parts, the total GHG emission was calculated. To obtain the CO<sub>2</sub>-e value per unit weight of concrete, the density of the ready-mixed concrete was assumed as 2400 kg/m<sup>3</sup> concrete (Richard, 2004). Table 8 summarizes the final calculation results for each part in terms of kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup> concrete and kg CO<sub>2</sub>-e/kg concrete. As indicated in Table 8, the part of upstream material extraction and processing contributes the majority of the total GHG emission, because cement as raw material has a rather high embodied carbon value.

**Table 8. Results comparison of CO<sub>2</sub>-e for each part of ready-mixed concrete life cycle**

<b>(1)Upstream material</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup> concrete</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/kg concrete</b>
Cement	373.86	0.1558
Aggregate	5.90	0.0025
Fly ash	0.30	0.0001
<b>Total CO<sub>2</sub>-e in part (1)</b>	<b>380.06</b>	<b>0.1584</b>
<b>(2) Concrete batching</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup> concrete</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/kg concrete</b>
Electricity supplier 1	1.47	$6.1156 \times 10^{-4}{}^a$
Electricity supplier 2	0.04	$1.7135 \times 10^{-5}{}^a$
<b>Total CO<sub>2</sub>-e in part (2)</b>	<b>1.51</b>	<b>0.0006</b>
<b>(3) Transport</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup> concrete</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-e/kg concrete</b>
Raw materials transport	1.42	0.0006
Products transport	0.61	0.0002
<b>Total CO<sub>2</sub>-e in part (3)</b>	<b>2.03</b>	<b>0.0008</b>
<b>Total CO<sub>2</sub>-e emission</b>	<b>383.60</b>	<b>0.1598</b>

<sup>a</sup> Figures may not add up to total due to rounding off.

The results of this study were compared with the values provided by Inventory of Carbon & Energy (ICE), a widely used UK-based carbon inventory database of building materials developed by University of Bath (Hammond and Jones, 2008). The system boundary of ICE is “cradle-to-gate”. In other words, our “cradle-to-site” system boundary in this study has a broader coverage than ICE and includes the GHG emissions from transport of products which ICE excludes. In order to make a fair comparison, the results of this study were converted to “cradle-to-gate” values by deducting the emissions of product transport from the previous “cradle-to-site” calculation. Table 9 shows the details of the comparison. The ICE value for cement was selected from the type “CEM I Portland cement” in ICE, which is the type of cement studied in this paper. For concrete, the average cement content of the concrete studied in this paper is 407.7 kg/m<sup>3</sup> concrete, calculated based on the annual cement consumption quantity and annual concrete production volume. Therefore, the ICE value for concrete was selected from the specific type of concrete in ICE that contains 400 kg cement in one cubic meter of concrete (“400 kg CEM I/m<sup>3</sup> concrete”). As shown in Table 9, the result for cement

presented in this study is larger than the ICE value. In addition, the result for concrete presented in this study is smaller than the ICE value, probably because the concrete plants surveyed in this study add fly ash as cement replacement in the batching process, reducing the amount of cement necessary for each unit volume of concrete. However, the concrete type “400 kg CEM I/m<sup>3</sup> concrete” in ICE does not include the addition of fly ash.

**Table 9. Results comparison of CO<sub>2</sub>-e between ICE and this study**

Database	kg CO <sub>2</sub> -e/kg cement	kg CO <sub>2</sub> -e/m <sup>3</sup> concrete	System boundary
ICE	0.950	0.1810	Cradle-to-gate
This study	1.007	0.1596	Cradle-to-gate
This study	1.010	0.1598	Cradle-to-site

## 7. Conclusion and Future Work

This paper presents and illustrates the methodology framework developed for measuring the life cycle carbon emissions of locally used building materials in Hong Kong. A “cradle-to-site” life cycle system boundary was used in this study. To illustrate the steps of GHG emission calculation, Portland cement and ready-mixed concrete were selected as examples in this paper. The results show that calcination and coal combustion are the major sources of GHG emissions for cement over its “cradle-to-site” life cycle, whereas the high embodied carbon emission in cement manufacture is the largest contributor to GHG emission for ready-mixed concrete over its “cradle-to-site” life cycle. The results were then compared with the values provided in the ICE database developed by University of Bath.

As the values of embodied carbon are region-specific, this study aims to collect first-hand data in Hong Kong and nearby regions, wherever possible, for accuracy and reliability of the final results. However, when the information from the manufacturers was limited, the second-hand information from existing databases or literature would be used. In addition, some assumptions were made for the manufacturing and transport calculation due to the limited information. The methodology framework presented in this paper can be applied to

building materials other than cement and concrete. In the near future, the scope of this study will be extended to more building materials and a building materials carbon inventory database will be developed for the Hong Kong market. Such a database could help build a low carbon built environment in Hong Kong by providing a benchmark for selection of green construction materials and a basis for prediction of carbon emission in building infrastructures.

## References

- British Columbia Ministry of Environment (B.C. MoE), Carbon Dioxide Equivalent (CO<sub>2</sub>e). *Climate Action Secretariat (CAS) – Glossary*. The Government of British Columbia, Canada (2013). <http://www.env.gov.bc.ca/cas/resources/glossary.html> (accessed Feb 27, 2013).
- Cement Sustainability Initiative (CSI), CO<sub>2</sub> Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry. *The Cement CO<sub>2</sub> and Energy Protocol*. Version 3.0. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Switzerland (2011). [http://www.wbcscement.org/pdf/tf1\\_co2%20protocol%20v3.pdf](http://www.wbcscement.org/pdf/tf1_co2%20protocol%20v3.pdf) (accessed Feb 27, 2013).
- Cement Sustainability Initiative (CSI), CO<sub>2</sub> Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry. *The Cement CO<sub>2</sub> and Energy Protocol*. Internet Manual Version 3.04. Line 049b, Emission factor for inbound clinker. [http://www.cement-co2-protocol.org/v3/Content/Internet\\_Manual/linebyline.htm#line049b](http://www.cement-co2-protocol.org/v3/Content/Internet_Manual/linebyline.htm#line049b) (accessed Feb 27, 2013).
- CLCD, Bulk cargo shipping (2500 t) – CN – AP. *Chinese Reference Life Cycle Database (CLCD Public)*. Version 0.8. Sichuan University, IKE Environmental Technology CO., Ltd. China (2010).
- CLCD, Limestone extraction – CN – AP. *Chinese Reference Life Cycle Database (CLCD Public)*. Version 0.8. Sichuan University, IKE Environmental Technology CO., Ltd. China (2009).

- Cornish, A., Yu, W., Cheung, C. W., Wong, A., Ho, P. *et al.*, Hong Kong Ecological Footprint Report 2010. pp21-22. World Wildlife Fund (WWF) - Hong Kong. Hong Kong (2011). [http://awsassets.wwfhk.panda.org/downloads/hong\\_kong\\_ecological\\_footprint\\_report\\_2010.pdf](http://awsassets.wwfhk.panda.org/downloads/hong_kong_ecological_footprint_report_2010.pdf) (accessed Feb 27, 2013).
- Duggal, S. K. Materials for Making Concrete – I Cement. *Building Materials*. pp137-138. A.A. Balkema. Netherlands (1998).
- Ecoinvent, Clay, at mine/CH S. *Ecoinvent System Processes*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Switzerland (2003).
- Ecoinvent, Hard coal, at mine/CPA S. *Ecoinvent System Processes*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Switzerland (2010).
- Ecoinvent, Iron ore, 46% Fe, at mine/GLO S. *Ecoinvent System Processes*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Switzerland (2007).
- Ecoinvent, Sand, at mine/CH S. *Ecoinvent System Processes*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Switzerland (2003).
- Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K. (eds.), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 2. Energy. Chapter 3. Stationary Combustion. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Japan (2006).
- Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K. (eds.), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 3. Chap 2. Mineral Industry Emissions, Cement Production. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Japan (2006).
- EMSD, Heavy Goods Vehicle (Diesel), Gross Vehicle Weight 24.01 – 38.00 Tonnes. *Transport - Energy Consumption Indicator*. Principal Group 6 – Vehicle – Heavy Goods Vehicle (HGV), V41. Electrical and Mechanical Services Department (EMSD). [http://ecib.emsd.gov.hk/en/indicator\\_trp.htm](http://ecib.emsd.gov.hk/en/indicator_trp.htm) (accessed Feb 27, 2013).
- Flower, D. J. M. and Sanjayan J. G., Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture. *The International Journal of LCA*. Volume 12, No 5. pp282-288.

Springer-Verlag. Germany (2007).

Foster, P., Ramaswamy, P., Artaxo, T., Berntsen, R., Betts, D.W. *et al.*, Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Chapter 2. pp129-234. Cambridge University Press. UK (2007).

Frischknecht, R., Carbon Footprinting and LCA. *Advanced Environmental, Social and Economic Assessment*. Swiss Federal Institute of Technology in Zurich (ETHZ). Switzerland (2012).

HKEPD, Guidelines to Account for and Report on Greenhouse Gas Emissions and Removals for Buildings (Commercial, Residential or Institutional Purposes) in Hong Kong. 2010 Edition. pp30-31. HKEPD and EMSD. Hong Kong (2010). [http://www.epd.gov.hk/epd/english/climate\\_change/files/Guidelines\\_English\\_2010.pdf](http://www.epd.gov.hk/epd/english/climate_change/files/Guidelines_English_2010.pdf) (accessed Feb 27, 2013).

Hammond, G. and Jones, C., Inventory of Carbon & Energy (ICE). Version 1.6a. Sustainable Energy Research Team, Department of Mechanical Engineering, University of Bath. UK (2008).

ISO/TC 207, Life Cycle Assessment-Principles and Framework. *Environmental Management*. ISO14040: 2006. pp9-10. International Standard Organization. Switzerland (2006).

JEMAI, CFP Distance Data. Carbon Footprint of Products (CFP) Database. Version 1. Marine shipping- non canal. Japanese Environmental Management Association for Industry (JEMAI). Japan (2012). <http://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/data.html> (accessed Feb 27, 2013).

JEMAI, Mining - Limestone. Carbon Footprint of Products (CFP) Database. Basic data, ver101. Line176. Japanese Environmental Management Association for Industry (JEMAI). Japan (2011). <http://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/data.html> (accessed Feb 27, 2013).

McKinnon, A. and Piecyk, M., Measuring and Managing CO<sub>2</sub> Emissions of European Chemical Transport. pp19. European Chemical Industry Council (Cefic). Belgium (2010).

<http://cefic-staging.amaze.com/Documents/Media%20Center/News/McKinnon-Report-Final-230610.pdf> (accessed Feb 27, 2013).

Mineral Products Association, *Specifying Sustainable Concrete*. pp11. The Concrete Centre, Mineral Products Association. UK (2011).

Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (eds.), Summary for Policymakers. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Switzerland (2007). [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_spm.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf) (accessed Feb 27, 2013).

Richard, C. D. (ed.), Structural Concrete. *The Engineering Handbook*. 2<sup>nd</sup> Edition. Chapter 30, Concrete.. CRC Press. U.S. (2004).

United States Environmental Protection Agency (USEPA), Carbon Dioxide Equivalent. *Glossary of Climate Change Terms*. United States Environmental Protection Agency. U.S. (2012).

World Resources Institute (WRI), CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O Emission Factors by Weight Distance. *Emission Factors from Cross-Sector Tools*. Mobile Transport-For Freight. Table 13 and Table 14. The Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol). U.S. (2011).

## 美國吉德大橋(Gerald Desmond Bridge)抗震優化設計

楊毅

奧雅納工程顧問  
中國香港

Matt Carter

奧雅納工程顧問  
美國

### 摘要

吉德大橋 (Gerald Desmond Bridge) 位於美國加利福尼亞州南部長灘地區，原為建於1960年的一座鋼桁拱橋，但現在已不能滿足日益增加的交通需求。為保證南加州的重要商貿地位和交通需求及人車安全，現正設計建造一座新橋，總長2.7公里，主橋改為雙塔雙索面邊主梁形式的斜拉橋，仍名為吉德大橋，建成後完全取代舊橋。其中斜拉橋主橋總長610米，主梁為鋼混疊合梁，獨柱型橋塔，因其地處強震地帶，對抗震要求極高。本文介紹大橋詳細設計中的抗震優化設計，特別是對主塔設計方案及其與主梁的聯結形式和結構體系的優化，對於大橋在弱震、強震之下的結構響應利用有限元時程分析進行了詳細研究，震後的橋梁適用性及阻尼器的特色和表現都是設計的重要環節，還超限考慮了大于設計荷載的地震發生時的附加安全構件設計，證明瞭優化的塔型和結構體系有效地滿足了抗震要求，獨特的造型充分結合了美觀和施工養護方便，其抗震優化設計理念和成果也值得在其它地區的橋梁設計中借鑒。

### 1. 序言

吉德大橋 (Gerald Desmond Bridge) 位於美國加利福尼亞州南部長灘地區，原為建於1960年的一座鋼桁拱橋，但現在已不能滿足日益增加的交通需求。為保證南加州的重要商貿地位和交通需求及人車安全，現正設計建造一座新橋，總長2.7公里，主橋改為雙塔雙索面邊主梁形式的斜拉橋，仍名為吉德大橋，建成後完全取代舊橋。

本文介紹大橋詳細設計中的抗震優化設計，特別是對主塔設計方案及其與主梁的聯結形式和結構體系的優化，對於大橋在弱震、強震之下的結構響應利用有限元時程分析進行了詳細研究，震後的橋梁適用性及阻尼器的特色和表現都是設計的重要環節，其抗震優化設計理念和成果也值得在其它地區的橋梁設計中借鑒。

### 2. 項目簡介

吉德大橋 (Gerald Desmond Bridge) 原為建於1960年的一座鋼桁拱橋 (圖1)，一方面維護工程困難越來越大，另一方面也不能滿足日益增長德交通，同時也無法滿足港口運作中所需通航淨空。



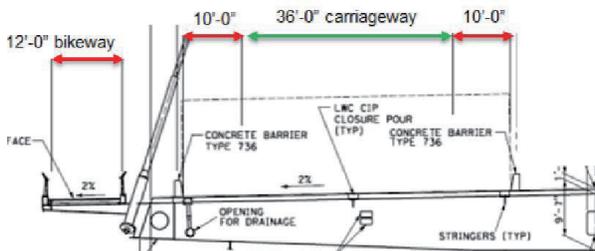
圖片 1. 現有之鋼桁拱橋



圖片 2. 擬建之斜拉橋

因此開始設計建造一座新橋取代之。新橋的斜拉橋主橋總長610米，主梁為鋼混疊合梁，獨柱型橋塔（圖2）。與原橋相比，增加了通航淨空和可承受的交通量。除斜拉橋主橋外，新建之大橋還包括在兩岸的混凝土高架橋引橋及交通交匯設計，總長為2.7公里，即西引橋0.91公里，主橋0.61公里和東引橋1.18公里。

主梁為邊主梁鋼箱梁即混凝土橋面板的組合結構形式。主梁典型截面如圖3所示，除了車輛交通外，在主梁一側還提供3.6米寬的人行道和單車道，并在跨中和四分之一橋跨的位置設置休息平臺，供行人休息和觀景。



圖片 3. 主梁典型截面（半側）

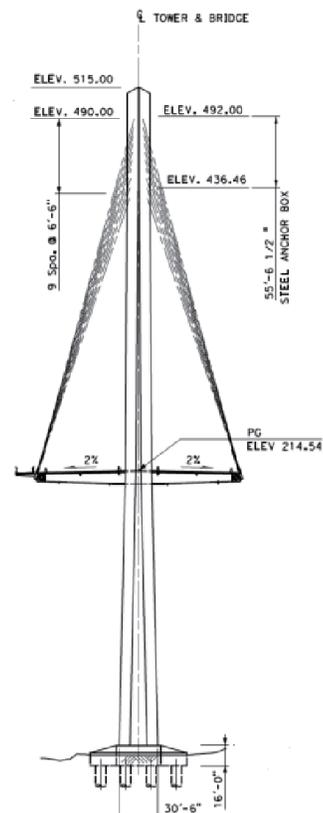
### 3. 橋塔設計及抗震特色

最終方案的橋塔為獨柱型的橋塔，總高度約157米，塔梁結合處位于65米高度的位置（圖4）。塔柱為空心截面，在塔底為八邊型，寬9.3米，逐步縮小至主梁高度後，轉為菱形截面直至塔頂（圖5）。塔頂可開啓，內裝有維修養護吊機，可以伸出塔外協助進行維修養護工作。

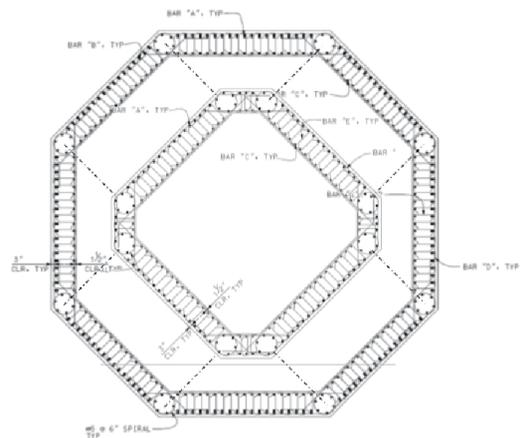
#### 3.1 主塔柱優化

主塔設計的一個主要因素是其抗震結構體系。根據設計要求，地震荷載作用下的主塔響應采用不同的地震波輸入模型後以時程分析的結果進行設計。地面加速度的峰值在強震的安全設計條件（Safety Evaluation Event）下為1.4g，要求主塔必須能承受最小限度的破壞。業主的參考方案是采用相互靠近的雙塔柱，其間以抗剪短橫梁

連接，是之前在加州地區成功用于海灣大橋的主塔抗震方案。



圖片 4. 主塔立面



圖片 5. 主塔截面尺寸的變化

但是由于采用相互靠近的雙塔柱，位于主梁中央的塔柱截面較寬，勢必增加主梁寬度來適應塔截面的寬度（圖6）。改為獨柱可以減低造價，且便于設計塔內通道，也有利于養護和震後維修。塔底截面的減小，對基礎的要求也可減低。

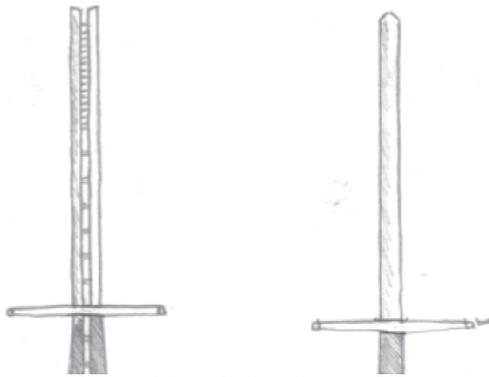


圖 6. 塔柱型式比較和優化

### 3.2 塔梁連接優化

主塔柱優化後，抗剪短橫梁的抗震效果將通過塔梁間的阻尼器和觸發裝置承擔。阻尼裝置的用途是在地震發生時通過耗能和緩衝減少對橋梁結構構件的傷害。因此在橋梁的使用過程中是無須阻尼器的作用，而且也不希望阻尼器平時的頻繁伸縮而太早造成損耗和失效，所以附加一個觸發裝置，觸發裝置的作用是在大橋的正常狀態下鎖定阻尼器，使塔梁之間在橋梁自重、溫度變化、車輛荷載、風荷載等的作用之下都沒有相對位移。

塔梁之間縱向和橫向都以數組阻尼器和觸發裝置連接（圖7）。所需阻尼器和觸發裝置的數量根據時程分析的地震力大小和每一個阻尼器的承載力加以選擇。

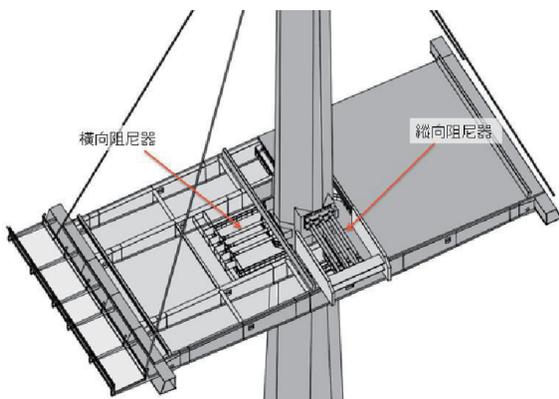


圖 7. 塔柱型式比較和優化

而當地震發生時，地震力大到一定程度則令鎖定裝置失敗，從而觸發阻尼器（圖8），容許塔梁間800毫米的相對位移。阻

尼器的阻尼效應耗散地震能量，以達到保護主塔和主梁免受破壞的目的。

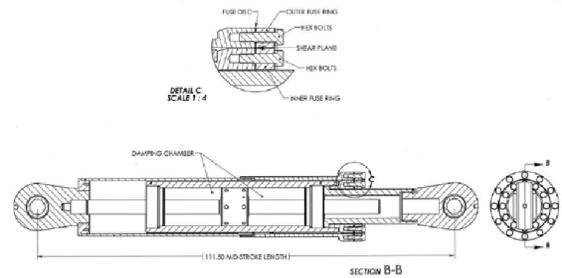


圖 8. 阻尼器及其觸發裝置

這樣保證主塔基本是在彈性範圍內工作。震後對塔梁及阻尼器的檢查都容易進行，使阻尼器及塔梁複位并更換損壞了的觸發裝置都能直接進行操作，不影響橋梁結構其他部分的工作。

非線性地震時程分析採用LS-Dyna模型（圖9），阻尼器的非線性特性和觸發裝置的受力特性都在模型中進行模擬。阻尼器在強震作用之下的典型力—位移時程響應如圖10所示。

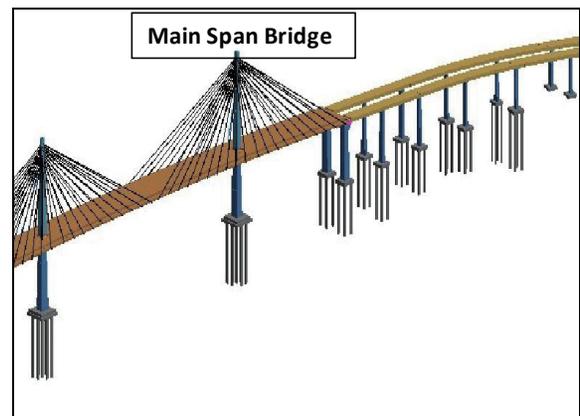


圖 9. 非線性有限元分析

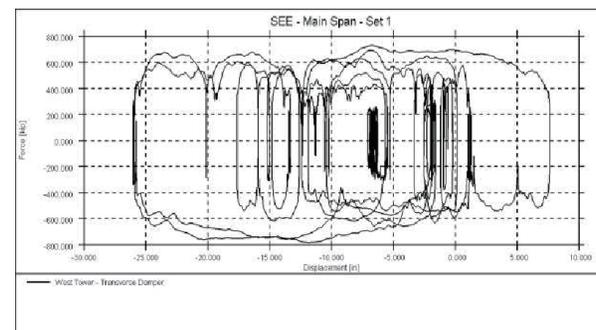
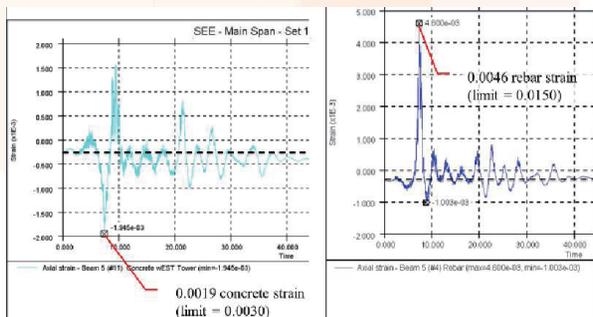


圖 10. 阻尼器力—位移時程

主塔混凝土截面的鋼筋也通過特定的模型進行模擬，可以直接輸出在地震荷載作用之下主塔截面混凝土的應力和應變，以及鋼筋的應力和應變。圖11顯示主塔截面混凝土和鋼筋在強震作用下的應變時程，皆能够滿足設計要求。

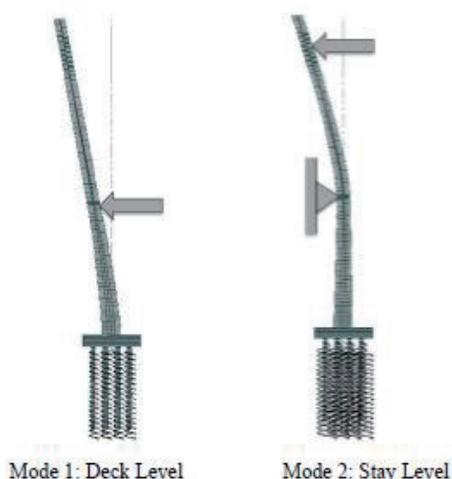


圖片 11. 主塔截面混凝土和鋼筋應變

塔梁之間阻尼裝置抗震設計還進一步考慮了震後觸發裝置更換前發生強風及在車輛荷載作用下阻尼體系的效應，保證整座大橋的結構體系在完全恢復到地震前的狀態下仍能正常工作。

#### 4. 延展性

主塔的延展性通過對主塔頂部和主梁高度施加橫向力直至破壞加以研究（圖12），在設計要求範圍內完全滿足要求。除此之外，還進一步考慮如果地震發生產生的地震波強度超過設計範圍，如何令設計進一步安全。



圖片 12. 主塔延展特性研究加載工况

阻尼器的設計是根據設計要求的地震強度，如果超限，阻尼器活塞的遠動範圍可能過大造成損壞。因此設計了結構擋塊阻止阻尼器運動超出容許範圍，從而保證阻尼器在整個地震過程中發揮作用。

#### 5. 總結

新建之吉德大橋(Gerald Desmond Bridge)對結構抗震進行優化，合理地為斜拉橋主橋選擇了獨柱型的橋塔。強震作用下的時程分析表明主塔截面混凝土和鋼筋的應變都保持在設計要求的彈性應變範圍內，雖然主塔的彈性變形很大，在地震後仍然可以回到其中性位置。

設計中采用阻尼器和觸發裝置的抗震隔震體系能有效地控制橋塔的地震響應。塔型設計獨具一格，簡潔明瞭又充分考慮了施工便利和維修養護的方便。其抗震優化設計理念和成果也值得在其它地區的橋梁設計中借鑒。

## 建築物生命週期碳排放分析之發展

吳兆堂

香港大學土木工程系  
中國香港

鄒偉武

何瓊

香港大學土木工程系  
中國香港

### 摘要

建造業作為全球碳排放的主要來源之一，在全球節能減排的趨勢下將發揮舉足輕重的作用。近年來，為了推行綠色環保建築，各國都在積極地發展綠色建築評審標準和認證體系。然而，這些標準和認證體系很少提及建築材料和建築設備在生命週期內的碳排放量。由於缺乏相關的量化和評核基準，建造業在減少能耗，循環再造等減碳的發展方向上勢必會受到極大的限制。

本文開頭介紹了相關的綠色建築評審標準和認證體系，並闡述了這些體系的重點和理念。由於目前世界上並沒有一個得到廣泛認可和應用的建築物碳排放計算標準，本文引入了生命週期分析法（LCA），並重點闡述了其在建築項目應用時如何設定一個合適的界限（boundary）。文章亦簡介了一個評估建築物料隱含碳足蹟的平台，以及碳排放分析在應用上存在的一些潛在困難。我們希望可以藉此研究，把建築物的生命週期碳排放分析和綠色建築評審互相融合，從而為建築項目由設計、建造到拆卸提供一個更加全面和有效的環境影響分析評估。這樣也可以幫助業主或發展商在節能減排方面提供最佳方案。

關鍵字：二氧化碳 碳排放 建築物環境評價 隱含碳足蹟 生命週期

### 1. 序言

二氧化碳（CO<sub>2</sub>）的大氣濃度問題變得越來越嚴峻，同時給環境造成了極大的負擔（Lu *et al.*, 2007）。作為全球經濟中的一個重要行業，建築業通過各種直接和間接的行業活動排放了相當多的碳（Goldenberg, 1998）。根據美國國家環境保護局（US EPA）2008年出版的報告，美國建築業的碳排放總量位列各行業第三位，而且該行業消耗了全國差不多4成的能量（USA Census Bureau, 2003）。在英國，建築業消耗了將近全國5成的主要能源。

目前，各國開始建立自己的綠色建築評審標準和認證體系，作為一種鼓勵環保建築設計和施工的方式。儘管這些標準和認證體系在行業中得到了廣泛的應用，但目前大部份都停留在評價建築物的整體性的環境表現（Cole, 1998），而往往忽略了碳排放這個重要的方面。更為重要的是，排放的標準設置卻是基於建築運行階段能源消耗而定。所以，目前的根本問題是，對於整個建築系統的碳排放缺乏一種系統化的量化和評核基準（Ayaz and Yang, 2009）。現有的綠色建築評審標準和認證體系在提倡環保綠色產品和過程方面存在不足，由於其使用線性的評價方式，局限了建築物在生命週期內設計優化（Braungart and McDonough, 2007）。

考慮到生命週期內碳排放對於業主或者發展商來說是經濟上有益的，因為通過更加有效的資源利用方式，比如使用低碳環保同時低成本的建築材料，可以提高用戶的滿意度，從而也增加了利潤。但是，由於缺乏對生命週期內碳排放分析方法的相關知識，使得這一概念很難得到有效地實施。本文探討了目前比較流行的幾種綠色建築評審標準和認證體系，討論了碳審計以及生命週期的相關概念。文章亦簡介了一個評估建築物料隱含碳足跡的平台，並闡述了生命週期分析法在建築項目應用上存在的一些潛在困難。

## 2. 建築物的環境性能

為了測評建築物整體或者某部份的能耗，一般會使用兩種基本的工具：一種是測量評估另外一種是評定等級 (Ding, 2008)。綠色建築評審標準和認證體系包括能源標籤，能源審計和分析，以及建築物整體性能評價。開發能源標籤，提高能耗率，被廣泛採納為一種有效地鑑定能耗表現，找出節能機會和增加建築物租售價值的方式。這些標準和體系也可以為建造商，賣家和買家，以及業主或者租戶等其他利益相關者之間在交易成本，信息不對稱或者資源錯配等方面提供更透明的信息 (Levine et al., 2007)。

首個綠色建築評審標準和認證體系由一家英國的建築研究機構 Building Research Establishment, UK 建立。其建立目的是測評建築物對環境的整體影響，並且基本上考慮了所有相關的影響因素，這其中包括了碳排放，物料回收和室內空氣質量 (Prior, 1993)。由此，一系列的建築物認證體系也開展開來，很多國家也開始建立起了自己的一套認證體系和標準，比較出名的有德國的 Blue Angel 和 Green Dot，西班牙的 AENOR Medio Ambiente 和新加坡的 Energy Smart Labelling System。這些認證體系在排查建築物及其各組成部份的能耗表現方面是非常有效 (Lee and Rajagopalan, 2008)。

區域性的認證體系在某特定的地理環境中還是起到了一定積極的效果，尤其是考慮了當地經濟文化方面等等的因素 (Stevenson and Ball, 1998)。但是，這些也會容易引起混淆，特別是使得不同認證體系之間的可比性變得更加複雜。West (1995) 研究得出目前的建築物環境認證體系在可靠性方面存在很大問題。特別是投入了大量的成本以及資源去開發一套建築物能耗表現認證體系 (Larsson, 1999)。相關的比較研究表明，與環保標籤相比，實施 ISO 14000 使建築業在提高環境表現方面的效果更加顯著 (Ball, 2002)。

相關的環保團體和組織也有使用其他的方法，比如考慮了環境影響審計項目，可以幫助消費者在提升建築物能耗表現方面更有幫助 (Levine et al., 2007)。比如，歐盟的 Eco-Management and Audit Scheme (2001) 提供了一種標準而又全面的環境測量體系。為了使建築在節能方面達到更好的效果，建築能耗分析被廣泛採用，使建築物對能源的依賴性降低，同樣也可以遵守全球在減碳方面的承諾。此外，還有一些能耗模擬程式，比如 Hourly Analysis Program 和 PowerDOE，這些在建築物能耗分析方面都能提供類似的分析結果 (Rey et al., 2007)。

BREEAM 是在世界範圍內都很有影響力的一套綠色建築評審標準和認證體系。加拿大，澳大利亞，香港以及其他國家和地區在 BREEAM 的基礎上，都開發出了一套適合本土的建築物環境評價方法。其他的國家和地區也開發了一些相應的工具來對建築業能耗以及碳排放進行測評。

## 3. 建築物環境評價的侷限性

儘管以上提到的各種評價工具迄今為止的廣泛運用，仍然還是存在一些不足之處。Ding (2008) 在一項研究總結如下：

- 這些環境評價的過程一般是在建設項目設計將要完成的時候才開始進行，這樣就侷限了環評在設計指引方面的作用（Crawley and Aho, 1999; Soebarto and Williamson, 2001）。
- 既然環境評價是用來評價建築設計，那他們在最優項目的選擇上就變得沒有那麼有用。比如在可行性研究階段，不同項目選址，設計方案之間進行互相比較（Lowton, 1997）。
- 有些評價系統，比如 BREEAM，BEPAC，LEED 和 HK-BEAM 很少考慮在經濟上的一些因素。某些項目可能環境表現十分優秀，但是對於投資方來講帶來的回報確很低。
- 大部份的綠色建築評價體系都具有本地性質，如果要區域或者全國進行推廣，會有很多的侷限性。
- 綠色建築評價體系在評價指標方面太過於全面而變得過分複雜。
- 目前的評價體系和相關工具很難測量和評價一些定性環境問題。

由於以上存在的侷限性，Soebarto and Williamson (2001) 開發了一套多指標的建築物環境影響評價方法，這種方法允許建築設計人員在不同的環境下測試建築方案。另外，Ding (2008) 也提出了一套多指標方法來對不同的建築方案和設備運營策略進行排序。Todd (1998) 建議對不同的環境指標提供定性或者定量分析的範圍，這樣可以從不同的角度進行判別從而選出最優方案。特別是當那些定量分析所需要的數據難以獲得，或者缺乏，甚至數據獲得的成本過高的時候。

#### 4. 生命週期分析

生命週期分析 (LCA) 是用來評價某種產品（實物產品或者服務性產品）或者某種生產活動在其整個生命週期內對於環境影響的一種方法 (Vigon *et al.*, 1993; EEA, 2002; Sonnemann *et al.*, 2003; Fava, 2004; Taborianski, 2004; Fava, 2006)。這種方法自 1990 年開始廣泛用來計算能源消耗量和碳排放。LCA 在建築業的潛在應用價值也有廣泛的研究。開發相關的 LCA 工具對於香港的建築物來說，被看來是一種有效的設計工具，特別是可以用來優化建築設計以及提供一種實際有效的決策工具來評價建築物的可持續性。其他相關的 LCA 工具也有同樣被開發出來被應用在環境評價上 (Centre for Design, 2001; Erlandsson and Borg, 2003; Forsberg and Forsberg, 2004)。

作為一種對建築業進行環境影響評估的工具，LCA 為建築在整個生命週期內的能耗，從設計、建造到拆卸提供一個分析評估。McDonough and Braungart (2002) 認為生命週期應該涵蓋原材料提取，生產，建造，使用，一直到變成廢料進行處理。Steffen (2006) 將這種生命週期的概念描述為一種線性的，或者單向性的過程，因為有些物料即使還有某些價值，但在產品壽命終點的時候會以廢料而放進堆填區 (Bisset, 2007; US GBC, 2005)。

另外一種和 cradle-to-grave 相對應的生命週期理論是 Braungart *et al.* (2007) 的 cradle-to-cradle 理論。這種理論將材料的整個生產流程看成是一種週期性的過程 (Miyatake, 1996)。該理論模型下，沒有材料應該變成廢料而進行處理，這些耗材會通過回收而再生 (Tischner *et al.*, 2001)。依據這種理論，建築工程在原材料上面會變得沒有那麼具有依賴性，而且原材料本身會一直保值或者改變用途。Braungart *et al.* (2002, 2007) 將這種現象叫做生態效益，認為這種現象就是產品會附帶環境價值，從而使社會經濟向前發展。並且，這種概念也

和材料設計在不同產品的生命週期階段有關，比如某種材料用在某種產品中會比用在同樣的產品中間另一階段更有價值或者效率（Kibert, 2008）。

然而，材料或者產品回收並不是一個新的概念，況且目前本身已經慢慢開始形成了一個行業，比如廢料場，二手商店等等的存在。然而，某些行業，比如說汽車製造業，家用電器和 IT 行業對應用 cradle-to-cradle 方式的興趣愈加濃厚。例如，用於租賃的施樂複印機經過翻新可以增加多次生命週期，而一次性“用完即丟”的相機事實上也可以被重複使用到十次之多（Cottrill, 2003）；以及蘋果公司對其電子設備（其中包括來源於任何一家製造商的計算機和顯示器）的重複使用和循環利用。

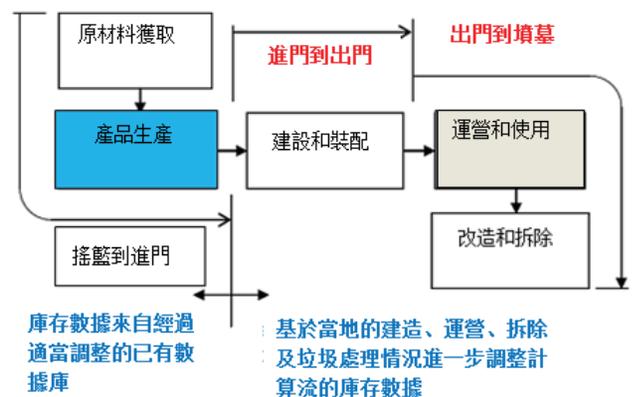
## 5. 生命週期分析在建設項目中的應用

在建築行業，Simonet al. (2007) 已經將 cradle-to-cradle 概念用於鑑定通過應用選擇性拆遷程序如何顯著改善廢物處置的質量。他們發現，這種鑑定方法有利於發展建築物廢棄處置的改良程序，從而促進在處置過程中恢復建築材料，即實現材料性能零損失。就可重複使用和循環利用的具體建築材料而言，最常見就是金屬，如鋼鐵和鋁。鋼鐵是世界上循環利用最多的材料，這是因為廢鋼料的循環利用比開採原始礦石便宜，且與重新生產新鋼材相比，鋼鐵的循環利用可以節省 74 % 的能源（Steel Recycling Institute, 2006）。而重熔廢鋁料所需的能源只有從原始礦石中獲得鋁金屬所需能源的 5%（Millbank, 2004）。

Liu (2009) 開發了一個用於追蹤鋼構建築物生命週期的模型，稱為“資源環”。在結合 cradle-to-grave 模型以及 cradle-to-cradle 模型（Steffen, 2006; El Hagggar, 2007）的基礎上，該模型解釋了在一這封閉循環系統中的材料使用流和能量流，在這這

系統中建造過程的廢棄材料被用於生產其他產品。Liu (2009) 的研究結果顯示，運輸很大程度上影響了 cradle-to-cradle 的設計。因為無論是在建築或拆遷過程中，還是在重複使用或循環利用過程中，運輸都需要消耗大量的能源。

因此，有必要謹慎考量和評估建築設施在生命週期中的排放物，即原材料的提取和加工，產品加工，產品分配，建築運營，以及廢棄物管理等。從 cradle-to-grave 的角度來說，一個建築設施的碳排放量應該用每平方米建築面積或最少單位造價（所產生的二氧化碳當量的噸數（tCO<sub>2</sub>e）來計算（如圖 1 所示）。



圖片一. 建築行業中用於評估碳排放的 cradle-to-grave 概念

要實現上述對建築設施生命週期排放物的評估，首先需要描繪出在產品製造和運輸過程中（即到某個施工現場入口處）所產生的碳排放量。當在施工現場需要進一步加工時，需要謹慎考量從開始施工到設施施工完畢（即到施工現場出口處）整個過程中所需消耗的能源。更重要的是不應該低估在運營階段和設施壽終時處置廢棄物階段的能源消耗。對建築設施生命週期 CO<sub>2</sub> 排放物的評估將有助於委託方，設計團隊成員，承包方和最終使用方共同做出一個合理的決定，即在設施施工過程中該採用什麼樣的設計和的材料（cf: PAS, 2008）。

## 6. 隱含碳足跡的評估

水泥是作為一個例子來說明該機制如何評估產品的碳足跡。製造商應計算一個特定的水泥產品對全球變暖的潛在作用，即通過量化所有重要溫室氣體在水泥產品生命週期中的排放來表現為二氧化碳當量。從水泥生產開始所排放的碳可以分為三個關鍵過程即上游，核心和下游。

II CO <sub>2</sub> e 核算								
A. 直接排放的 CO <sub>2</sub> e								
A1. 原料和燃料燃燒的 CO <sub>2</sub>			產品1	產品2	產品3	產品4	產品5	總計
19	根據排放因子計算生物含有生物碳的 CaO+MgO	[kg CO <sub>2</sub> /t cl1]	525	525	525	525	525	525
20	生物含量的生物碳	[% 數量]	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
21	生物碳的總量	[t 數量]	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
22	生物碳的淨量	[t/yr, 數量]						
23a	CO <sub>2</sub> 原料燃燒為熟料排放的	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
23b	粉磨熟料排放的 CO <sub>2</sub>	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
23c	CO <sub>2</sub> 離間爐排放的 CO <sub>2</sub>	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
23d	生料的生物碳氧化時排放的 CO <sub>2</sub>	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
23	原料和熟料和氧化時排放的 CO <sub>2</sub>	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
A2. 爐窯中燃料排放的 CO <sub>2</sub>			產品1	產品2	產品3	產品4	產品5	總計
24aa	傳統的化石燃料排放的 CO <sub>2</sub>	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
24b	替代燃料排放的 CO <sub>2</sub>	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
24c	生物燃料 CO <sub>2</sub>	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
24	燃料排放的 CO <sub>2</sub> 總量	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
A3. 碎爐中燃料排放的 CO <sub>2</sub>			產品1	產品2	產品3	產品4	產品5	總計
25a	碎爐原料排放的 CO <sub>2</sub>	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
25b	碎爐運輸排放的 CO <sub>2</sub>	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
25c	碎爐排放的 CO <sub>2</sub>	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
25d	碎爐製成或製冷排放的 CO <sub>2</sub>	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
25e	碎爐發電排放的 CO <sub>2</sub>	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
25	碎爐中燃料排放的 CO <sub>2</sub> 總量	[tCO <sub>2</sub> /yr]						
			產品1	產品2	產品3	產品4	產品5	總計
26	直接排放的 CO <sub>2</sub> e 總量	[tCO <sub>2</sub> /yr]						

表一. 跟蹤和評估水泥碳足跡的計算工具

(鳴謝：香港建造業議會)

透過香港建造業議會發展的計算工具，製造商可識別和輸入碳核算和碳審計的必要數據。如圖 2 所示，該工具根據製造商生產的不同產品為他們輸入排放數據提供了不同的模板。根據系統的輸入和輸出數據以及內置信息如不同類型的燃料的轉換係數，這個計算機工具會基於每噸水泥產生的功能單元的二氧化碳當量的噸數自動計算出總炭量。這應該為建立一個建築設施的隱含碳提供必要數據。

## 7. 挑戰

一般情況下，生命週期碳排放分析面臨的挑戰包括 4 個方面 (El Hagggar, 2007; Proveniers *et al.*, 2009)：

- 概念的挑戰 - 包括對生命週期碳排放的分析概念缺乏經驗，缺乏生命週期碳減排的設計和建築材料，以及相關的風險。
- 經濟的挑戰 - 由於傳統思維只關注初始投資，並不願意投入更多資源於建築階段。
- 參與者的挑戰 - 很多參與生命週期的碳排放分析過程的人們可能會導致利益各方內部和外部的衝突。工業活動和不同利益相關者之間的複雜關係使得生命週期碳排放分析策略難以實施 (Savitz, 2006)。舉例來說，材料的再利用和循環利用實質上是承包商、製造商和終端用戶的責任，而設計師應該在設計階段就決定材料的可再利用性和可循環利用性。此外，目前建築行業缺乏生命週期碳排放分析概念的相關經驗，從而使得該分析的應用困難，例如，跟蹤材料流和產品的生命週期是非常困難的。儘管目前在使用一些跟蹤方法比如經濟投入產出和生命週期分析，但是如果沒有精確可靠的信息可利用，這些結果都是不確定的值 (Hermreck and Chong, 2009)。
- 測量的挑戰 - 現有的材料和能源核算方法不足以提供充足全面的數據 (Liu, 2009)。

## 8. 總結

這篇文章研究建築環境分析工具，該工具用於處理建築生命週期內特定部分的能源和碳計算。本文還肯定了生命週期碳排放分析概念的重要性，除了減少能源消耗和碳排放，還具有長期的經濟效益。它指出了很少研究會考慮建築的重複利用和循環使用的環境效益，同時也很少探索進一步發展該領域現有的評估工具來提供足夠精確的信息。另外，生命週期碳排放分析概念的應用前景受到諮詢商、承包商、業主貧乏的經驗和知識的限制，也受到他們共同工作能力的限制。

雖然許多研究已經證實，一個建築設施在整個生命週期內能產生顯著數量的二氧化碳，但是徹底反思怎樣改進現存的含有生命週期碳排放的建築環境評估方法是非常必要的。因此，文章亦簡介了一個評估建築物料隱含碳足跡的平台。

除了運營階段是二氧化碳排放量最大的貢獻者外，在規劃和設計階段、材料製造階段，施工過程階段，維修和裝修階段，以及拆除和處理廢物階段產生的任何排放都應該被考慮。通過採用生命週期的碳排放量分析概念，減少對原材料的依賴，認識到生產新材料的負面影響，加強回收循環利用和再利用等方面的潛力應該在建築行業中增加。

### 致謝

作者感謝香港建造業議會、深圳市戰略性新興產業發展專項資金項目「深圳碳排放技術重點實驗室」、及香港大學 CRCG Seed Funding for Basic Research (項目編號：201111159093) 與 Small Project Funding (項目編號：201109176151) 為本研究項目提供所需經費。

### 參考資料

Apple (2010). *Apple recycling program*. Webpage accessed 10 August 2010 at: <http://www.apple.com/recycling/computer/>

Ball, J. (2002). Can ISO 14000 and eco-labelling turn the construction industry green? *Building and Environment*, **37**, 421-428.

Bisset, R. (2007). *Buildings can play a key role in combating climate change*, UNEP news release. Webpage accessed 5 July 2010 at: <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=502&ArticleID=5545&l=en>:

Braungart, M., McDonough, W. & Bollinger, A. (2007). Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions - a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production*, **15**(13-14), 1337-1348.

Centre for Design at RMIT (2001). *Background report LCA Tools, data and application in the building and construction industry*. Webpage accessed 8 July 2010 at: <http://buildlca.rmit.edu.au/menu8.html>

Charter, M. & Tischner, U. (2001). *Sustainable solutions: developing products and services for the future*. Sheffield: Greenleaf Publishing.

Cole, R. J. (2005). Building environmental assessment methods: redefining intentions and roles. *Building Research and Information*, **35**(5), 455-467.

Cottrill, K. (2003). Dell and the reverse computer boom. *Traffic World*, **267**(50), 23.

Crawley, D. & Aho, I. (1999). Building environmental assessment methods: application and development trends. *Building Research and Information*, **27**(4/5), 300-308.

Curwell, S., Yates, A., Howard, N., Bordass, B. & Doggart, J. (1999). The Green Building Challenge in the UK. *Building Research and Information*, **27**(4/5), 286-293.

Ding, G. K. C. (2008). Sustainable construction - The role of environmental assessment tools. *Journal of Environmental Management*, **86**, 451-464.

EEA (2002) *Case studies on waste minimisation practices in Europe*. Copenhagen: European Environment Agency.

Erlandsson, M. & Borg, M. (2003) Generic LCA-methodology applicable for building, construction and operation services-today

practice and development needs. *Building and Environment*, **38**(7), 919-938.

European Union (2001). *Allowing voluntary participation by organizations in a community eco-management and audit scheme (EMAS)*. Regulation (EC) No. 761/2001 of the European Parliament and of the Council of 19 March 2001, Official Journal of the European Communities, L114/1, Brussels: European Union.

Fava, J. A. (2004). *Why take a lifecycle approach? Lifecycle initiative*. Paris: United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry and Economics Production and Consumption Branch.

Fava, J. A. (2006). Will the next 10 years be as productive in advancing lifecycle approaches as the last 15 years? *International Journal Lifecycle Assessment*, **11**(Supp.1), 6-8.

Forsberg, A. & von Malmborg, F. (2004). Tools for environmental assessment of the built environment. *Building and Environment*, **39**, 223-228.

Haggard, S. E. (2007). *Sustainable industrial design and waste management: cradle-to-cradle for sustainable development*. London: Elsevier Academic Press.

Hermreck, C. & Chong, W. K. (2009). Embodied energy of CDW recycling and technical metabolism due to regional differences and building designs. *Proceedings: 2009 Construction Research Congress*. April 5-7, Seattle, WA, American Society of Civil Engineers, 526-536.

Kibert, C. J. (2008). *Sustainable construction: green building design and delivery*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, Inc.

Larsson, N. K. (1999). Development of a building performance rating and labelling system in Canada. *Building Research & Information*, **27**(4/5), 332-341.

Lee, S. E. (2008). Rajagopalan priyadarsini - Building energy efficiency labelling programme in Singapore. *Energy Policy*, **36**, 3982-3992.

Lee, W. L. & Burnett, J. (2006). Customization of GBTool in Hong Kong. *Building and Environment*, **41**, 1831-1846.

Lee, W. L., Yik, F. W. H. & Burnett, J. (2007). Assessing energy performance in the latest versions of Hong Kong Building Environmental Assessment Method (HK-BEAM). *Energy and Buildings*, **39**, 343-354.

Levine, M., Ürge-Vorsatz, D., Blok, K., Geng L., Harvey, D., Lang, S., Levermore, G., Mehlwana, A. M., Mirasgedis, S., Novikova, A., Rilling, J., & Yoshino, H. (2007). Residential and commercial buildings. In: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R. & Meyer, L. A. (eds): Cambridge and New York: Cambridge University Press.

Liu, L. F. (2009). *Tracking the lifecycle of construction steel: the development of a resource loop*. Unpublished Thesis, School of Engineering, Kansas: University of Kansas.

Lowton, R. M. (1997). *Construction and the Natural Environment*. Oxford: Butterworth Heinemann.

Lu, J., Vecchi, G. A. & Reichler, T. (2007). Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophysical Research Letters*, **34**, 5 pages.

- McDonough, W. & Braungart, M. (2002). *Cradle-to-cradle: remarking the way we make things*. New York, NY: North Point Press.
- Millbank, P. (2004). *Aluminum recycling vital to global supply chain*. Aluminum International Today. Webpage accessed 6 August 2010 at: <http://www.allbusiness.com/primary-metal-manufacturing/alumina-aluminum/232827-1.html>
- Miyatake, Y. (1996). Technology development and sustainable construction. *Journal of Management in Engineering*, ASCE, **12**(4), 23-27.
- PAS (2008). *Publicly available specification 2050 - specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. London: BSI British Standards.
- Prior, J.J. (1993). *BREEAM / new offices (version 1/93): an environmental assessment for new office designs*. Garston, Watford: Building Research Establishment.
- Proveniers, A. G. W. J., de Vries, B., Collas, D. P. M., Advokaat, B. & Nieuwenhuijsen, I. (2009). A cradle to cradle (C2C) decision support model for the development of mixed functional areas. In: *Changing Roles: New roles, New Challenges*. Wamelink, H., Prins, M. & Geraedts, R. (eds.): Delft: TU Delft. 645-654.
- Rey, F. J., Velasco, E. & Varela, F. (2007). Building energy analysis (BEA): a methodology to assess building energy labelling. *Energy and Buildings*, **39**, 709-716.
- Simon, M., El-Haram, M. & Horner, R. M. W. (2007). Cradle-to-cradle - a concept for the disposal of building at the end of their lives? *Proceedings: International Conference on Whole Life Urban Sustainability and its Assessment*. June 27-29, Glasgow Caledonian University, Glasgow.
- M. Horner, C. Hardcastle, A. Price & J. Bebbington (eds.), 14 pages.
- Soebarto, V. I. & Williamson, T.J. (2001). Multi-criteria assessment of building performance: theory and implementation. *Building and Environment*, **36**, 681-690.
- Sonnemann, G., Castells, F. & Schuhmacher, M. (2004). *Integrated life-cycle and risk assessment for industrial processes*. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Steel Recycling Institute (2006). *Steel recycling holds strong despite inventory crunch*. Webpage accessed 6 August 2010 at: <http://www.recycle-steel.org/PDFs/2006RatesRelease.pdf>
- Steffen, A. (2006). *World changing: A user's guide for the 21<sup>st</sup> century*. New York, NY: Harry N. Abrams, Inc.
- Stevenson, F. & Ball, J. (1998). Sustainability and materiality: the bioregional and cultural challenges to evaluation. *Local Environment*, **3**(2), 191-209.
- Taborianski, V. M. & Prado, R. T. A. (2004). Comparative evaluation of the contribution of residential water heating systems to the variation of greenhouse gases stock in the atmosphere. *Building and Environment*, **39**(6), 645-652.
- Tam, V. W. Y. (2007). The effectiveness of the green building evaluation and labelling system. *Architectural Science Review*, **50**(4), 323-330.
- Todd, J. (1998). Incorporating lifecycle assessment concepts and other suggestions for enhancing the GBC 98 assessment framework. *Proceedings: Green Building Challenge '98*. October 26-28, Vancouver, BC, Vol. 1, 330-336.

USCB (2009). *Guide to Data Sources, Definition: NAICS 23, Construction*, U. S. Census Bureau. Webpage accessed on 2 December 2010 at: <http://www.census.gov/epcd/naics02/def/ND-23.HTM> Business Dictionary.com

USEPA (1993). *Lifecycle assessment: inventory guidelines and principles*, EPA/600/R-92/245, Office of Research and Development, Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency.

USEPA, (2008). *Quantifying greenhouse gas emissions in key industrial sectors in the U. S.*, Sector Strategies Division, Washington, DC: US Environmental Protection Agency.

USGBC (2005). *LEED new construction version 2.2 reference guide*. Washington, DC: U. S. Green Building Council.

West, K. (1995). Eco-labels: the industrialization of environmental standards. *The Ecologist*, 25(1), 31-47.

## 作者簡介

吳兆堂是香港大學土木工程系之教授及基建及建造業發展研究中心行政總監。他發表超過 300 篇國際論文。吳教授獲得的研究經費達 6.5 百萬美元。他目前的研究集中於可持續建築與樓宇翻新、建築物生命周期碳審計、及綠色建築物料評核機制等。

鄒偉武博士是香港大學土木工程系之博士後研究員。他的研究領域包括綠色建築及建築採購模式等。

何瓊是香港大學土木工程系領博士博士生。她的研究方向在於提高可持續樓宇翻新的整體成功。

## 大理石和岩溶空洞上的地基設計和施工個案： 天水圍公共圖書館及室內體育中心

嚴建平  
香港工程師學會土木分部、環境分部前主席

鄧俊旭、黃志棠、梁文傑  
香港特別行政區政府建築署

### 摘要

此項目是在香港天水圍區興建一座綜合大樓，大樓內有公共圖書館、泳池、多用途室及體育館。建築署負責建築設計、岩土工程、結構工程、屋宇裝備工程、工料測量及施工監督等顧問服務。天水圍區地質非常複雜，有大理石和岩溶空洞，最大的岩溶空洞直徑有 11m，而此項目上層的室內體育中心更要提供兩層大跨度空間，本文會詳細介紹此項目的規劃理念、地基和 7m 深的地庫的設計和施工。

### ABSTRACT:

*This paper will present a trail that demonstrates the process of the planning, design and construction of the foundation and basement in a very difficult ground with cavernous karst in Tin Shui Wai, Hong Kong SAR with thorough considerations of technical issues and alternative solutions. In this project, an appraisal was carried out to determine the effect of geological constraints on the foundation design and to assess the suitability of different types of foundation systems for the project with a basement of 7m depth.*

### 1. 序言

天水圍區位於香港西北角，此項目(圖 1、圖 2 和圖 3)是在這個地區興建一座綜合大樓，整座大樓分為兩大部分：公共圖

書館和室內體育中心，室內體育中心內有大跨度空間的泳池、多用途室及體育館，讓居民有一個優質的文化及康樂活動場所。整個項目在 2009 年 4 月正式動工，其中室內體育中心在 2011 年底完成並開放使用，而公共圖書館則在 2012 年底正式投入服務。在此項目工地東面有大理石和岩溶空洞，最大的岩溶空洞直徑有 11m，而在工地的東北角，岩溶空洞和大理石基岩更分別位於地面 55m 及 75m 以下。本文詳細介紹此專案的規劃理念、地基和地庫的設計和施工。



圖 1. 建築設計草圖



圖 2. 竣工後的建築物外觀

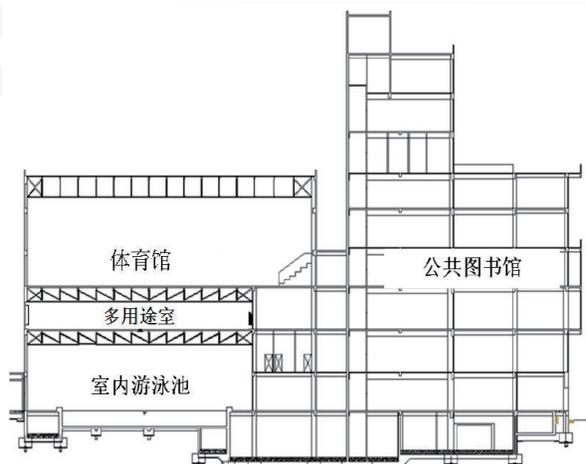


圖 3. 建築物的截面

## 2. 設計

### 2.1 天水圍區及工地地質情況

天水圍區屬低窪沼澤地形，地質非常複雜。天水圍區位於香港西北方一個長形彎曲的山谷地帶，山谷兩側高地由花崗岩和火山岩構成，花崗岩旁邊的小山主要是由變質沉積岩組成 (Darigo 1989, Frost 1989) (圖 4)。一系列斷層以大約東北 60° 方向經過該山谷地帶，又有從西北指向東南的斷層貫插其中。該山谷地帶的基岩上覆有淺層的沉積物，其中包括元朗組和落馬洲組大理石、變質粉砂石、礫岩，以及淺水灣火山岩群。天水圍區大部分基岩為火山角礫岩，小部分基岩則為元朗組大理石 (圖 5.1)。元朗組大理石是由純白大理石構成，純白大理石的化學成分以是純碳酸鈣 (圖 5.2)，易溶於水，容易形成岩溶空洞。此項目的工地恰恰位於這個小部分的地方 (圖 5.3)。

工地地面水平為主水準基準+7.9m 和+6.1m 之間。此項目工地地面下 10m 至 25m 為填土和沖積土，沖積土下為變質的花崗岩石。工地內有三條斷層線橫跨 (圖 6)，花崗岩基岩面處於地面 20m 至 25m 以下，地下水的水位位於主水準基準+2.0m。在工地東面有大理石和岩溶空洞，最大的岩溶空洞直徑為 11m。在工地的東北角，岩溶空洞和大理石基岩更分別處於地面 55m 及

75m 以下。在規劃過程中，項目為了避免過度壓力引致岩溶空洞塌陷，巧妙地改動建築物的位置避開東北角的極大型岩溶空洞 (圖 7)，此規劃改動為項目節省了不少的成本及減低了施工的難度，而這規劃改動方法亦已曾在香港一些項目使用 (Fletcher et al 2004, Lee and Ng 2004, Wightman and Lai 2006)。

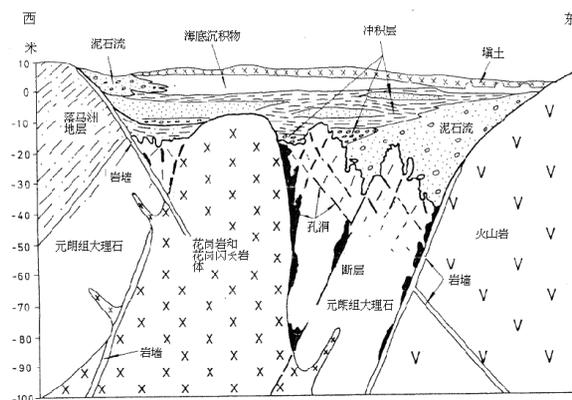
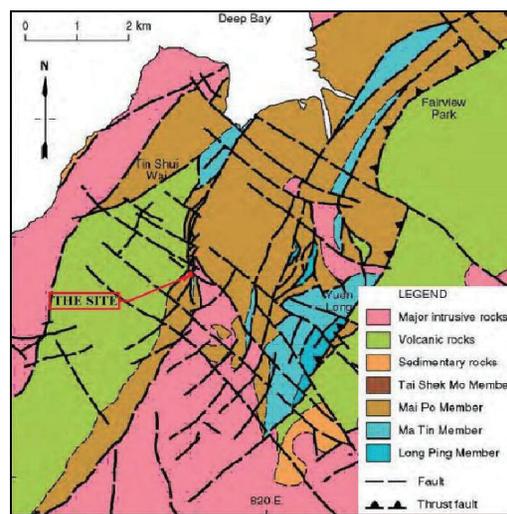
圖 4. 天水圍區地質截面  
(資料來源: Frost 1989)圖 5.1. 天水圍區地質平面圖  
(資料來源: GEO 2007)

圖 5.2. 工地的岩石樣本

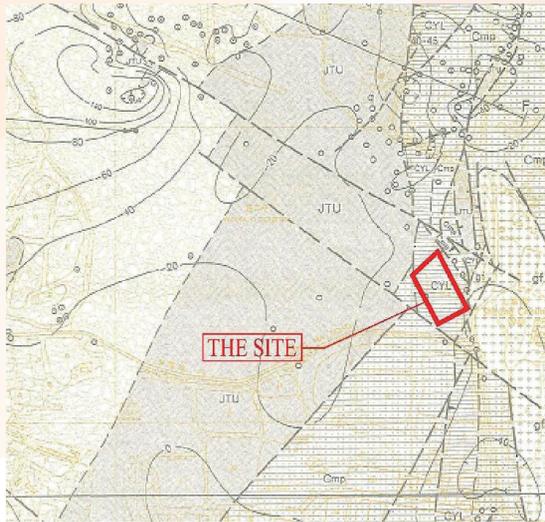


圖 5.3. 天水圍區 1:5000 地質圖

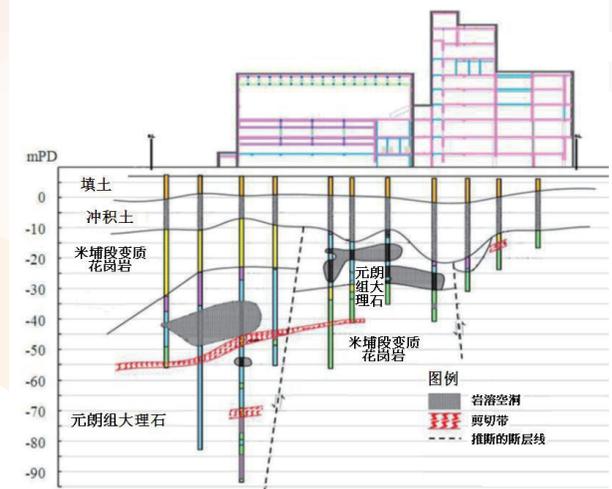


圖 7. 工地地質的橫截面

## 2.2 跨孔地震勘察

為了掌握大理石基岩和岩溶空洞分佈資料，工程團隊利用 50 個鑽孔及 9 個豎管式水壓計以進行地質勘測。並採用跨孔地震勘察方法 (cross-hole seismic tomography) 來探測岩溶空洞的三維空間分佈情況。勘測人員在其中一個鑽孔中以 1m 的點距用震源逐點激發地震波，而在另一個鑽孔中以相同的點距用感測器逐點接收地震波信號 (圖 8)，並利用儀器將地震波信號記錄下來，因花崗岩基岩、大理石基岩、岩溶空洞及上覆土層之間存有明顯的彈性縱波波速差異 (Wai 1991, Meigh 1991, Morris et al 2005)，從而構成跨孔成像 (圖 9)。此方法減少鑽探孔工作量，同時又能查清岩溶及溶蝕三維空間分佈情況。

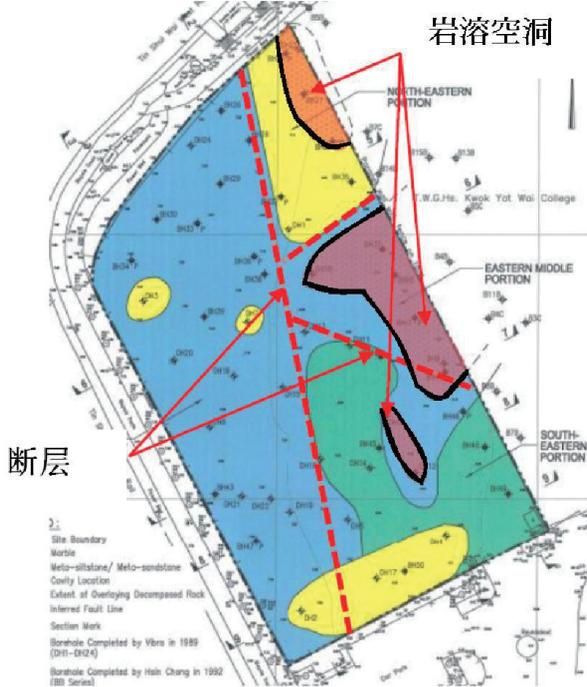


圖 6. 工地的地質情況



圖 8. 震源

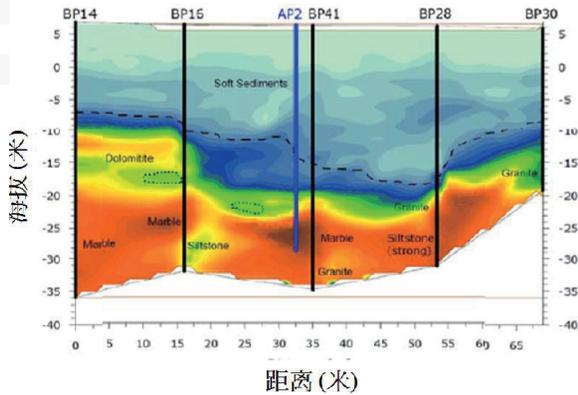


圖 9. 二維斷層跨孔地震勘察圖像

### 2.3 地基設計

工地範圍內如有岩溶空洞，建築工程經常以淺基礎、摩擦樁基礎（例如 Pakt-in-Place 鑽孔灌注樁）、撞擊式工字鋼樁、大直徑鑽孔樁或嵌岩工字型鋼樁作為地基。在這項工程中，因為淺層地質主要為填土和沖積層，故淺基礎不被採用，以避免建築物過度沉降。如果採用鑽孔灌注樁組成的摩擦樁基礎，樁底將到達岩溶空洞上數米的地方，可能引致岩溶空洞塌陷。另外，如果採用撞擊式工字鋼樁，樁尖亦會接近溶洞，可能造成岩溶空洞塌陷。此項目最終採用了嵌岩工字型鋼樁和大直徑鑽孔樁，並讓樁嵌入基岩，穿過岩溶空洞。地基由 99 支嵌岩工字鋼樁和 51 支大直徑鑽孔樁組成（圖 10），並邀請了香港大學土木工程學院在 4 支大直徑鑽孔樁和 3 支嵌岩工字鋼樁上安裝了振動應變計（圖 11），以研究沿樁身和岩石插孔的應力分佈，及大理石插孔與混凝土的摩擦承力。

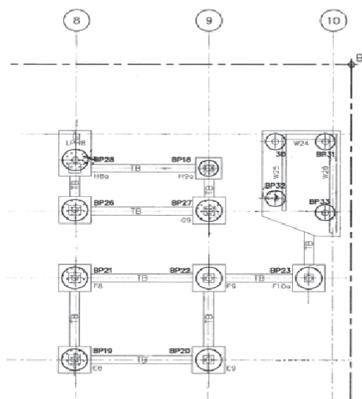


圖 10. 部份地基佈局圖



圖 11. 振動應變計

## 3. 施工

### 3.1 地基興建(圖 12.1和圖 12.2)

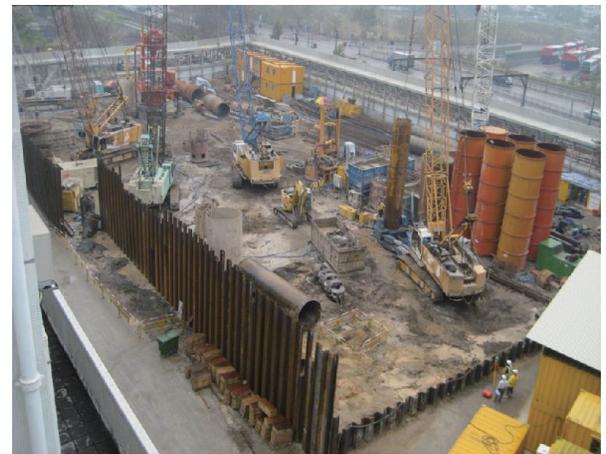


圖 12.1 興建地基時的工地



圖 12.1 興建大直徑鑽孔樁

地下岩溶空洞令興建地基時有潛在的困難。工程團隊通過不同的樁孔灌注施工方

法（圖 13.1 和圖 13.2），移除地面沉降或岩溶空洞塌陷的風險。

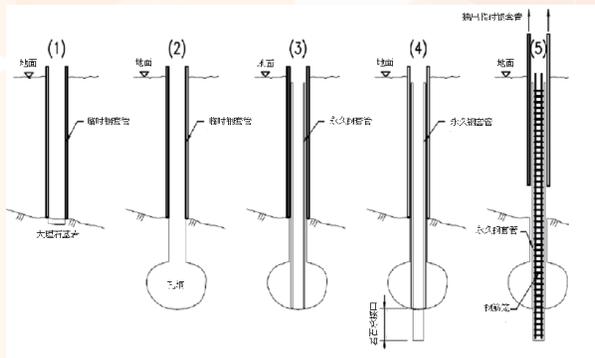


圖 13.1. 樁孔灌注施工方法一

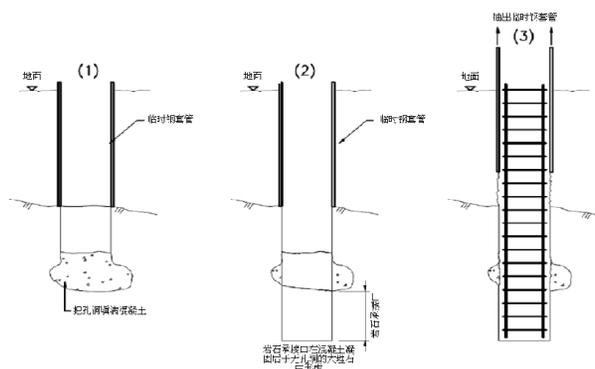


圖 13.2. 樁孔灌注施工方法二

### 3.2 地庫興建

此項目亦興建了一層 7m 深的地庫停車場。在興建的時候，須挖走總共 18,000m<sup>3</sup> 泥土，並要施工期間抽走 3m 的地下水，加上工地附近有香港鐵路西鐵線、輕便鐵路和一所學校，令這項工程的難度大大增加。工程團隊在地庫的邊界打了大約 13m 深的鋼板樁，形成截水牆，以便抽走地下水和施工，並在開挖期間，在鋼板樁上安裝三行橫撐，配合斜撐，以支護基坑（圖 14）。在抽走地下水期間，岩溶空洞表面的有效應力增加，這可能會導致岩溶空洞塌陷，所以在開挖時，整個工地分為兩個分區，每個分區的開挖分作兩個階段，補償了溶洞因為抽走地下水而增加的應力。另外，工程團隊在工地附近設置 15 個沉降標記點、5 個傾斜檢查點和 15 枝豎管式水壓計，以監測施工過程對附近鐵路和學校結構所造成的沉降、扭曲、移動，以及垂直

或水平壓力，並量度結構的振動粒子速度的峰值。



圖 14. 興建地庫時的基坑

### 4. 總結

本項目總開支為六億港元，在 2011 年底順利完成。它為天水圍區的 27 萬居民提供了香港第二大的公共圖書館設施和該區唯一的室內溫水游泳池。本項目的地基設計和施工、結構設計與鮮明的建築理念互相配合，因此獲得香港工程師學會 2012 年度結構優秀獎及香港建築師學會 2012 年度建築大獎。

### 致謝

作者感謝香港特區政府建築署署長批准參加這次會議，並感謝建築署有關工作人員在該專案的幫助。此外，作者亦感謝香港大學李啟光教授和譚國煥教授的幫助。

### 參考文獻

1. GEO (2007), *GEO Publication No. 1/2007: Engineering Geological Practice in Hong Kong* (Hong Kong: Geotechnical Engineering Office).
2. Darigo, N J (1989), "A Volcanic Breccia in the Buried Karst of Hong Kong", *Proceedings of the Third Multidisciplinary Conference*

- on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, St Petersburg, Florida, 2-4 October 1989, pp. 225-32.
3. Fletcher, C J N, Pang, V P Y and Yim, K P (2004), "Geological Modelling and Foundation Appraisal for Project Planning of Development Sites in Tin Shui Wai, North-western New Territories", *Proceedings of the Conference on Foundation Practice in Hong Kong, Hong Kong, 4 September 2004*, pp. F1-14.
  4. Frost, D V (1989), "Palaeokarst of Yuen Long, North West New Territories, Hong Kong", *Proceedings of the Third Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, St Petersburg, Florida, 2-4 October 1989*, pp 239-46.
  5. Lee, D M and Ng, M (2004), "Design Strategies for Deep Foundation in Areas of Marble Formation in Hong Kong", *Proceedings of the Conference on Foundation Practice in Hong Kong, Hong Kong, 4 September 2004*, pp. C1-17.
  6. Meigh, A C (1991), *Technical Note TN 3/91: General Report on Foundation in Area Underlain by Marble and Associated Rock Volume 1* (Hong Kong: Geotechnical Control Office).
  7. Morris, V, Gehrig, D and Bryant, T (2005), "Detection of Three-Dimensional Voids in Karstic Ground", *Proceedings of the Tenth Multidisciplinary Conference, 24-28 September 2005, San Antonio, Texas*, pp. 562-71.
  8. Wai, M (1991), *Technical Note TN 2/91: Checking Procedures and General Requirements for Foundations in Areas Underlain by Marble* (Hong Kong: Geotechnical Control Office).
  9. Wightman, N R and Lai, A (2006), "Investigation and Foundation Design in Marble/Karst Designated Areas of Tung Chung and Ma On Shan", *Proceedings of Seminar on Geotechnical Works in Karst in South-East Asia, Hong Kong, 26 August 2006*, pp. 109-40.

#### 作者簡介

嚴建平，香港特別行政區太平紳士，倫敦帝國學院土木工程碩士，香港工程師學會土木分部、環境分部前主席，退休前為香港特別行政區政府建築署高級土力工程師。

鄧俊旭，香港大學土木工程碩士，現職香港特別行政區政府建築署結構工程師。

黃志棠，香港大學土木工程碩士，退休前為香港特別行政區政府建築署總結構工程師。

梁文傑，香港理工大學土木工程碩士，現職香港特別行政區政府建築署高級結構工程師。

## 管綫專業的新時代

### Utility Profession--Towards the New Era

黃敬博士、工程師

黃敬博士 - 管綫學院院長，香港管綫專業學會會長(2013 - 2015 年度)，香港管綫管理研究中心秘書長，國際管綫專業學會召集人

#### 簡介

對於香港的城市建設，地下管綫佔著一個重要的組成部份。作為傳輸食水、污水、信息、能源等的重要媒介，管綫是城市現代化的其中一個標誌。現時香港作為發展度高的城市，其地下管綫也越來越繁多，而有效及高水平的管綫測量則提供了城市規劃、建設和管理的重要資料，因此各界(包括政府、私營機構)對專業管綫測量的需求也越來越大。未來，管綫測量將會進入一個新時代 - 一個專業、高技術、高效率的新時代。

#### 一、管綫專業的歷史

香港建造業現有的專業人仕有工程師、建築師、測量師、規劃師、園境師等，每一個專業都分擔著建造業不同工作範疇的任務。然而管綫專業人員，雖然從事對社會繁榮起著關鍵作用的管綫測量、項目管理、物料選用、管綫狀況評估等工作，過往卻欠缺認可的專業資格。

過往，建造業蓬勃，管綫測量作為保養的一部份，乃一相對不受重視之行業，但隨著香港的設施越趨複雜，加上過去數年發生的管綫意外，政府開始重視管綫管理，並批出不少關於管綫維修、測量及保養等的合約，吸引不少人仕開設以管綫測量為主的工程及專家公司。但由於當時沒有特定的專業要求，故「專家」公司良莠不齊，難以建立客戶的信心。

為規管這些專家公司，以改善業界形像，及提升人民生活水準，香港管綫測量師學會(後易名為香港管綫專業學會)於2002年成立，多年來一直在管綫測量的議題擔當領導角色。並和政府、各大機構及其他專業學會、工程顧問等公司通力合作，對管綫測量的標準制定、員工培訓、宣傳推廣作出不少貢獻。所以管綫管理成為建造業一個新的專業領域是指日可待的。

#### 二、改變的需要及已發生的改變

過往，地下管綫相關的事故層出不窮。如因施工挖斷電纜，而導致商業大廈的斷電停業，亦發生工人因掘斷電纜而受傷甚或死亡的事，及因煤氣喉破損而引發爆炸等，地下管綫實存在很多隱患，因此管綫測量對於市民的安全是重要的。

缺乏完善的管綫管理及預防系統，極可能會帶

來社會上的經濟損失，進而影響市民生活質素。過往香港曾發生數次水喉破裂事故，波及酒店、商戶及住戶等。食肆缺乏食水供應固然影響商戶當日營運及銷售額，住戶缺水更感不便，在職人仕上、下班遇上因修理水管而引致的交通擠塞，以上種種都帶來居民生活上的不便及社會經濟損失。除了水管，其他重要地下管綫如電纜、電訊管道、氣體管道等也與市民生活息息相關。若以上任何一種管道出現問題，也能嚴重影響經濟活動及市民的日常生活。

除經濟損失外，欠缺標準及實務守則更可能因為安裝和維修地下管綫不當而帶來人命傷亡。以往香港曾發生護土牆倒塌事件，途人因走避不及而遭塌下的山泥困著，事件做成多人傷亡。土木工程署委託加拿大教授穆根士頓 (Prof. Morgenstern) 調查事件，發現渠道滲漏引致護土牆無法抵禦雨水而倒塌。1996年，當時的香港政府工務司鄺漢生 太平紳士簽發“影響斜坡安全的帶水管道檢查及維修守則”，要求所有斜坡業主小心看顧他們的物業，並定期檢查及測試影響斜坡的帶水管道。實務守則推行後，情況得以改善。該守則並於2006年經多個政府部門及香港工程師學會、香港管綫專業學會共同修訂後，最後經工務科重新簽發。

管綫意外所帶來的損失，涉及範圍廣闊，業界因而經常受外界人仕批評，影響聲譽，也導致公眾的不信任。政府的管治威信下降，支出亦增加。私營機構聲譽及經濟也有相當大的損失，市民的安全及財產受威脅。因此，一次管綫意外的發生，足以造成多個界別的損失，能妥善安裝、保養和維修管綫實百利而無一害。

為增加道路及斜坡安全性及減少各方面的損失，以改善市民生活質素，在過去幾年，業界曾作出不少努力。香港管綫專業學會透過推行會員強制安全訓練及表現評估標準，以確保經理及操作員均符合一定的要求。此外，該學會亦提供了一系列的專業管綫測量標準，促進管綫測量從業人員的專業化及保證其服務質素。一些符合國際標準的測量方法得以訂立，使業界人仕有例可依。透過舉辦研討會及講座，客戶及公眾亦漸漸開始了解管綫測量行業，使他們懂得如何選擇合適的管綫專業服務公司。

### 三、 怎樣維持高水平的質素

要使管綫測量這個行業維持高水平的質素，政府、管綫管理從業員、專家公司、客戶、管綫專業學會等都須共同努力。

#### 1. 員工質素

作為一位管綫專業人員，其必須已受培訓及教育，以確保他具備足夠的管綫相關知識及溝通技巧。此外，由於管綫測量對員工的技術要求高，因此空有理論並不足夠。從業員亦必須已實習過管綫測量工作，具備使用各種測量儀器之經驗，方能從心所欲地在受監督下把平日所學的理论應用在實際工作。從業員工作時必須具邏輯思維，按步就班地完成工作，以減少錯誤的發生，使測量結果更為準確。職業道德對管綫從業員最為重要。欠缺道德之從業員，縱有豐富的經驗、良好的技術，也有可能向客戶提供虛假的資料，以達到自己最大的利益。這種短視的做法，不但影響個人前途，也影響業界聲譽。因此，業界必須設立監控措施，以確保員工的質素。

除以上條件外，員工亦必須謹守行內規則及勞工指引。若果不嚴格遵從標準，除會影響客戶信任外，更會影響工人安全。在 1999 年 9 月 28 日早晨，三名渠務工人在香港蝴蝶灣公園一沙井處理井內的污水時，疑因抽污水的油渣泵釋出過量一氧化碳，引致集體中毒。事實上，勞工條例規定了工人應先用儀器測試場地，確保有足夠氧氣而且驗明有毒氣體含量不超標，才可入內工作。另外，在 2012 年 10 月 30 日，灣仔發生罕見工業意外。2 名中外潛水員在直徑 1.2 米渠管內進行新舊渠管接駁工程，為防海水倒灌，故以一個吹氣球將出口堵塞才進行工序，突發生大氣球爆破。這 2 名中外工人首當其衝被強大氣體擊倒，繼而被涌入海水推倒跌落沙井；與此同時，在地面出口處工作的 2 名工人亦遭氣流所傷，需要報警求助。

這些事件證明，若員工沒有足夠的培訓及教育，隨時可能危及自己或其下屬的生命，故員工需貫徹執行業界守則及勞工條例，方可在服務社會之餘，亦可保障自身安全。

## 2. 公司質素

除了員工的質素，專家公司本身的質素也應注重。因公司的管理質素會影響其屬下員工的行事方式。香港管綫專業學會透過會員評審及續審，扮演著一個監管其會員公司的角色，學會已制定各種守則，發予各會員及公司遵守。專家公司不應以不合理的低價爭取合約，而應留意工程所需之費用，以服務質素為第一考慮點，以謀求長遠的利益。

## 3. 測量結果質素

要確保管綫測量所採集的資料質素，檢測方法及準確度必須劃一，並需合乎國際及本地標

準。此外，測量結果報告亦需由合資格人仕撰寫及簽署作實，合資格人仕並應為至少擁有 5-10 年相關經驗及香港管綫專業學會會員，以保持服務質素。

## 4. 客戶質素

客戶對管綫測量這個行業的認知程度，可大大影響業界的素質。若客戶能清楚了解行業標準，在選擇供應商時便能作出更好的決定。香港管綫專業學會透過舉辦各類型的推廣活動，如交流會或研討會，解釋管綫測量的應有程序，及守則、方法標準，使客戶能更了解管綫測量的重要性。

香港管綫專業學會堅守會員名單，由該學會骨幹成員把持續信譽優良的管綫測量工程公司列入名單中，使客戶更易於選擇合乎操守、專業性高的管綫專業公司，也鼓勵其他公司提高服務水平，以爭取進入名單之中。

## 四、管綫專業的事業前景

### 管綫領先 邁向國際化

國際管綫專業學會於 2013 年在香港成立，目標是推廣及促進地下管綫服務的知識及實踐，制定及確保管綫測量的國際標準及專業資格，並提供狀況評估及管理，強制執行技術標準，加強管綫專業人士識別和認證課程，並舉辦年度會議「國際管綫管理及安全會議高峰會」。榮獲國際業界人士的支持，國際管綫專業學會將於 2014 年 11 月 14 日至 16 日在北京國家會議中心舉行第四屆的會議高峰會，主題為“安全規範，創新發展”，目的是加強國內外管綫領域的交流，讓管綫專業邁向國際

化。

### 未來對管綫專業的需求

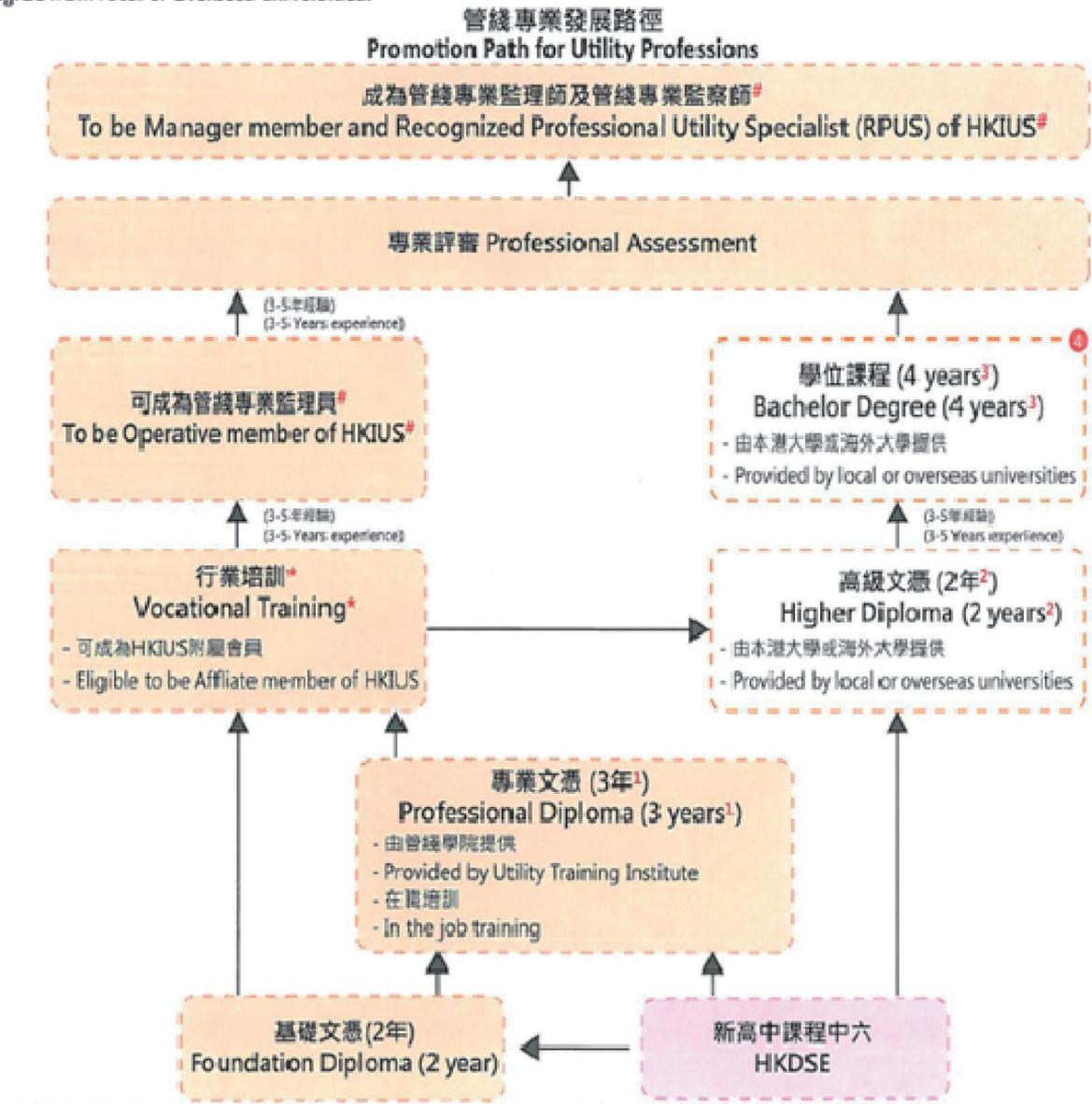
香港為一已發展城市，各處均有各類公共設施、建築物、地下管綫，建設已達飽和狀態。在未來，地下設施的維修及保護比建立的需求更大，而管綫測量對地下設施的維修及保護尤其重要，因此其需求及發展會急促上升。在最近數年，政府也開始關注管綫維修及保護的重要性，很多關於地下管綫的工程合約大增。以高危斜坡為例，每年有很多相關合約批出，但行內的專家公司只能應付約一半。此外，除了高危斜坡，其他政府機構如水務署、渠務署、運輸署及房屋署等及一些私營機構也邀請專家作管綫測量工程及維修及保護的工作。因此，專業管綫測量的市場會越來越大及對管綫人材需求越來越高。

單以私人機構以言，現時受過正式訓練的管綫專業人材數目還是很少，因此，在需求大供應少的情況下，投身管綫行業是一個不錯的選擇。

管綫專業的事業路綫

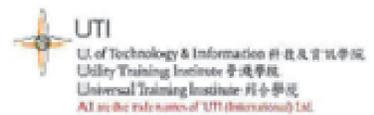
Career Prospects 就業機會

Following appropriate training in the placements, graduates could become professional utility specialists progressively. The continuing growth of Hong Kong' infrastructure offers opportunities for graduates to take up positions with utility or construction companies. Graduates with relevant education level may further their studies by applying for Higher Diploma or Associate Degree from local or overseas universities.



\* 管綫學院將為學員安排培訓 Utility Training Institute (UTI) will arrange the placements for students  
 # 備註 Remarks: 1) OMHKIUS – 管綫專業監理員 The frontline leaders of utility profession  
 2) MHKIUS – 管綫專業監察師 The professionals and managers of utility industry  
 3) RPUS – 管綫專業監察師 Recognized Professional Utility Specialist  
 有關成為學會會員資格可瀏覽 www.hkius.org.hk

1 完成基礎文憑後，再完成專業文憑只需一年  
 After the completion of the Foundation Diploma, it just takes one year to complete the Professional Diploma  
 2 若學員已持有專業文憑，可申請學分轉移，此讀高級文憑課程第二年  
 Students who possess Professional Diploma could apply for credit transfer and enter Year 2 of Higher Diploma  
 3 若學員已持有高級文憑，可申請學分轉移，此讀學位課程第二年  
 Students who possess Higher Diploma could apply for credit transfer and enter Year 2 of Bachelor Degree  
 4 完成基礎文憑 → 專業文憑 → 高級文憑 → 學位課程只需7年  
 It just takes 7 years to complete Foundation Diploma → Professional Diploma → Higher Diploma → Bachelor Degree



圖一：管綫管理專業晉升途徑

無論是何等學歷的人，皆能在管綫行業發展自己的事業。一位中五畢業生，以從事工程助理開始，入職工資約為每月九千至一萬二千元不等。當累積足夠經驗、持續進修及考取相關証書後，他可以提升至技術主任，可賺取約每月兩萬元的穩定收入。

一位剛畢業的學士學生，可以成為助理管綫測量師，月入一般高於一萬五千元。當於管綫行業從事一段時間，表現優良的員工能晉升為專業管綫測量師，月入約兩萬五千元。管綫測量師當中更會有人成為公司合夥人，前途及待遇具無窮發展空間。

#### 怎樣成為管綫專業的一員

主修測量、工程、應用科學或相關學系的畢業生，可以從事管綫管理專業，並申請成為香港管綫專業學會初級會員，當累積3-5年經驗後，可申請成為該學會執行會員(Operative Member of Hong Kong Institute of Utility Specialists - OMHKIUS)，經專業評審後，能肯定其專業資格，並成為專業會員(Manager Member of Hong Kong Institute of Utility Specialists - MHKIUS)。

為了增加專業管綫人員以應付需求，現在除了擁有大學學位之畢業生外，中五學歷的青年也有機會晉身管綫專業，他們可接受由所屬公司或管綫學院(Utility Training Institute)籌劃的行業在職培訓，經數年磨練後，成為學會執行會員(OMHKIUS)，再吸取多年經驗，最後通向專業之路。

由於地下管綫的種類繁多，要投身管綫測量，需考取不同的証書，其範圍包管綫勘察、漏水測試及控制、材料選用、狀況評估及施工安全等。因此，入行者需於最初數年學習各範疇的

管綫測量，然後選取其中一種作為專業。

## 五、管綫專業之現行發展

為進一步提升管綫專業水平，香港管綫管理研究中心(The Hong Kong Utility Research Center)計劃編寫技術手冊及說明書等作研究，以供管綫測量業人仕及公眾使用。此外，亦會向公眾、各政府機構、建造業界及各大學宣傳管綫測量之相關標準，以提高大眾的認知。

於2007年內，香港管綫管理研究中心會實行針對管綫測量的成本及工序分佈之可行性研究。此外，一些學士學生及碩士學生亦會對測量方法、原料、工作進度及測量結果準確度進行研究及報告。從以上計劃所收集到的資料對管綫測量之標準化有著相當大的幫助。

除此之外，為培育有志成為未來專業管綫管理人士的中學生，管綫學院(Utility Training Institute)聯同香港大學土木工程系，合辦應用學習(管綫專業技術及應用)課程。課程由本年9月開始，課程目的為讓年青人全面了解管綫管理的運作，為未來的專業路線奠定良好的基礎，並提高他們的安全意識及團隊合作性，使他們將來正式就業時，能兼具專業知識及良好操守，以提升管綫業界的整體質素。透過參予課程，學生不但吸收管綫管理原理及專業測量技術等知識，更有機會參予一些實務訓練如實驗、工具儀器操作及實地參觀等形式，使他們無論在管綫技術、溝通技巧及領導才能三個層面皆有所裨益，再者，他們亦有望於2011至2012年度成為第一批修讀管綫管理本科的學生。

## 六、改善管綫安全及管理之建議

為改善地下設施的管理及安全性，以下有數則可行建議：

### 1. 加強專業管綫團體的認受性

香港管綫專業學會是一個較為新的團體，因此，現時學會所急需做的，是加強對政府、學院及建造業界的宣傳，如舉辦研討會、出版專業管綫測量書籍等，以提高其認受性，鼓勵更多專業管綫及專業人員加入成為其會員，從而更有效地管理及監督管綫業界相關機構及員工，以確保其服務質素合乎標準。

### 2. 加強管綫專業人員的培訓

在培訓員工方面，各間已屬香港管綫專業學會會員的專家公司可透過與認可機構合作，提供一系列管綫相關課程，並要求會員接受適當培訓，由具備經驗的專業導師為從業人員教授相關知識及帶領實習，待學員修畢課程後授予由香港管綫專業學會所頒下之證明，從而提升他們的專業資格，改善他們的工作水平，使工作更順利完成。

香港管綫專業學會正推行著持續專業發展課程(Continuous Professional Development courses)，為管綫測量員工提供一個長期並持續性的培訓，並要求會員每年必須出席不少於三十五小時的持續專業發展課程；又或連續兩年不少於七十小時的相關課程，並保留所參予課程之紀錄。此課程嚴格規定會員履行課程要的要求，以確保他們具正確、更新的管綫知識。

### 3. 制定表現評估制度

受訓學員須通過由學會所定立之考核，方能成為該學會會員，及受予專業資格，學會會員亦需定期接受審核，此舉可確保其會員的服務質素及專業操守。

### 4. 推動各界之間的交流

學會及各專業團體可向社會各界相關人仕如政府、客戶、教育團體舉辦各類型的推廣活動，如交流會、研討會及公開論壇，解釋管綫測量的應有程序，及推介該學會會員之專業性，使公眾及客戶能更了解管綫測量的重要性。此外，透過舉辦不同類型的比賽、會議及課程，亦能引起學生對管綫行業的興趣，從而增加未來的人材。

香港管綫專業學會已制定優質公司名單，由該學會骨幹成員把持續信譽優良的管綫測量工程公司列入該名單中，使客戶更易於選擇合乎操守、專業性高的公司，也鼓勵各公司提高服務水平。

### 5. 統一管綫測量標準

要使管綫測量業走向更成熟的階段，統一的檢測方法及準確度是必須訂立的。而訂立標準時必須根據一些實地研究結果，再加以分析，所訂立的標準才會具說服力。因此，香港管綫管理研究中心將會從事這方面的研究，再把研究結果交給香港管綫專業學會，由該學會進行認可程序及以不同方式(如廣告、通告、交流會)告知政府及其他客戶，促使業界各測量公司跟從專業守則辦事，使整個管綫測量業質素提升，值得信賴。

28/02/2014

## 參考資料 Reference:

1. 香港管綫專業學會網頁:  
<http://www.hkius.org.hk/home.html>
2. 黃敬(King Wong), 如何利用現代科技及技術管理改善管綫測量的狀況「管綫測量師的苦與樂」, 2006
3. 香港管綫測量師學會工作守則, 2006
4. South China Morning Post, Three Die In Landslip, 24/7/1994
5. 東方日報, 銅鑼灣爆喉, 九條街癱瘓, 28/3/2004
6. 東方日報, 金鐘斷水 14 小時, 21/7/2004,
7. 東方日報, 地下管綫人材叻過蜘蛛俠, 23/5/2007
8. 明報, 爆水管癱瘓香港心臟, 21/7/2004
9. 經濟日報, 渠工通沙井, 疑中毒危殆, 29/9/1999,
10. 經濟日報, 管綫測量員渴市成新貴, 23/6/2006
11. 經濟日報, 中五入行 10 年升主管, 23/6/2006
12. 經濟日報, 探地儀曾找出希特拉頭骨, 23/6/2006
13. 招職, 三年在職培訓計劃, 為晉身地下管綫測量師打好基礎, 2004
14. 工務局, 影響斜坡安全的帶水管道檢查及維修守則, 1996, 2006
15. 香港特別行政區教育統籌局, 應用學習課程(管綫專業技術及應用), 2007
16. 頭條日報, 地底電纜探測, 可創就業, 04/06/2009
17. 明報, 受傷打工仔平均請假 20 日, 27/09/2010
18. 星島日報, 青島驚爆夷平民居, 2013
19. Recruit HK, 管綫專業人才缺, 集團聘百人提供培訓, 10/02/2014
20. JobsDB, 管綫測量 探測地下通道, 28/02/2014
21. Hong Kong Economic Times, 建造高峰期至, 管綫測量求才若渴, 25/03/2014
22. Moment Magazine, 第六建造專業宣揚地下管綫安全意識, 03/2014 (第九版)
23. The Standard, Drains to Blame, 01/04/2014
24. Macau Daily News, 暴風雨冰雹齊襲, 惡劣天氣料持續, 港遭二百年一劫, 01/04/2014
25. Hong Kong Economic Time, 拆解又一城水舞間之迷, 01/04/2014

## 香港特別行政區政府路政署吐露港公路擴闊工程 擴闊現有橋面雙向行車道的技術考慮與施工過程

陳嘉樂

劉啟平

安誠-奧雅納-博威聯營顧問  
香港特別行政區

### 摘要

香港吐露港公路/粉嶺公路的擴闊工程，就通過切削斜坡，加建新擋土牆，改建現有橋樑和興建新橋樑以提供額外的路面。擴闊工程會在原有的行車橋樑旁建造一條四線連路肩的新獨立橋樑。而原有的兩條三線行車橋樑會予以保留並連接以改建成四線連路肩的單行方向橋面。當擴闊工程完成後，原有的雙程三線道路會改為雙程四線連路肩，大大增加了市區往返新界的南北交通流量及安全性。

原有的11及13號行車天橋的南行及北行方向由兩條結構獨立的行車天橋組成，但這兩條行車天橋橋面的超高是相反方向，所以橋面擴闊工程會將東面橋橋面先行提升、然後旋轉傾斜至橋面超高達到一致的斜度，最後接合使二橋為一，以符合高速公路行車的設計要求。該擴闊工程採用了「同步頂壓系統」以避免過度扭曲橋面而影響橋樑的結構。而這次橋面提升、旋轉傾斜工序亦是首次在香港進行。

### 1. 序言

吐露港公路及粉嶺公路是在香港新界區東北部，連接沙田、大埔、粉嶺及上水一帶的主要幹道。吐露港公路和粉嶺公路分別長11.3公里及10公里，大部分路段原是以雙程三線行駛。為配合新界未來發展及日益增加的交通需求，吐露港公路及粉嶺公路由大埔元洲仔交匯處至和合石交匯處(全長8.7公里)需要由原來的雙程三線分隔行車道擴闊至有路肩的雙程四線分隔行車道。當中，由沙田至元洲仔交匯處一段的

吐露港公路擴闊工程已在2003年完成。而餘下的工程則分兩階段進行。第一階段由元洲仔交匯處至泰亨(全長5.7公里)已在2009年8月展開，工程主要部分已在2014年第一季完成。

第一階段工程(即由元洲仔交匯處到泰亨一段的吐露港公路)主要處於大埔市區南面的山坡。為配合地勢，這段公路建在山坡及橋樑之上，因此我們建造了護土牆及橋樑以提供空間擴闊路面。第一階段工程的護土牆，高度由0.8米到20米，全長為2,300米；共有19條橋樑，長度由53米到750米，12條為新建的橋樑，7條為舊有改建的橋樑。

為了進行擴闊，我們在舊有橋樑旁先建造新橋樑。之後在舊有的橋樑改建成單一橋面，以承托擴闊後的單一方向的4線行車道及路肩。當中，2條舊有橋樑(11號橋及13號橋)的超高相反(分別為+2.5%及-2.5%)。

11號橋及13號橋的擴闊改建工程已於2013年及2014年首季完成及已開放通車。由於以上兩條舊橋的擴闊施工過程十分相似，下文就以13號橋的擴闊工程作進一步介紹。

### 2. 擴闊改建13號行車天橋

舊有的13號行車天橋由兩條分別往南及往北方向的獨立預應力混凝土行車天橋組成，是長116米的三跨橋，跨距分別為37m、42m及37m，橋面闊度分別為15米和12米。兩條橋有相同的縱坡(3%)，但超高

(2.5%) 則方向相反(見圖1至3)。往北方向的橋身需與往南方向行的橋身接合，形成新的北向行車道。在兩條橋樑縫合後，路面的超高必須一致。

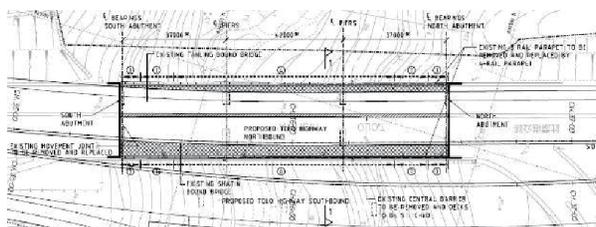


圖1. 舊有13號橋平面圖

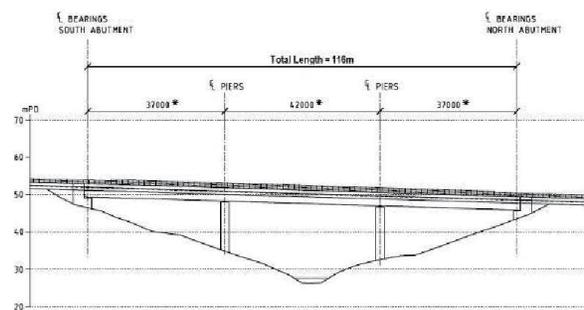


圖2. 舊有13號橋立面圖



圖3. 舊有13號橋的鳥瞰圖

## 2.1 設計考慮

在設計階段期間，我們曾考慮以下設計方案以達致一致的超高

方案1 - 拆卸現有的13號橋，並在原址重新興建一座有四道行車線的新橋的方案：

但考慮到工程的可持續發展性和環保因素，例如清拆時所產生的大量建築廢料需要運往堆填區，並產生空氣及噪音污染，興建新橋方案亦令資金成本增加及延長施工期，亦會對周邊的居民帶來不便及滋擾，因此放棄該方案。

方案2 - 以瀝青或水泥回填的方式來提升路面高度：

可是，由於大量的回填物料會產生額外的荷載，經結構評估後得知會超出現有結構的承托力，所以不可行。

方案3 - 提升及旋轉傾斜橋身：

該方案是通過調較箱形樑傾斜度來提升及旋轉傾斜橋身的方法。該方案通過以千斤頂同步提升及旋轉傾斜箱形樑，並更換支座，以確保橋樑道路走線和結構不受影響。另因舊13號橋沒有彎度，筆直的橋身易於方便提升及旋轉傾斜。故最後採納了這個最為可取的方案。

## 2.2 橋身縫合及旋轉傾斜的設計

在設計橋面縫合的過程中，我們利用有限元軟體對縫合後的橋身的結構進行分析。在考慮一般荷載的同時，我們亦考慮混凝土的蠕變和收縮所產生的應力。分析結果顯示，橋面縫合區須加建強化拼接樑以應對懸臂板間的形變及內力調整(見圖4)。從有限元分析模型圖像中可以看到，加裝拼接樑之後的橋面結構能有效地將負載轉移到縫合後的橋面上，避免在局部地方出現過大的內應力而對橋面結構有所損壞。而加建強化拼接樑的有效距離最遠為三米。

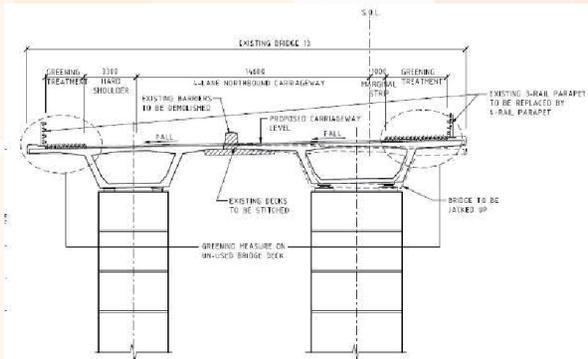
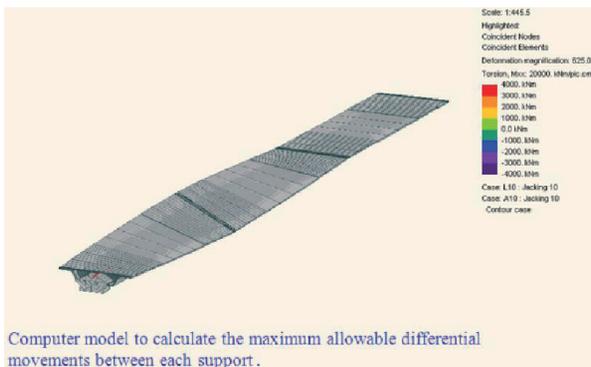


圖4. 修改13號橋的總體佈置圖

至於橋身旋轉傾斜問題，雖然我們會採用同步頂升方法，但考慮到施工時的頂升誤差，故利用電腦模型計算出橋樑及承台間的容許最大位移差距，並訂為施工規範，以避免扭曲及破壞現有橋身結構。分析結果，我們在施工規範中限制了在垂直提升橋箱時，承台間的最大可容差距為5毫米。而在旋轉橋身時，最大可容差距更收窄為2毫米。（見圖5）



Computer model to calculate the maximum allowable differential movements between each support.

圖5. 用以計算承台間允許最大位移的電腦模型

因為原往南方向的橋箱高度和高度的改變，橋樑的八個現存支座必須更換。並提升至合適的高度。因舊13號橋在橋身縫合後的自重及交通活載重都沒有增加，所以不需要加固橋墩及橋箱來迎合新的支座。

### 3. 施工過程

#### 3.1 改建舊行車橋的整體施工安排如下 -

第一步 - 在舊有往南方向行車天橋旁建造新的行車天橋；

#### 第二步 - 臨時交通改道(見圖6)

把舊有往南方向行車天橋的交通改道往新建的行車天橋；騰空現有路面，拆除在分隔舊有往沙田及往北方向行車橋上的路學；

第三步 - 以「同步頂壓系統」逐步垂直提升往南方向的橋身，並旋轉傾斜橋箱，把橋身的超高(…)，與往北方向橋身的超高一致；

第四步 - 更換往南方向的橋身支座；

第五步 - 把舊有往南方向及往北方向行車天橋的橋樑接合，並建造強化拼接梁

第六步 - 更換在南、北橋台的伸縮縫及重鋪瀝青路面。

#### 3.2 施工期間的交通安排

吐露港公路及粉嶺公路為貫通香港新界區南北的主要幹線。為維持正常交通，繁忙時段每個方向的行車線數量將維持不變。因此，新的13A號行車橋必須率先完成，以提供額外行車線疏導舊13號行車橋上的交通，從而騰出舊橋空間進行頂升及橋身旋轉傾斜有關操作工程。如工程必須在行車線上進行，有關工序則安排在夜間或在星期日及公眾假期局部封閉行車線進行，以減低對交通的影響。

#### 3.3 提升和旋轉橋身的準備

施工單位聘請富有經驗的分判商負責操作和監控同步頂壓工序。工序所用系統及電腦程式是由來自瑞士的專門廠商研發及供應，包括主要的操作平臺、油壓千斤頂和位移偵測器。偵測器安裝在每個千斤頂旁的橋箱表面上，用以監測並控制千斤頂的位移，避免過度扭曲而破壞現有橋樑結構。

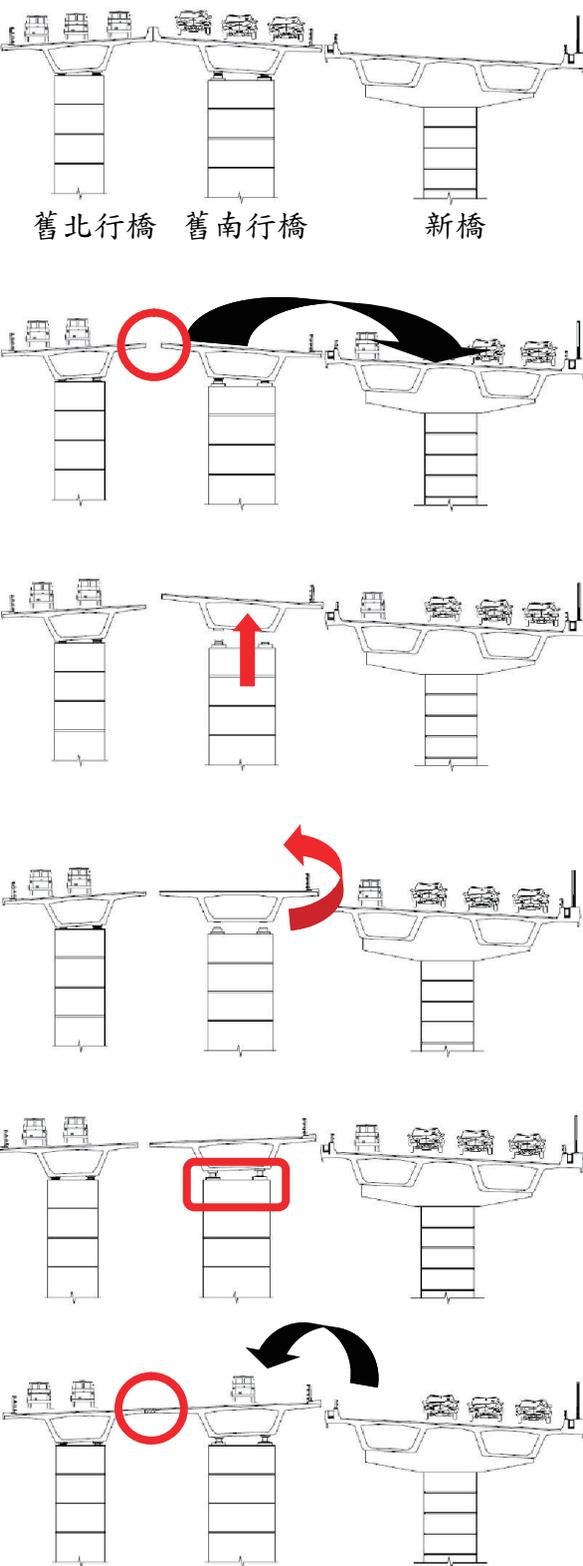


圖6. 準備進行橋樑頂升工程的臨時交通安排

經過多次由工程承建商、分判商、駐地盤工程師及設計師參與的會議討論後，施工隊伍為頂壓工程定立詳細的工序安排。駐工地人員在場負責監督並核實未來道路高度、協調和監測橋箱頂壓操作，並密切檢查和記錄準備的清單和記錄表。操作過程中，橋箱兩側會設置足夠的臨時支撐以防止橋箱移位。(見圖7)



圖7. 臨時支撐

此項工程一共設置了八個頂升點，每個頂升點設在橋墩及橋台的支座旁。(見圖8)因為橋箱和橋墩頂的原間距不足，所以在初期只能在每個頂升點安置兩台400噸級千斤頂以進行垂直提升橋身。當橋箱和橋墩頂的間距隨著橋身提升而有所增加至足夠的空間後，原本的400噸級千斤頂會被換上500噸級千斤頂，從而減少回頂的次數及加快提升及旋轉傾斜橋箱的速度。

在每點對應的箱梁底面附一個位移感應器(見圖9)，以記錄並傳送箱梁位移資料到中央處理系統(見圖10)，用作控制及調節每組千斤頂的提升幅度，以免出現過度的位移差。



圖8. 液壓千斤頂



圖9. 位移感應器



圖10. 中央控制系統

### 3.4 提升和旋轉橋身的操作

當所有準備工作都完成後(包括臨時交通改道安排, 微調設計, 安裝及測試同步頂升系統, 以及完成原來橋面高度及平水測量等), 便可以開始提升橋面及旋轉傾斜的工序。而每一程序都由駐地盤監督人員在旁監督及驗證。

「同步頂壓系統」通過由安裝在頂升點旁的位移傳感器將位移數據傳送到中央處理系統, 再由處理系統發放訊號至每一組千斤頂, 從而達到同步提升的效果。

頂壓過程如下-

#### 第一階段 - 垂直提升:

橋箱以每次5毫米垂直提升至大約220毫米, 當橋箱升至預訂高度後, 更換頂升點上的千斤頂, 由400噸級轉至500噸級, 加快橋箱提升的速度。

#### 第二階段 - 旋轉傾斜:

以每次2毫米提升外頂升點上的千斤頂至大約123毫米, 而內頂升點則維持不動, 令橋箱反向微轉傾斜, 從-2.5%調校至+2.5%, 跟往粉嶺方向橋面的超高相同。(見圖11)

#### 第三階段 - 最後調較:

然後繼續同步垂直提升內外頂升點上的千斤頂至大約75毫米, 以作最後的橋面高度及平水調較。當橋面提升至目標水平, 主千斤頂會被鎖上, 用作臨時支座以便往後的更換永久支座工序。

剔除前期的準備工作, 整個橋面提升及傾斜工序在2013年10月3日至18日期間進行, 為期11個工作天。



圖11 - 旋轉傾斜後的舊13號橋面

### 3.5 更換支座(見圖12至13)

由於提升及傾斜後的橋面高度及水平跟原本相比改變了, 因此現有的支座必需更換。同時, 為了配合傾斜後的箱梁高度, 原有承台底座要拆除並重建及升高, 並用高強水泥砂漿澆灌處理。

更換支座時, 承建商先為支座基座定下中心線, 並由駐工地人員監督、檢查支座方向、水平和預定位置。駐工地工程師、技術員及承建商對支座的預定位置進行多次覆核, 確保支座位置正確無誤後, 才在支座底部灌漿。駐工地人員亦曾進行測試以確保支座及混凝土的品質。另外, 額外的鋼筋用”Hilti” RE-500注射式混合黏著

劑植入橋墩及橋台的頂部加強承台底座的抗壓能力。



圖12. 安裝橋樑承台



圖13. 完成後的橋樑承台

### 3.6 橋面縫合(見圖14至18)

為確保交通流量不受橋面縫合工程影響，路政署嚴格執行調控管制，包括拼接板和加強樑的施工方法、混凝土澆灌時橋面的振動監測和要求等。工程師仔細審查施工方法和臨時工程設計，確保接合部分的結構完整。

為了減少橋面振動對縫合工序時所產生的不利影響，混凝土澆灌時及其後二十小時內橋面的振動幅度限制為每秒5毫米。採用抗壓強度為50MPa的快乾混凝土，在澆灌後4小時抗壓強度要達到12MPa。

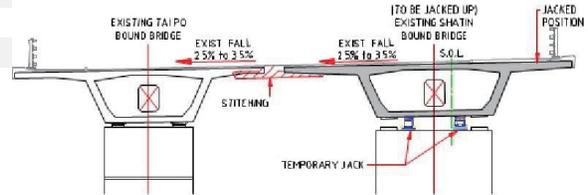


圖14. 縫合13號橋樑的側面佈局圖



圖15. 澆灌混凝土中的拼接板和加強樑

### 3.7 測量橋面高度及水平

在整個擴闊工程中，承建商及駐地盤測量員均在不同工序中為橋面進行詳細測量，確保橋身結構沒有過度變形或扭曲。



圖16. 擴闊工程前的13號橋



圖17. 完成擴闊工程後的13號橋

## 致謝

作者謹此感謝香港特別行政區路政署署長批准發表本文。惟本文謹代表作者個人意見。

## 4. 總結

這次吐露港公路擴闊工程中的橋面提升及旋轉傾斜工序是在香港首次採用，在世界各地也很少進行。就這次在舊13號橋面的擴闊工程後來看，該方法可算是十分成功。而工序中所用的「同步頂升系統」亦能有效地發揮它的效用，確保在橋箱提升及旋轉傾斜過程中不會出現橋身過份變型及扭曲的情況，避免了傷害橋身結構。是次擴闊13號橋面保留了原身結構，舊橋因而免除拆卸及從新建造，大大減少了所制造的建築廢料及對附近居民帶來的滋擾。而且這亦貫徹了可持續發展的設計理念。

## 作者簡介

陳嘉樂 土木工程師 香港奧雅納工程顧問董事，現任香港工程師學會土木分部主席，英國結構工程師學會會員，英國認許工程師，英國公路交通學會(香港分會前主席)。陳先生專長於與道路及車輛及有關之路線安排結構、地面、地底及隧道等設施之設計，勘察，監工及檢核。現為香港吐露港公路/粉嶺公路擴闊工程監理。

劉啟平 土木工程師 香港奧雅納工程顧問高級工程師，現任香港吐露港公路/粉嶺公路的擴闊工程駐地盤工程師。

## Green Buildings of The Hongkong Electric Co, Ltd.

**Ir IP Tat Yan,**

The Hongkong Electric Co.,  
Ltd., Hong Kong

**Ir HO Hing Yu,**

The Hongkong Electric Co.,  
Ltd., Hong Kong

**Ms WONG Yee Yi,**

The Hongkong Electric Co.,  
Ltd., Hong Kong

### Abstract

*The Hongkong Electric Co., Ltd. (HEC) has been adopting environmentally-friendly building design and green features to its premises. This paper aims to introduce the green features of newly built Lamma Power Station Extension (LMX) Maintenance Building and Lamma (LMA) East Store Building and share experience in green building development and how these initiatives add value to the company.*

*LMX Maintenance Building obtains provisional Platinum rating under BEAM Plus standard, while LMA East Store Building is awarded BEAM 4/04 Platinum Certification. Application of renewable energy by installation of PV panels is estimated to contribute to 43.5% and 78% of their annual energy consumption respectively. Another example is the application of “DIG Solar Wireless Irrigation System” at LMA East Store Building, which helps save annual water consumption by more than 35% as compared with the traditional irrigation method. Along with other environmentally-friendly features, the buildings help reduce resources consumption and achieve sustainable building design.*

### 1. Introduction

Green building is the practice that uses environmentally responsible processes throughout the life cycle of a building, from siting, design, construction and then operation, maintenance, renovation and demolition. The objectives are to minimise impacts to the natural environment and human health. Generally, these are met by using resources efficiently, reducing waste and pollution to the environment, and adopting measures to protect the health of the building users.

Established in 1889, The Hongkong Electric Co., Ltd. (HEC) generates and supplies electricity for over half a million of commercial and domestic customers in Hong Kong. As one of the major public utilities in Hong Kong, HEC realises it is influential in the way of life of Hong Kong citizens. Over the years, HEC takes environmentally-friendly initiatives in multiple aspects. For instance, its Lamma Winds and various education programmes are well-known in the community. Besides these well-established environmentally-responsible activities, HEC also applies green initiatives in the daily operations. Its newest operation buildings – LMX Maintenance Building and LMA East Store Building – adopt sustainable concepts in their life-cycle, which in the end can reduce their impacts to the environment in a more thorough and effective way.

## 2. Initiatives Taken by HEC

Dated back to 2008, HEC constructed its Marsh Road Station Building with the concept of promoting sustainable development. Ash produced from coal burning at our Lamma Power Station was used as construction materials for the building. In addition, the building features a number of green elements including a rooftop garden to lower indoor temperatures of the building, thereby reducing the demand for air ventilation. One micro wind turbine of 2.5kW capacity and 30 solar photovoltaic panels totaling 6.15kWp were also installed to generate green electricity for the premises. To conserve water resources, a water collection tank was built to collect rain water for plants irrigation in the garden.

Besides, noise abatement measures were taken to reduce nuisance to the nearby community. Acoustic lining for transformer, and silencer for ventilation fans and generator were employed.

### 2.1 LMX Maintenance Building

LMX Maintenance Building is the newest building developed by HEC at its Lamma Power Station. It obtains Platinum rating under Provisional Assessment of BEAM Plus Assessment for New Buildings. BEAM (Building Environmental Assessment Method), launched in 1996, is a voluntary green building assessment scheme in Hong Kong. It measures, improves and certifies the building of its environmental sustainability across its life-cycle, in terms of site, materials, energy use, water use, indoor environment quality and

innovations. BEAM Plus is the most updated standard of BEAM for assessing environmental performance of new and existing buildings. The assessed buildings are labelled as Platinum, Gold, Silver, Bronze or Unclassified accordingly.

Since siting and design of the building, environmental considerations are taken care of in development of LMX Maintenance Building. Site planning and building designs of the LMX Maintenance Building have taken visual impacts and other environmental aspects into account for integration with the immediate site surroundings and neighbourhood according to the Urban Design Guidelines in the Hong Kong Planning Standards and Guidelines.

About 65% of hard landscaped areas are paved with eco paving materials. As water is allowed to filtrate into the ground, the surface and surrounding area temperatures of LMX Maintenance Building will be cooler than a hard impervious surface. Also, pervious pavement absorbs less heat from solar radiation as the relatively open pore structure stores less heat, therefore, reducing the heat reflected back into the environment and helping to lower heat island effects. High emissivity roofing material is used such that remaining heat absorbed from the sun can be released and roof temperature of LMX Maintenance Building can be reduced. All exterior surfacing works including paths and surfaces will adopt environmentally friendly pave and permeable which contain high recycled content. Approximately 70% of outside surface works and structures are made from recycled materials. FSC (Forest Stewardship Council) certified timber or reused

wood is used for temporary work during construction. No ozone-depleting chlorofluorocarbon (CFC)-based refrigerants are used which is destructive to the environment.

The design of the LMX Maintenance Building also takes into account of environmental considerations. Spatial flexibility is provided in the premises for different uses and allows for expansion to permit additional spatial requirements to be accommodated. Flexible design of services that can adapt to changes of layout and use is available. Building design also provides flexibility through the choice of building structural system that allows for change in future use, and which is coordinated with interior planning modules.

Appropriate monitoring and auditing has been implemented during its construction stage. Mitigation measures for dust and air emissions, noise and water pollution during the construction were taken. Obtrusive light from exterior lighting meets the specified performance. Waste management plan was implemented and waste recycling has been taken place.

On energy aspect, PV panels are installed at LMX Maintenance Building and power generated from which achieves about 44% of total building energy consumption. Instruments are installed to monitor the electricity consumptions. Motion sensors are installed to control artificial lighting and hence achieve energy saving.

Regarding water use, harvesting of rainwater is estimated to contribute to about 20% of annual water saving. Overall, it is estimated that about 41% of annual water saving and 26% of flush water saving is achieved.

To maintain satisfactory indoor environment, adoption of sun light is integrated in building design. Suitable daylight glare will be maintained with the assistance of venetian blind. Ventilation system is installed at the areas with significant indoor pollution sources generated.

## 2.2 LMA East Store Building

LMA East Store Building is another BEAM certified building of HEC. It obtained BEAM 4/04 Platinum Certification in 2012. By implementation of environment management during its construction phase, incorporating green features in building design, and adoption of energy and water saving measures, impacts to the environment are reduced.

Environment management was implemented during construction stage of LMA East Store Building. Mitigation measures were implemented to reduce air, noise and water pollution during construction. Wastes generated during its construction stage were reduced by reuse and recycling of materials. More than 97% by weight of construction waste are recycled. All unitised transportable metal hoardings left after the construction are reused for other construction projects in Lamma Power Station. Moreover, surplus excavated soil after foundation completion is used for ground filling purpose within Lamma

## Power Station without dumping to public Landfills.

In respect of material used, paving surrounding the LMA East Store Building was paved with recycled aggregate paving blocks. These paving blocks were made of not less than 50% recycled aggregates to replace virgin aggregates.

Renewable energy is harnessed to provide electricity for this building. About 78% of the annual energy consumption of the building is provided by a grid-connected solar PV power system with total installed capacity of 173.8kW on the rooftop. The system comprises 1,224 pieces tandem junction thin film photovoltaic (TFPV) modules each rated at 142W peak output.



Fig. 1a TFPV Solar Panels on the roof of LMA East Store Building (top view)



Fig. 2b TFPV Solar Panels on the roof of LMA East Store Building (side view)

The use of natural lighting is maximised in the daytime by a thin strip of skylight added at regular intervals corresponding to the aisle location of each store. For artificial lighting, the following energy-efficient devices are installed to achieve energy saving:

- 1) Energy-efficient highbay floodlights with induction lamp are provided for high headroom stores.
- 2) T5 fluorescent luminaries are provided for the building services equipment rooms and Store Control Room.
- 3) All lighting system is controlled by individual motion sensors located in the respective room.
- 4) Perimeter lightings with SON lamps are provided around the building perimeter and are controlled by photocell.

Therefore, electricity consumption for lighting is largely reduced. About 54% energy saving in lighting energy consumption is achieved as compared with the BEAM baseline option.



Fig. 2 thin strip of skylight added at regular intervals corresponding to the aisle location of each store

Water consumption of the LMA East Store Building is reduced by the application of “DIG Solar Wireless Irrigation System”. It is a wireless irrigation control system powered by photovoltaic technology and ambient light energy collection system. It is also a weather based system that has incorporated the use of evapotranspiration (ET) data. Site information is combined with the weather station data to calculate the daily local microclimate ET and automatically adjust the daily irrigation schedule. Drip pipelines are provided to the plant boxes to minimise the loss of water by evaporation or spraying everywhere. The estimated annual water saving is more than 35% as compared with the traditional irrigation method.

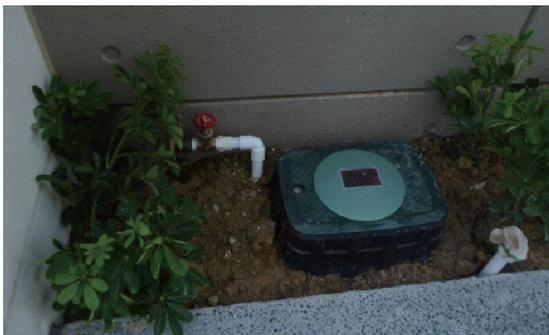


Fig. 3 DIG Solar Wireless Irrigation System at LMA East Store Building

Indoor environment is enhanced by adoption of natural ventilation effectively. LMA East Store Building is oriented with its long façade facing the prevailing wind direction. Natural ventilation is also facilitated by means of low level louvers on one façade and high level louvers on the opposite one.

### 3. Conclusion

HEC is committed to protecting the environment and supporting sustainable development by conducting our business in an environmentally responsible manner. From expanding our generation portfolio to cleaner energy and renewable energy, to promoting energy efficiency and conservation to our community, HEC is always aware of the impacts of our operations to the society.

The concept of green building is becoming more popular in Hong Kong. Impacts to the environment and human health are reduced through detailed planning for the life cycle of a building. HEC understands the expectation of our stakeholders on environmental protection is increasing. Thus, we look into every detail in our operations and invest a lot to reduce our impacts to our community, no matter directly or indirectly. Our green buildings contribute to a more sustainable society and they fully represent our commitment of protecting environment.

### Reference

- [1] “BEAM Plus Provisional Assessment Report for LMX Maintenance Building”, BEAM Society Limited, 4 December 2012
- [2] “Final BEAM Assessment Report for LMA East Store Building”, Business Environment Council Limited, October 2012
- [3] “Social and Environmental Report 2008”, The Hongkong Electric Co., Ltd., 2009
- [4] “Transmission & Distribution System”, The Hongkong Electric Co., Ltd., 2014

# Design and Construction of Hong Kong Railway Project - Challenges and Importance of Cut and Cover Method in Urban Area 香港鐵路工程的設計與施工 - 市區明挖回填方法之挑戰及重要性

Ngai Chung Yuen Edward  
MTR Corporation  
Hong Kong

## 摘要

鐵路系統為香港主要公共運輸的骨幹。港鐵公司，藉著擴建鐵路網絡和改善其接駁系統，為香港市民提供優質的鐵路服務，亦加強與地區聯繫。

香港建築物林立，車站建在人口稠密的地區，在建造深度較淺的地下車站，便使用明挖回填方式建造。明挖回填是將地面挖開，進行所需的工程，然後再填平地面。港鐵公司在市區建造工程上有豐富經驗，本文將集中討論港鐵公司採用的挖掘與側向承托方法，以配合地下結構施工。同簡介現時港鐵公司所採用設計與施工方案。

## Abstract

*Railways as the backbone of Hong Kong's major public transport, its services are enhanced by MTR Corporation with the expansion of railway network and improvement of its feeder system. Hong Kong is a highly populated area and condensed with buildings and infrastructures. Underground railway stations constructed by cut and cover method is commonly adopted by the Corporation in urban areas. Cut and cover method is using open excavation to dig up the ground, carry out the necessary construction work, and then backfill the ground. MTR Corporation has extensive experience for construction in urban areas. This paper will focus on the excavation lateral sup-*

*port (ELS) systems adopted by the Corporation's for open excavation to facilitate the construction of underground stations. Design and construction approaches will also be briefly discussed in this paper.*

## 1. Introduction

Due to the lack of land area and high costs of land in Hong Kong, underground stations are constructed so as to offer additional space for future development. The underground station are generally located as shallow as possible to cater the major factors such as architectural elements, provision of access and egress for passengers, and the anticipated significant amount of underground obstructions in urban areas (Figure 1). The underground railway stations in Hong Kong are normally constructed by open excavation method in view of the above mentioned factors. The scope of this paper is to outline the excavation lateral support system adopted by MTR Corporation for the construction of underground stations & associated facilities in urban area and to discuss the challenges encountered during the execution of the work.



Figure 1 - Open Excavation at Urban Area

## 2. Challenges

Underground construction projects in cities are necessary for continued and sustainable urban life, but they present distinct challenges. When the open excavation method is adopted in an urban area for construction of underground structures, there is need to minimize the adverse effects on the surrounding environment. Using this method in Hong Kong is especially difficult, as the extremely efficient use city space makes it difficult to find space to work, and noise, vibration, air pollution and traffic problems caused by construction need to be addressed. Also, conservation of underground water is an important issue, therefore selecting a construction method that mitigate the adverse effects on surrounding community is the key to success in urban construction project. Underground structures have to be constructed with minimal disruption to infrastructure and economic activity in the area. During construction of excavation support system, additional

precautions are to be taken for adjacent structures and facilities.

## 3. Types of retaining wall for underground construction

Variety of construction techniques and walling systems for open excavation have been adopted by the construction industry in Hong Kong. As different types of walling systems have differences in quality such as verticality, strength and permeability of the walls, consideration on underground and environmental conditions, allowable construction period, cost, programme and construction plants are taken into account when choosing the appropriate walling system to facilitate the underground construction works. In general, diaphragm wall and pipe pile wall are commonly adopted by the Corporation for the construction of stations.

### 3.1 Sample project adopting diaphragm wall for construction of underground station

A 300m long and 20m wide underground station is being constructed underneath an existing carriageway in urban area, which is in close proximity to the densely populated residential building area (Figure 2 & 3). In response to the tight physical constraints along the street, the station has a stacked platform to suit the street configuration. The base slab of the station box is being constructed at more than 30m below the existing ground level.



Figure 2 - Site Photo



Figure 3 - Placing Steel Reinforcement Cage of Diaphragm Wall Panel

The station is being constructed by using cut and cover method in top-down construction sequence. Diaphragm wall with 1.2m thick is used as the temporary and permanent lateral retaining structure, which will be laterally supported by the permanent slabs at the permanent stage plus a total of seven layers of steel shoring and concrete cross wall at the temporary stage. Typical shoring layout is shown in Figure 4.

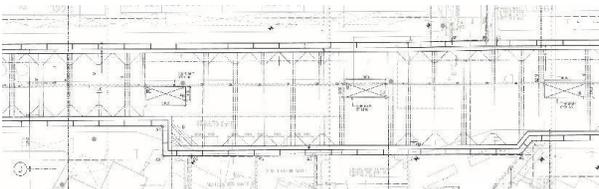


Figure 4 - Typical Shoring Layout

The diaphragm wall toe is founded on Grade IV/III or better rocks. Cross walls with 0.8m thick at spacing 6m are constructed to act as “pre-installed” props and provide additional lateral support against soil and water pressure in order to minimize the impact to the adjacent buildings due to ground movement. They are constructed using the same technique of diaphragm walling, with plain concrete for the ease of removal during excavation. Shear pins will be installed down to the specified level to maintain the toe stability. Toe grouting is proposed as a water cut-off system to control the water drawdown due to dewatering activities throughout the excavation.

Another challenge of the station construction is attributed to the existing traffic. It has to maintain the existing traffic along the street such that the station is being constructed in 3 stages.

### 3.1.1 Diaphragm wall

Diaphragm wall provides robust structural support and water tightness. It is a classical technique for many deep excavation projects, large civil engineering works and underground structures. Diaphragm walling is a technique of constructing a continuous underground reinforced concrete wall from the ground level. Typical wall thickness varies between 0.8m to 1.5m. The wall is constructed panel by panel in full depth. Panel width varies generally from 2.5m to 6m.

Typical details of diaphragm wall panel are shown in Figure 5.

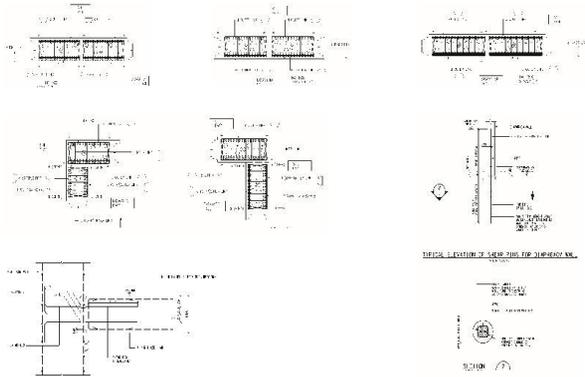


Figure 5 - Typical Details of Diaphragm Wall

Diaphragm wall offers one of the most favorable solutions for deep excavation for stations with depth more than 25m. The reasons are mainly the following:

1. The shape of the diaphragm wall panels suits the shape of the final structural element (underground station wall)
2. The construction period is shorter due to excavation of panels longer than the pile
3. The total number of joints is significantly reduced and therefore this system is more likely to be watertight
4. With the reinforced concrete wall construction, it can provide good water cut-off. Therefore, no dewatering is required for the construction
5. Maximum use of the site; a diaphragm wall can be constructed at the extreme site perimeter
6. Construction to great depth possible due to stiff rigid wall
7. Safe construction method

8. Inclination of the panel is controlled during excavation in order to ensure a continuous wall

### 3.2 Sample project adopting pipe pile wall for the construction of underground station

A station located in well developed, densely populated streets with extensive residential towers situated on both side of the carriageways (Figure 6). Pipe pile wall is adopted as ELS for this station since the excavation depth is relatively shallow. This station comprises two concourses which are joined by a 100m long platform tunnel and the associated over-run tunnel to be constructed within this area. Whilst majority of the works is mainly beneath the carriageway, one of the concourse is being constructed using cut-and-cover method within a cofferdam where maximum dimension of the concourse is in the order of 100m x 20m x 24m deep.



Figure 6 - Site Photo of pipe pile wall construction

The cofferdam is mainly formed by pipe pile with 610mm outer diameter around the future station box. Excavation inside the cofferdam is pre-

dominantly in soil while rock excavation is expected towards the base of the station box. Strut system to laterally support the cofferdam walls has been provided as the excavation inside the cofferdam is taken downwards. King posts have also been provided inside the cofferdam to minimize the buckling effect on steel strut during excavation. In order to maintain the live traffic within the main traffic zone, over the excavation, temporary traffic decking is proposed which is supported by both the perimeter pipe pile walls and king posts.

Ground treatment, particularly, curtain grouting is proposed behind the cofferdam pipe pile walls to cut off groundwater inflow into the excavations and hence reduce the extent of groundwater drawdown. Wider permeation grouting is also proposed to strengthen the ground between the cofferdam and some of the residential buildings after detailed assessment of underground conditions.

### 3.2.1 Pipe Pile Wall

Pipe pile walls are very popular in Hong Kong due to their availability of construction plant and practicality of operation. Pipe pile walls are rows of steel circular hollow section installed by boring method (Figure 7). In order to produce a continuous wall, lagging by steel plate or grouting is necessary between the piles. They avoid pre-excavation of trench for diaphragm wall construction, and the boring method for installation of steel pipe

pile can overcome underground obstruction such as core stones or boulder. By control the water inflow, it is more economical compared to diaphragm wall in small to medium scale excavation due to cost of site operation and bentonite plant. For underground station excavation down to approximate 25m, this type of wall can be executed without major difficulties. Typical details of pipe pile wall, strut and waling are shown in Figure 8.



Figure 7 - Pipe Pile Installation by boring Method

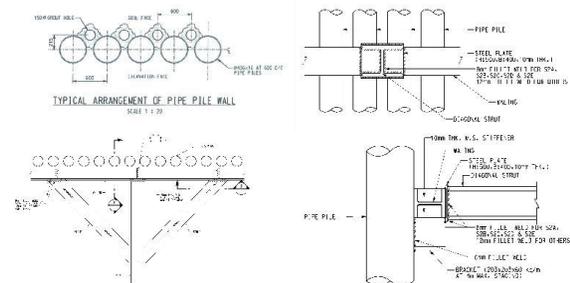


Figure 8 - Typical Details of Pipe Pile Wall, Strut and Waling

#### 4. Precautionary Measure and Controls of Works

All underground structures shall be designed so that they can be constructed in a practical manner. The generated vibration and settlements which may have effects on adjacent buildings and structures should be minimized to an acceptable level. In order to demonstrate that this is the case, ground movements shall be estimated using methods which have been approved in principle by the Corporation and government authorities. A settlement contour plan will be presented according to the estimated ground movements which can define the influence zone to the Existing Buildings and Structures (EBS) in vicinity (Figure 9).



Figure 9 - Settlement Contour and EBS within Influence Zone

##### 4.1 Pre-condition Survey

The Corporation will arrange a detailed condition survey to be carried out for EBS adjacent to the work sites. Generally, EBS within the influence zone bound by the contour of at least 10mm ground movement or peak particle velocity of 13mm/s will be

surveyed, but exceptional buildings and structures outside such zone of influence should be considered on their merits. The pre-construction condition survey with a full set of photographic record of the external, common areas and individual flats of the EBS within the influence zone will be carried out by an independent surveyor. Review by the designer of these surveys shall be carried out and advice be given on the implications/considerations, if any, with respect to the proposed construction options and designs, if different to those contained within the detailed evaluations carried out previously.

##### 4.2 Instrumentation and Monitoring

The designer will also determine the locations of all monitoring check points. The monitoring instruments shall be installed for the purpose of monitoring ground and structure movements, groundwater and structural behavior prior to construction, during construction and following completion of construction in certain cases. (Figure 10)

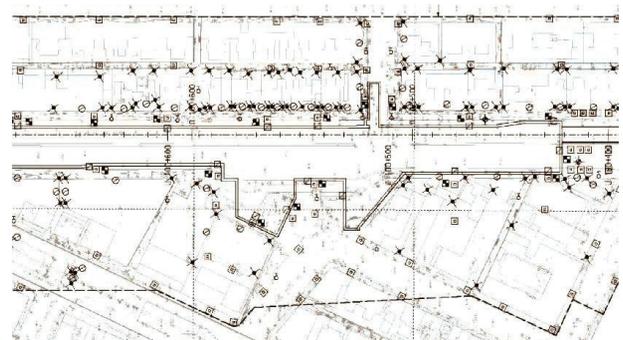


Figure 10 - Instrumentation and Monitoring Plan

Readings of all monitoring check points at regular intervals are required to be taken and submitted to the Corporation promptly throughout the duration of the construction works.

#### 4.3 Three Triggering Levels (AAA Levels)

The monitoring requirements for the EBS, slopes and utilities, arising from the proposed construction works should include a system of three triggering levels, namely the alert, alarm and action levels respectively. Movement control levels for the monitored elements shall be defined in accordance with the following criteria.

(i) Alert Level - It shall initially be set as 0.5 times the serviceability limit movement for the monitored elements. Upon reaching "Alert Level" movement at any location, the Contractor shall review the movements and assess the effect of movements on the monitored element and then submit proposals for remedial measures to limit further movement for the approval of the Engineer.

(ii) Alarm Level - It shall initially be set as 0.7 times the serviceability limit movement for the monitored elements. Upon reaching "Alarm Level" movement at any location, the Contractor shall immediately instigate the approved remedial measures agreed at the

"Alert Level" status. The Contractor is required to submit an updated report to review the movements and assess the effect of the movement on the monitored elements. In addition, revised "Alert Level" and "Alarm Level" values which take into account the implemented remedial works shall be submitted and approved by the Engineer before work may continue.

(iii) Action Level - It shall initially be set at the serviceability limit movement for the monitored element. Upon reaching the "Action level" at any location the corresponding site works have to be suspended. The Contractor is required to provide a report detailing the full history of movements and remedial measures adopted in relation to the actual construction sequence. The report shall contain a review and interpretation of the events and give recommendations for enabling the work to proceed. Work may only resume upon the written instruction of the Engineer.

Provided that there are no particularly sensitive adjacent buildings, structures and services, the following may be taken as the AAA trigger for reference purpose.

Instrument	Criterion	Alert	Alarm	Action
Ground settlement	Total settlement	12mm	18mm	25mm
Services settlement marker	Total settlement &	12mm or	18mm or 1:450	25mm or 1:300
	Angular distortion	1:600		
Building tilting marker	Angular distortion	1:1000	1:750	1:500

Table A - AAA trigger values generally adopted in Hong Kong

## 5. Conclusion

Through careful planning and with due consideration in all aspects in the design and construction of underground structures and the monitoring system to surround features, safety of the public and adjoining structures are safeguarded. Movements of the monitored elements are within the specified control limits with the implementation of monitoring system which provide sufficient information to enable the excavation works to be kept under control.

## 6. References

1. Buildings Department, The Government of Hong Kong SAR - Practice Note for Authorized Persons, Registered Structural Engineers and Registered Geotechnical Engineers No. APP-137 (2012)
2. Mass Transit Railway Corporation - New Works Design Manual
3. Mass Transit Railway Corporation - Materials and Workmanship Specification for Civil Engineering Works
4. Triantafyllidis, T and Ing, H (1992) - "Construction Methods and Technical Aspects for Deep Basement in Hong Kong"

## Biography

MTR Corporation

Ngai Chung Yuen Edward, Engineering Manager-Civil

Edward Ngai is the Engineering Manager-Civil of MTR Corporation. He graduated from National Taiwan University and University of Missouri-Columbia in Bachelor and Master of Science in Civil Engineering. He started his career in design of large-scale infrastructure and civil engineering projects. He has also involved in the design and project management of major railway development over 18 years.

## **Key to Green Building**

Name	CHOI Chung ming
Organisation	CLP Holdings Limited
Postal Address	Group Environmental Affairs 8 Laguna Verde Avenue Hung Hom, Kowloon
Tel. number	852 - 6829 1566
e-mail	<a href="mailto:cmchoi@clp.com.hk">cmchoi@clp.com.hk</a>

## Key to Green Building

### Summary

*The objectives of this paper are to review the key drivers and issues behind the greener building movement, identify the most appropriate green building standards in Hong Kong; understand the issues, discuss measures organizations could take to turn a building green, and share CLP's experience on green building management.*

*Green building is not only an energy efficient building, it is an environmentally-friendly and resource-efficient building. However, it should be noted that some well- designed buildings do not necessarily translate to green performance due to a variety of reasons.*

*Therefore it is important for organisations to assess and establish the environmental aspects of a building prior to determining approaches to transforming their building. The results will pave the way for identifying and adopting a recognised building performance standard and benchmark performance. This paper identifies critical factors and proposes a framework for a green building. These include integrating key issues of a building into the ISO 14001 environmental management system, conducting regular carbon and energy audit, implementing high energy efficiency building installations, and setting up performance indicators for continuous monitoring.*

*This paper also shares WBCSD's Manifesto for Energy Efficiency in Buildings and how CLP promotes energy efficiency and efforts to achieve green buildings.*

## **Key to Green Building**

### **Introduction**

Much of our lives is spent inside buildings, yet most of us tend to pay little attention to the energy consumed by buildings, the amount of waste generated on a daily basis, the efficiency of the air conditioning system, and the impacts of buildings to the surrounding and global environment. Needless to say, the benefits delivered in terms of energy efficiency attributable to a good building design are often overlooked. Thanks to concerns over climate change, recent air quality issues and increase of environmental awareness as well as enforcement of more regulatory control, this situation is changing.

In some countries, moving towards a green building has progressed surprisingly fast as evidenced by the rapid releasing of more new or revised policies and regulations related to energy efficiency and performance of green buildings. For example, the compulsory requirement for large building to display energy certificate under the Energy Performance of Building Directive since 2008 and implementation of green deal scheme in 2013 in UK.

The objectives of this paper are to review the key drivers behind the greener building movement, identify the most appropriate green building standards; understand the issues, discuss methods to turn a building green, and share CLP's experience on green building management.

*In this paper, a green building is simply defined as low carbon (or energy efficiency) building and performing in an environmental responsible and resource efficient manner. At the same time it also meets the needs and expectations of the occupants and relevant stakeholders.*

### **What is a green building?**

## Key to Green Building

The meaning of a green building and a sustainable building is best described and defined by the Building Environmental Assessment Method (BEAM)<sup>1</sup>. It also quotes from ASTM<sup>2</sup> which states that a “green building” is defined as “a building that provides the specified building performance requirements while minimising disturbance to and improving the functioning of local, regional, and global ecosystems both during and after its construction and specified service life. Furthermore, “a green building optimises efficiencies in resource management and operational performance; and, minimise risks to human and the environment”.

In addition to the above definition, BEAM defines a sustainable buildings by including social and economic aspects. BEAM considers that in the context of Hong Kong’ sub-tropical climate and dense high-rise development, a sustainable building should meet the aspects of, in the priority order, safe, healthy, comfortable, functional and efficient. These definitions align with the definition and objectives of this paper except that the social and economic aspects are not included.

<sup>1</sup> BEAM is a Hong Kong standard that defines building quality and is owned and operated by BEAM society Limited.  
<http://www.beamsociety.org.hk>

<sup>2</sup> ASTM International E 2114-01. Standard Terminology for Sustainability Relative to the Performance of Buildings. 2001

## Key to Green Building

### Why do we need a green building?

According to the UK Committee on Climate Change, greenhouse gas (GHG) emissions from buildings contributed 35% of the UK's total in 2011. Its latest progress report on meeting UK's carbon targets reveals that 66% of GHG emissions from buildings are from residential ones, while commercial and public sector emissions accounts for 25% and 90% respectively<sup>3</sup>. In Hong Kong, the situation is even more critical. Over 60% of GHG emissions come from electricity, in which 90% of electricity is consumed by buildings<sup>4</sup>.

Therefore, as Hong Kong strives to do its part in the Mainland's carbon intensity reduction goals, it is important to focus on GHG reductions from buildings. In addition to new and revised policies and regulatory requirements in relation to energy consumption, there are a number of factors and drivers, which will vary according to the needs and development of various countries, behind the green buildings movement. In brief, key drivers to make such change are summarised in below table.

**Table 1 : Key drivers to change a building green**

Driver	Past	Present	Future
Regulatory Requirements	♣	♣♣	♣♣♣♣
Policies (government & private)	♣	♣♣♣	♣♣♣♣
Green group's agenda	?	♣	♣♣
People's awareness	♣	♣♣	♣♣
Money saving	♣	♣♣	♣♣♣♣
Stakeholder expectations (Feeling green, company initiative)	?	♣♣	♣♣♣♣♣

♣ intensity of the driver, e.g. more regulatory requirements and policies in future than in the past. ? means not aware of.

<sup>3</sup> Paul Suff, Makeover SOS, the Environmentalist, October 2012.

<sup>4</sup> Page 2-3. CCBF, Carbon-Smart Building. Tackling Energy Efficiency in HK's Commercial Buildings

## Key to Green Building

Regardless of whether it is regulatory compliance or environmental stewardship, there will be some changes for the design, construction, operation and maintenance of buildings.

Furthermore, driving forces from developers, occupants and relevant stakeholders should not be overlooked. With the increasing environmental awareness and appreciation for the concept of sustainable development among the public, expectations for an environmentally friendly and quality working and living environment within a building are higher today.

How long has this change been started? It is difficult to have an exact answer. However, it is likely to have started in early to mid 2000s when the film “The Day after tomorrow” was broadcasted and Al Gore launched his global warming and climate change programme as well as his book & film “Inconvenient Truth”. People started to realise the importance to protect our environment and that contribution from each of us as an individual is crucial. These changes gradually lead to concept of a green building and protect the global environment.

### How green is green?

There have already been many national and international standards to specify the design, construction, operation and maintenance of a building. To make a building green, it is necessary to identify and adopt an appropriate standard and then benchmark performance.

In Hong Kong, the Electrical and Mechanical Services Department has already launched the Energy Efficiency Registration Scheme for Buildings since 1998 and also its fifth code - Performance-based Building Energy Code in 2003. Under this Scheme, there are five sets of code covering lighting, air conditioning, electrical and lift & escalator installation and the minimum energy performance standards of these installations.

## Key to Green Building

These Codes form the basis of energy efficiency for a building if it is designed, retro-fitted and operated according to the requirements. If a wider set of environmental aspects is considered, more consideration, measures and initiatives are needed.

### Adopting a recognised building performance standard

Every country and city has its unique climate, culture and development. Factors like temperature, rainfall, humidity, rain storm, geographical location, etc. highly affect the performance of a building.

There are some recognised international standards (e.g. LEED<sup>5</sup>) and local standards (e.g. BEAM) that can be adopted for a green building. If Hong Kong's sub-tropical climate and dense high-rise environment is considered, the latest version of BEAM Standard, the BEAM Plus Version 1.2, seems to be more appropriate. BEAM embraces a wide range of sustainability issues, environmental issues (including climate change and global warming in the latest version) and covers the whole-life performance of buildings. The standard is applied to assessing new buildings upon completion; and certifies actual performance. Furthermore, it embraces management, operation and maintenance practices to ensure high level of building performance.

Under BEAM, a comprehensive set of performance standards are provided and can be pursued by developers and owners. These standards are separated into 5 key aspects, namely:

- site aspects;
- materials aspects;
- energy use;
- water use; and

---

<sup>5</sup> Leadership in Energy and Environmental Design developed by the US Green Building Council

## Key to Green Building

- indoor environmental quality.

Each category has a different rating. Depending on how a building is to follow these standards and its final performance, a building joining this scheme will be assessed and an overall grade will be determined by the percentage of the applicable credits gained under each performance category and its weighting factor. The best performer will be awarded a Platinum grade if the overall percentage is 75% or above while a Bronze is given to an above average performer with an overall percentage of 40.

In principle, this kind of building performance standard can provide the basic requirement to turn a building (new or existing) green and provide guidance for a building to perform in a responsible and environmentally friendly manner throughout the building's life cycle.

### **A well-designed building does not necessarily translate to green performance**

*“Few buildings perform as efficiently and effectively as they are designed to. And not just by an inconsequential margin but by a factor of two or three when it comes to energy use”* mentioned in an article written by Richenda Wilson<sup>6</sup>. It also quoted a comment from the Building Services Research and Information Association (BSRIA) that *“the greenest buildings on paper tend to be the biggest disappointment.”* This article further mentions that many new buildings disappoint, not only in energy use but also have higher than expected running cost and disappointment levels of occupant satisfaction.

It is not difficult to recognise these facts when the tenants move in to a new building. The differences in energy use are likely because of the method of energy consumption estimation. If a building, during its design and construction stage, is to estimate based on fixed building installations

<sup>6</sup> Richenda Wilson, Buildings on the best laid plans, the Environmentalist, Oct 2012, IEMA

## **Key to Green Building**

such as air conditioning, ventilation, lift and escalator, lighting, etc, it will not account for the appliances/ equipment plugged into the sockets, from the IT equipment and more unpredictably the behaviour of the occupants. If a building has a data centre, many display rooms / restaurants, storage of items (e.g. food and beverage) in low temperature environment, the overall electricity bill can be high.

Energy efficiency is only one key aspect of a green building. If other aspects are considered such as solid waste and water management, the operation and maintenance of a green building can be made more difficult and complicated. As such it is not only a design issue but also an implementation and sometimes cultural issue.

### **How about buildings not following a recognised building performance standard?**

Furthermore, the majority of buildings, at least in Hong Kong, do not follow a recognised building performance standard (e.g. BEAM or LEED) in particular existing buildings (both commercial and residential) or buildings occupied by small and medium enterprise. Then are there any green building framework or standards that these buildings / companies can follow and implement? For a long run this will definitely help reduce the GHG emissions and resource depletion and finally contribute to the national GHG target.

To answer these questions and understand the issue, it should be started from reviewing the environmental aspects of a building before looking into solutions for a green building.

### **Understanding the issue**

## Key to Green Building

To identify and evaluate significant environmental aspects, the most widely adopted and recognised method is to follow Section 4.3.1 of ISO 14001 and 14004 Environmental Management System (EMS) standard.

Considering the life cycle of a building, it can be broadly separated into 3 phases, i.e.

- Design and construction
- Operation and Maintenance
- Decommissioning

For simplicity, this paper only focuses on the operation and maintenance phase of a building.

### Environmental Aspect of a Building

Based on professional judgement, desktop review, site visit and previous experience, environmental aspects of a building during the operational and maintenance stage are established and summarised in Table 2 below. It is noted that the proposed aspect list :

- is not a comprehensive list
- only identifies key issues
- is applicable to a typical commercial and residential building rather than mixed-type buildings with industrial processes.

Below is only a summary of key activities of a building that interact with the environment and the associated environmental aspects. Details of their impacts, operational control and monitoring are listed in Appendix 1.

Table 2 : Key activities & the associated environmental aspect of a typical building

Activities		Environmental Considerations
1	Operation and Maintenance of Ventilation and air conditioning	a. Consumption of energy
		b. Use of refrigerants

## Key to Green Building

Activities		Environmental Considerations
		c. Handling and disposal of chemical waste
2	Operation and Maintenance of Lift and escalator	a. Consumption of electricity
		c. Handling and disposal of chemical waste
3	Lighting	a. Consumption of electricity
		c. Handling and disposal of chemical waste
4	Solid waste management	d. Solid waste Storage and disposal
		e. Waste segregation, reuse and recycling
		f. Food waste collection or composting
5	Effluent generated from sewage, car washing, cleaning, etc.	g. Wastewater treatment and recycling
6	Water conservation	h. Water re-use and harvest
7	Managing a comfort and healthy indoor air quality	i. Indoor air quality performance indicator
8	Greening the building environment	j. A more diverse and natural environment
9	Operation and maintenance of electrical appliance, Office & IT equipment	a. Consumption of electricity
		c. Handling and disposal of chemical waste
10	Practising green behaviour	k. Performing in an environmentally responsible manner, e.g energy saving, waste recycling, etc.
11	Selection and use of environmentally friendly appliances and products	l. Green procurement
12	Operation and maintenance of backup diesel generator	m. Fuel consumption and emissions

## Evaluation of significant environmental aspects

Selection of criteria is based on :

## Key to Green Building

- Scale and severity of environmental impacts, i.e. high energy and natural resources consumption
- Whether the aspect is subject to regulatory control or internal policy, e.g. Chemical Waste Regulation; internal Energy Policy;
- Measures that have beneficial impacts, e.g. saving natural resources and reducing the amount for disposal
- Factors that affect the health and quality of a working and living environment

From an energy consumption context, all building fix installations are significant aspects as they consumed most of the energy. Waste management and effluent discharge are also key aspects as they have regulatory control, at least for the part of collection and disposal. As a green building, more consideration and initiatives are needed to go beyond compliance. Therefore most of the existing environmental initiatives and practices on recycling in such as paper recycling, metal reuse, etc. should be included. The next important aspect is Indoor Air Quality (IAQ) as it will affect the health and efficiency of the occupants. For others, it depends on the expectations of the occupants/building owner and how green they would like to go.

Finally it also depends on whether the building owner or property management will establish and implement an Environmental Policy (and / or an Energy Policy) and an Environmental Management System (and / or an Energy Management System). It also depends whether there are any incentive / green deals offered by the government.

## **Key to Green Building**

### **How to turn a building green (or build a green building)**

There are many ways to turn a building green. It may start from the design and construction stage or retrofitting the existing building. Below sections propose a framework to turn a building green.

#### **Adopting an appropriate and local building performance standard**

As mentioned earlier, to adopt directly the BEAM Plus grading system for instance, is one of the best ways to attain the basic requirement of a green building and benchmark performance. This is applicable to both new and existing buildings. The advantage of this approach is that a recognised building performance standard has already provided a comprehensive and fair assessment of the overall performance of a building in most of the environmental aspects as well as sustainability areas. It also recognises best practices and demonstrates performance qualities to end users.

Its method of quantifying overall performance can provide an easy to understand energy saving and environmental protection efforts. It also identifies areas for continual improvement.

#### **Retrofitting existing buildings**

According to the Intergovernmental Panel on Climate Change, retrofitting existing buildings has the largest potential of all measures to reduce GHG emissions by 2030. Therefore, retrofitting of existing building by addressing part of the significant environmental issues defined above can make a big different and reduce lots of its carbon footprint. For example, if all incandescent lamps are replaced by T5 florescence tube or LED lamp, the reduction of energy consumed could reach over 80%. If a glass recycle bin can be provided, hundreds of empty glass bottles can be reused for other materials, such as bricks that are used to pave pedestrian sidewalks. If water can be harvested, both the carbon footprint and water consumption can be reduced. .

## Key to Green Building

Below two tables provide a brief account on energy saving and environmental control measures for a green building. Key information is based on the Energy Management in Buildings<sup>7</sup>, BEAM Plus and CCBF<sup>8</sup>.

### Building services installation / equipment :

**Table 3 : Standard of Key Building Services Installation**

Building Installations / Equipment	Recommended Standards	Others initiatives / standards
Air Conditioning and Mechanical Ventilation	Building Energy Codes; energy label	Chiller dynamic control; ultra-efficiency air conditioning, e.g. water-cooled chillers with oil-free magnetic bearing compressors or with a control variable speed systems
Lighting	Building Energy Codes; energy label	No incandescence lamps; T5 and LED Integrated controls for occupancy, smart energy metering systems
Office Equipment & IT equipment	Green Label; Energy Label	Integrated controls for occupancy, smart energy metering systems
Life & escalator	Building Energy Codes	
Renewal Energy & energy efficiency equipment		Use of solar energy; heat pump, etc. Facade treatment with solar film
Material use		Use environmentally friendly refrigerants Use of rapidly renewal materials or sustainable forest product DO not use prohibited substances such as asbestos, ozone depleting substances, etc.

### Environmentally friendly measures : beyond compliance

**Table 4 : Key Environmental Measures for a Green Building**

Environmental measures	Recommended Standards	Others initiatives / standards
Water conservation and wastewater treatment	NA	Water conservation plan, water saving devices, water audit, etc.
Solid Waste Management	NA	Waste management plan; demonstrating reduction in waste disposal and increased recycling; providing facilities for collection,

<sup>7</sup> Best Practice Series, Vol 4 2003, IEMA : Energy Management in Buildings

<sup>8</sup> CCBF, Carbon-Smart Buildings – Tackling Energy Efficiency in HK's Commercial Buildings

## Key to Green Building

		sorting, etc.
Noise barrier	Hong Kong Planning Standards and Guideline	
Indoor Air Quality	EPD's IAQ scheme.	Suggest at least good class for existing building and excellent class for new or retro-fitted buildings

### How to sustain a green building

To sustain a green building, a consistent and systematic process to manage the key environmental aspects as well as influencing stakeholders is needed in addition to adopting energy efficiency building services installations described above. It is proposed that a recognised environmental management system with setting up of key building performance indicator should be adopted.

### Adopting the ISO 14001

For most of the buildings that do not (or cannot) follow a recognised building performance standard and its grading system, the most straightforward approach is to adopt and ISO 14001 EMS and conduct regular carbon / energy audit.

### Does a green building need ISO 50001?

With the introduction of a specific system - ISO 50001 - for energy management, building owner or occupant can further explore the opportunity to follow this standard and review its applicability to a green building. However, it is considered that ISO 14001, with an appropriate policy, and identification of a set of performance indicator are the basic system / platform to manage the key environmental aspects, including energy consumption, for a green building.

### Setting up performance indicators and ISO 14064

The weakness of ISO 14001 EMS in the context of green building is that:

## Key to Green Building

- it does not have a mandatory process to capture and monitor building performance indicators (e.g. energy consumption and greenhouse gas emissions)
- it is not detailed enough to provide a systematic framework and processes for data capture, compilation and calculation

Therefore, it is highly recommended that the process is supported by ISO 14064<sup>9</sup> (preferably cum energy audit) to quantify the carbon footprint, at least for scope 1 and scope 2 greenhouse gases.

Quantifying GHG emissions is not a complicated process and there are many useful guidelines and templates to assist a company or a premise to evaluate its own carbon footprint. For example, the guideline to account for and report on GHG issued by the Hong Kong Government<sup>10</sup> is a good reference for this purpose.

Based on the significant environmental aspects defined in Table 2, key performance indicators can be determined for continuous monitoring, for example, energy consumption, solid waste (both hazardous and non-hazardous waste) recycling, disposal, water consumption / reuse, wastewater discharge, etc. These indicators are summarised in below table.

**Table 5 : Suggested key performance indicators for a green building**

Environmental Aspect		Key Performance Indicators
<b>a</b>	Consumption of energy	Electricity consumption monitoring
<b>b</b>	Use of refrigerants	Consumption of HFC
<b>c</b>	Handling and disposal of chemical waste	Chemical waste disposal quantities
<b>d</b>	Solid waste Storage and disposal	Construction waste and other solid waste

<sup>9</sup> ISO 14064 is an ISO standard for quantification and reporting of Greenhouse Gas Emissions and Removals

<sup>10</sup> EMSD & EPD. Guidelines to Account for and Report on Greenhouse Gas Emissions and Removals for Buildings (Commercial, Residential or Institutional Purposes) in Hong Kong.

## Key to Green Building

Environmental Aspect		Key Performance Indicators
		disposal quantities
<b>e</b>	Waste segregation, reuse and recycling	Solid waste reuse/recycle quantities, e.g. WEEE, plastics, paper, metals,  Recycling & Reuse to disposal ratio
<b>f</b>	Food waste collection or composting	Food waste disposal or composting records
<b>g</b>	Wastewater treatment and recycling	Effluent discharge quantities
<b>h</b>	Water re-use and harvest	Water recycling and reuse quantities
<b>i</b>	Indoor air quality performance indicator	Regular monitoring and follow-up action
<b>j</b>	A more diverse and natural environment	No. of tree planted.
<b>k</b>	Perform in an environmentally responsible manner	Training hours
<b>l</b>	Green procurement	% of products with green labels and % of contractor/supplier with ISO 14001

### Conducting Energy Audit

Whether a building is new or existing, building performance evaluation is necessary to evaluate energy consumption and identify problems and energy saving opportunities. It can be conducted through regular walkthrough or site inspection; occupant satisfaction survey and finally energy and environmental audit. If an ISO 14001 EMS is implemented, this process can be integrated into existing practices.

The recent enforcement of energy audit for commercial building in Hong Kong is a big step to monitor energy efficiency and towards a green building.

### Other Green Initiatives

## Key to Green Building

Other areas of importance for successful implementation of a green building include :

- The Indoor Air Quality Certification
- Green procurement
- Green IT
- Performance contracting

### WBCSD – Manifesto for Energy Efficiency in Building

In addition to above initiatives, there are also some voluntary programmes that promote building energy efficiency in a strategic manner, for example, the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)<sup>11</sup>. It initiated a Manifesto for Energy Efficiency in Buildings and aims to guide WBCSD member companies to improve the energy performance of their commercial buildings. This manifesto is to be signed by the CEO of a company; thus reflecting commitment from top management.

This kind of programme allows member companies, based on their own business nature and environment, set out and report the energy reduction target. Its five proposed actions are good reference to set medium to long term targets for any company. Key actions include:

- Create a baseline of the company's building and set time based energy/and CO2 reduction targets;
- Publish the company policy for minimum energy performance levels;
- Define and carry out the company's audit program and implementation strategy to meet energy targets for its commercial buildings;
- Publish annually, building energy use, CO2 emissions and progress against reduction targets, in the company's respective CSR or other report;

<sup>11</sup> The WBCSD brings together some 200 international companies in a shared commitment to sustainable development through economic growth, ecological balance and social progress. [www.wbcd.org](http://www.wbcd.org)

## Key to Green Building

- Further promote building energy efficiency among suppliers, employees, and other stakeholders through advocacy, marketing activity, R&D, education and training.

There are also some key points to note :

- There is a commitment to publish the annual energy or CO2 emissions results, usually through its CSR or Sustainability Report. As such, public disclosure reflects the company's commitment to the target and commitment to transparency
- Minimum energy performance level is also required to be set and published. Therefore benchmarking of performance and adopting reasonable and recognised standards such as Building Energy Code is needed.

Actions proposed in this programme are worth reviewing and highly recommended to all large corporation and utility companies.

### **Involvement of Local Government : Incentive & Green Deal**

To motivate all occupants and building owners to adopt energy efficiency measures (e.g. converting incandescence lamp to compact fluorescence lamp / T5 tube, etc.), effective governmental policies and incentive (or punishment) are sometimes needed.

It is noted that the first green deal in UK will be signed in 2013<sup>1213</sup>. The scheme allows the cost of installing energy-efficiency measures to be financed through a charge attached to a property's electricity meter. This kind of deal provides a solution for those occupants and business unwilling to invest in energy efficiency because of initial cost.

### **Best Practice and Information Sharing**

---

<sup>12</sup> Page 3, Deal or no deal?, the Environmentalist, Oct 2012

<sup>13</sup> Paul Stuff, The Great Deal – Makeover SOS, the Environmentalist, Oct 2012

## Key to Green Building

To encourage best practices and information sharing among building services professional, platforms like Usable Building Trust [usablebuildings.co.uk] and Carbon Buzz [cabronbuzz.org], etc. should be set up and promoted locally.

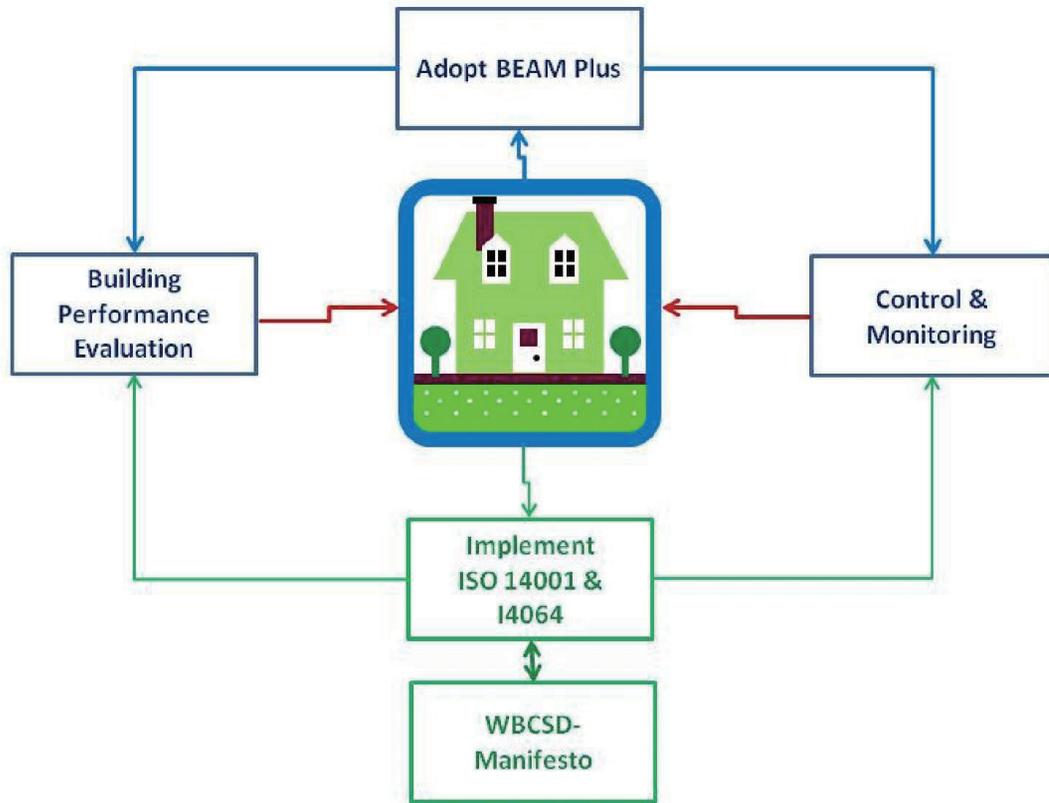
### Conclusion - Critical factors for a green building

Based on the above discussion, it is a trend that buildings will become more energy efficient and environmentally friendly in future. This not only meets the expectations of stakeholders but also meets the upcoming carbon reduction target and more stringent building management regulatory requirements. Therefore it is time to act now and critically review how to reduce the carbon footprint and turn a building green.

Recognising that some buildings or companies may not opt to fully adopt and implement building performance standards such as BEAM Plus, there are still a number of measures that organisations could apply to enhance the environmental performances of their buildings:

- Adopt and implement the ISO 14001 Environmental Management System to manage the significant environmental aspect of a building and preferably supported by an ISO 14064 to quantify the carbon footprint;
- Set out minimum energy performance standard based on the Building Energy Codes
- Through building performance evaluation, identifying energy saving opportunities and improvement areas for environmental aspects
- Setting up building performance indicator and monitor the performance on a regular basis
- With reference to or following the proposed actions and strategy of WBCSD Manifesto
  - Below diagram illustrate the management framework for a green building

## Key to Green Building



## Key to Green Building

### Case Study : CLP Green Buildings

In 2007, CLP issued its Climate Vision 2050, which sets out the company's commitment to reduce the carbon intensity of generating portfolio from 0.84 kg CO<sub>2</sub>/kWh in 2007 to 0.2 CO<sub>2</sub>/kWh by 2050. To achieve this goal, CLP has been increasing its investment in both the production and use of cleaner fuels such as renewable energy, natural gas; nuclear power and lower-calorific (You know the proper term) coal.

In Hong Kong, CLP Power published its Energy Vision, a roadmap for clean energy generation, which involves the strengthening of infrastructure integration with South China; adopting a cleaner fuel mix for cleaner air; and, promoting energy efficiency.

Energy savings is one of the most direct methods to help reduce CO<sub>2</sub> emissions. As such CLP supports initiatives that maximise energy efficiency in buildings. Below are key measures and initiatives :

#### Adoption of Building Energy Codes

CLP Group or Power Hong Kong adopted the Building Energy Codes in accordance to local regulations whenever possible within its own buildings. As of end 2010, 29 registration for 11 CLP buildings have already been completed under the Energy Efficiency Registration Scheme.

#### Improving Overall Thermal Transfer Value (OTTV) Standards and Promoting Wider Adoption of Green Roofing

CLP Power has incorporated key design features which can improve the OTTV value in our electricity substation building such as green roof, vertical greening and less window glazing. Green roof/ wall features are being incorporated into new and existing substations

## **Key to Green Building**

### **Expanding Use of District Cooling or Water-cooled Air Conditioning**

Water-cooled chiller is at least 30% more energy-efficient than older air-cooled equivalents. In Hong Kong, CLP has helped our commercial and industrial customers to convert air-cooled chillers to the more efficient water-cooled chiller.

### **Improving energy efficiency in commercial buildings**

CLP Power assists our commercial and industrial customers to conduct energy audit and identify energy saving opportunities. It is estimated about 30GWh of electricity can be saved (equivalent to about 16 kT CO<sub>2</sub>) each year.

The GreenPLUS programme, launched in August 2010 aims to help small-to-medium enterprises and non-governmental organization (NGOs) to implement Energy Efficiency & Conservation measures. Through implementing the recommended improvement, about 5% to 20% of energy can be saved. Internally CLP has introduced an internal “Go Green” campaign to promote a green culture since 2005. Up to now, CLP offices have already reduced about 10% electricity consumption, cut about half dry cell consumption, recycled tonnes of paper, etc.

### **Towards the concept of green building**

In addition, there are many other initiatives, measures and programme implemented in CLP towards the concept of a green building. These include :

#### **Implementation of an ISO 14001 EMS**

- ISO 14001 is implemented in all power stations under CLP’s operational control and key business units
- ISO 14064 is implemented for all buildings and carbon footprint is quantified annually

## Key to Green Building

- Indoor Air Quality : Corporate guideline has been issued to set out Indoor Air Quality standards and requirements. Selected buildings are certified to the government's IAQ scheme
- Solid wastes are re-used, reduced, recycled, replaced through the Go Green Programme or other environmental programmes.

### Committing to the WBCSD Manifesto

CLP also commits to the WBCSD Manifesto. Energy audits are being conducted in the CLP Group's commercial buildings to collect baseline data on energy consumption, identify saving opportunities, set targets and prepare for external reporting. Under this programme, about 50 premises will be measured for baseline and tracked in future years on their electricity consumptions.

With the implementation of all these initiatives and programmes, CLP is making sound progress towards green building.

## Key to Green Building

## Appendix 1

Activities		Env. Aspect	Env. Impact / Benefit	Regulation*	Control & Monitoring
1	<b>Operation and Maintenance of Ventilation and air conditioning</b>	a. Consumption of energy	Fossil fuel consumption leading to emission of air pollutants	NA	Electricity consumption monitoring
		b. Use of refrigerants	Global warming & ozone depleting	Montreal Protocol and Ozone Layer Protection Ordinance	Use of HFC
		c. Handling and disposal of chemical waste	Health hazards, land contamination, etc.	Chemical Waste Regulation	Control procedure and monitoring of disposal quantities
2	<b>Operation and Maintenance of Lift and escalator</b>	a. Consumption of electricity	Similar to Ventilation and air conditioning	NA	Electricity consumption monitoring
		c. Handling and disposal of chemical waste	Health hazards, land contamination, etc.	Chemical Waste Regulation	Control procedure and monitoring of disposal quantities
3	<b>Lighting</b>	a. Consumption of electricity	Fossil fuel consumption leading to emission of air pollutants	NA	Electricity consumption monitoring
		c. Handling and disposal of chemical waste	Health hazards, land contamination, etc.	Chemical Waste Regulation	Control procedure and monitoring of disposal quantities
4	<b>Solid waste management</b>	d. Solid waste Storage and disposal	Waste disposal to landfill	Waste Disposal Ordinance, etc.	Control procedure and monitoring of waste records
		e. Waste segregation, reuse and recycling	Resource conservation and saving landfill space	NA except chemical waste (not applicable to residential)	WEEE, plastics, paper, metals,
		f. Food waste	Waste of natural	Waste Disposal	Control

## Key to Green Building

Activities		Env. Aspect	Env. Impact / Benefit	Regulation*	Control & Monitoring
		collection or composting	resources and end up in landfill site	Ordinance	procedure and monitoring of waste records  Food waste composting
5	<b>Effluent generated from sewage, car washing, cleaning, etc.</b>	g. Wastewater treatment and recycling	Water pollution	Water Pollution Control Ordinance	Discharge limits and control procedure
6	<b>Water conservation</b>	h. Water re-use and harvest	Water saving	NA	Water recycling and reuse
7	<b>Managing a comfort and healthy indoor air quality</b>	i. Indoor air quality performance indicator	Deteriorating indoor air quality	Relevant indoor air quality standard.	Regular monitoring and follow-up action
8	<b>Greening the building environment</b>	j. A more diverse and natural environment	Enhance biodiversity	NA	Environmental Management Programme
9	<b>Operation and maintenance of electrical appliance, Office &amp; IT equipment</b>	a. Consumption of electricity	Similar to Ventilation and air conditioning	NA	Electricity consumption monitoring
		c. Handling and disposal of chemical waste	Health hazards, land contamination, etc.	Chemical Waste Regulation	Control procedure and monitoring of disposal quantities
10	<b>Practising green behaviour</b>	k. Perform in an environmentally responsible manner	Less energy consumption and natural resources depletion	NA	Training; Awareness Programme.
11	<b>Selecting more environmentally friendly appliances</b>	l. Green procurement	Less energy consumption and natural resources depletion	NA	Green procurement guideline and training
12	<b>Operation and maintenance of backup diesel generator</b>	m. Fuel consumption and emissions	Air pollution	Air Pollution Control Ordinance	Fuel consumption; GHG estimation

\* With reference to Hong Kong regulatory requirements

## Key to Green Building

## Appendix 2

Table 5 : Suggested key performance indicators for a green building

	Env. Aspect	Env. Impact / Benefit	Regulation*	Key Performance Indicators
a	Consumption of energy	Fossil fuel consumption leading to emission of air pollutants	NA	Electricity consumption monitoring
b	Use of refrigerants	Global warming & ozone depleting	Montreal Protocol and Ozone Layer Protection Ordinance	Consumption of HFC
c	Handling and disposal of chemical waste	Health hazards, land contamination, etc.	Chemical Waste Regulation	Chemical waste disposal quantities
d	Solid waste Storage and disposal	Waste disposal to landfill	Waste Disposal Ordinance, etc.	Construction waste and other solid waste disposal quantities
e	Waste segregation, reuse and recycling	Resource conservation and saving landfill space	NA except chemical waste (not applicable to residential)	Solid waste reuse/recycle quantities, e.g. WEEE, plastics, paper, metals, Recycling & Reuse to disposal ratio
f	Food waste collection or composting	Waste of natural resources and end up in landfill site	Waste Disposal Ordinance	Food waste disposal or composting records
g	Wastewater treatment and recycling	Water pollution	Water Pollution Control Ordinance	Effluent discharge quantities
h	Water re-use and harvest	Water saving	NA	Water recycling and reuse quantities
i	Indoor air quality performance indicator	Deteriorating indoor air quality	Relevant indoor air quality standard.	Regular monitoring and follow-up action
j	A more diverse and natural environment	Enhance biodiversity	NA	No. of tree planted.
k	Perform in an environmentally responsible manner	Less energy consumption and natural resources depletion	NA	Training hours
l	Green procurement	Less energy consumption and natural resources depletion	NA	% of products with green labels.

# 2014 亞太城市建設實務論壇

## Asia-Pacific Forum on Urban Construction Practice 2014

---

作者	董榮進、劉建陸等
編輯	董榮進、劉建陸、劉昌南、陳鴻正 吳家德、楊文宋、王傳宗、王朝皇 李茂林、張簡秀震、陳建榮、林威宏 吳振纓、詹美華
出版者	2014 亞太城市建設實務論壇
地址	高雄市前鎮區一心一路 241 號 5 樓
電話	07-536-6270
發行地	高雄市
版次	初版
初版	中華民國 103 年 5 月 2 日
I S B N	978-986-90664-0-2
建議售價	NT1,200 元

聲明：論文集所載資料均由作者提供，承辦單位及各區域主辦單位  
不對論文集所載資料之可靠性或著作權等負相關責任，非經  
授權不得複製。

2014

**2014亞太城市建設實務論壇**  
Asia-Pacific Forum on Urban Construction Practice 2014