

# 香港新世纪桥梁建设的发展和前景

邝汉生<sup>1</sup> 刘正光<sup>2</sup>

(1. 香港特别行政区政府工务局原局长 2. 香港特别行政区政府土木工程署署长 暨香港工程师学会会长)

**摘要:** 香港从一个小渔港, 在百余年中, 发展成一个世界之大都会, 发展的过程和基础设施的建设有密切的关系, 而道路及桥梁工程的作用更是十分明显和重要。

本文简介香港一些重要的世界级桥梁工程发展项目及前景。并着重介绍其关键技术、创新点、质量管理、经济和社会效益。

## 1. 前言

香港的经济很大程度上以贸易为基础, 因而十分依靠机场和港口设施。在九十年代初期, 为配合在离岛建造的新机场, 因而兴建新的道路和铁路枢纽以连接市区和位于大屿山离岛的新机场, 而其中最重要的一环, 就是建造三座悬吊体系长大桥。

这三座大型桥梁为青马大桥, 为一主跨1377m之吊桥; 汲水门大桥, 为一主跨430m之斜拉桥, 和汀九大桥, 为三塔式之斜拉桥, 其主跨分别为475m及448m。前二座桥都是采用双层桥身设计, 上层桥面有两条三线行车道, 而下层有两线机场高速火车路轨及两条单线行车紧急/维修通道。而汀九大桥则可容两条四线行车道。这三座桥梁都已完工及在使用中。

为了适应香港及连接珠江三角洲和深圳特区之交通量高速增长的需求, 当局发展更大规模, 更庞大的道路工程计划。连接深圳蛇口与香港后海湾的新跨界通道, 为长达5公里的高架桥, 其中横跨两条航道为斜拉桥形式, 将在2005/2006完工。位于香港西部跨越南北之十号干线, 长达13公里, 其中包括主跨1418米之青龙大桥, 将为世界上第四座最长之吊桥, 计划在2004年开工。而通过一项国际桥梁形式比赛而选出最佳方案之昂船洲大桥, 为双程三线分隔及主跨1018米之斜拉桥, 将在2003年开工, 将为世界上最长之斜拉桥。

由于珠江三角洲及广深珠地区经济的迅速发展, 内地与香港经济贸易关系日益密切, 故有建

议兴建伶仃洋大桥, 连接香港至珠海及澳门。而近年更有兴建港澳珠大桥的建议, 进一步推进广深珠、澳门至内地与香港的经济联系。

## 2. 青马大桥

青马大桥是从香港市区通向新机场高速公路中的主要桥梁, 它是一公路、铁路两用桥梁, 连接青衣岛及马湾岛。大桥主跨为1377m, 为世界上最长之公路铁路两用的吊桥。

大桥之设计可使用期限与目前英国的实践相同, 都定为120年。早在工程开发的前期, 设计者就意识到作为到大屿山唯一通道组成部分的跨海工程的战略重要性。为了保持道路的不间断运行, 必须满足三个基本原则。第一必须在严峻的气候条件下保证通行。因而, 青马大桥和汲水门大桥都采用双层桥面和在下层设有遮棚的车行道的构思。第二, 桥不致受巨轮撞击而损坏。这点由将所有桥墩都置于陆上而获得最有效的保证。第三, 鉴于香港经历的台风具有很高风速, 因而保证结构的空气动力稳定性是很重要的。

由于此大桥为通往新机场唯一通道, 故非常重要, 因而要在各种天气情况下都可以通行, 以维持各地区间之联系。因此采用了双层桥身设计, 在正常情况下, 上层桥面供客、货车使用。在强风时, 即平均风速在40-65Km/h时, 即阵风为60Km/h时, 上层桥面, 本来每方向有三线行车道, 到时近桥边的行车道将封闭, 以防止发生危险, 届时每方向只有二线行车道, 同时高身车的货车, 也不容在上层桥面行驶, 而要引导在下层之紧急行车道行驶。当平均风速增至65-95Km/h,

即阵风为120Km/h时，上层桥面将停止使用，所有车辆要转用下层之二道紧急行车道。而平均风速再增加至90Km/h，即阵风达220Km/h时，桥就要封闭。除了紧急抢救车辆外，所有车辆不容通过。当然此时飞机场也早已关闭了。闭合箱式之桥身在风洞试验时，箱内，即下层桥面的风速约为桥外风速的百分之四十，所以以上之交通管理方法是有实际的试验结果为依据的。

为了避免吊桥受大船撞损，东面的桥墩建在青衣岛岸上，再加上防护堤。而西面的桥墩地基用预制，高16m之钢筋混凝土沉箱，放在水深约10m处经处理的海床上，四周再加保护层及防波堤，形成一个人工岛。这种设计可以令桥墩避免受船撞损，也减少主跨度，缩短施工期和节省建造费用。桥的主跨度由桥下的航海宽道决定。在此处航宽约为1200m，因东面桥墩建在岸上，而两面之桥墩建在海水比较浅的地方，因而最经济的主跨度为1377m，而航海净空则为62m。

在青马大桥址，200年一遇之三秒阵风为83m/s，即高达300Km/h。在结构设计方面，有二个重要问题要解决。首先桥身结构设计一定尽量减少风阻力，和足以抵抗风力，因而要选择最合适之结构横切面。其次桥结构在台风时，能维持动力平衡及不产生颤动和不平衡现象。

过去已证实，在传统的箱形桥身两旁安上如飞机翼之桥身稳定器(Aerodynamic Stabiliser)，可大大减低牵引力。传统的吊桥设计形式可符合50m/s之最大风速要求。在欧洲，改良后的流线式的箱形桥身也证实可提高桥身稳定性达至风速为55m/s之要求。但青马大桥设计风速标准都比它们高，因而一种新的桥身型式才可以符合要求。由建造桁架桥得到之经验，如在桥身中央加上通气隙(Air Gap)。由于便利空气流通，除可增加桥身的稳定性外，也可以增加临界颤动不稳定的风速。因而青马大桥之桥身设计为一流线式的闭合箱形，与近年欧洲所建的吊桥相同，但桥身中央上下都留通风隙，产生通风作用；并在两旁的翼尖加上不锈钢镶面以减少风阻力。风洞试验的结果，确定桥身临界颤动速度

(Critical Flutter Speed)在零度强风吹袭下仍超过设计之95m/s之标准。而在低风速下之所产生之旋卷而激发之涡激震荡(Vortex excited oscillation)亦很小，对公路车辆及载客火车没有影响。同时桥身两旁如飞机翼的桥身稳定器也不需要，因而可以减少所用钢材。是项设计，笔者曾在1981年英国伦敦举行之国际桥梁气体动力学会议提出及介绍，得到各国专家的赞赏。

在工作荷载条件下，混凝土是最佳的建筑材料。近年来，高层楼房建筑采用滑动模板法，可令施工期大为缩短，因而青马大桥的吊塔也利用此种方法，每个吊塔在三个月内完成，两个吊塔共用了46,000m<sup>3</sup>混凝土。

吊塔的二柱都安装升降机。而升降机顶安有座椅及射灯，维修工作人员可安坐椅上，控制升降机上落，方便视察塔内混凝土情况。而吊塔各柱内也安装上浸锌之钢铁楼梯及平台，以便维修及升降机有事故时使用。

用于吊桥上的钢索由传统的空中穿梭方法建造钢索。主钢索用80组（每组有368条钢丝）和11组（每组有360条钢丝）之钢束组成。而每条钢丝之直径为5.38mm。组成后钢索直径为1.1m，钢索总用28,000吨钢丝，其总长为16万米，足可以围绕地球四圈。

桥身外型是符合气体动力稳定性的要求。在结构方面为双向桁架形式，即纵向梁为传统桁架结构而横向梁为空腹桁架结构，其中以上层及下层桥面钢板作为翼缘。两条和桥身同高度的纵向梁相距为26m，与纵向桥面结构组成组合梁。横向梁是个三孔空腹桁架，横系于吊索间。吊索间之纵向相离为18m，因而主横梁之中心距也为18米，但主横梁间有三条次横梁，即次横梁之中心距为4.5m。流线形的桥身两旁都安上不锈钢覆盖板片，用以控制空气流过桥身。在桥身中央加上通气隙(Air Gap)。由于便利空气流通，除可增加桥身的稳定性外，也可以增加临界颤动不稳定的风速。因而桥身外形看来像流线型的箱形梁，而在内看，则为一传统桁架梁。桥身内有三个空腹，中央空腹将容机场高速载客火车，而两旁之空腹各容一行车道，以作紧急及维修时行车之用。

桥身之钢结构共重50,000公吨,构件在英国及日本制造,各占一半。其后构件则运到中国东莞沙田镇,当地有占地六十万平方米之装配厂,进行加工,装配及加上油漆,装配后成36m长,41m宽的完整桥身。每段长36米之桥身重一千公吨,用特别制造的拖船运到工地,航行约十小时。随后用安装在主钢缆上的吊装机械将桥身组件吊到最终位置。一次过把一千公吨桥身构件吊装,并不容易,可说是世界纪录。

由于温度变化及各种施加荷重,会使桥梁端部发生角变位,而会令位于桥端之伸缩装置产生垂直、水平移动及角转动。如果伸缩缝装置设计不佳,会影响车的安全。为了减低角变位的幅度,青马大桥的设计作了相应的安排。

在平面看来,桥身在桥两端,两吊塔处及边跨之柱顶安上水平的约束支承,不但可分担水平应力,又可以减少梁端水平角转动及避免水平移动,使伸缩缝受最小的水平角变位。在立面,桥身在马湾锚碇处安上铰接端,承担所有纵向水平力。桥身纵向为连续梁,因而在所有支柱顶及在两吊塔处都安上滑动支承,不承受纵向水平力,桥身自由向青衣岛锚碇方面伸展,因而青衣岛锚碇承受所有的水平位移( $\pm 700\text{mm}$ ),为了减少桥端之水平角转动,在边跨加上支柱,并加强了桥身之刚度以得符合铁路路轨之设计。因为在铁路伸缩缝处之水平及垂直角转动为 $\pm 0.330^\circ$ ,而最大可容水平角转动力 $\pm 0.10^\circ$ ,这是十分严格的要求,目的是保证火车的安全,及令乘客在火车以时速一百三十五公里经过伸缩缝时不会有不舒服的感觉。

公路桥面的伸缩缝设计是采用传统性的滚轴支座设计。最后改用了瑞士生产的Mageba产品,此为手提风琴式的设计,在外国有很多大型的吊桥都采用多年,比传统的设计减少维修问题。

青马大桥之监管是由路政署内抽调对桥梁工程有特别心得之工程师组成一个特别工作单位名为青衣至大屿山干线工程管理处,此工程管理处主要工作是负责策划及兴建三道大型的桥梁,即青马大桥,汲水门大桥及汀九大桥。

在青马大桥计划期间,路政署内只有吊桥设

计及建造经验的工程师,可以说基本是不存在。因而要请顾问工程师一齐进行大桥设计。路政署派工程师和顾问工程师一齐工作,制定大桥设计标准及规范,其后顾问工程师则作大桥之详细设计和工程合约书,在大桥施工时期,路政署派工程师和顾问工程师事务所之工程师一齐到工地工作,监管大桥之建造。从而路政署的工程师可以从工作中获得兴建吊桥的实际工作经验,因而在其后之汀九大桥工程,路政署已有足够对悬索桥建造经验之工程师,所以可以自己直接监理汀九大桥的建造,不用聘用顾问工程师。

香港传统的土木工程合同是根据英国土木工程学会之蓝本,再加些小修改,以配合香港情况。为了避免工程建筑费用超出预算的机会及确定工程能在预期内完成。大桥的工程合同加上一些特别的条例,也修改了一些条例,可令甲方(即路政署)更有效控制工程成本和进度及激励承建商按施工程序兴建。我特别介绍这些不寻常的条例。

普通合同的工程建造费用是按已完成之工作,量度后发放于营造商。通常是每一个月量度一次。如本月尾完成100立方米土方,就按100立方米之数量乘以合同之每立方米土方的报价而发放。但大桥工程则按合同中固定的施工进度表付款。在合同内,每一工序,如地基、吊塔、桥身、锚碇等都列有一施工进度表。如地基在开工后12个月就应完工。首月会完成工序之5%,次月完12%,第三个月完20%等等。而营造商在投标时,可根据自己计划的工作程序,工作方法及公司所拥有之机械资源,更改或不更改合同甲方所定之施工进度表。但一旦签约后,此施工进度表就成为合法之文件,双方要共同遵守。在开工后,如营造商在第一个月完成5%之地基工程指针,他就可以获得相应之建造费,即地基工序总包价之5%工钱。如他只完成4%,则一文也不发放,因未能达到施工进度表的要求。如他完成了6%之地基工程,则也只能按5%而发款,这样营造商就一定要尽力按进度表工作,以求得到应得的工钱和利润,而甲方也可以有一固定的财政安排及放款进度表。不用临时张罗款项。因甲方也

有可能向财务单位申请拨款，有了放款进度表，财政比较容易控制。

其它特别的条款为工程合同是为固定价格合同 (Fixed price lump sum contract)，即工价不会按物价通胀而调整，因此合同一旦批出，合同价格就固定不变，不会因通胀而调整，即开工时的合同价和完工时的合同价相同。也可以说，承建商在标书上所下的价钱，要包括施工期内之人工及建筑材料的通胀率。承建商当然可以向海外的材料制造及供货商，以长期合约方式订购所需之材料，以减低价格波动的风险。合同也规定施工期也不会因台风或受雨水期之影响而延期。合同也给予营造商引进外地劳工机会，以减低因香港劳工不足而引起的问题。这种固定价格合同，过去在建造香港地下铁路及一些私人发展的大型楼宇建设时，也引用过，效果十分良好，这样的安排，相信可保证工程建造费不会超出预算，并能按施工程序完成。

工程合同也有其它条例，基本上和其它普通工程合同相同。如《承建商工作表现信用状》为合同价的10%。如承建商在建造期内表现恶劣，进度十分差，甲方大可收回工程合同，再公开投标，把余下的工程交别的承建商完成，当然此信用状之款项则由甲方没收。因为青马大桥为通往新机场之唯一通道，如不能如期完成，社会大众所受的影响及损失会很大。所以合同内所列因工程不能如期完工的罚款数目十分巨大。在规定完工日期后才完工的期间内，每一天罚款为一百三十五万港元，如所拖的期限超过30天，每超过一天则罚款三百四十五万港元。而总罚款上限为九亿港元。

青马大桥有很多任务是在高空工作及在地平线下工作，困难度比普通土木工程项目为大，因而对工地安全措施特别重视。工程合同规定每200名工人要有一名合资格的安全主任负责安全措施，而承建商要定期向工人灌输工地安全知识，举行小型安全研讨会及安全训练，驻工地总工程师之下属有一位高级工程师专门负责监察工地安全问题，每月要举行工地安全管理委员会，作工作层次讨论，检讨安全方案之实施情况。如

果每月有良好的安全记录，承建商会给予奖励，但如果连续多月工地的安全记录恶劣，工伤事故特多，则承建商会受到惩罚，严重的则被禁止向其它的政府工程投标。

为了保证青马大桥工程品质有保证，工程管理处指定承建商在其投标书要包括一份完整的“品质计划书”推行全面质量管理和控制方法。此计划是要按国际品质检定标准IS09001之规划而书写，并分三大部分，即工程品质手册，检查及检验计划，和品质程序制度。其内容是针对设计，选购材料及建造期内不同工序及不同情况而制定。计划书列明每一步骤都要由独立人士校核或审查，切实履行品质控制程序及职责。

甲方在1990年尾向全世界著名的财团、营造商等发出邀请书，如果他们有兴趣承建青马大桥，就请将他们的经验、公司财政、资源等有关资料送回，共有11家国际财团表示有兴趣，并呈上有关的资料。经审核后，有五家财团通过投标预审资格。在1991年7月31日，甲方向他们送上投标书及有关文件，邀请他们竞投青马大桥工程合同。可惜其后有一财团合伙人退出，令其投标资格取消，结果只有四家财团投标。截止投标日期是1991年12月16日。有关合同在1992年5月中批出，费用为71亿港元，建筑期为五年，即六十个月，工程已在1997年5月如期完成。美观的青马大桥已成为香港注目标志，与美国三藩市的金门桥互相辉映。

### 3. 汲水门大桥

汲水门大桥和青马大桥都是直接通往机场的高速公路中两座重要桥梁，因而其设计构思和青马大桥相同。桥梁上层桥面设双向3车道的行车道，下层桥面设双轨铁路和2个供紧急需用的单车道的行车道。

汲水门大桥合同是以“设计和施工”为基础而签订的，这是因为在国际上，有各种相仿跨度的斜拉桥设计和施工方法，都可适用于汲水门大桥。投标商也有足够的时间去准备他们自己的设计。根据设计和施工合同，投标商以其与他们的专门技能和手段相称的成本最有效的设计参与竞

争。工程合约内容基本上和青马大桥相同。业主也是按合同中固定的施工进度表付款，合同价钱也是为固定价格合同。双方对这种合同条款都十分满意。

中标的投标商所推荐的结构方案是现在的430m主跨斜拉桥，其主跨为钢/混凝土迭合梁，混凝土边跨和混凝土桥塔。

桥梁另包括4个80m边跨。全长750m，由80+80+430+80+80m数跨组成。主跨中部390m是钢/混凝土迭合结构包括钢空腹框架，倾斜的钢外腹板和混凝土顶板、底板组合的行车桥面。主跨的其余部分和4个边跨均为类似的预应力梯形箱梁。之所以将主跨定为430m是由于要求将桥塔建在岸上以避免船撞。桥面高出水面47m。桥塔基本上是垂直的，高150m，钢筋混凝土结构和用跳模施工。大屿山侧的塔置于岩石上的扩大浅基础而马湾侧的塔则大部份置于4m直径的钻孔桩上。

承包商采用递增顶推法自外向桥塔安装边跨。这便于在航道旁的坚实场地上施工及节省工期。主跨钢/混凝土一则节节地安装。钢单元构件先在深圳，蛇口工业区制造，再运到香港，在大屿山一侧工地拼装成8.7m长重500公吨一节，然后由海上驳船吊装就位。

该方案有三点使人感兴趣：钢/混凝土迭合桥面在斜拉桥上的应用，混凝土上、下翼缘板的“双层组合”的应用和主跨从混凝土截面向钢/混凝土迭合截面的进度。方案更有许多独特的设计特点，最显著之一是混凝土边跨连接一个钢框架和混凝土板迭合的主跨。250mm厚之混凝土顶板和底板成为行车桥面。纵方向上，混凝土板承受锚固在钢边梁上拉索的压力。桥面间的剪力由每侧的加劲钢腹板传递。钢和混凝土的这种组合创造出能利用混凝土边跨固有的重量来锚固中跨的独特设计。在工地上的所有钢连接面都用高拉力摩阻螺栓接合。

斜拉索由介于51至102条15.3mm直径的镀锌钢绞线组成，其总重量为2400公吨，而其总长度为11km。斜拉索的张拉是把索内的钢线，用两公

吨的千斤顶分别地每条逐一张拉。这样不但可以方便工作，节省时间，同时可以降低成本，值得大力推荐。每条钢绞线的防锈保护方法包括镀锌，灌注建筑油脂和PE外套。而拉索则加黑色PE外层。这与法国之诺曼底大桥之拉索设计相似。

大桥的投标预审过程和青马大桥同时进行。有五家财团通过投标预审资格，但最后只有三家财团参加1992年1月的投标，而在1992年6月截止投标时，三家财团共提供四个建造方案。有关合约在1992年12月批出。桥梁于1997年5月与青马大桥同步完成。而汲水门大桥在完工时成为世界最长的公路、铁路两用之斜拉桥。但现在因丹麦之Oresund斜拉桥完工后，已降为世界第二位。

#### 4. 汀九大桥

为了满足香港的交通高增长的需求及连接珠江三角洲和深圳特区之交通量高速度增加，除了连接新机场的道路网外，最重要的就是3号干线工程，此干线北连深圳皇岗/香港落马洲交接处，沿新界西北部向南下通过新界、九龙、及新的西区海底隧道连接香港本岛。汀九桥是3号干线中之最重要一环，桥在北连干线之郊野公园隧道，横跨蓝巴勒海峡，南接青衣岛及北大屿山干线，可为新界西北部提供前往赤立角新机场、九龙及香港岛的便捷通道。汀九大桥是一道三塔四跨式大型斜拉桥，跨度为127+448+475+127m，为同类别之世界级大桥。

设计构思的桥面的宽道要求是双向三车道，但要预留空间，到交通量增加时，可扩建为双向四车道路面。

在1993年10月，香港及国际上的报章都登载邀请承包商参加投标的资格预审广告，而在同年12月，在11家报名的国际承包商中，选择了7家合资格公司参加1994年1月投标。汀九大桥之招标书要求承包商聘用自己的顾问工程师，根据路政署之设计范围，提出自己的设计方案及工程造价。标书在1994年5月截标，当局共收到七份投标书，也即是说收到七份桥梁设计方案，全部都是斜拉桥形式。在对七份投标书的法律、商业及技术内容作多重深入评估，当局在1994年9月

把工程合同批与出价最低的投标书已价值17亿港元。大桥在1998年中开放使用。

汀九大桥及高架引道全长1875m，而汀九大桥为三塔四跨式斜拉桥，技术创新，外形美观，并节省建筑材料，为十分有创意的设计。

桥身横向布置特别，采用独柱塔，桥身分成两桥身，分别位于独柱塔的两侧，这安排令桥身外观更为纤巧，且能于强风吹袭期间有更佳的防风表现。而由塔顶垂下4个斜索面，连接两桥身两旁之锚固。

公众人士对细的塔身可能担忧，但这恰恰是设计者津津乐道的巧妙之处。3座桥塔均为长方形，横向端为半圆形，此独特形状，可减低强风及台风荷重。多数斜拉桥为双柱桥塔，只有纵向拉索。而单柱桥塔的汀九桥除纵向拉索外，在塔身处还标新立异地使用了横向拉索。桥面下的塔身上插上2支横向空心钢梁，伸至桥面以外，横向拉索分别自塔侧拉至横向空心钢梁外端，再转至塔身上的转换层处，整个桥塔恰似欧洲古代帆船的桅杆，成一美丽图案。

斜拉桥塔顶拉索锚固设计甚为重要。因为汀九桥是用单柱塔，而有个桥面，平行分列在桥塔侧，所以形成四个拉索面，因而令拉索在塔锚固处十分拥塞。设计者利用特别制造的巨型钢制塔头锚箱来传送拉力，主塔顶的边均装上此钢锚箱。每件高31米，重达190吨。全部拉索的张拉端锚具均位于塔头钢锚箱内，而利用高拉力杆连接往桥塔。在桥塔旁设置钢锚箱，以避免加大桥塔顶及预留孔道和浇筑锚以作塔顶拉索锚固，可节省桥塔的施工费用和时间，从而降低全桥的造价。这是十分有创意的设计。

主塔之纵向刚度，因单柱之故，不能加强。设计巧妙地引用纵向稳定索，由主塔顶分别连接边塔桥面处，用以增加桥主塔的纵向刚度，其水平倾角为20.6度，尚在斜拉索的常规倾角范围。长达465米，是当今世界最长的拉索。

桥身为结合梁，桥面之纵向梁为1.5m高L形钢主梁，而横向工形钢梁之距离为4.5m，从而形成一个坚固的网格。桥面安放4.4m×4.6m厚度为

230mm之预制桥面板，用现浇混凝土连接，再加上100mm之沥青行车面层。

汀九大桥的投标方法也引用“设计及施工”方法(Design and Build)，即由招标者按业主设计规范而提出自己的设计和工程造价是有相当大的好处。

首先业主不用花长时间和金钱来做详细设计方案，工程合约招标及建造时间可大大减少，汀九大桥由初步设计，投标资格预审，到招标及批出合约，前后只用一年多的时间，比传统的方法省了近一半时间。

每个承包商都有自己的专长，如有些长于混凝土形式建造方法，有些对钢结构有特别心得。因而在设计时，他们会把自己的专长和优点溶入其方案，以求获得最佳回报的设计。在汀九大桥收回之招标书，不同的承包商有不同的方案，全部都是可被接纳的，而大部份的报价都比业主之估计造价低。而被接纳的方案不但报价低，而且桥梁外型新颖，简单而美观。只有通过这种特别的“设计及施工”，投标方法，才可以获得。

## 5. 监测系统

青马大桥，汲水门大桥及汀九大桥，都是香港主要道路网中最重要的一环。其总投资近110亿港元。为了保护此巨大的资产，保证大桥使用者的舒适及大桥的安全，路政署制定了一套全世界最先进、最高科技的监察系统去控制及监察大桥的完整性、耐久性及可靠性。此套系统名为“风及结构监测系统”(Wind and Structural Health Monitoring System)。透过超过一千个安装在桥梁不同位置各类传感器，此系统可以监测三组不同的参数，即(1)环境及外施荷载参数，如风、地震、温度及交通等，(2)结构运作参数，如位移、应变、应力及动态特性，(3)由检查或测试而确定的结构的受力变化情况，从而了解桥梁的结构健康变化。而系统之功能则为(甲)提供补助资料用以确定及解决在使用期时所产生的操作及维修问题，(乙)帮助大桥管理当局作现场重大决定，如局部封闭大桥以方便维修，或应付台风袭击，及(丙)监测现在及推断将来荷载之可靠性及安全

性,作为长远结构评估,营运和维修参考,进一步可改进吊桥及斜拉桥的设计规范及设计理论。过去多年,收集了很多非常宝贵的数据,引起世界桥梁专家的注意和兴趣,他们都纷纷来信及参观,希望能有机会分享或参与进一步研究工作,把桥梁设计向前推进。

## 6. 青龙大桥

1995年完成《香港发展策略研究》,预测香港人口在2011年将达750-810万,而西北部人口将会大幅增长,导致该发展区与市区的交通需求大增,将要兴建“西部公路”连接香港岛,经新界西部直达深圳蛇口,而要在大屿山东北部兴建一座跨海大桥,定名为「青龙大桥」。

青龙大桥面为双向三线分隔行车道,各宽11m,并有1m宽的路肩。由于大桥比较接近香港国际机场,青龙大桥的桥塔高度受限制,北面桥塔净空为175m而南面则为184m。为了维持海峡的航道畅通,桥下净空为62.1m,开采取一跨航海峡的构思,主跨定为1418m。

在初步设计桥面结构时,把青马大桥桥身改良,定为箱形钢梁,宽38m,深5m,并在桥身中央设有3.5m宽的通气口,提供桥身在空气动力所需要的稳定性,这桥身模型通过严格的风洞测试,证实是可行的。

但在进行详细设计时,顾问工程师提出新方案,采用一种崭新的主梁,暂定为第三代主梁(G3主梁),较初步设计的主梁有更佳的抗风表现。新主梁的横切面设计源自意大利,主跨3300米之Messina Crossing的主梁设计,这断面设计在欧洲经过长时间的测试,证明有非常优良的抗风表现。在高风速下,主梁的个箱形钢桥身保持上下振动,并不依靠传统土梁的扭力系统来抵抗强风。

这种新颖桥身有以下显着的优点:

- 由于横切面比较流线形,使空气阻力减至最低。

- 桥面只有2.3米深,用钢材量小而轻,大大减低建造成本,包括减轻主钢缆、悬垂缆索、桥塔、锚碇及地基的物料。

- 较薄的桥身,可以采用多种不同的建造方法,可以在工厂内以半自动化机械预制,有较佳的品质控制和保证。

- 建筑成本比较低,可在较短的时间完成工程。

青龙大桥的设计,以传统的桥梁设计为基础,汲取经验,引进其它先进理论,配合详尽而科学性的实验测试,开拓新的吊桥主梁概念。可以推论,从青龙大桥开始,G3主梁将会被广泛注意及采用。将来配合不同理论的引证和争论,预料在很短的未来,G3主梁将成为新一代悬索大桥的焦点。

大桥的详细设计已接近完成,大桥工程预算将在2004年开工,建筑期定为五年。

## 7. 昂船洲大桥

香港九号干线是一条连接大屿山与沙田(即东西横过香港)的主干道路,包括现有的北大屿山公路,青马大桥及汲水门大桥,以及计划中的青衣至长沙湾段利长沙湾至沙田段。昂船洲大桥是九号干线青衣至长沙湾段的主要部份,大桥是整项工程中最突出的部份。大桥将跨过900m宽通往繁忙的葵涌货柜码头的蓝巴勒海峡。

昂船洲大桥位处于香港港口一个显着的位,从维多利亚海港,西九龙市区及港岛的山顶均可望到大桥。因此大桥的外型设计值得特别的考虑。而且大桥如以斜拉桥的形式兴建,建成后将极大可能成为当时世界最大跨度的斜拉桥,亦会成为香港这个大都会的一个主要标志。为此香港特别行政区路政署首次举办一项国际性桥梁设计比赛,以吸引全球知名的桥梁专家提供优雅出色的设计概念。比赛的主要目的是选出一个桥梁方案,让昂船洲大桥成为与众不同的世界级长跨度大桥,并为海港树立一个适合的地志和货柜码头的门户,以突出和提升香港作为生气蓬勃、举足轻重的国际贸易中心之形象。举办这一项国际性桥梁设计比赛亦同时可达到其它得益:香港作为一个国际大都会的地位得以提升;设计比赛吸引公众对大桥的兴趣;设计比赛提供一个机会给来自世界各地的桥梁设计师和专家聚集于香港交

流经验。

路政署于1999年11月召开记者招待会,介绍这座在未来拟建的大跨度桥梁。在同一日,设计比赛的网站亦开始运作,显示有关设计比赛的资料供浏览。亦透过工程杂志和通知世界各地的工程学会及各国驻港商务办事处广为宣传。

在1999年12月截止时,共收到31支来自世界各地的设计队伍对设计比赛表示有兴趣。这31支队伍总共由103家独立公司或设计师组成。以设计队伍和各单位桥梁设计纪录及各队伍内准备参赛的桥梁工程师和建筑师的经验作比较,首先预审了16支设计队伍,在2000年1月邀请他们参加第一阶段的设计比赛。这16支队伍总共由64家独立公司或设计师组成,队伍的领导机构分别来自中国内地、芬兰、法国、德国、香港特别行政区、日本、挪威、英国及美国。差不多所有国际上具长大桥梁经验的设计单位都包括在内,相比之下,察觉到我国多年来累积斜拉桥的经验,已达到世界一流水平。

整项设计比赛分两阶段进行。邀请全球知名的桥梁专家和建筑师组成一个技术评审委员会和一个美观评审委员会。两个委员会分别对第一阶段和第二阶段的作品评审和评分。在第一阶段,两个委员会所给予每项作品的得分以预先定下的比重加在一起,以选出得分最高的作品进入第二阶段的比赛。在技术方面,对桥梁的结构表现,可建性,耐用性,工程造价和所需工期,五方面的表现评分。在美观方面,对桥梁本身的外形与及它和周围环境的配合,两方面的表现评分。在第二阶段,两个委员会亦对各作品评分和作出评语,但最终并非以分数及一个比重决定赛果,而是由一个以路政署署长为主席的行政人员小组以投票方式选出冠、亚、季军的作品。在选择过程中,行政人员小组充分考虑两个委员会的评审报告。为了公平起见,设计比赛是以匿名的方式进行。每个方案均以不同的六位数字作为代号。在比赛进行时,只有赛事经理一人知道参赛方案的设计者的身份,而赛事经理不参与任何评分和投票。

第一阶段比赛的作品在2000年2月收到。有11支设计队伍提交2个方案,有5支队伍只提交1个方案,总共收到27个不同的设计方案。其中有22个为斜拉桥,2个为悬索桥,3个为斜拉和悬索的协作体系。各方案在概念和侧重点方面都有很大的分别。一部份方案只侧重概念之突出而对施工可行性方面忽略。在表达之能力和吸引力方面,也有很大差别。但整体而言,各方案提供了很多新构思,新技术和新材料,对昂船洲大桥的设计给予不少极具创意和启发性的建议。

两估评审委员会分别于2000年3月和4月在香港开会,他们根据预定的评分准则进行评分,有5个优秀的方案获选进入第二阶段的比赛。它们都采用斜拉桥的建造形式。

5个获选进入第二阶段比赛的方案是来自5支不同的设计队伍。5支设计队伍均同意参加第二阶段的设计比赛。每支设计队员,获资助港币一百万元,作为准备更详细设计及提交模型的部分费用。路政署更和参赛者签订合同,以保证知识产权转移方面的问题,得到法律上的保障。这一阶段比赛的作品在2000年7月收到。除了更详细的报告,第二阶段的作品更包括中型和小型模型各一。小型模型可以放入一个预先制造的背景模型,以方便比较各方案对附近环境的影响。

在这阶段技术评审委员会和美观评审委员会同时于2000年8月中在香港开会。行政人员小组在2000年9月初选出优胜的作品。冠、亚、季军的作品各自获得额外一百万、三十万和二十万奖金。冠军方案是一座像烟囱状单柱桥塔的斜拉桥,高295m,上部份112.5m是钢结构,而下半部为混凝土结构。主跨1018m,两边跨为298m。拉索以半扇型的形式分布,加劲梁在边跨和近桥塔24m的主跨是双箱混凝土梁,主跨其它部分是双箱钢梁,外形与青龙大桥相似。大桥外形美观,和相邻环境配合,桥塔施工容易,方案在设计和施工上均为较新颖。

按冠军作品而展开的详细设计已经完成,2002年底将进行投标资格预审,大桥工程可在2003年展开,建造期约为5年。

(下期待续)