

文章编号:1001-7372(2016)12-0001-09

# 港珠澳大桥钢结构桥梁建设综述

苏权科, 谢红兵

(港珠澳大桥管理局, 广东 珠海 519015)

**摘要:** 为了给超长跨海钢结构桥梁的建设提供参考, 综述了港珠澳大桥的建设实践。介绍了大桥的建设制约条件、建设目标及理念, 以及大桥的景观设计, 说明了超长钢桥选型的主要考虑因素: 抗震性能、耐久性、施工性、结构维护和环保。关于钢箱梁设计, 重点介绍了单体大悬臂钢箱梁正交异性板的疲劳设计要点、参数优化结果、疲劳细节构造及足尺模型疲劳试验情况, 并对使用调谐质量阻尼器应对主梁涡激振动的情况进行了介绍。关于施工质量管理, 在全过程品质保证/品质控制(QA/QC)技术要求、质量控制和验收标准的基础上, 对多项专项产品技术管理进行了介绍, 数个首次使用的标准(如不锈钢钢筋、桥梁检查车等)可为中国行业标准的建立和完善提供参考。介绍了钢结构制造过程中有关加工、制作、焊接和检测的新技术与新工艺, 这些要求可提高生产效率、改善工人工作环境、消除人为误差、提高制造精度并保证钢结构品质的稳定性。关于海上吊装, 重点介绍了3座斜拉桥的钢塔吊装技术。关于防护涂层及维护, 重点介绍了挥发性有机化合物(VOC)含量限值等环保性能指标及钢箱梁箱内、箱外检修车系统特点。综述分析表明: 港珠澳大桥“四化”要求促进了钢结构各施工环节的工艺创新, 机械化、自动化、信息化技术的应用, 提升了中国桥梁钢结构加工企业的总体制作能力和管理水平; 海上装配化施工, 促进了海上大型设备的开发应用和吊装工法的创新, 成功经验为海上工程的设计与施工开辟了新的途径; 钢桥面铺装方案效果有待实践的检验。

**关键词:** 桥梁工程; 港珠澳大桥; 综述; 钢箱梁; 正交异性板; 钢桥面铺装; 质量保证

**中图分类号:** U448.36 **文献标志码:** A

## Summary of Steel Bridge Construction of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

SU Quan-ke, XIE Hong-bing

(Hongkong Zhuhai Macao Bridge Authority, Zhuhai 519015, Guangdong, China)

**Abstract:** To provide references to construction of a long sea-crossing steel bridge, the construction project of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge (HZMB) were summarized. The project construction constraints, project goal & concept, and bridge landscape design were introduced, which showed the main consideration factors for long steel bridge type selection including seismic performance, durability, constructability, structure operation & maintenance and environment protection. For the design issues, emphasis has given to key points of fatigue design, optimized parameters results, fatigue structure detail and the full-size fatigue model test of the orthotropic steel panel of single-cell cantilevered box girder, and the respond condition of tuned mass damper to vortex

收稿日期: 2016-08-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAG07B01)

作者简介: 苏权科(1962-), 男, 陕西岐山人, 教授级高级工程师, 工学硕士, E-mail: sqk@hzmba.com。

通讯作者: 谢红兵(1967-), 男, 浙江建德人, 教授级高级工程师, E-mail: xhb@hzmba.com。



港珠澳大桥主要建设制约条件包括:①外海环境水文气象条件复杂,施工受波浪涌、潮汐、台风、高温高湿等因素影响,有效作业时间短;②珠江口海域行洪、纳潮、防淤要求严格,整体工程阻水率要求小于 10%;③海上航线密集,客、货船舶种类多,日最大通航船舶超过 4 000 艘,施工期航运管控风险大;④九州航道桥受澳门机场航空限高制约,其主塔施工要求工艺创新;⑤作为中国最宜居的城市之一及中华白海豚保护区,海洋生态和环保要求极高;⑥重大项目地震设防标准高;⑦结构完整性状态 2 400 年重现期地表加速度为  $0.24g$ ;⑧抗风设计标准高,120 年重现期设计基准风速  $47.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,为当前中国桥梁要求的最大基准风速;⑨跨越油气管线,施工风险大;⑩中国首次提出设计使用寿命 120 年耐久性要求,外海长桥维养难度大;⑪港、珠、澳三地不同体制,工程建设管理模式和理念差异,技术标准总体要求就高不就低。

## 1.2 建设目标及理念

港珠澳大桥管理局由香港特别行政区政府、广东省人民政府和澳门特别行政区政府联合组建,承担港珠澳大桥主体工程的建设、运营、维护和管理职责。综合考虑三地文化、环境、交通和经济的可持续发展及本工程的特殊意义,项目伊始,经三方政府同意,管理局确定了本工程“建设一流跨海通道,为用户提供优质服务,成为地标性建筑”的总体建设目标。项目的建设理念主要包括:

(1)全寿命周期规划,需求引导设计:项目规划既考虑建设期需求,更充分考虑运营管理、维护保养需求,保障工程在 120 年全寿命周期内结构功能满足使用要求且成本最低。

(2)“四化”要求:广泛推行工厂化大生产、机械化装配的建设思路,化水上施工为陆域加工制造,变工地为工厂,变构件为产品,保证大桥建设质量和耐久性<sup>[1]</sup>。

(3)开放、整合,自主创新:充分利用港澳地区国际化平台,整合全球优势资源为本工程服务。

(4)绿色、环保,可持续发展。

## 2 桥梁景观设计

港珠澳大桥的结构设计与景观设计密不可分。管理局认为:成为地标性建筑不仅体现在桥梁景观设计的视觉效果及其人文、历史内涵与美好寓意,还包括大桥建设者们的集体智慧、实践能力与创新精神在桥梁建设同行和社会大众心灵中产生的震撼力

及认同感。项目前期,管理局组织了初步设计和施工图设计景观设计竞赛,经专家评审和三地政府认可,最终形成了港珠澳跨海长桥岛、桥、隧错落有致、珠联璧合的景观理念和效果。

港珠澳大桥主体工程非通航孔桥长约 20 km,包含长约 15 km 的 110 m 跨钢箱连续梁和长约 5 km 的 85 m 跨钢箱组合连续梁,梁高约 4.5 m,采用等高梁、独柱墩设计,承台埋入海床<sup>[2-3]</sup>,桥梁建筑效果大气、简洁、一气呵成、极具工业化和现代化观感。上述全钢桥型不仅结构选型独特,环保印记深刻,更形成了港珠澳大桥非通航孔桥独特的视觉效果。

3 座斜拉桥更是颇具地标特色。九州航道桥为主跨 268 m 双塔斜拉桥<sup>[4]</sup>,钢混双塔形如双帆,景观造型表达一种乘风破浪,扬帆远行的意境[图 2(a)]。江海直达船航道桥为主跨 258 m 三塔斜拉桥,3 座钢主塔形如凌空腾跃、结伴嬉戏的中华白海豚,体现对海洋生态的保护意识[图 2(b)]。青州航道桥为主跨 458 m 双塔斜拉桥,H 型混凝土框架桥塔横梁采用具有传统民族文化元素的钢制“中国结”造型,寓意团圆回归、三地同心[图 2(c)]。图 2(d)~(f)为港珠澳大桥施工场景。

## 3 钢结构选型

港珠澳大桥采用钢结构作为主选桥型的考虑不仅包括项目的建设制约条件、全寿命周期成本理念、耐久性等因素,也与改革开放以来中国钢结构行业的快速发展和中国日益重视的环保理念密不可分。一些主要考虑因素包括:

(1)抗震性能。因阻水率限制,非通航孔桥梁承台均埋入海床。为解决水下墩台结合敏感区域可维可达的难题,需保证大震作用下墩台仍处于弹性状态。正交异性板钢箱形梁自重轻,结合减隔震技术的应用,可满足上述性能要求并大幅降低下部结构的受力和造价。

(2)耐久性。钢结构桥梁是目前有 120 年以上正常使用记录的结构,随着涂装技术的不断发展,钢结构实际寿命上限亦可提高。

(3)施工性。如前所述,钢箱梁和组合梁方案均可实现大跨吊装,符合“四化”建设理念,可缓解诸多建设制约条件的影响。

(4)结构维护。除开桥面板疲劳问题,钢箱梁的维护可简化为对涂装体系和桥面铺装体系 2 种“保护层”的维护和维修。维护策略上可减少海中上部结构的大修风险。



图 2 3 座斜拉桥景观与施工场景

Fig. 2 Landscapes of Three Cable-stayed Bridges and Construction Scenes

(5) 环保。钢结构材料可循环利用,即使寿命终期后拆除也不会给环境留下垃圾,是可持续发展的绿色环保型材料。大规模采用钢结构不仅有利于国家战略性资源储备,也符合中国对目前钢结构行业的政策导向。

业主充分认识到钢结构抉择中隐含的技术、管理风险与挑战,通过一系列专题研究,有针对性地解决设计、施工及维养中可预见的难题并形成项目专项技术标准<sup>[5]</sup>。钢结构相关专题包括钢箱连续梁合理构造系统和设计标准专题研究、疲劳控制与试验研究、制造及安装关键技术研究、抗风性能试验研究、抗震设计和性能优化研究、钢箱梁防腐及维护关键技术研究、自动化制造工艺研究、正交异性板 U 肋相控阵无损检测技术研究等。

## 4 钢箱梁设计

深水区非通航孔桥采用大悬臂单箱双室钢箱梁(图 3)、整幅钢箱梁刚度大、整体受力性能好、外露

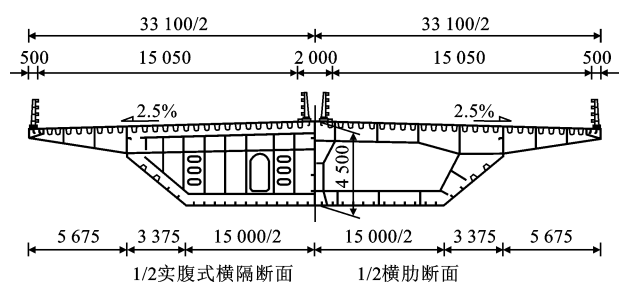


图 3 钢箱梁标准横断面(单位:mm)

Fig. 3 Standard Section of Steel Box Girder (Unit: mm)

面积小、支座数量少、涂装和维护工作量小。设计阶段亦曾对全封闭钢箱梁进行了比选,全封闭箱虽然外形简洁流畅,外露面积更小使得后期养护涂装工作量相对更小,但因宽体箱用钢量相对增加,风动力稳定风险并未减少,建设费用较高而未被采纳。

疲劳开裂是正交异性板最大的风险。项目在对欧美、日本和中国相关钢桥疲劳开裂病害和规范研究的基础上,结合仿真分析和足尺模型疲劳试验研究(图 4),进行了参数优化,确定了有利于钢桥面板

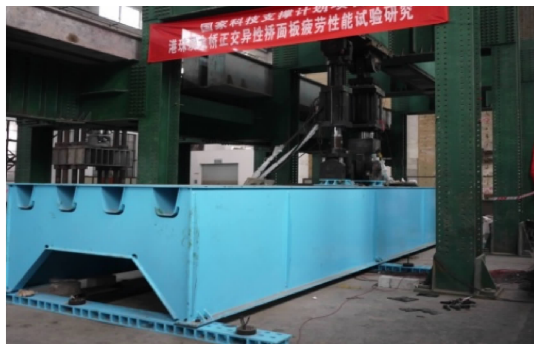


图 4 正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验

Fig. 4 Fatigue Test on Full Scale Model of Orthotropic Steel Bridge Deck

抗疲劳耐久性的细节构造;同时对主要结构连接的焊缝设计、焊缝坡口形式、焊接方法及焊缝内在质量控制和检验方法提出了明确要求<sup>[6]</sup>。U 肋板厚采用 8 mm,与顶板角焊缝的熔透率要求大于 80%。图 5 为采用的横隔板和横肋上 U 肋穿过部位的开槽形状<sup>[7]</sup>。

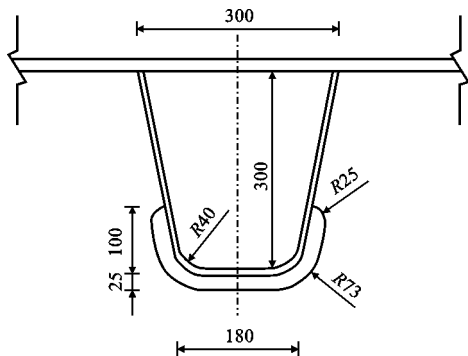


图 5 U 肋穿过部位的开槽形状(单位:mm)

Fig. 5 Recess Shape of Position Crossed by U-rib (Unit: mm)

钢箱梁顶板最小厚度 18 mm;U 肋中到中间距 600 mm,上口宽 300 mm,下口宽 180 mm,高度 300 mm,U 肋高度和下口宽度较通常有一定增加;箱梁实腹式横隔板间距 10 m,其间设有 3 道横肋板。强化后的桥面体系可减小轮载作用下的桥面板挠曲变形量,改善局部传力路径与应力分布,有助于解决或缓解桥面板焊缝疲劳及钢桥面铺装问题。顶板 U 肋一般采用栓接方式连接。

钢箱梁疲劳设计的另一个重要区域是悬臂板与钢箱梁外腹板的焊接部位,该处直接承受重车作用,除细节构造优化外,重点对该部位的疲劳性能进行了理论分析和疲劳验算。悬臂钢桥在日本应用较多,疲劳验算方法参考了日本《钢构造物疲劳设计指南(修订版)》,作用荷载采用《公路工程技术标准》

(JTG B01—2003)中的车轮荷载提高 25%后的数值。

大悬臂整幅宽体箱形截面新颖、独特,但气动外形较钝,风洞试验研究发现:主梁在低风速  $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $27 \sim 32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  附近会出现竖向涡激振动,振幅最大值超过《公路桥梁抗风设计规范》规定的成桥振幅容许值,需采取适当措施抑制其响应,以避免产生桥梁构件疲劳、影响行车安全及使用舒适性问题。经过专题研究分析并借鉴国内外同类桥梁的经验,悬臂钢箱梁采用了调谐质量阻尼器(TMD)制振方案<sup>[8]</sup>(图 6)。



图 6 钢箱梁调谐质量阻尼器

Fig. 6 Tuned Mass Damper for Steel Box Girder

## 5 施工质量保证

港珠澳大桥主体桥梁工程建设是一个世界级的系统工程,建设周期长、施工受气候、海上交通、环境条件制约,技术难度大、专业要求高、涉及面广、各标段施工配合要求高,不可预见或不确定因素多,容易出现施工质量控制的盲区或灰色地带。

作为对项目世界级跨海通道建设目标在施工规范和要求的一个直接反映,在编制招标技术要求和质量及验收标准等施工指导性技术文件过程中,广泛收集和参考了国际上类似工程经验,根据本项目特点制定了各施工环节品质控制/品质保证(QA/QC)技术要求、质量控制和验收标准,并引入诸如板单元自动化生产、大节段车间化拼装和 U 肋超声相控阵检测等国际先进技术。质量管理中特别重视承包人主要施工技术文件的编制和审查,除监理方、设计方审核外,亦使咨询和质量管理顾问更多介入到相关文件的审核和施工现场管理中,定期对各单位质量体系的运行进行巡查评估,以减少系统性质量风险。

特别系统地编制了专项产品招标技术要求,以加强对诸如钢结构防腐涂料、桥梁检修车、除湿系统、伸缩缝、斜拉索、减隔震支座、不锈钢筋、调谐质

量阻尼器和黏滞性阻尼装置等特殊材料和专项产品的技术监管。要求专业供应商中标后集中提供设计方案、图纸、计算单、材料和产品试验检验、重要QA/QC 项点,并综合考虑设备的安装、运营维护和更换要求的完整技术文件。上述材料物资的质量对保证桥梁结构安全、正常运营和耐久性至关重要。其中数个首次使用的标准,如不锈钢钢筋、桥梁检查车、高阻尼橡胶减隔震支座和防腐涂料中对挥发性有机化合物(VOC)含量的限制将会为中国相关行业标准的建立和完善提供有益参考。

## 6 钢结构制作

港珠澳大桥所用钢结构总量巨大,其中钢箱梁制造(含对应索塔钢结构制造)共分为2个标段,分别约18万t和16万t,合同工期3年。作为对比,近期建成的美国加州旧金山新海湾大桥钢结构总量4万余t,制造时间约4年;香港昂船洲大桥用钢量3万余t,制造时间约3年。港珠澳大桥钢结构制作3年的工作量相当于这些国际上类似钢结构制造项目16~18年的工作量。如何按时保质保量完成钢结构制造并达到建设目标要求的世界级质量水平,是港珠澳大桥面临的一项巨大挑战。

传统的钢桥面板加工组装及焊接多采用半自动化和人工操作,质量控制风险大,工效低。为满足“四化”的总体建设理念,同时保证其长寿命、高品质要求,对于钢结构制造中最基本的板单元生产,特别是正交异性钢桥面板采用自动化、信息化生产势在必行。港珠澳大桥总共约40万t的板单元制造数量巨大,同类构件数量多,设计标准化程度高,亦非常适合进行自动化生产。

中国钢结构制造行业近年积极通过新工艺研发、新设备配套以及制造全过程的细节管理以提升产能和品质。新设备包括U肋加工流水线、U肋自动装配机、U肋多头龙门焊接系统和机器人焊接系统等国际一流智能化生产设备。材料加工、焊接自动化、先进质量检测技术和制作新工艺主要包括:数控切割机自动划线、板单元下料;宽幅板单元工艺、大板块工艺、无损制造工艺;U肋边缘和坡口机械化、自动化加工成型技术;U肋焊接大型自动化焊机机器人流水线作业系统(图7);立对接焊缝和爬坡焊缝全自动小型焊接机器人应用;焊接数据信息化管理;反变形无码装配焊接,无损伤吊装、翻身技术,减少码板对母材的损伤;U肋角焊缝相控阵超声波检测技术等。



图7 U肋机器人自动焊接系统

Fig. 7 Robot Auto-welding System for U-Rib

招标技术规范同时要求港珠澳大桥钢结构组拼和涂装需车间化,所有这些理念旨在提高生产效率、最大限度改善工人工作环境、消除人为误差、提高制造精度以保证钢结构品质的稳定性。目前,项目板单元制造已全部完成,超声相控阵检测结果表明:各标段正交异性板U肋与顶板的角焊缝熔深合格率均达到99.9%以上。

## 7 海上安装

港珠澳大桥采用标准化工厂流水线生产和大节段拼装,将大量现场施工转化为工厂制造,大幅减少现场作业时间并缩短工期;但同时,大型结构构件现场安装也增加了施工难度和挑战性,要求装备更现代化的大型吊装设备、大型陆上和海上转运设施,进行更精细化的施工计划和操作管理以及采取风险控制和安全防护措施。

钢箱梁采用逐跨浮吊架设、逐跨调位与现场焊接模式,接头位于钢梁反弯点附近,多数吊装质量(不含吊具)从1600t到2900t不等,采用大吨位浮吊(4000,3200,2200t)吊装或抬吊。桥梁工程最大钢梁吊装质量约3500t(不含吊具),跨越油气管线是本项目大节段吊装的最大的安全风险点(图8)。



图8 跨越油气管线双浮吊抬吊

Fig. 8 Girder Erection Over Oil Pipe Line with Two Floating Cranes

安装精度采用工厂车间试拼及现场调配的方式,通过全过程施工监控对不同阶段施工制造误差实行控制和调整,避免安装时的误差积累。如前所述,全桥采用减隔震支座体系,而减隔震支座是否能方便实现在安装现场的预偏量调整对保证结构抗震安全非常重要。

受澳门机场航空限高制约,九州航道桥主塔上塔柱安装采用创新的整体提升竖转方案,其施工分为两步,首先利用大型浮吊将约 70 m 长、质量 1 000 t 的上塔柱整体吊装至桥面滑道上;然后利用塔身两侧搭建的临时提升吊架通过提升、滑移,完成整体竖转(图 9)。



图 9 九州航道桥钢塔竖转

Fig. 9 Rotation Erection of Jiuzhou Channel Bridge Steel Tower

#### Bridge Steel Tower

江海直达船航道桥主塔含吊具总质量约 3 100 t,长 105 m,采用海上浮吊抬吊转体就位安装<sup>[9]</sup>(图 10)。类似体量的大型钢塔吊装在国内外尚无成熟经验可以借鉴,是项目吊装的最大重、难点。施工借助于完善的施土组织设计及全面的操作演练模拟,以制定更加详细的操作规程、调控与监控计划,实施细节及风险控制措施。



图 10 成功抬吊竖转安装的首个江海桥钢塔

Fig. 10 Successfully Lifting Rotation Erection of First Jianghai Bridge Steel Tower

青州航道桥塔柱“中国结”钢横撑高约 50 m,质量约 450 t,分 5 个节段利用塔顶吊机逐段拼装(图 11),结形撑 4 个端头与混凝土塔柱中的预埋件在高



图 11 塔顶吊机吊装结形撑

Fig. 11 Erection of Cross Bracing by Tower-top Crane

空进行焊接连接,其余节段接头采用螺栓连接。结形撑钢结构与混凝土塔柱要求精确匹配,难度极大,高空组装在中国亦属首例。

港珠澳大桥附近水域航路纵横交错、船舶流量大、交通复杂,大桥建设使得桥区附近工程船舶大量增多,通航风险愈加增大。桥梁大型构件运输、临时航道转换等特殊作业使得交通组织和管制、现场警戒与护航等安全保障工作变得更加重要。港珠澳大桥与交通运输部海事局合作,为本项目构建了完善的海事安全管理体系,该体系的成功实施实现了对上述大型吊装作业的保驾护航。

## 8 防护涂层及维护

港珠澳大桥钢结构涂装面积约 580 万  $\text{m}^2$ ,涂料用量约 390 万 L。钢结构涂装体系对于钢结构防锈防腐,确保其承载能力、使用功能和耐久性至关重要。基于大量涂装施工的质量可控性、现场维护及再涂装便利性、涂层长效性和全寿命周期成本考虑,采用与 C5-M 海洋环境配套的环氧富锌底漆+环氧云铁中间漆+氟碳面漆重防腐复合涂层体系作为钢结构外表面涂装,总膜厚 380  $\mu\text{m}$ 。钢箱梁内部采用较低膜厚涂层和除湿系统,保证钢箱梁内部空气相对湿度小于 50%。

考虑到涂料有害物质对施工人员健康以及对海洋生物的潜在危害,基于中国涂料技术现状和日益严格的环保需求,参考国内外特别是香港地区技术指标和规定,按照三地建设标准“就高不就低”的原则,港珠澳大桥使用的涂料产品,除常规的技术指标外,还增加了 VOC 含量限值、游离六亚甲基二异氰酸酯/甲苯二异氰酸酯(HDI/TDI)含量(质量分数,下文同)以及有害物质含量限制等 3 项环保性能指标(表 1),为推广环保型涂料在中国桥梁建设领域

表 1 涂料产品环保性能技术指标

Tab. 1 Technical Indicators in Terms of Environment Protection for Coating Products

序号	名称	含量技术参数	
		面漆	中间漆、底漆
1	VOC 含量/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\leq 420$	$\leq 350$
2	游离 HDI/TDI 含量/%	$< 0.4$	
3	铅含量/ $10^{-6}$	$\leq 1\ 000$	
	汞含量/ $10^{-6}$	$\leq 1\ 000$	
	镉含量/ $10^{-6}$	$\leq 100$	
	六价铬含量/ $10^{-6}$	$\leq 1\ 000$	
	多溴联苯含量/ $10^{-6}$	$\leq 1\ 000$	
	多溴二苯醚含量/ $10^{-6}$	$\leq 1\ 000$	

的使用做出了努力<sup>[10]</sup>。

港珠澳大桥跨海距离长,结构长期处于高温、高湿的海洋腐蚀环境,桥梁检查与维护工作量大且难。为此,在设计伊始进行了桥梁涂装和检修设施相结合的专题研究,为钢箱梁配备了较完善的箱内和箱外检修车系统(图 12)。箱外检修车为钢箱梁的再涂装提供了一种解决方案,具有自动旋转过墩、过伸缩缝、自动爬坡,自动走行及适应不同梁宽等能力。港珠澳大桥桥梁段约 23 km 共配备了 28 台箱内检修车和 34 台箱外检修车,并拥有检修车位置查询和电池智能化管理功能,以方便后期维养和管理。



图 12 梁外检修车走行试验

Fig. 12 Trial Run of Girder Maintenance Vehicle

## 9 钢桥面铺装

因为与气候环境和交通情况等密切相关,世界各国各区域大都有自己喜好的钢桥面铺装类型。正交异性板钢箱梁在中国桥梁中应用较晚,国际上一些典型的桥铺类型在中国内地均能找到桥例,但表现或尚不尽如人意或尚待时间检验,钢桥面铺装一直以来就是桥梁人需面对的一项挑战。港珠澳大桥钢桥面铺装规模巨大,面积超过 50 000  $\text{m}^2$ ,又位于温暖潮湿的亚热带海洋季风气候区,情况更加复杂。

前述钢箱梁截面设计时已考虑对正交异性钢桥面板刚度进行了加强,以期减少桥面板在汽车轮载

直接作用下产生的局部变形对桥面铺装的影响。考虑到本项目与中国香港地区气候环境、交通条件相似,香港青马大桥采用的英国浇注式沥青砂胶(MA)铺装已成功运行 16 年(至 2013 年),且未经过大修;同时参考深港西部通道和昂船洲大桥的桥铺实践,港珠澳大桥拟选用甲基丙烯酸甲酯(MMA)类防水黏结层+港珠澳浇注式沥青(GMA)+沥青玛蹄脂(SMA)的铺装方案,总厚度 7 cm。GMA 表示考虑工效因素,需采用德国浇筑式沥青(GA)的一次拌和工艺来施工 MA。当然,大规模铺装层施工质量控制的敏感性、修复和再铺装的便捷性也是方案选型的重要考虑因素。

桥面铺装方案设计阶段,在实验室研究的基础上,在中山进行了钢箱梁足尺模型桥面铺装加速加载试验<sup>[11]</sup>(图 13),对 MA+SMA 和 GMA+SMA 的高温稳定性及低温疲劳试验进行了对比。试验结果表明,GMA+SMA 方案各方面性能可达到甚至超过 MA+SMA,能满足港珠澳大桥 15 年的设计使用寿命要求。



图 13 桥面铺装加速加载试验

Fig. 13 Accelerated Loading Test for Deck Pavement

目前,项目承包方已根据加速加载试验确定的混合料技术指标和施工要求完成了 GMA 的生产配合比设计和试验段试铺,各项技术指标和施工性能满足设计要求,2016 年底正式开始桥面铺装施工。当然,桥面铺装施工大胆尝试工艺创新,使用 MA 的集料配比,按 GA 工艺拌和,相关实践效果亦有待时间考验。

## 10 结 语

为实现工程建设目标,港珠澳大桥管理局在世界一流设计、咨询和施工团队的挑选、各级协调管理制度和审核工作机制的建立、国际规范标准的借鉴和项目技术规范、验收标准的制定、项目管理、先进施工技术应用和工艺创新等方面都做了大量富有成效的努力。相关经验和结果总结如下:

(1) 钢箱梁标准化、工厂化、大型化生产要求,促

进了钢结构各施工环节的工艺创新;机械化、自动化、信息化技术的应用,提升了中国桥梁钢结构加工企业的总体制作能力和管理水平。

(2)海上装配化施工,促进了海上大型设备的开发应用和吊装工法的创新,成功经验为海上工程的设计与施工开辟了新的途径。

(3)借鉴国内外相关经验和规范,结合港珠澳大桥工程特点编制了钢箱梁加工制造、安装技术规范、质量验收标准和一系列桥梁产品和材料的技术要求,使得全过程控制的理念得以有效实施。

(4)为用户提供优质服务不仅体现在设计标准和建设质量,还包括后期运营维护系统的规划,含三地跨境一体化运营、维护政策的规划和有效实施,相关工作还在继续。

#### 参考文献:

#### References:

- [ 1 ] SU Q K, ZHANG J W. Approach of Management Planning in Constructing High-quality Cross-sea Bridge[C]//CSPM. Proceedings of the Tenth International Symposium on Structural Engineering for Young Experts. Beijing: CSPM, 2008: 1-10.
- [ 2 ] 张敏, 马建林, 吴伟胜, 等. 复杂受力状态下钢管复合桩粘结性能试验研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(9): 67-71.  
ZHANG Min, MA Jian-lin, WU Wei-sheng, et al. Experimental Study on Bond Behavior of Steel Tube Composite Pile Under Complex Stress Condition[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(9): 67-71.
- [ 3 ] ZHANG M, MA J L, WU W S, et al. Model Test Study on Force and Deformation Characteristics of Steel Tubular Composite Piles[C]//HU J, MA J, MENESES J, et al. IACGE 2013: Challenges and Recent Advances in Geotechnical and Seismic Research and Practices. Reston: ASCE, 2013: 297-307.
- [ 4 ] HUSSAIN N, CARTER M, YEUNG N, et al. Hong Kong Zhuhai Macao Bridge - Conceptual Design of Bridges[C]//IABSE. Proceeding of the IABSE Conference on Bridges and Structures Sustainability. Zurich: IABSE, 2016: 787-796.
- [ 5 ] 苏权科. 跨海大桥特殊技术问题探讨[J]. 公路交通科技, 2005, 22(12): 101-104.
- SU Quan-ke. An Analysis of Special Techniques for Sea-crossing Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(12): 101-104.
- [ 6 ] 孟凡超, 苏权科, 卜一之, 等. 正交异性钢桥面板的抗疲劳优化设计研究[J]. 公路, 2014(10): 1-6.  
MENG Fan-chao, SU Quan-ke, BU Yi-zhi, et al. Optimization Design of Anti-fatigue of Orthotropic Steel Bridge Deck[J]. Highway, 2014(10): 1-6.
- [ 7 ] 张梁, 高科, 谢红兵, 等. 正交异性钢桥面板横隔板开孔部位疲劳性能研究[J]. 公路, 2014(10): 6-11.  
ZHANG Liang, GAO Ke, XIE Hong-bing, et al. Research on Fatigue Properties of Transverse Diaphragm of Orthotropic Decks in Steel Box Girder[J]. Highway, 2014(10): 6-11.
- [ 8 ] XIE H B, SU Q K, HUBER P. Application of Tuned Mass Damper for the Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge for Mitigation of Wind Vibrations[C]//IABSE. Proceeding of the IABSE Conference on Bridges and Structures Sustainability. Zurich: IABSE, 2016: 812-819.
- [ 9 ] 高文博, 张鸣功, 朴泷. 港珠澳大桥江海直达船航道桥整体式钢塔制造技术[J]. 桥梁建设, 2016, 46(2): 7-12.  
GAO Wen-bo, ZHANG Ming-gong, PIAO Long. Manufacturing Techniques for Integral Steel Pylon of River-to-sea Ship Channel Bridge of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Bridge Construction, 2016, 46(2): 7-12.
- [ 10 ] 谢红兵, 刘明虎, 马翔宇. 港珠澳大桥环境友好型涂料技术指标研究与应用[J]. 中国涂料, 2015, 30(5): 30-33.  
XIE Hong-bing, LIU Ming-hu, MA Xiang-yu. Research and Application of the Technical Index of Environmental Friendly Coatings in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. China Coatings, 2015, 30(5): 30-33.
- [ 11 ] XU W, ZHANG X N, FANG M S, et al. Study on the Steel Deck Pavement Design for the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[C]//ASCE. Proceedings of the Fourth Orthotropic Bridge Conference. Reston: ASCE, 2015: 55-64.