

港珠澳大桥设计理念及桥梁创新技术

孟凡超,刘明虎,吴伟胜,张革军,张 梁

(中交公路规划设计院有限公司,北京 100088)

[摘要] 介绍了港珠澳大桥的工程概况、建设目标和总体设计方案,重点阐述了以“大型化、工厂化、标准化、装配化”的设计理念和总体原则指导下,设计采用的新材料、新技术、新工艺、新设备。创新技术的应用,为提高工程品质、确保设计使用寿命提供了坚实基础和有利保障。

[关键词] 钢管复合桩;埋床法预制墩台; $\phi 75$ mm 预应力粗钢筋;正交异性钢桥面板;1 860 MPa 斜拉索;减隔震

[中图分类号] U44 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)01-0027-09

1 概述

1.1 工程概况

港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域,是连接香港、珠海、澳门的超级跨海通道,是列入《国家高速公路网规划》的重要交通建设项目,是我国具有国家战略意义的世界级跨海通道。项目西接京港澳高速公路,东接香港大屿山高速公路,是一项“桥、隧、岛”一体化多专业的超大型综合集群工程,包括:主体工程(粤港分界线至珠海口岸之间区段)、香港界内跨海桥梁、三地口岸、三地连接线。主体工程总长 29.6 km,其中桥梁工程长约 22.9 km。港珠澳大桥桥梁工程包括 3 座通航孔桥及深/浅水区非通航孔桥 5 部分^[1~3]。

青州航道桥桥跨布置为(110+236+458+236+110)m 的双塔斜拉桥(见图 1),主梁采用扁平流线型钢箱梁,斜拉索采用扇形式空间双索面布置,索塔采用横向“H”形框架结构,塔柱为钢筋混凝土构件,上联结系采用“中国结”造型的钢结构剪刀撑。

江海直达船航道桥桥跨布置为(110+129+258+258+129+110)m 的三塔斜拉桥(见图 2),主梁采用大悬臂钢箱梁,斜拉索采用竖琴式中央单索面布置,索塔采用“海豚”形钢塔。九洲航道桥桥跨布置为(85+127.5+268+127.5+85)m 的双塔斜拉桥(见图 3),主梁采用悬臂钢箱组合梁,斜拉索采用竖琴式中央双索面布置,索塔采用“帆”形钢塔(下塔柱局部为混凝土结构)。深水区非通航孔桥为 110 m 等跨径等梁高钢箱连续梁桥(见图 4),钢箱梁采用大悬臂单箱双室结构。为跨越崖 13-1 气田管线需要,其中一联采用(110+150+110)m 变梁高钢箱连续梁桥。浅水区非通航孔桥为 85 m 等跨径等梁高组合连续梁桥,主梁采用分幅布置。全桥基础采用大直径钢管复合群桩,通航孔桥采用现浇承台,非通航孔桥采用预制承台,全桥桥墩采用预制墩身。

1.2 主要技术标准

公路等级为双向 6 车道高速公路;设计行车速度 100 km/h;建筑限界为桥面标准宽度 33.1 m,净高 5.1 m;设计汽车荷载按《公路桥涵设计通用规范》

[收稿日期] 2013-07-10

[作者简介] 孟凡超,1959 年出生,男,四川遂宁人,教授级高级工程师,主要从事桥梁结构设计研究;E-mail: mengfanchao@hpdi.com.cn

(JTG D60—2004)中规定的汽车荷载提高25%用于设计,并按香港《United Kingdom Highways Agency's Departmental Standard BD37/01》汽车荷载进行复核;抗风设计考虑运营阶段设计重现期120年,施工

阶段设计重现期30年;地震设防标准:以重现期表征,工作状态(E1)均为120年,极限状态(E2)通航孔桥为1200年、非通航孔桥为600年,结构完整性状态(E3)均为2400年;设计使用寿命120年。

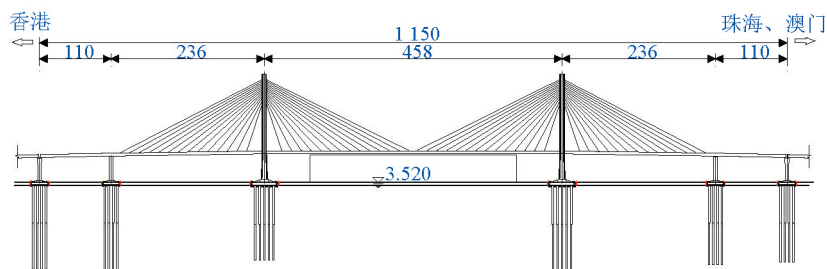


图1 青州航道桥桥型布置(单位:m)

Fig. 1 Layout of Qingzhou navigation bridge (unit: m)

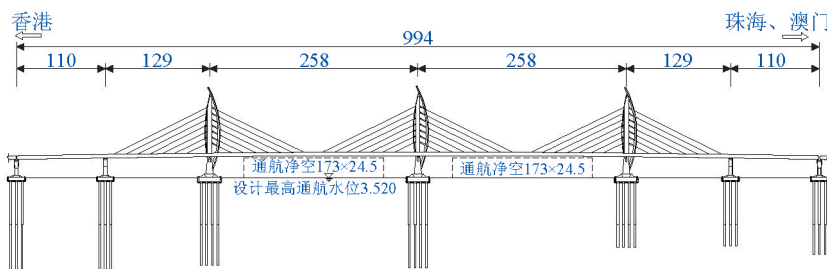


图2 江海直达船航道桥桥型布置(单位:m)

Fig. 2 Layout of Jianghai navigation bridge (unit: m)

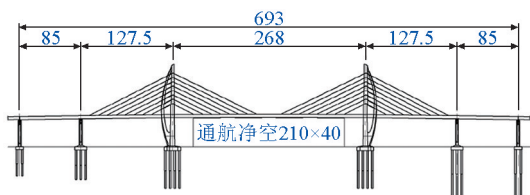


图3 九洲航道桥桥型布置(单位:m)

Fig. 3 Layout of Jiuzhou navigation bridge (unit: m)



图4 深水区非通航孔桥桥型布置效果图

Fig. 4 Image of layout of non-navigation bridge in deep water zone

1.3 建设条件

项目地处珠江伶仃洋入海口,属于近海离岸跨

海通道工程,海域宽度超过40 km。大桥处于南亚热带海洋性季风气候区,桥位区热带气旋影响十分频繁,气象条件恶劣,台风多,风力大,高温高湿。桥区重现期120年10 m高10 min平均风速达47.2 m/s。实测极端最高气温为38.9℃,极端最低气温为-1.8℃。年内各月平均相对湿度均在70%以上。

水文条件复杂,水动力条件差,行洪、纳潮、防淤要求严。海床稳定性好,潮位变化平缓、流速不大。水深介于5~10 m,局部最深点可达17 m。桥区海域为不规则半日潮海区,潮差不大,平均潮差仅1.24 m。实测垂线平均流速1~2节,总体上本海区流速不大。穿越桥区的航道多、航线复杂、通航船型类型众多、船舶通航密度大、通航要求高,航行安全管理要求高。地震设防水准高。地质条件变化大。桥位处覆盖层较厚,最厚可达89.3 m;下伏基岩为花岗岩,岩面及风化厚度差异较大。软土分布范围广,厚度大。海水和地下水均具有较强的腐蚀性。

香港大屿山机场位于大桥东岸登陆点附近,澳门机场位于大桥西岸附近,机场航空限高严。桥轴线穿越白海豚保护区,环保要求高。

2 设计理念^[4-6]

港珠澳大桥3大目标为:建设世界级的跨海通道;为用户提供优质服务;成为地标性建筑。每个目标均具有丰富和深刻的内涵和要求。

基于并服务于项目建设条件、建设目标 and 需求,设计提出了项目建设理念和指导方针,即“大型化、工厂化、标准化、装配化”。全面实现“四化”工法是项目的总体设计思想,以适应工程复杂建设条件,保证施工安全和航运安全、确保工程质量品质、减少现场工作量、减少海中作业时间、降低施工风险、保护海洋生物、保障工期。

“四化”理念是项目追求的最高境界,其本质是工业化。在交通基础设施建设乃至整个工程建设中,采用“四化”理念或者工业化的建设模式,将是一场深刻的革命。中国近20年来建设了很多桥梁,其中不乏世界顶级桥梁,但在那种劳动密集型的生产组织方式下,很难有工业化的充分实践。工程建设的工业化是一个国家工业化水平的表现:大型施工船舶、大型设备的研发制造取决于国家装备工业的水平;大型构件的生产制造安装体现了国家工业生产能力;标准化水平的高低取决于国家工业管理水平。可以说“四化”理念是国家实力的体现。

港珠澳大桥是中国交通建设史上规模最大、技术最复杂、标准最高的工程,作为世界级挑战性的通道,它的建设必须采用世界先进技术和方法,以及与之匹配的先进建设理念,必须推行“以需求和建设目标引导设计”,推行先进的“四化”建设思想,依靠当代先进的科学技术和国家强大的工业化实力,确保其“新技术、高品质、长寿命”重要目标的实现。相对来说,桥梁建设的工业化水平在港珠澳大桥上达到了空前的高度,“四化”建设理念将引领中国桥梁及交通建设领域的工业化革命,是中国迈向桥梁强国的里程碑项目。

3 桥梁创新技术

3.1 地标性桥梁建筑景观设计

为建成地标性建筑,进行了长期的艰苦卓绝的建筑景观设计。其中,航道桥对全桥景观效果和地标性目标影响至关重要。在全桥桥墩造型、主梁线形协调一致的基础上,作为斜拉桥的索塔的建筑造型则成为控制性因素。基于全桥桥隧组合“珠联璧合”的总体景观设计理念,在对景观文化内涵、桥梁元素特征、视点进行研究分析的基础上,考虑中西、粤港、古今文化交融的地域文化特点,最终从众多套桥梁方案中筛选出以海洋文化元素为基础的“扬帆顺行”组合方案(见图5)。三座通航孔桥桥塔造型既有统一的主题元素,又各具特色,体现了设计的原创性,极具可识别性。

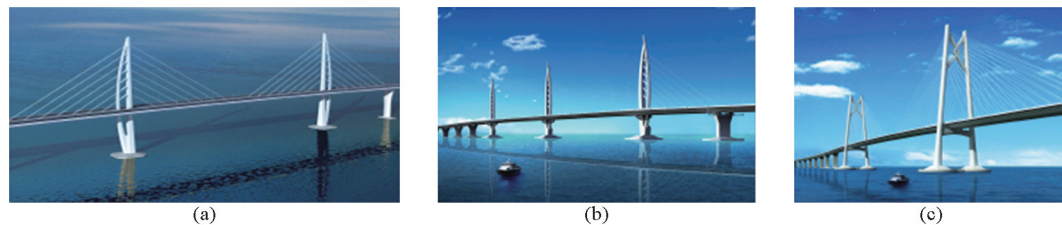


图5 通航孔桥建筑景观效果图

Fig. 5 Images of landscapes of navigation bridges

3.2 大型钢管复合桩研究与应用

在广泛吸收国内外跨海桥梁基础建设的有益经验的基础上,通过对打入桩、钻孔灌注桩和钢管复合桩综合比选,最终确定采用钢管复合桩,钢管与钢筋混凝土共同组成桩结构主体。通航孔桥基础采用变直径钢管复合桩。桩身由两部分组成:有钢管段、无钢管段。有钢管段的长度根据地质条件、结构受力、沉桩能力、施工期承载等综合确定。

复合桩钢管内径2 450 mm,钢管壁厚分两种:下部约2 m范围壁厚为36 mm,其余壁厚为25 mm。钢管对接时内壁对齐,采用全熔透对接焊。在顶部一定区段钢管内壁设置多道剪力环。复合桩混凝土强度等级采用水下C35,桩身根据受力配置钢筋。非通航孔桥复合桩钢管内径2 150/1 950 mm,桩身根据受力配置钢筋。其余与通航孔桥相同。

虽然钢管复合桩以其优越的力学性能越来越

受到工程界的重视和青睐,但目前国内外对于钢管复合桩复合结构的受力机理、协同工作性能以及设计计算理论还不完善,缺乏系统理论研究^[7,8]。工程上常常只是把钢管作为钻孔桩的临时护筒,设计时未将钢管与核心混凝土作为复合体加以共同考虑。目前钢管复合桩计算理论和设计方法的研究大大落后于工程应用。一方面,实际工程中经常出现因桩基沉降过大等引起的工程事故,另一方面也暴露出桩基设计中存在着保守的趋势和现象。造成这种现状的原因是桩周介质(岩土)性状的复杂性,同时钢管和混凝土桩体之间的受力分析相对困难,导致现在对大直径钢管混凝土复合桩的荷载传递机理、变形规律等还未完全研究清楚。鉴于此,对钢管复合桩的变形分析、承载力计算理论以及桩的合理构造形式等方面开展了系统的理论分析和试验研究(制作了14根钢管复合桩试件开展模型试验),在充分了解其承载特性和受力机理的基础上,获取了大直径钢管复合桩的各项设计参数,提出了

钢管复合桩竖向和水平承载能力计算方法,并将研究成果应用于设计。

3.3 埋床法全预制墩台设计与施工技术

为使全桥桥隧组合轴线断面阻水率满足不大于10%的要求,需将全部非通航孔桥的承台埋于海床面以下。同时,在项目设计理念指导下,设计采用了埋床法全预制墩身和承台方案(见图6)。墩身根据吊装能力分成1~3节预制拼装,承台随同首节墩身一同预制,预留桩位孔洞和后浇混凝土空间。桩位孔洞用以实现止水、桩基与预制承台临时连接;后浇混凝土空间在抽水后浇注后浇混凝土,实现承台与桩基的整体化。预制承台既是承台主体结构,又是实现承台与桩基连接的围堰结构,除附着于预制承台之上的临时周转使用的围堰设施外,承台本身施工不需要额外的围堰结构。下节段墩身及承台整体最大吊装重量约2 850 t,最大高度约27 m。

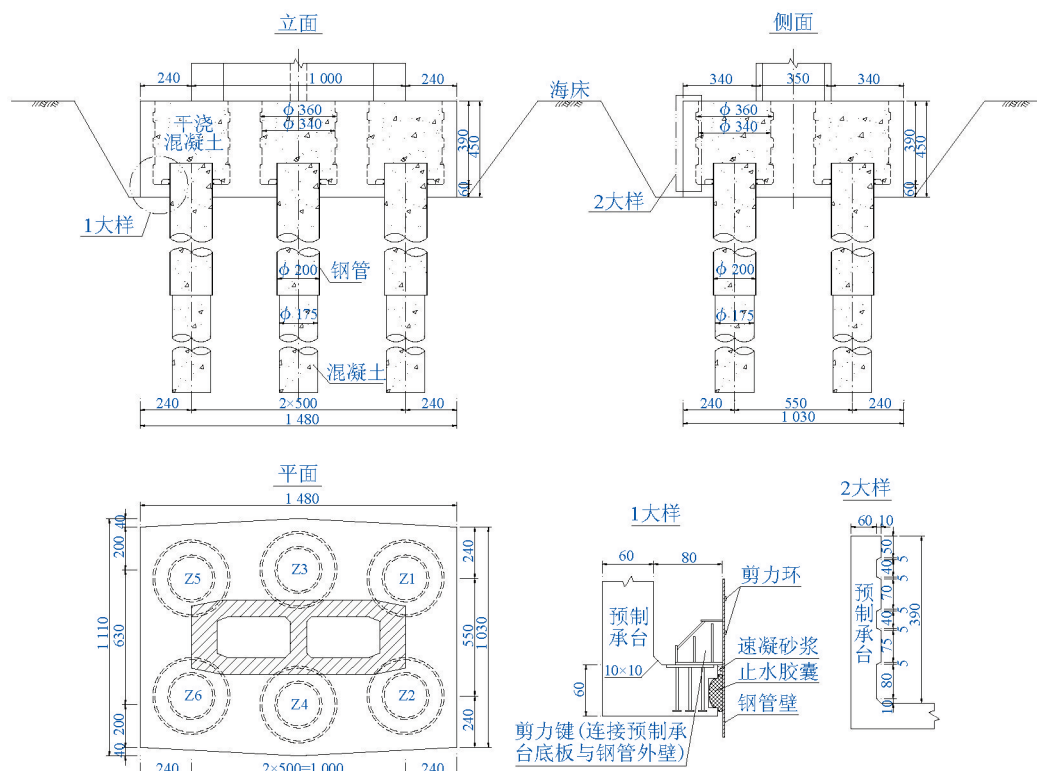


图6 埋床法全预制墩身和承台构造(单位:cm)

Fig. 6 Configuration of fully fabricated pier shaft and pile cap embedded below sea bed (unit: cm)

预制承台底板厚0.6 m,底板开孔直径2.13 m,孔壁设有槽口,用于置入整体式止水胶囊,通过充

水后实现止水。需研制新型封堵止水装置及相应工艺解决16 m水深处潜水预制承台与钢管复合桩

间的止水问题,确保后浇混凝土能够在干作业环境内进行施工。胶囊正常充水压力 0.3 MPa,极限充水压力 1.2 MPa,正常情况下可在水下大于 16 m 深处工作。为确保整体式止水胶囊实现止水,设计要求钢管复合桩竖向倾斜不大于 1/400 ~ 1/320,桩中心平面位置允许绝对误差小于 150 mm,各桩之间允许相对误差小于 50 mm。若施工能采取其他可靠措施实现止水和后续工序,也可将上述精度要求降至常规要求。

为确保实现上述施工精度和工期要求,设计提出了以下施工方案和保证措施:a.钢管沉桩施工宜采用在定位船上设置的导向架和大功率液压振动锤对钢管进行振动下沉。b.三次定位措施:驳船首先采用锚索初定位;再下放 4 根锚桩将驳船定位;下放钢管,桩底离泥面 50 cm 左右时,通过导向架的液压背板微调钢管平面位置及倾斜率,进行精确定位。c.桩基施工采用可拆卸周转使用的整体式装配化钻孔平台(钻机、泥浆池、沉淀池、钻杆和工作房集成一体),以缩短海上作业时间、节约造价、降低风险。

3.4 预制墩身连接技术及 $\phi 75$ mm 预应力螺纹粗钢筋研发

全桥桥墩均采用工厂预制、现场安装。其中,青州航道桥、江海直达船航道桥、深水区非通航孔桥的墩身根据吊装能力采用节段预制,并通过预应力筋进行连接(见图 7),墩身接缝采用干接缝,设置匹配的凹凸剪力键,接缝处涂抹满足技术要求的环氧树脂。经技术经济综合比较,并重点考虑施工的可操作性、寿命保证的可靠性,预应力确定采用全螺纹粗钢筋体系(见图 8)。由于受力所需及墩身断面限值,粗钢筋直径需达 75 mm。鉴于《预应力混凝土用螺纹钢筋》(GB/T 20065—2006)最大规格仅 50 mm,为此,在广泛调研国内外相关技术水平及市场情况的基础上,确定采用 $\phi 75$ mm 预应力螺纹粗钢筋(目前国内已研发成功并应用到项目中,钢筋屈服强度 830 MPa,抗拉强度 1 030 MPa)连接墩身节段。要求所采用的精轧螺纹钢筋或滚压连续外螺纹粗钢筋均符合国内外相关规范规定的尺寸、外形及技术性能要求。连接墩身节段的预应力粗钢筋采用“电隔离防护+真空灌浆”措施进行防腐,并进行了详细的防腐构造细节设计。

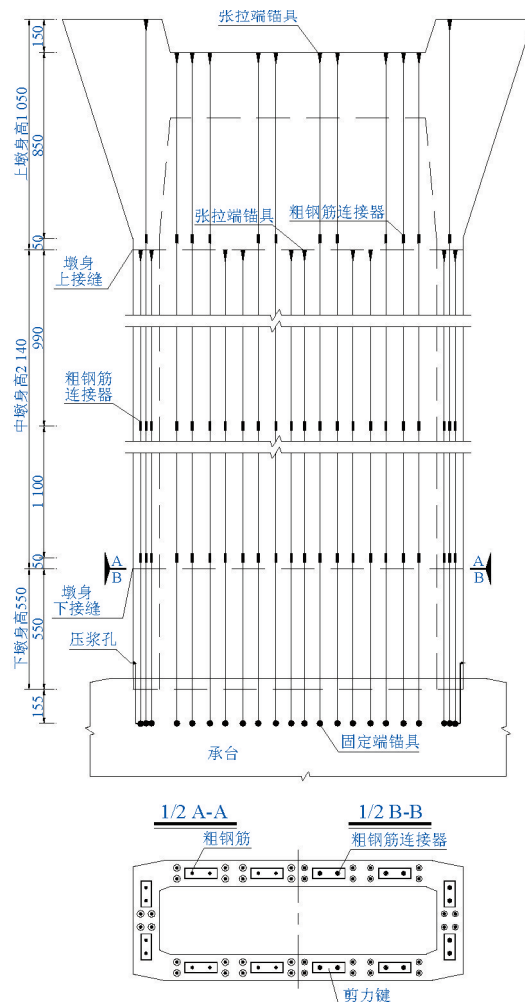


图 7 预制墩身及连接构造(单位:cm)

Fig. 7 Prefabricated pier shaft and connection detailing (unit: cm)

3.5 大悬臂钢箱梁耐疲劳结构设计技术

全桥钢箱梁梁高 4.5 m;箱梁设置边纵腹板和中纵腹板。中纵腹板采用实腹式,但开设了联通人孔方便出入,并联通箱室内干空气,利于除湿。为使箱室内部更加通透,采用了实腹式横隔板和横肋板交替布设的构造,通航孔桥横隔板间距 7.5 m,深水区非通航孔桥横隔板间距 10 m,中间每隔 2.5 m 设置 1 道横肋板。深水区非通航孔桥钢箱梁横断面见图 9。

在细节研究及疲劳验算的基础上,确定了钢桥面板的细部构造:桥面板厚度 ≥ 18 mm;纵向 U 肋间隔 300 mm、厚度 ≥ 8 mm、内侧弯曲加工半径不小于 5 倍板厚;桥面板与纵向 U 肋熔透量不小于纵肋板

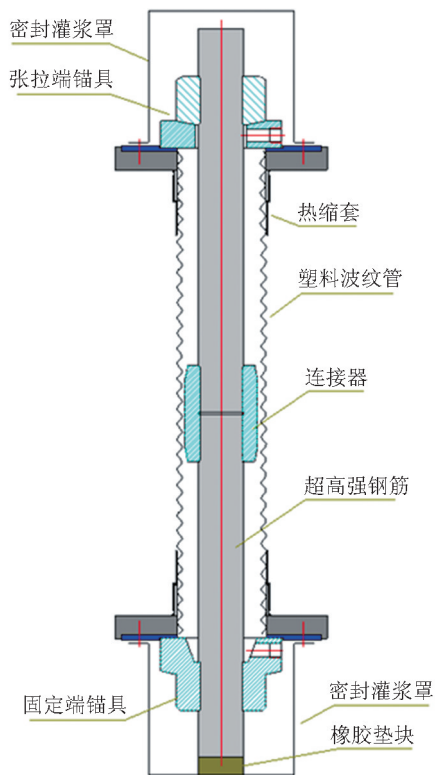


图8 预应力粗钢筋及体系

Fig. 8 Prestressing thicker reinforcing bar and system

厚的80%；纵向U肋接头采用高强螺栓连接，过焊孔长度80mm；桥面板的焊接利用X坡口或利用焊接垫板的V形坡口实施完全熔透焊接，接头位置避

免布置在轮载正下方；横肋间隔 ≤ 2.5 m；竖向加劲构件与顶板之间设置35 mm的间距；对纵向U肋与顶板、横隔板（横肋板）之间的组装、焊接及细部处理做了严格规定（见图10）。理论分析表明，该构造能够确保耐疲劳安全。进一步开展了试件疲劳试验，对病害最突出的“横隔板在U肋附近开槽处、横隔板与U肋焊缝、顶板与U肋焊缝、U肋对接（栓接）”构造细节进行了疲劳性能验证。试验结果表明，构造完全满足耐疲劳性能要求。

3.6 超大尺度钢箱梁的制作与安装

深水区非通主梁架设采用大节段整孔逐跨吊装方案，标准节段长110 m，吊重约2 300 t，最长节段长133 m，最大控制吊装重量约2 750 t。通航孔桥边跨无索区大节段长度134.5 m，采用浮吊整体吊装，吊装重量约3 580 t。

钢箱梁结构规模及数量巨大，健康、安全、环保、制造标准、品质及耐久性要求高，为此实施了“全新的厂房、尖端的设备、先进的技术、科学的管理”的工作方针，大幅度提升“车间化、机械化、自动化”水平。通过“全面实现车间化作业、广泛使用机械自动化设备、采用计算机辅助制造技术、世界先进的电弧跟踪自动焊技术、反变形船位施焊技术、U肋焊缝相控阵超声波检测技术及信息化质量控制手段”，大幅度提升钢箱梁制造质量水平。

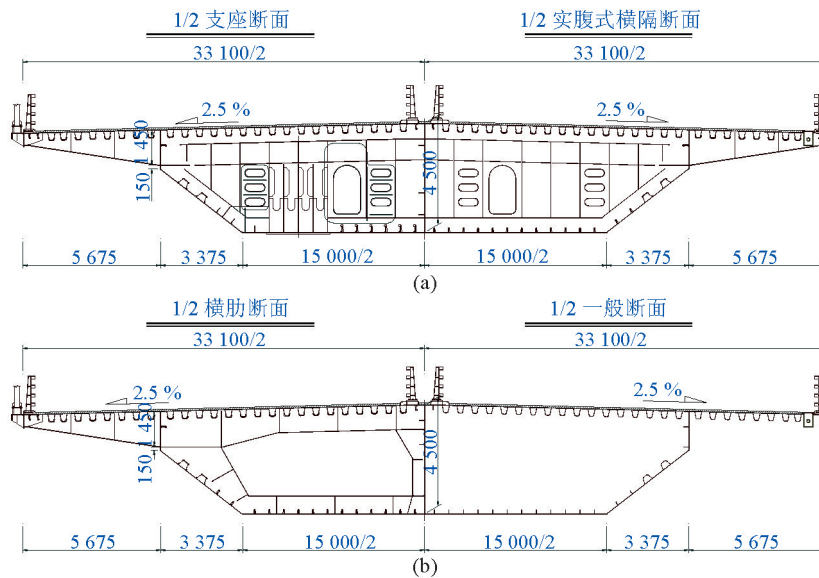


图9 深水区非通航孔桥主梁横断面(单位:mm)

Fig. 9 Cross section of main girder of non-navigation bridge in deep water zone (unit: mm)

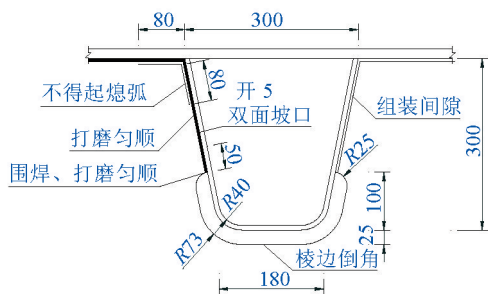


图10 组装、焊接、细部处理要求(单位:mm)

Fig. 10 Requirement on connection, welding and details (unit: mm)

对所有板单元均采用全自动化制造,主要体现在以下内容。a.钢板下料采用空气等离子及火焰数控切割机进行精密切割,切割设备同时完成自动划线、标识喷写。b.U肋加工:钢板下料后,用双面铣床加工边缘,螺栓孔连接的U肋采用先孔法卡样板制孔;在专用数控铣床上同时加工U肋两侧坡口,钝边尺寸精度达到 ± 0.5 mm,坡口角度达到 $\pm 0.5^\circ$,最后在数控折弯机上轧制成形。c.U肋和板肋板单元组装:采用自主研发的自动机床进行组装和定位焊。首先进行焊缝部位自动打磨和除尘,再利用机械卡具进行U肋的自动定位和压紧,保证组装间隙小于0.5 mm,采用日本先进的机器人焊接系统进行定位焊,实现U肋定位焊自动化,保证U肋坡口根部焊接质量。d.U肋和板肋板单元焊接:在反变形胎上焊接,通过自动液压卡具预设双向反变形,用多头机器人焊接系统进行船位焊接,该机器人焊接系统采用世界技术先进的电弧跟踪技术,实现对坡口根部位置偏差的自动化跟踪调整,跟踪精度达到0.2 mm。配合反变形船位施焊技术,确保焊缝根部融合、内在质量、外观成形及板单元焊后平整度,避免焊后矫正。e.横隔板单元:在平台上用专用焊接机器人系统进行施焊,大幅提升焊接质量和效率。f.棱角铣削:板单元焊接后,采用自动倒棱设备对非焊接自由边棱角进行圆角铣削。

钢箱梁由板单元制成小节段,然后在工厂车间内整体组装成大节段。小节段及大节段拼装全部在厂房内进行。广泛采用数字化焊机进行施焊。梁段在专业打砂、涂装厂房内完成打砂、涂装。钢箱梁大节段通过船舶运输至桥位,采用单台或双台浮吊起吊安装。

3.7 抗拉强度1 860 MPa斜拉索研发与应用

江海直达船航道桥采用竖琴式布置的单索面,

若采用1 670 MPa斜拉索,则规格超过《斜拉索热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件》(GB/T 18365—2001)的最大规格;若采用1 770 MPa斜拉索,则也要用到《大跨度斜拉桥平行钢丝斜拉索》(JTT 775—2010)的LPES7-547规格。为减轻斜拉索重量,减小索体直径进而减小拉索阻风面积,在广泛调研国内外相关技术水平及市场情况基础上,确定通航孔桥采用抗拉强度1 860 MPa的斜拉索。斜拉索采用平行钢丝拉索,钢丝采用7 mm高强度、低松弛钢丝,其抗拉强度 $\geq 1 860$ MPa;屈服强度 $\geq 1 660$ MPa;扭转性能 ≥ 8 次;成品索应力幅为200 MPa(少数为250 MPa),对应的钢丝疲劳应力为360 MPa(410 MPa)。钢丝其余技术条件、冷铸锚、内、外PE护套的技术条件均应符合《大跨度斜拉桥平行钢丝斜拉索》(JTT 775—2010)及《斜拉索热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件》(GB/T 18365—2001)的要求。

为进一步提高钢丝表面防腐性能和斜拉索整体使用寿命,经综合比较,确定钢丝采用锌-5%铝混合稀土合金镀层。

3.8 桥梁减隔震设计

通航孔桥:对于塔梁非固结的青州航道桥和江海直达船航道桥,以降低结构地震响应为目标,研究选择了主梁动力约束体系。青州航道桥在索塔与主梁间设置了带纵向静力限位功能的阻尼装置,在辅助墩与主梁间设置了横、纵向阻尼装置,在过渡墩与主梁间设置了纵向阻尼装置。江海直达船航道桥在三个索塔和辅助墩、过渡墩与主梁间设置了纵桥向阻尼装置,在中索塔和辅助墩与主梁间设置了横向阻尼装置。以桥梁抗震性能分析为基础,优选了阻尼装置技术参数。

非通航孔桥:由于地震动参数峰值加速度较大,连续梁桥桥墩处设置一般支座难以保证结构的抗震安全性及经济性,为了降低结构的地震反应,确保结构安全,在各个桥墩处设置了减隔震支座,利用其良好的滞回耗能特性和自恢复功能,在强震作用下达到减隔震耗能的效果,使结构的地震反应得到了很好的控制。支座具有常规使用和减隔震功能,同时还具备在罕遇地震作用下防落梁功能;支座设计寿命为60年。进行分区段设计:深水区非通航孔桥的等宽段高墩区采用高阻尼橡胶支座,等宽段低墩区采用铅芯橡胶支座及双曲面球型支座,变宽段采用双曲面球形支座。浅水区非通航孔桥

全部采用铅芯橡胶支座。

3.9 钢箱梁涡激共振抑制技术

根据结构抗风性能试验研究结果,大悬臂钢箱梁在设计风速范围内发生了涡激振动现象,且位移和加速度影响了桥梁结构安全和运营期间的舒适性。在给定结构设计方案的前提下,涡振抑制措施包括:安装附加的主动或被动控制面(亦称气动措施);增加结构阻尼(亦称机械措施)。经对“栏杆上加导流板、加装风嘴、对护栏进行不同程度封闭、主梁内设置调谐质量阻尼器(TMD)”方案进行同等深度的技术经济综合比选,推荐采用设置TMD方案。

深水区非通航孔桥在每联的次边跨跨中均布置4个TMD,每联共8个。跨崖13-1气田管线桥在中跨跨中布置4个TMD。江海直达船通航孔桥为了制振第一竖向振型,在两主跨的跨中均布置4个TMD,共8个;为了制振第二竖向振型,在两主跨的跨中均布置4个TMD,共8个。研究提出了TMD的主要技术要求,包括:摆动质量(单个TMD质量)有3 000 kg、3 750 kg、4 000 kg、6 250 kg四种;质量块最大位移 ± 250 mm、 ± 300 mm;阻尼比10%;安装TMD后主梁结构的等效阻尼比应大于1%;阻尼常数、弹簧刚度、最大速度由制造商分析确定;TMD系统设计寿命要求与桥梁主体结构相同。

3.10 全自动、全覆盖的运营管养设计与装备

基于“为用户提供优质服务、需求引导设计、以人为本”的建设目标及设计理念,确定运营管养设施设备的设计原则:a.满足各部位“可到达、可检查、可维护、可持续性”,尽量做到易检、易修、易维护。对于可更换、需定期养护部件,提供足够的操作空间、操作平台。b.管养设施设备做到全自动、全覆盖。

全桥主梁箱外设置检查车,采用7000型航空铝合金,全自动液压控制。梁内设置检查车(见图11),采用7000型航空铝合金,内设照明、空调、供氧和工具箱等人性化系统,具有重量轻、速度快、舒适性好等特点。

索塔均设置内外检修通道及平台(设备)。以青州航道桥为例,在索塔下塔柱、中塔柱内设置楼梯,上塔柱设置爬梯,中上塔柱设置升降梯通道。钢结形撑内设置爬梯,设置通道与塔柱内部相通。在下横梁顶板、塔柱与下横梁节点处、桥面处塔柱均设有人孔通道。塔柱顶部设置了顶板,设有人孔,可达塔顶及结形撑顶部。在塔顶设置了预埋

件,在结形撑顶设置了轨道,专项采购检修保养设备,在通车前安装并完成试运营。在运营期可实现对塔柱及结形撑外表的检修保养工作。索塔外部检修系统详见图12。对斜拉索在运营期根据需要购置附着式自动爬升机器人进行斜拉索表面状态全方位检查。在桥墩顶设置有检修平台,从检查车和桥面进入墩顶,实施支座、伸缩缝及阻尼装置的检修和更换。



图11 梁内检查车

Fig. 11 Inspection gantry inside girder

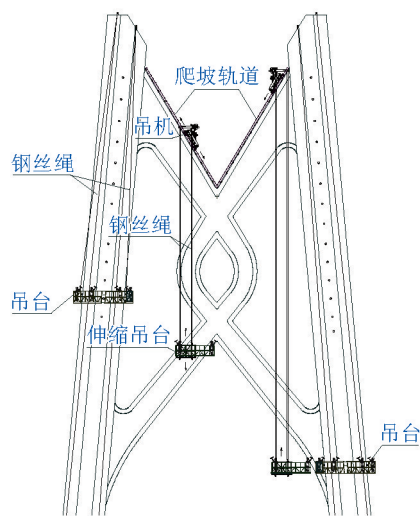


图12 索塔外部检修系统

Fig. 12 Checking and repairing system external to tower

3.11 基于120年设计使用寿命目标的结构耐久性设计^[9]

为保证主体结构的120年设计使用寿命,制定了总体保证策略包括:a.设计合理的结构;b.采用有利于寿命的高性能材料;c.采用“四化”施工方法;d.采用提升或者保障耐久性的防护措施;e.注重并改善利于耐久性的细节构造设计;f.加强运营期

管养、维护维修、更换等的考虑并制定有效措施。

耐久性设计首先根据其所处海洋环境确定了工程环境分类与作用等级,基于桥梁主体结构120年的设计使用寿命需求,研究制定了各构件设计使用寿命;进而从原材料要求、各构件强度等级及氯离子扩散系数要求、各构件钢筋净保护层厚度、各构件裂缝宽度限制、各构件附加防腐蚀措施等方面开展了详细的混凝土结构耐久性设计;从材料的选择、表面防腐涂装技术措施、内部除湿系统等方面开展了钢结构耐久性设计;对所有附属构件或附属工程同样开展了耐久性设计或提出要求。

耐久性设计是一项系统工作,与结构、材料、工艺设计密切相关,且贯穿于建造、运营维养全过程,集宏观和细节为一体,系统庞大、内容繁杂,以下简称主要耐久性措施:a.钢管复合桩采用高性能环氧涂层和牺牲阳极阴极保护联合防护。b.预制构件下节段墩身全部钢筋采用高性能双层环氧树脂涂层钢筋,中、上墩身外层钢筋及其拉筋、支座垫石钢筋采用高性能单层环氧树脂涂层钢筋;现浇混凝土构件对索塔下塔柱及下横梁的外层钢筋及其露头的拉筋、各类支座(阻尼装置)垫石采用耐海洋腐蚀不锈钢钢筋。不锈钢钢筋的绑扎钢丝采用直径1.2mm柔软的不锈钢丝。c.预制墩身内外表面、索塔、承台外表面均采用硅烷浸渍。d.所有钢结构均进行油漆涂装防腐。其中,钢箱梁外表面采用“环氧富锌底漆+环氧云铁中间漆+氟碳面漆”体系,内表面采用“环氧富锌底漆+环氧厚浆漆+除湿系统”体系。

4 结语

港珠澳大桥的综合建设技术难度和水平是世界级的。如何建成“景观美、品质高、寿命长”的精品工程,甚至成为里程碑式的经典之作,必须积极主动、因地制宜、实事求是地提升建设理念、践行创新技术、深化细节设计,这是我国桥梁建设水平与发达国家的差距所在,也是努力的方向。为此,在总体设计理念指导下,开展了多项技术创新,以期为实现港珠澳大桥的宏伟建设目标奠定坚实基础,并为国内后续桥梁工程提供示范。港珠澳大桥主体工程的桥梁工程于2012年5月开工,目前,项目施工正按计划顺利进展之中,预计2016年底建成通车。

参考文献

- [1] 中交公路规划设计院有限公司联合体. 港珠澳大桥初步设计[R]. 2009.
- [2] 中交公路规划设计院有限公司联合体. 港珠澳大桥桥梁DB01标施工图设计[R]. 2012.
- [3] 中铁大桥勘察设计院有限公司联合体. 港珠澳大桥桥梁DB02标施工图设计[R]. 2012.
- [4] 严国敏. 现代斜拉桥[M]. 成都:西南交通大学出版社,1996.
- [5] 刘士林,梁智涛.斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [6] 陈明宪.斜拉桥的建造技术[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [7] 钟善桐. 钢管混凝土中钢管与混凝土的共同工作[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2001,34(1):6-10.
- [8] 韩林海,杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [9] 孟凡超,吴伟胜,刘明虎,等. 港珠澳大桥桥梁耐久性设计创新[J]. 预应力技术,2010(6):11-27.

The design philosophy and bridge's technical innovation of Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge

Meng Fanchao, Liu Minghu, Wu Weisheng, Zhang Gejun, Zhang Liang

(CCCC Highway Planning and Design Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

[Abstract] This article introduces the project overview, construction goal and design philosophy of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge. Based on large scale, factory production, standardiza-
(下转41页)