

揭阳大桥主桥设计关键技术

魏朝柱¹, 何 海², 梁立农²

(1.广东省交通运输规划研究中心, 广东 广州 510101; 2.广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510107)

摘 要: 揭阳大桥主桥全长 576 m, 为(138+300+138)m 双塔双索面钢-混组合梁斜拉桥, 桥面宽度 32.4 m。主梁采用双工字形组合梁, 斜拉索和主梁的锚固采用锚拉板锚固形式。为有效解决桥面板开裂问题, 提出了局部采用超高韧性混凝土材料(UHPC)桥面板方案; 另外, 因主桥抗震、抗风设防要求较高, 为有效减小主塔地震力, 增加主桥抗风性能, 对塔梁间纵向阻尼器进行了参数敏感性分析, 确定了阻尼器的合理设计参数, 同时通过风洞试验, 确定在外侧小纵梁处设 2 道下稳定板的气动措施可提高颤振临界风速, 降低涡激共振振幅, 使大桥具有足够的抗风稳定性。

关键词: 斜拉桥; 钢-混组合梁; 总体设计; UHPC; 抗风设计; 抗震设计

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)11-0071-05

1 设计概况

揭阳大桥位于揭阳市榕城区, 跨越榕江南河, 是广东省揭(阳)至惠(来)高速公路揭阳市区连接线工程的重要构造物。榕江南河为内河Ⅲ级航道, 单孔双向通航并兼顾 5 000 t 海轮, 通航孔净空为 260 m (净宽) × 34 m (净高), 最高通航水位 3.03 m, 最低通航水位 -0.55 m (国家 85 高程基准)。榕江南河水面宽约 350 m, 河水受潮汐影响明显, 具有不规则半日混合潮、潮时潮差不等的特点。

本项目采用一级公路兼城市主干路标准, 双向 6 车道, 设计速度 80 km/h, 主桥桥梁总宽 32.4 m, 桥梁设计汽车荷载为公路-I 级, 设计基本风速为 39.4 m/s, 地震动峰值加速度值为 0.15g, 工程场地类别为Ⅲ~Ⅳ类。

揭阳市地处亚热带, 属亚热带海洋性气候, 具有明显的海洋性气候特点, 多年平均相对湿度为 80%。多年平均气温 21.9℃, 热月(7 月份)平均气温 28.7℃, 冷月(1 月份)平均气温 13.9℃, 最高气温 39.7℃(2005 年 7 月 18 日), 极端最低气温 -2.7℃(1955 年 1 月 12 日)。年平均降水量为 1 740.7 mm。揭阳市属华南沿海台风区(Ⅳ7), 受台风影响, 7~9 月 6 级以上强风占总数的 83%, 年均风速 1.8 m/s, 历史最大台风风力 11 级(1969 年 7 月 28 日), 风速达 28 m/s (东北, 东风)。桥址区覆盖层主要由海陆

交互相的软土、黏性土及砂土组成, 基底岩性均为花岗岩, 基岩埋深大, 岩质极硬, 岩面起伏较大, 桩基最长约 120 m。

2 主桥设计

2.1 总体设计^[1]

揭阳大桥主桥为主跨 300 m 的双塔双索面钢-混组合梁斜拉桥, 桥跨总体布置为(138+300+138)=576 m, 结构体系采用半漂浮体系, 因两侧边跨分别跨越市政道路, 故采用无辅助墩设计, 桥梁总体布置见图 1。

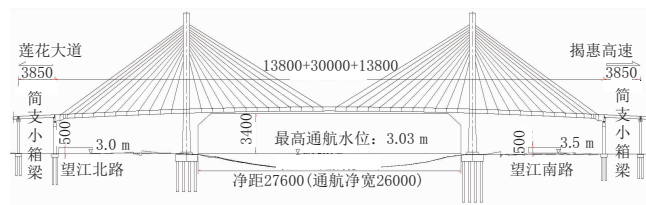


图 1 桥梁总体布置图(单位: cm)

主桥边中跨比为 0.46, 为确保正常使用状态下, 过渡墩支座不出现负反力, 设计将两侧引桥各 1 孔 38.5 m 简支小箱梁作为压重梁支承于主梁箱形端横梁上, 同时在过渡墩墩顶附近主梁钢横梁间施加压重。过渡墩顶顺桥向 31.2 m 范围内压重 200 kN/m, 全桥共压重 1 251 t。

过渡孔简支小箱梁一端支撑在主桥的钢横梁上, 设置纵向固定支座; 另一端支承在过渡孔柱墩盖梁上, 设置纵向活动球型钢支座。在过渡孔的小箱梁和主桥之间设置 D80 伸缩缝, 只允许过渡孔小箱梁和主梁之间有微小的转角, 次边墩处设置 RBKF560 单

收稿日期: 2022-12-17

作者简介: 魏朝柱(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事公路工程设计咨询工作。

元式位移伸缩缝。

2.2 主梁设计

钢-混组合梁因能充分发挥钢与混凝土材料的力学性能,兼顾钢与混凝土结构的优点,同时其结构受力明确、可工厂化制造、施工快捷,因此使用广泛。但经过调研,钢-混组合梁斜拉桥桥面板湿接缝和支点负弯矩区桥面板存在开裂现象,严重影响结构使用耐久性。为有效解决桥面板开裂问题,本文研究了主塔支点负弯矩区桥面板局部应力分布,提出了局部采用超高韧性混凝土材料(UHPC)桥面板方案。

2.2.1 钢梁设计

本项目主梁采用钢-混组合梁,全宽 32.4 m,主梁中心高 3.37 m,主梁标准横断面见图 2。

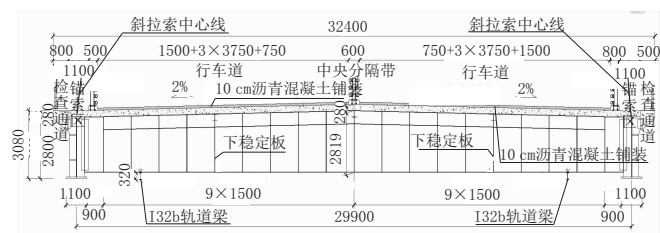


图2 主梁标准横断面图(单位:mm)

钢梁由工字形钢主梁、横梁、小纵梁组成。

两侧钢主梁横向中心距 29.9 m,高 2.8 m。根据构造及施工架设的需要,全桥钢主梁划分为 12 种梁段,标准梁段长 11.7 m,标准横隔板间距为 3.9 m。根据受力需要,其上翼缘板宽 900 mm,厚 36 mm、50 mm;下翼缘板宽 1 100 ~ 1 920 mm,厚 60 mm、80 mm;腹板厚度统一采用 28 mm。腹板外侧设 2 道纵向加劲肋(宽 350 mm、厚 24 mm),腹板内外侧标准节段每隔 3.9 m 设置 2 道间距为 1.3 m 的竖向加劲肋。过渡墩附近的梁段(过渡段)共长 13.085 m,采用加高设计,高度从 2.8 m 加高至端部 4.88 m。

横梁间距 3.9 m,一般横梁上翼缘宽 600 mm,厚 24 mm;下翼缘宽 700 mm,厚 28 mm;腹板厚 16 mm。横梁腹板两侧成对布设水平加劲肋和若干道竖向加劲肋。横梁腹板与边主梁通过高强螺栓拼接。

主梁横向设 3 道小纵梁,横向间距 7.5 m,小纵梁高 300 mm,上翼缘宽 400 mm,下翼缘宽 240 mm,腹板厚 12 mm。

为抑制主梁涡激振动振幅,于主梁外侧小纵梁下设置 2 道稳定板,稳定板沿主梁纵向通长设置,为高 2 300 mm,厚 6 mm 的钢板,与横梁间采用高强螺栓连接。

钢梁工字形主梁、横梁、小纵梁等均采用 Q345D。锚拉板位置处边主梁上翼缘钢板要求为 Z 向钢板,

其厚度方向性能应满足《厚度方向性能钢板》(GB 5313—2010)中 Z25 级性能要求。

2.2.2 桥面板设计

桥面板厚度为 28 cm,预制部分采用 C60 高强混凝土,现浇部分采用 C60 微膨胀混凝土,内掺高强有机聚合物纤维。为传递拉索的剪力,外侧预制板边主梁侧面设置剪力键。为了减小混凝土收缩、徐变对结构的影响,预制板需存放 6 个月以上。以上措施均为钢-混组合梁桥面板设计通常做法,即便照此严格要求施工,桥面板也存在开裂风险。

主塔墩支座顶局部应力集中见图 3。

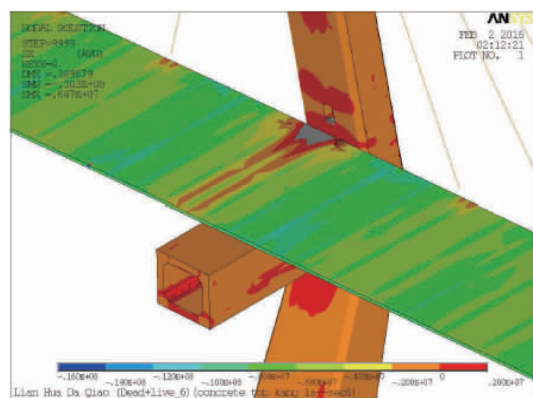


图3 主塔墩支座顶局部应力集中

局有限元仿真分析^[2]表明,在主塔墩支座顶附近主梁混凝土顶板会出现超过 2 MPa 的纵桥向拉应力,局部最大值为 6 MPa。为降低桥面板开裂风险,提高结构耐久性,本次设计在支座顶 4.5 m × 3.45 m × 0.28 m 桥面板范围采用超高韧性混凝土材料(UHPC)加强,UHPC 设计抗压强度 120 MPa,抗弯拉强度 20 MPa,现场浇筑施工,高温蒸汽养护。

在中跨 133.4 m 及两边跨各 78.1 m 范围内桥面板中布置多股 7φ¹⁵.24 纵向预应力钢束,钢束采用两端张拉,群锚锚固,塑料波纹管真空压浆工艺施工。

纵、横梁上翼缘板上布置有直径 22 mm 焊钉,材质为 ML15,高 20 cm。预制混凝土桥面板通过设在纵、横梁上的湿接缝形成共同受力的组合梁结构。

2.3 主塔与基础设计

桥梁景观要求高,本项目以揭阳市花“莲花”为设计主题元素,主塔造型从含苞待放的“水上莲花”中抽象而出,将钻石型主塔设计融合城市文化特色,赋予主塔生命力。整个主塔由塔座、下塔柱、下横梁、中塔柱、中横梁、上塔柱、上横梁和塔冠等部分组成,总高度为 120 m,自桥面以上塔高 81.5 m(含塔冠 3.5 m),塔高与主跨比为 0.272,主塔采用 C50 混凝土。

土。主塔一般构造图见图 4。

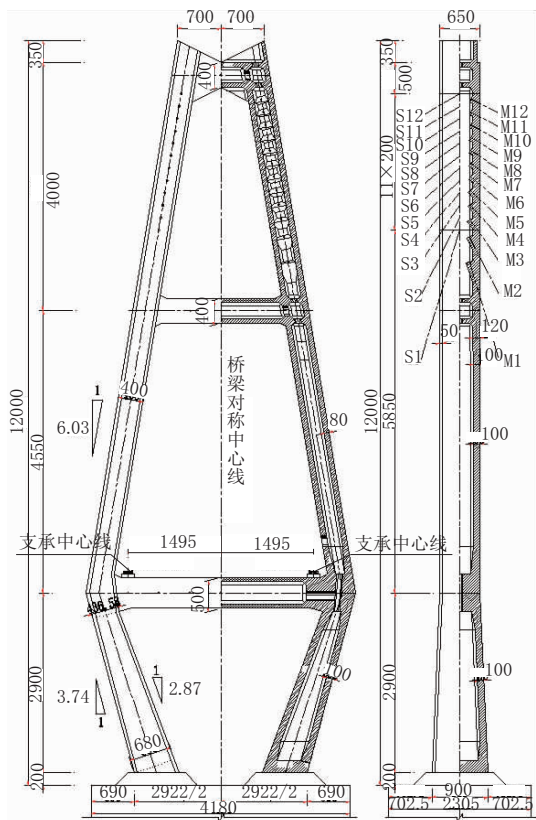


图 4 主塔一般构造图(单位:cm)

斜拉索在塔上采用扇形布置,每个索塔均设 12 对,塔上锚固方案比选了钢锚梁、钢锚箱和预应力锚固形式,鉴于主桥规模和塔柱尺寸,经技术经济比选后推荐“井”字形预应力锚固。塔上斜拉索锚固间距 2 m,锚固在塔柱内壁的锯齿块上,锚固区布置了“井”字形预应力,以抵抗斜拉索拉力产生的水平分力。

主塔基础采用 24 根 $\phi 2.5\text{ m}$ 的端承桩,承台采用圆端型,平面总尺寸为横桥向 41.8 m,顺桥向 23.05 m,厚 5.5 m。承台顶设 2.0 m 的塔座,承台底设 1.0 m 封底混凝土,桩基最长约 120 m。

2.4 斜拉索设计

斜拉索采用空间双索面扇形布置,主塔各分布 12 对索,全桥共 96 根索。为提高成品索使用耐久性,斜拉索采用锌-铝合金镀层平行钢丝,斜拉索抗拉强度为 1 770 MPa。根据索力的不同,采用 PES7-163、PES7-199、PES7-253 和 PES7-313 共 4 种规格,拉索最长无应力索长 156.462 m,单根最大质量为 14.795 t。斜拉索减震措施包括斜拉索表面设置防风雨振动双螺旋线、斜拉索套筒内均设置减震橡胶块并在梁端安装外置阻尼器减震装置。外置阻尼器安装在桥面以上 3.5 m 高度处,确保能提供 3% 以上

附加阻尼,行程满足最大振幅 $1/1\ 700\ L$ (L 为索长) 的要求。

3 结构抗震计算及抗风研究

3.1 抗震计算分析

桥址区地震动峰值加速度值为 $0.15g$,桥梁抗震设计要求高。为有效减小主塔地震力,主桥主梁与主塔往往采用纵向阻尼器相连。为了确定阻尼器的合理设计参数,对阻尼参数进行了敏感性分析。

采用非线性阻尼器,阻尼力与相对速度关系可表示为: $F=CV^\alpha$, 其中 F 为阻尼力, C 是阻尼系数, V 是速度, α 是速度指数。

从抗震设计经验看,大跨径桥梁阻尼器的速度指数 α 常用值一般在 0.3 ~ 1.0 范围内。取速度指数 $\alpha=0.3、0.5、0.7、1.0$, 阻尼系数 C 变化范围为 1 000 ~ 20 000, 对主桥进行非线性时程响应分析。

阻尼器参数对主梁梁端位移的影响、对主塔塔顶位移的影响、对主塔塔底弯矩的影响见图 5 ~ 图 7; 阻尼器参数对阻尼器自身位移的影响、对自身内力的影响见图 8、图 9。这些曲线图表明,设置阻尼器可以显著减小梁端位移和主塔塔底弯矩。

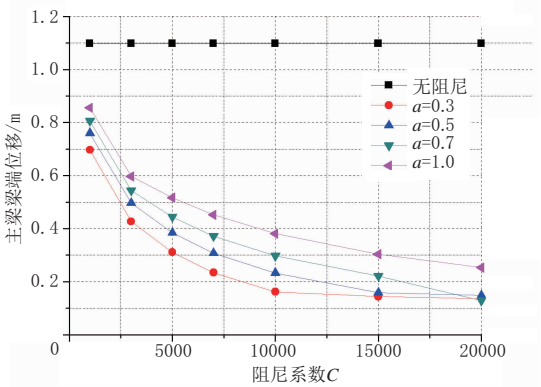


图 5 阻尼器参数对主梁梁端位移的影响

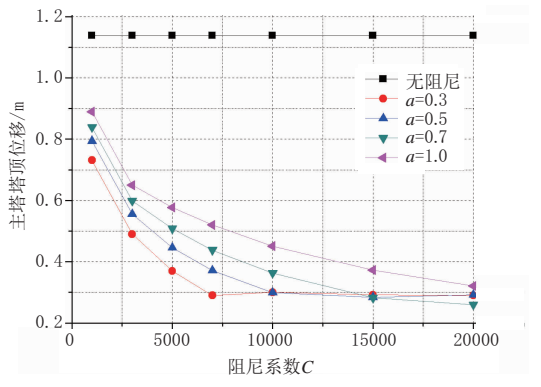


图 6 阻尼器参数对主塔塔顶位移的影响

由图 5~ 图 9 可见,当阻尼器的速度指数 α 一定时,随着阻尼系数 C 的增加,主梁梁端位移、阻尼器位移逐渐减小,而阻尼力则逐渐增加;主塔塔底弯矩

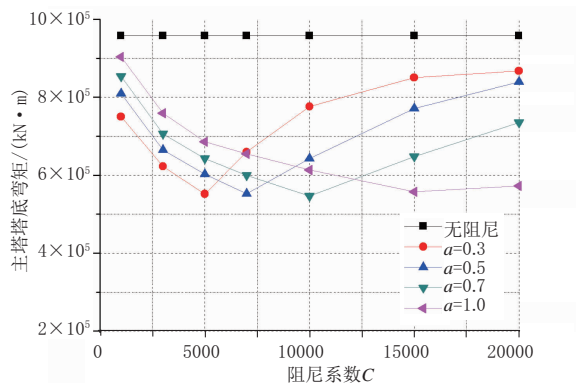


图7 阻尼器参数对主塔塔底弯矩的影响

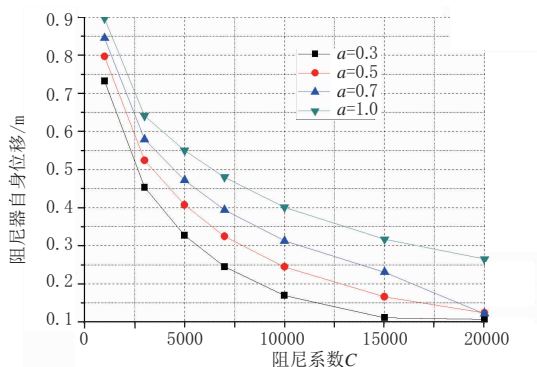


图8 阻尼器参数对阻尼器自身位移的影响

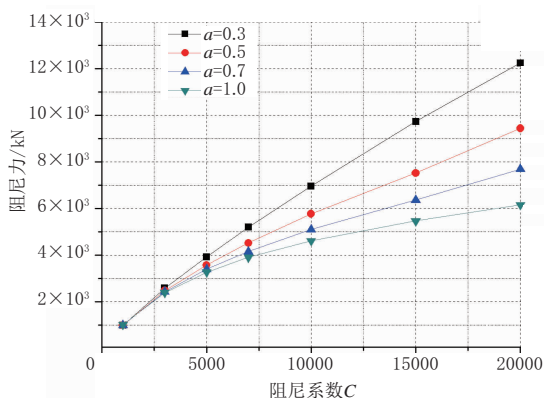


图9 阻尼器参数对阻尼器自身内力的影响

在速度指数 α 取 0.3、0.5 或 0.7 时开始随着阻尼系数 C 的增大而减小,超过某一范围后又随着阻尼系数 C 的增大而增大,而在速度指数取 1.0 时随着阻尼系数 C 的增大而减小。

另一方面,当阻尼系数 C 一定时,阻尼器自身位移、主梁梁端位移随着阻尼器速度指数 α 的增大而逐渐增大,阻尼力随着阻尼器速度指数 α 的增大而逐渐减小;塔顶位移、主塔塔底弯矩在某一范围内随着阻尼器速度指数 α 的增大而逐渐增大,超过该范围则随着阻尼器速度指数 α 的增大不再有该变化趋势,在 α 取某些值时,反倒有随着 α 的增大而减小的趋势。

由此可见,随着阻尼器参数的变化,主梁梁端位

移与阻尼力的变化趋势相反,而主塔塔底弯矩在某一范围内与主梁梁端位移及塔顶位移变化趋势一致。因此,在没有一个变量是控制因素的情况下,较好的做法是折中取值,阻尼器的速度指数 α 取为 0.4,阻尼系数 C 取为 3 000 ~ 5 000 较为合适,此时各控制截面弯矩相对最小,主梁梁端位移减小值也基本达到最优。

阻尼器参数对主梁梁端位移等的影响见表 1。

表 1 阻尼器参数对主梁梁端位移等的影响

序号	阻尼系数 C	梁端位移 / m	塔顶位移 / m	塔底弯矩 / (kN·m)	阻尼力 / kN	阻尼器速度指数 α
1	5 000	0.350	0.411	5.788×10^5	3 714	0.4
2	4 000	0.400	0.461	6.092×10^5	3 136	0.4
3	3 000	0.463	0.525	6.452×10^5	2 515	0.4
4	0	1.098	1.138	9.579×10^5	0	0

由表 1 可见,在阻尼器速度指数取 0.4,阻尼系数分别取 3 000 和 5 000 时,与未加阻尼器时比较,在不计恒载位移情况下,主梁梁端位移分别减小了 58% 和 68%,塔顶位移分别减小了 54% 和 64%,塔底弯矩分别减小了 33% 和 40%。

阻尼器参数敏感性分析结果表明,阻尼器的速度指数 α 取为 0.4,阻尼系数 C 取为 3 000 ~ 5 000 较为合适,此时,主梁梁端位移减小了 58% ~ 68%,塔顶位移减小了 54% ~ 64%,塔底弯矩减小了 33% ~ 40%。

3.2 抗风性能研究

抗风性能专题研究^[3]进行了节段风洞试验和全桥气动弹性模型风洞试验研究。

(1)该桥成桥运营状态竖弯和扭转基频分别为 0.314 3 Hz 和 0.870 3 Hz,扭转频率比为 2.769;最长单悬臂状态为最不利施工状态,竖弯和扭转基频分别为 0.344 3 Hz 和 0.961 2 Hz,扭转频率比为 2.792;最长双悬臂状态竖弯和扭转基频分别为 0.215 7 Hz 和 1.042 9 Hz,扭转频率比为 4.835。

(2)桥位基本风速 $V_{10}=39.4$ m/s,地表粗糙度系数为 0.16,主梁设计基准风速为 49.5 m/s,成桥状态桥梁颤振检验风速为 77.2 m/s。施工重现期取为 30 a,施工阶段的设计基准风速为 41.4 m/s,施工阶段颤振检验风速为 64.6 m/s。成桥阶段静风失稳检验风速为 59.4 m/s,施工阶段静风失稳检验风速为 49.7 m/s。

(3)主梁断面进行了几何缩尺比为 1 : 45 的节段模型风洞气动力系数测试试验,通过六分力天平测

得主梁断面成桥态和施工态三分力系数。试验风攻角范围为 $-10^{\circ} \sim +10^{\circ}$, 间隔为 1° 。主梁断面风攻角为 0° 时, 施工状态的气动阻力、升力和俯仰扭矩系数分别为 1.291 4、-0.040 1 和 0.034 9; 成桥状态气动阻力、升力和俯仰扭矩系数则分别为 1.563 9、-0.083 1 和 0.014 6。

(4)采用节段模型直接试验法对成桥状态和最大双悬臂状态进行了 $\pm 3^{\circ}$ 范围内风攻角情况下的颤振稳定性试验, 结果表明采取双下稳定板气动措施后, 成桥状态和最大双悬臂状态的颤振临界风速均大于 108 m/s, 颤振稳定性满足《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)要求, 大桥具有足够的抗风稳定性。

(5)采用节段模型进行了涡激共振试验。为防止成桥运营状态 $+3^{\circ}$ 攻角时的涡激共振振幅超限, 主梁断面气动措施推荐采用双下稳定板方案, 气动改良后成桥运营状态在 $\pm 3^{\circ}$ 风攻角范围内不会发生振幅超过《公路桥梁抗风设计规范》容许值的竖弯和扭转涡激共振。

(6)采用 Ansys 有限元分析软件对成桥态和最大双悬臂状态进行抖振时域有限元分析, 得到了主梁和主塔关键截面内力及关键节点位移响应平均值、根方差和极大值, 经计算结构满足《公路桥梁抗风设计规范》要求。

4 结 语

(1)主桥采用(138+300+138)m 的 3 跨连续纵向半漂浮体系, 边跨跨越市政道路, 取消了常规辅助墩设计, 通过将过渡孔 38.5 m 简支小箱梁作为主梁端

压重梁, 有效减小了边跨主梁段压重荷载。

(2)主梁采用双工字形截面主梁, 便于制造、运输和架设, 整体造价较低。该桥主梁用钢量为 397 kg/m^2 , 造价经济。

(3)为有效解决桥面板开裂问题, 本文研究了主塔支点负弯矩区桥面板局部应力分布, 提出了局部采用超高韧性混凝土材料(UHPC)桥面板方案, 以提高结构耐久性。

(4)本桥为城市桥梁, 景观设计要求高, 以揭阳市花“莲花”为设计主题元素, 主塔造型从含苞待放的“水上莲花”中抽象而出, 其造型简洁大方, 线形极为流畅, 把桥梁建筑融入到了桥梁结构美学之中, 已成为揭阳市的标志性桥梁建筑之一。

(5)桥址区地震动峰值加速度为 $0.15g$, 抗震要求高。阻尼器参数敏感性分析结果表明: 阻尼器的速度指数 α 取为 0.4, 阻尼系数 C 取为 3 000 ~ 5 000 较为合适, 此时各控制截面弯矩相对最小, 主梁梁端位移减小值也基本达到最优。

(6)本桥设计基本风速 39.4 m/s, 抗风性能要求高。风洞试验表明, 在外侧小纵梁处设 2 道下稳定板的气动措施可提高颤振临界风速, 降低涡激共振振幅, 使大桥具有足够的抗风稳定性。

参考文献:

[1] 广东省交通规划设计研究院股份有限公司. 广东省揭(阳)至惠(来)高速公路揭阳市区连接线(第 1 标段)两阶段施工图设计[Z]. 广州: 广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 2015-11.

[2] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

[3] 同济大学. 揭(阳)至惠(来)高速公路揭阳市区连接线工程《莲花特大桥主桥结构抗风性能研究》报告[Z]. 上海: 同济大学, 2016-06.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com