

文章编号: 0451-0712(2006)11-0057-05

中图分类号: U442.54

文献标识码: B

高赞大桥主跨斜拉桥设计简介

梁立农, 宋神友, 郭文华, 邱新林

(广东省公路勘察规划设计院 广州市 510507)

摘 要: 介绍正在施工的高赞大桥的设计概况, 该桥主跨为 280 m 的双塔单索面预应力混凝土斜拉桥, 塔墩梁固结, 边跨设辅助墩, 主塔为六边形空心独柱式, 主墩为双薄壁矩形柔性墩, 主梁采用抗风性能优越的大悬臂单箱三室的准三角形断面。主桥采用综合调索法确定成桥状态恒载内力。在合龙后, 为调整主梁根部及跨中内力进行了合龙后调索。除常规分析计算外, 还做了全桥的施工及使用过程的块体单元仿真分析。

关键词: 高赞大桥; 斜拉桥; 设计; 仿真分析; 准三角形主梁

1 桥址概况

高赞大桥位于佛山市顺德区西南部, 连接顺德市的杏坛镇和容桂镇, 为佛山市“横九”主干线的一部分。由广东省公路勘察规划设计院设计。

桥址属珠江三角洲平原区, 地势平坦、水网密集。主桥跨越容桂水道, 与河流基本呈正交, 常水位时江面宽约 280 m, 流速在 2~3.0 m/s 之间, 1/300 频率的设计水位 5.304 m (珠基)。最高通航水位 3.86 m, 桥位离下游 90° 的急弯起点约 350 m, 离弯道中心约 600 m, 受此急弯河水动力的影响, 主河槽偏西岸, 且西岸杏坛侧河床常年冲刷, 在离河堤坡脚 30 m 处形成一处高 4 m 左右的垂直陡坎, 最高通航水位时水深达 14~21 m, 并伴有漩涡, 东岸容桂侧河床常年淤积, 水深较浅, 但由于水流较快而淤积不明显。

本区属亚热带海洋性季风气候, 为华南沿海台风区, 每年 5 月~11 月为台风季节, 1/100 频率 10 m 高处 10 min 平均风速 $V_{10}=33.44$ m/s; 该区最高气温 38.7℃, 最低气温 -0.4℃, 7 月平均气温 28.7℃, 1 月平均气温 13.1℃, 年平均气温 21.9℃; 年平均降水量 1 639 mm, 最大降水量 2 000 mm, 多年平均相对湿度为 78%。

桥位区域岩层稳定, 新鲜基岩上部覆盖有滨海相的软土、粉细砂及河流冲积相的中粗砂、粉细砂、卵石层, 厚度 20~40 m, 不同风化程度的花岗岩风化层厚度在 1.5~12.6 m 之间, 其单轴极限抗压强

度离散性较大, 在 24~135 MPa 之间变化, 均值推荐 $R_a=60$ MPa, 为硬质岩石。

桥位地下水埋藏较浅, 一般 0.3~2 m 不等, 分为第四系松散岩类孔隙水和基岩裂隙水两类, 主要存在于砂及卵石中, 地下水对混凝土无腐蚀性。

2 主要技术标准

主线线型标准: 平原微丘区一级公路。

计算行车车速: 100 km/h。

设计荷载: 汽车—超 20 级; 挂车—120。

人群: 3.5 kN/m²。

桥面宽度: 主桥宽度 30.5 m, 整幅布置; 引桥宽度 2×14 m, 分幅布置; 行车道净宽 2×13.0 m, 双向 6 车道。

路基宽度: 35 m。

通航标准: 通航净宽 190 m, 通航净高 18 m。

最高通航水位: 3.86 m (珠基)。

防撞标准: 主航道按 3 000 t 级船舶考虑。

地震基本裂度: 6 度。

设计洪水频率: 1/300。

3 总体设计

本项目西接杏坛镇工业区二环路, 与规划的北滘~均安一级公路交叉并设互通立交, 跨越容桂水道后东连容桂镇红旗中路城市主干道。本工

程规模路线全长 4 233.8 m, 其中桥长 1 730 m (主桥长 580 m, 引桥长 1 150 m); 引道长 2 506 m。

平面基本采用规划线位, 设一个平交点, 平曲线半径为 5 000 m; 纵断面跨越容桂水道设双向 3.5% 纵坡, 坡顶凸型竖曲线半径为 11 000 m, 坡底凹型竖曲线半径为 10 000 m。

3.1 主墩布置

3.1.1 杏坛侧主墩布置

由于桥位下游约 350 m 处有 90°急弯, 杏坛侧河床离河堤坡脚 30 m 处由冲刷形成一处高为 4 m 左右的垂直陡坎, 陡坎离航道边线仅 20 余 m, 在最高通航水位时水深达 15~22 m, 并伴有漩涡, 因此杏坛侧主墩宜设在河堤坡脚下的平台上, 承台边离河堤坡脚约 10 m, 以满足水利部门对基础距河堤坡脚线净距大于 5 m 的要求。这种布置, 不改变河势, 特别有利于急弯航道处船舶航行安全和桥墩防撞安全, 常水位施工等同于在岸上施工, 非常方便, 有利于质量和工期控制, 经综合比较能减少工程造价。为减少河道冲刷对主墩基础的影响, 在主墩上下游两侧各 50 m 范围内对河滩进行抛石护坡处理。

3.1.2 容桂侧主墩布置

根据地形及航道情况, 容桂侧主墩比选了三个方案。

方案一: 仅从满足 190 m 通航要求出发, 主跨取 250 m 即可, 但主墩布置在水深为 10~13 m 的深水中, 施工费用大, 且承台离航迹线太近, 增加了船舶航行的不安全因素及主墩被撞击的概率, 增加了防撞设施的建设及养护费用, 当然, 跨径较其他方案小, 上部构造费用有所减少, 但总的建安费用与方案二相当。

方案二: 将主墩布置在水深约 3.0 m 的河堤边的浅滩上, 主跨达 280 m, 基础采用钢板桩筑岛围堰施工, 主墩工期较方案一减少 1 个月以上, 总工期也较方案一稍短, 同时, 施工质量容易保证, 运营期间, 对船舶航行基本没有影响, 防撞费用较少。

方案三: 将主墩置于内堤之外的鱼塘中, 主跨达 320 m, 基础施工方便, 对船舶航行没有影响, 但总工期较方案二长 1.5 个月, 造价较方案二高 1 500 万元。

经以上综合比较, 选用方案二, 主跨跨径 280 m。

3.2 桥型方案比选

对于 280 m 跨径的桥梁来说, 斜拉桥、拱桥、悬索桥、连续刚构均是技术可行的。通过设计投标中多个方案、多种桥型的比选, 我院的斜拉桥方案以其技

术经济上最合理、景观优美而中标, 故本桥确定为斜拉桥方案, 对不同风格的斜拉桥方案进行了比选。

3.2.1 斜拉桥方案比选

就斜拉桥方案而言, 形式非常丰富, 从塔数来说, 有单塔、双塔之分, 但本桥双塔方案的技术经济性明显优于单塔, 造价更低、施工更易、工期更短, 故本桥确定为双塔方案, 并进行以下三个方案的比选。

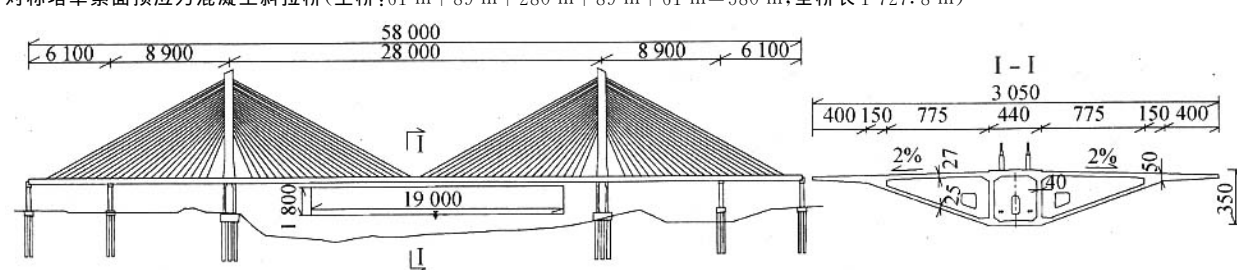
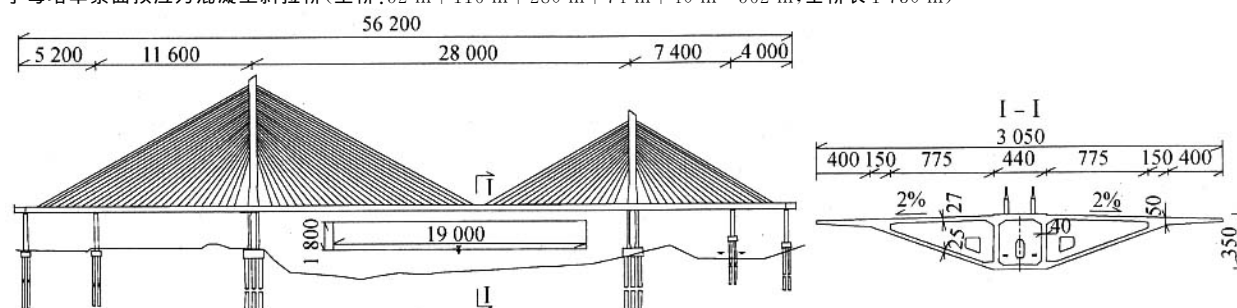
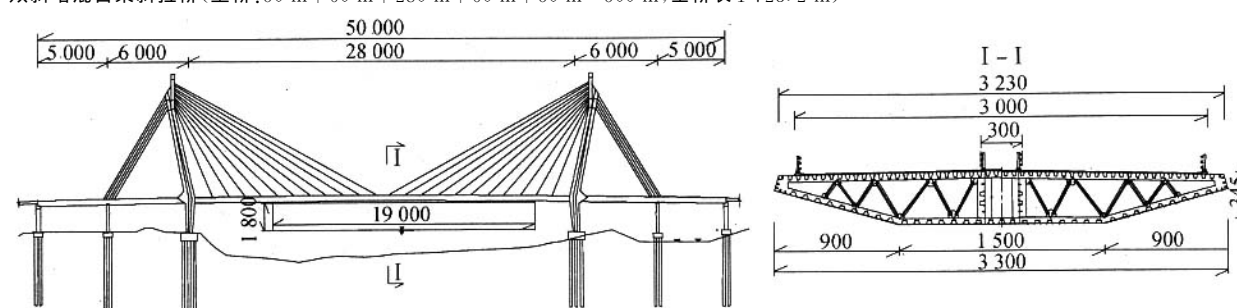
方案一: 主桥为对称塔单索面预应力混凝土斜拉桥, 桥跨布置为 61 m + 89 m + 280 m + 89 m + 61 m, 桥长 580 m, 在边跨内设置辅助墩以改善结构内力, 主梁采用力学性能优越的三角形断面, 梁高 3.5 m, 梁宽 30.5 m, 主塔选用简洁的单箱独柱断面, 配双薄壁矩形柔性墩, 钻孔灌注桩低桩承台, 与主梁构成塔墩梁固结的刚构体系, 桥面以上塔柱高 70 m。引桥采用先简支后连续的小箱梁桥, 单幅独柱墩大悬臂盖梁, 全桥长 1 727.8 m。

方案二: 主桥为子母塔单索面预应力混凝土斜拉桥, 桥跨布置为 52 m + 116 m + 280 m + 74 m + 40 m, 桥长 562 m, 桥面以上高塔塔柱高 80 m, 矮塔塔柱高 56 m。辅助墩、主梁、主塔、基础、结构体系及引桥设计类同方案一, 全桥长 1 730 m。

方案三: 主桥为双斜塔混合梁斜拉桥, 桥跨布置为 50 m + 60 m + 280 m + 60 m + 50 m, 桥长 500 m。在边跨内设置辅助墩, 中跨采用单索面扁平钢箱梁, 梁高 3.45 m, 梁宽 32.3 m, 边跨采用双索面预应力混凝土箱梁, 且拉索集中平行锚固于辅助墩附近的箱梁上, 梁高 3.5 m, 主梁的钢混结合面选在离塔中心 6.5 m 处的中跨侧, 边跨混凝土箱梁现浇施工, 中跨钢箱梁拼装施工, 主塔下塔柱微向中跨倾斜, 自桥面中心起向河堤侧倾斜并在塔冠处合成一体, 塔柱为五角形空心断面的钢筋混凝土结构, 塔冠因造型及受力复杂而采用钢混组合结构。为平衡折线形塔柱内力而采用塔墩梁固结体系。为适应混凝土收缩、徐变及温度等作用而采用三薄壁矩形墩, 并与中塔柱五角形外观一致, 以上下协调。桥面以上塔柱高 80 m。引桥类同方案一, 全桥长 1 723.2 m。各主桥方案简图及综合评价见表 1。

三个方案均布置辅助墩以增加体系刚度, 减少塔梁内力。如方案一活载工况时, 能减少中跨 20% 的挠度, 减少主梁中跨根部 44%、中跨跨中 21.8%、边跨跨中 10.7% 的弯矩, 减少主塔塔顶 44% 的水平位移, 减少拉索 46.8% 的应力幅, 辅助墩的设立降低了尾索应力幅, 使“尾索”的概念逐步淡化, 边中跨比不

表 1 桥型方案比较

方案一	<p>对称塔单索面预应力混凝土斜拉桥(主桥:61 m+89 m+280 m+89 m+61 m=580 m,全桥长 1 727.8 m)</p>  <p>单位:cm</p> <p>综合评价:塔形对称,与两岸平原景观协调;单索面配三角形主梁断面布置,基础紧凑,造型简洁,美观大方,行车视野开阔;塔墩梁固结,主梁悬浇,施工方便,技术成熟,力学性能好;预应力混凝土结构,沥青铺装,耐久性好,养护费低;一桥跨越主航道对通航影响小;工期较方案二少半个月,建安费 12 537 万元。</p>
方案二	<p>子母塔单索面预应力混凝土斜拉桥(主桥:52 m+116 m+280 m+74 m+40 m=562 m,全桥长 1 730 m)</p>  <p>单位:cm</p> <p>综合评价:塔形不对称,一高一低,生动活泼,别具风格,高塔边跨跨越宽阔的内外堤滩地,与两岸地形协调,但从远处看则与两岸平原景观欠协调;其他方面与方案一类同;但施工难度更大,建安费 12 640 万元,比方案一稍贵。</p>
方案三	<p>双斜塔混合梁斜拉桥(主桥:50 m+60 m+280 m+60 m+50 m=500 m,全桥长 1 723.2 m)</p>  <p>单位:cm</p> <p>综合评价:桥塔双向倾斜近似钻石形,中跨单面密索而边跨集中双面布索并全部锚于鹰头塔冠,全桥以跨中对称,与两岸平原景观协调,整体造型酷似多人隔岸拔河,栩栩如生,别有风味,构形优美;一桥跨越主航道对通航影响小;双向斜塔、混合梁、钢混组合结构的塔冠使得施工难度较大,养护费较高;钢桥面沥青铺装有难度;工期与方案二持平;建安费 14 988 万元,比其余方案贵。</p>

必拘于 0.4 倍左右而可突破 0.5,边中跨拉索可完全对称布置,简化了边跨主梁设计,使立面上舒展对称的美学期望得以实现,同时辅墩的设立可提前结束主梁悬浇施工中的双悬臂阶段,对大桥施工期的抗风有利。

由于本桥为六车道城市桥,桥总宽将超过 30 m,而桥墩却较矮,只有 20 m 左右,因此总体造型上单索面布置使桥墩更紧凑、更简洁、景观更协调,而且单索面方案可充分利用中央分隔带而节约投资

(比双索面桥面窄 2 m 左右)。

综上所述,三种桥型方案均可行,但从景观协调性、施工养护难度、造价等方面来说,方案一更优,故将对称塔单索面预应力混凝土斜拉桥作为推荐方案。

4 主桥结构设计^[2]

4.1 主墩基础及下部结构

主墩采用双薄壁矩形柔性墩,壁厚为 2.5 m,横

向宽 15 m, 双壁中心距为 6 m。由于地面以上墩的自由长度仅为 20 m, 为降低墩身混凝土的收缩徐变及温度内力而采用低桩承台设计, 承台厚 5.5 m, 使墩高达 23.3 m, 主墩采用 14 根直径为 2.5 m 的钻孔桩基础, 按嵌岩桩设计。容桂侧主墩位于浅滩上, 最高通航水位时水深达 6 m, 有被船撞的可能, 因此, 研究了以下三个防撞方案。

(1) 在承台周边航道侧修筑 80 cm 厚的钢筋混凝土防撞墙。

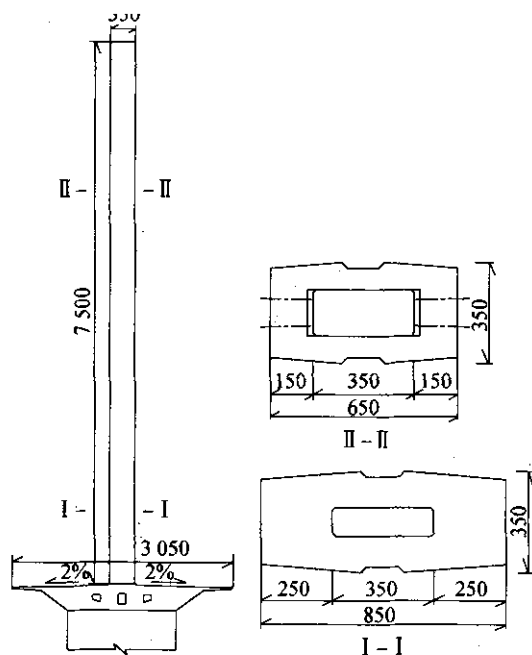
(2) 在承台航道侧设 3 根直径为 2.5 m 的防撞桩, 并在桩顶以钢筋混凝土圈梁连成一体。

(3) 在承台航道侧抛石筑岛与迎水面形成 15° 倾角, 让船舶自然搁浅。

方案(3)经济、美观, 对保护船舶和桥墩均非常有利, 经水工实验验证后, 可推荐采用。

4.2 主塔

主塔配合单索面总体设计而采用独柱结构, 菱形空心断面, 宽边中部刻槽以求美观。主塔高度为 101.882 m, 桥面以上有效高度 70 m, 高跨比为 1:4。塔柱横桥向宽 3.1~3.5 m, 壁厚 1.05~0.75 m, 顺桥向下段宽为 8.5~6.5 m, 壁厚 2.5~1.5 m, 上段等宽 6.5 m, 壁厚为 1.5 m, 主塔构造见图 1 所示。为平衡斜拉索的水平分力, 在塔冠内设置了 $\phi 32$ mm 井字形预应力精轧螺纹钢粗钢筋。独柱形桥塔施工方便, 外形简洁挺拔, 大方美观。



单位: cm

图 1 主塔一般构造

4.3 主梁

与单索面相配的预应力混凝土主梁断面主要有以下几种形式:

(1) 单箱三室带大悬臂的准三角形断面;

(2) 单箱三室准三角形断面;

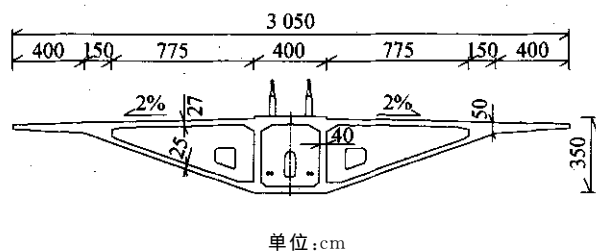
(3) 单箱二室三角形断面;

(4) 单箱单室带大悬臂并在箱内设预应力斜拉杆的倒梯形断面;

(5) 单箱三室带大悬臂的倒梯形断面;

(6) 单箱五室带大悬臂的倒梯形断面。

对于双向受力结构的单索面斜拉桥来说, 单箱三室带大悬臂的准三角形断面的横向几何构形与其横向荷载内力分布的配合较好, 抗扭刚度满足要求; 对应的准三角形横隔板减轻了自重, 连同底板的缩窄, 总体上比梯形断面降低了约 5% 的恒载, 提高了经济性; 而且抗风性能优越, 有利于强风地区的施工和运营安全; 因此采用了该断面形式, 如图 2 所示。



单位: cm

图 2 单箱三室带大悬臂的准三角形断面

根据桥面系的布置, 主梁宽 30.5 m, 宽跨比为 1:9.18; 梁高 3.5 m, 高跨比为 1:80, 高宽比为 1:8.7。箱梁顶板厚 27 cm, 悬臂板厚 20~50 cm, 底板厚 25 cm, 腹板厚 40 cm, 每道拉索处设一道隔板, 厚度 25~60 cm, 拉索间距为 6 m。主梁除 12.5 m 长的 0 号块及边跨尾段 8.5 m 采用支架现浇外, 其余均采用牵索挂篮悬浇施工。每个标准节段长 6 m, 节段重约 330 t, 合龙段长度 3 m。边跨尾段箱梁加大板厚并用填料作配重。主梁按部分预应力 A 类构件设计, 在箱内按受力需要同时配置体内和体外预应力束, 以提高窄底板的预应力配置效率。

4.4 斜拉索

斜拉索按单索面扇形索布置, 全桥共 168 根拉索, 塔上标准索距为 1.3 m, 梁上标准索距为 6 m, 边跨尾段索距加密至 2 m。拉索采用 $\phi 7$ 扭绞形平行镀锌高强钢丝, 钢丝强度 $\sigma_b = 1670$ MPa, 拉索规格为 PES112~PES213, 外面热挤 2 层 PE 防护材料, 里黑白, 外面白色 PE 层可以降低温度效应并增加美

感。锚具采用抗疲劳性能优异的冷铸镦头锚,主塔内壁拉索锚固处为内凹式槽口,主梁箱内拉索锚固处为外凸式齿板,斜拉索在塔和主梁的出口处均设置了高阻尼橡胶减震器。

4.5 辅助墩及边墩

辅助墩采用柔性薄壁空心墩,墩厚 2 m,横向宽 10 m,基础采用 6 根直径为 1.8 m 的钻孔灌注桩。边墩为悬臂式盖梁配双柱式墩身,以适应引桥小箱梁的布置,其基础为 8 根直径为 1.8 m 的钻孔灌注桩。

4.6 结构体系

基于单索面和施工的考虑,采用塔墩梁固结体系,在主墩处墩宽采用 15 m,边墩和辅助墩处采用拉大支座横向布置,给主梁以扭转约束。在辅助墩及边墩设置横向带缓冲橡胶的限位挡块,在辅助墩竖向设拉索构成拉压支座。

4.7 结构分析计算

静力分析计算了恒载、活载、混凝土收缩徐变、预应力、各种温度变化、风载、汽车制动力、支点沉降、船撞力以及施工荷载等。计算中考虑了拉索的非线性以及梁塔中轴力对变形的二次力效应,索力初值按综合法优化确定,并考虑合龙后的二次调索。活载计算考虑了汽车、挂车、人群、汽车冲击力 4 种活载。结构体系温度按±20℃、主梁上下缘温差按新桥规、塔左右侧温差按±5℃、索与梁塔温差按±10℃考虑,支点不均匀下沉按 2 cm 计算。风载执行抗风设计指南的规定。在运营状态考虑换索需要,计算了更换任一根斜拉索而转换体系后的各构件恒载、活载的内力包络图。对主塔、主梁做了施工及成桥状态的弹性稳定分析,最小失稳安全系数均大于 4,满足规范要求。为了全面考察应力分布及内力传递,采用 ANSYS 程序进行施工和使用状态的全桥仿真分析计算,采用生死单元严格模拟施工程序,牵索挂篮也一并仿真模拟,混凝土构件采用块体单元,挂篮采用壳单元及梁单元,斜拉索采用梁单元并计入当前阶段的等效弹性模量,承台及桩基础用梁单元等效其刚度,混凝土收缩、徐变效应采用等效荷载计入。使用阶段按规范进行了车道和车辆荷载共计 34 种布载工况的计算。

恒载下主梁应力集中系数见表 2。

动力分析^[4]采用单脊梁模型,计入广义等效质量,按抗风设计指南进行施工最长双悬臂、最长单悬臂以及成桥状态的颤振临界风速初步分析,得到施工阶段颤振临界风速 $U_{cr双悬臂}=297\text{m/s}$, $U_{cr单悬臂}=$

表 2 主梁应力集中系数

项目	中跨根部 2 号断面 (上缘/下缘)	中跨 L/4 断面 (上缘/下缘)	中跨 L/2 断面 (上缘/下缘)
剪滞系数	1.11/1.10	1.09/1.08	1.02/1.01
偏载系数	1.15/1.13	1.11/1.09	1.03/1.02
恒载应力集中系数	1.25/1.23	1.18/1.16	1.16/1.15
应力总集中系数	1.23/1.21	1.16/1.13	1.11/1.10

250 m/s,成桥状态颤振临界风速 $U_{cr}=252\text{m/s}$,它们均大于颤振检验风速 $[U_{cr}]=62\text{m/s}$,因 $\min Th^{-1}=2.31<2.5$,故颤振稳定性等级属 I 级,说明桥梁施工状态、成桥状态抗风稳定性十分安全,可以不必进行风洞试验。完成成桥状态模态分析以后,则可采用反应谱理论求解纵桥向、横桥向、竖向地震反应,并作为偶然荷载进行内力、位移组合。而本桥地震效应并不控制设计。

4.8 施工监控

施工程序决定成桥状态的恒载内力,施工索力及预高值通过综合调索法反复迭代后确定,施工分析计算中,必需逐阶段检查各断面的强度及应力是否符合规范要求,如不满足则应修改施工程序和施工索力或修改配筋甚至修改截面尺寸,直至满足要求。施工阶段对主塔及主梁的应力和位移均进行了监测。

本桥采用自适应法进行施工控制,对实际自重、弹性模量、收缩徐变系数等参数进行识别并与设计取值比较,如果误差可以接受,则按原设计方案继续施工,否则应根据识别后的参数重新确定立模标高及施工索力。对立模标高的调整幅度应以保证桥面光滑为原则。在合龙后,为调整主梁根部及跨中的内力,将进行合龙后调索。索力最大误差按 5% 控制。为减少日照温差对主梁挠度和施工张拉索力的影响,确定清晨日出之前进行测量和预应力束张拉,并用节段两端设计高差核查立模标高。

5 小结

(1)通过技术经济和安全的全面比较,采用适应河势的 280 m 跨径过江,以提高 90°弯曲航道处的桥和船的安全。

(2)采用低桩承台以尽量增加墩高,采用双薄壁矩形墩以减少抗弯刚度,即加大墩的柔度以实现在 18 m 通航净高条件采用塔墩梁固结的大跨径单索面预应力混凝土斜拉桥体系。

文章编号: 0451-0712(2006)11-0062-04

中图分类号: U445.463

文献标识码: B

湛江海湾大桥索塔液压自爬模施工技术

汪 溯

(广东省长大公路工程有限公司 广州市 510620)

摘 要: 以湛江海湾大桥上塔柱施工为例,介绍了中上塔柱液压自爬模的施工工艺。

关键词: 湛江海湾大桥; 液压自爬模; 架体; 操作平台; 导轨

1 工程概况

湛江海湾大桥位于粤西的湛江地区,起于湛江市坡头区,于湛江市平乐渡口上游 1.3 km 处跨越麻斜海湾;湛江海湾大桥桥梁全长 3 981.17 m,主桥斜拉桥全长 840.0 m,跨径组成为 60 m+120 m+480 m+120 m+60 m,为双塔双索面混合梁斜拉桥。大桥采用国内首创的火炬形索塔,索塔高 155.11 m。下塔柱为直线形两面收分,中、上塔柱为曲线形四面收分。为平衡斜拉索的水平分力,上塔柱斜拉索锚固区设置环向预应力束。

索塔施工是控制全桥工期的关键工程,也是施

工和技术的难点。根据工程的实际情况,索塔下塔柱采用常规的满堂支架施工,横梁采用墩旁牛腿加落地支架施工;中上塔柱采用国内先进的液压自爬模施工。液压自爬模施工具有劳动强度低、施工进度快、施工质量易于保证的优点。

2 中上塔柱施工

湛江海湾大桥中上塔柱高 107.58 m,整个中上塔柱共分为 25 个节段,其中标准节段 22 节,非标准节段 3 节,标准节段高 4.5 m。液压自爬模体系包括液压爬架、模板、操作平台系统,其功能集自动爬升、

收稿日期: 2006-06-18

(3)在边跨布置辅助墩以增加体系刚度,减少塔梁内力,降低尾索应力幅,使边中跨比不必拘于 0.4 左右而可突破 0.5,简化了边跨主梁设计,使立面上舒展对称的美学期望得以实现,同时辅助墩的设立可提前结束主梁悬浇施工中的双悬臂阶段,对大桥施工期的抗风是有利的。

(4)对于双向受力结构的单索面斜拉桥来说,大悬臂单箱三室的准三角形断面的横向几何构形与其横向荷载内力分布的配合较好,抗扭刚度满足要求,对应 6 m 一道准三角形横隔板减轻了自重,连同底板的缩窄,总体上比梯形断面降低了约 5% 的恒载,提高了经济性,而且抗风性能优越,有利于强风地区的施工和运营安全。

(5)单索面准三角形宽主梁,是国内首次在箱内按受力需要同时配设体内和体外预应力束,可提高窄底板的预应力束配设效率,并首次采用牵索挂篮悬浇施工。

(6)主桥采用综合调索法确定成桥状态的恒载内力,在合龙后进行调索,以优化、调整主梁根部及跨中梁的内力。本桥以自适应法进行施工控制。

(7)主桥除常规计算分析外,还做了全桥的施工及使用过程的块体单元仿真分析,牵索挂篮也一并进行了仿真模拟,全面了解了各构件的应力分布及内力传递,得到了主梁顺桥向恒载及活载的应力集中系数,指导了平面简化设计计算。

参考文献:

- [1] 广东省公路勘察规划设计院. 高赞大桥初步设计[Z]. 2004.
- [2] 广东省公路勘察规划设计院. 高赞大桥施工图设计[Z]. 2004.
- [3] 华南理工大学城市建设研究中心. 高赞大桥有限元仿真分析报告[R]. 2005.
- [4] 华南理工大学城市建设研究中心. 高赞大桥抗风、抗震和稳定性初步分析报告[R]. 2004.