柬埔寨金边市 Norea 矮塔斜拉桥总体设计

胡嘉平　黄　斌
（浙江数智交院科技股份有限公司　杭州　310030）

［摘　要］柬埔寨金边市 Norea 大桥主桥为（108+180+108）m 双塔单索面混凝土矮塔斜拉桥，是柬埔寨最大跨径的矮塔斜拉桥。主桥采用塔梁固结的结构体系、墩梁采用支座连接。项目位于金边市湄公河岸开发区，考虑城市景观需要采用高塔型矮塔斜拉桥，高塔型矮塔斜拉桥兼具斜拉桥的美观性和矮塔斜拉桥的经济性及施工便利性[1~3]。索塔塔冠为高棉建筑风格[4~5]的尖型拱顶造型，塔身也配以高棉建筑风格雕刻。斜拉索采用扇形单索面布置，塔顶通过分丝管贯穿而过，梁端对称锚于主梁中腹板顶部。为节省结构高度保证通航净空并便于施工，通航孔上方的主梁跨中段采用等截面设计。

［关键词］柬埔寨；高塔型；矮塔斜拉桥；单索面；景观设计

1　概述

1.1　工程概况

柬埔寨金边市 Norea 大桥是柬埔寨金边市钻石岛与 Koh Norea 岛（卫星城）之间的连接桥梁，位于金边市东南侧的湄公河与巴萨克河的交汇处，跨越巴萨克河。该项目路线全长 824.34m，桥梁长度 490.5m，是金边市嘉华集团独立投资建设的市政工程项目，于 2020 年 10 月开工建设。项目执行中国规范，道路等级为城市主干道，主桥主跨下设置通航孔，单孔双向通航，通航净空 90m×8m，设计最高通航水位 10.5m。按 1500 吨船舶设防；桥梁荷载等级为城-A 级，设计使用年限为 100 年，桥梁环境类别为 I 类环境。

1.2　主要建设条件

项目区域属热带季风气候，雨量充沛，气温高，终年如夏。每年分为雨季和旱季，其中 7~10 月为雨季，11 月至第二年 6 月为旱季，年平均气温达 29~30℃；每年的 12 月、1 月气温最低，月平均气温为 24℃；每年 4 月气温最高，月平均气温为 35℃。年均降雨量为 1000~1500mm 左右，其中 90%的降水集中在雨季。

根据调查资料及线路主要控制工点的地质钻孔资料，结合区域资料，沿线地层有第四系沉积层、泥盆系砂岩、泥岩等。第四系覆盖层厚度变化大，10~75m 不等，主要为湖积、冲积、冲洪积成因。上部以冲积粉质黏土、湖积淤泥质土为主，中下部以冲湖积硬塑~坚硬状粉质黏土，及冲洪积砂砾层。泥盆系地层：岩性为砂岩、泥岩，青灰色、紫红色，中厚层~中薄层状，钙泥质胶结，以泥质胶结为主，砂岩矿物成分以长石石英为主，砂岩一般较软~较坚硬，完整性一般较差，呈较破碎状为主，部分段受构造挤压，岩芯破碎。

区域以缓慢的地壳抬升为主，经过漫长的地质作用，平原区冲积沉积物厚度大。区域内褶皱、断裂不发育，未见新构造活动痕迹，属于区域构造稳定区，历史上无地震记录，地震基本烈度可按Ⅵ度考虑，地震动峰值加速度为 0.05g。

图 1　桥梁跨河平面布置图（单位：m）

收稿日期：2021-11-29

作者简介：胡嘉平（1976-　），男，正高级工程师，主要从事道路工程工作。

图 2　桥梁景观效果图

2　桥梁方案与总体布置情况

桥梁跨越的巴萨克河属于湄公河主要支流之一，桥位处于两河交汇处，水下地形平坦，水深较浅。两侧岛屿属于湄公河吹填人工岛，桥梁需要跨越现有岛屿的防护堤坝，桥梁总体布置为（20+21）m 预应力混凝土箱梁+（108+180+108）m 混凝土矮塔斜拉桥+2×23m 预应力混凝土箱梁，桥梁全长 490.5m。平面位于直线和缓和曲线上，其中主桥均位于直线段。纵断面受通航和两侧建筑物及引道长度控制，两侧均为 4.6%，主桥纵向为对称布置（支座布置非对称），横桥向亦为对称结构，横坡为 2%。引桥起点侧和终点侧桥台斜交布置，右偏角度分别为 80.0°、104.0°，其余桥墩均为正交布置。主桥整幅布置，桥宽 24.5m，引桥分幅布置，单幅桥宽 11m。

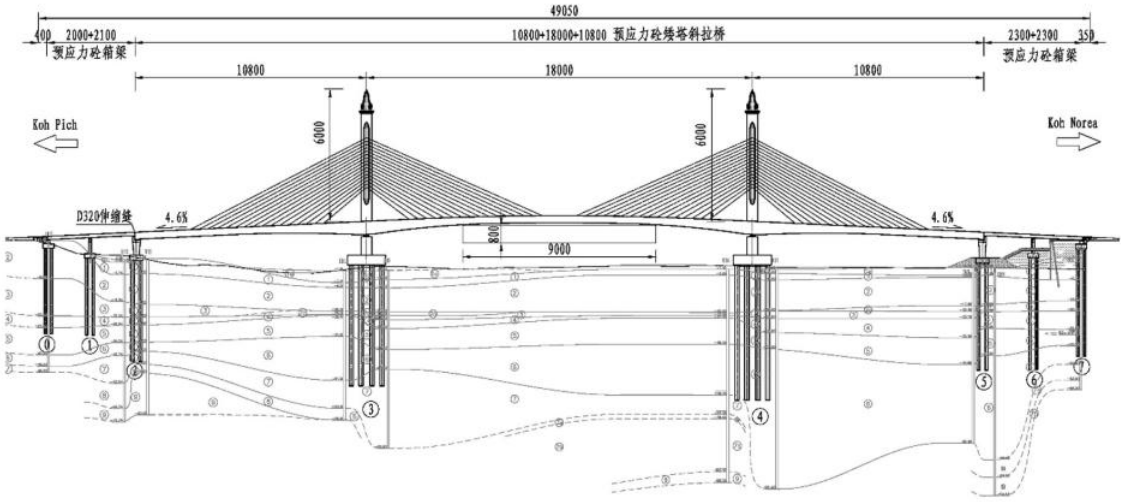

图 3　主桥桥型布置图（单位：cm）

3　主桥设计

3.1　总体设计

考虑到桥位处于湄公河及巴萨克河交汇处且位于两个人工岛的中心地带，综合水文条件、通航要求、景观造型、地质构造，考虑水中桥梁施工难度、桥梁两端接线及对周边建筑的影响等因素，主桥采用双塔单索面混凝土矮塔斜拉桥。本桥主桥墩高较低，为改善受力状态，结构体系采用塔梁固结，墩梁分离的结构体系。

主桥主跨为 180m，边跨 108m，边中跨比例为 0.6。为体现高棉文化效果以及城市景观需要，桥面以上塔高较高，其中索塔塔冠高 11m。桥面以上索塔总高为 60m，考虑塔冠仅为装饰用，塔柱结构高度按照 49m 计，则主桥高跨比达到 1/3.7，远高于常规的矮塔斜拉桥塔高，常规的矮塔斜拉桥桥面以上塔高一般为 1/6～1/10，本桥属于高塔型矮塔斜拉桥。

每个索面采用 16 根斜拉索，横向设双排索，每个索塔共 32 根索。

3.2　主梁设计

主梁箱梁为预应力混凝土结构，混凝土强度等级为 C60，采用单箱三室断面，跨中梁高 3.2m，支点梁高 6.0m。通航孔上方梁段采用等截面设计，既利于通航也便于施工。支点 6.0m

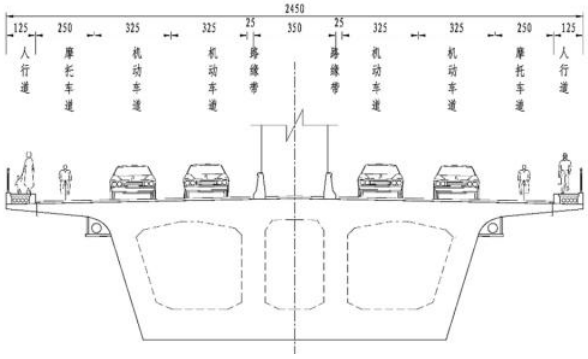

图 4　箱梁典型断面图（单位：cm）

梁高采用二次抛物线渐变至 3.2m 等高段。索塔区域渐变为单箱双室断面，中间箱室采用实心断面与索塔固结。中腹板采用直腹板，边腹板采用斜腹板，改善景观造型。桥面铺装采用 10cm 沥青混凝土+防水层。

主梁节段划分：中跨划分为（5.8m +5×3.2m+16×4.2m +1.0m）×2=180m，0 号节段的长度为 2×5.8 = 11.6m，有索区标准段长度为 4.2m，无索区标准段长度为 3.2m，边跨现浇段长度为 17m。如下图所示：

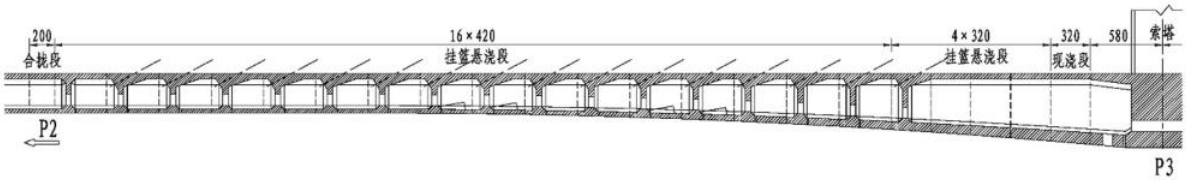

图 5　箱梁节段划分示意图（单位：cm）

3.3　索塔设计

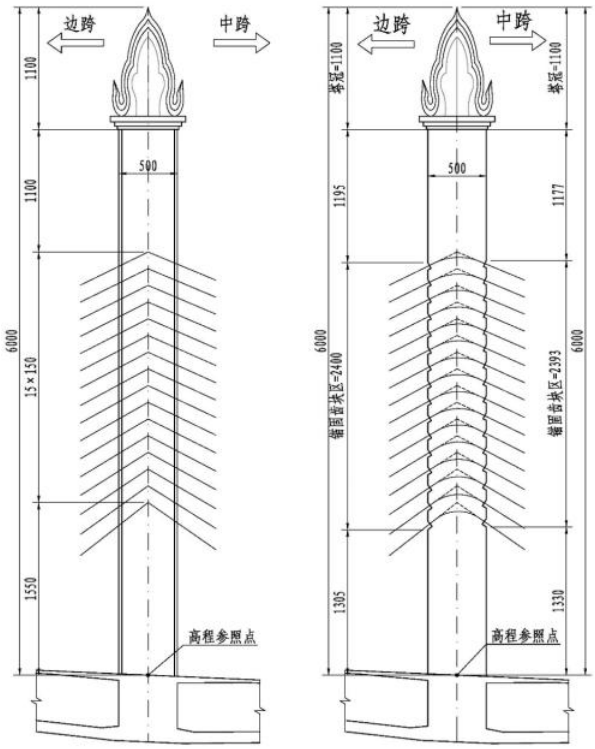

图 6　索塔立面和立剖面图（单位：cm）

索塔布置在中央分隔带上，桥面以上总塔高为 60m。11m 高的塔冠为高棉建筑风格的尖型拱顶造型，塔身也配以高棉建筑风格雕刻。索塔采用实心矩形截面，顺桥向宽 5.0m，横桥向宽 2.8m，倒圆角半径 25cm。斜拉索在横桥向呈双排布置。水平向两排拉索中心间距 1.2m，索塔理论锚固点在高度方向间距为 1.5m。

3.4　斜拉索设计

斜拉索为单索面（水平两排索，间距 1.2m）、扇形布置，每个塔上设有 32 根斜拉索，全桥共 64 根。斜拉索在主梁上纵向间距为 4.2m，塔上竖向间距为 1.5m。斜拉索在塔上连续通过鞍座，拉索两端对称锚于主梁两道中腹板顶部。

斜拉索按体外成品索设计，采用钢绞线斜拉索，抗拉强度标准值 f_{pk} = 1860MPa，根据索力不同，分别采用由 27/31/37 根 φ_s15.2 钢绞线组成的钢绞线，拉索最长 185.684m。

3.5　全桥总体计算

3.5.1　主要技术标准

桥结构安全等级：一级，重要性系数：1.1；

桥梁设计荷载：城 A；

预应力构件类型：桥梁纵向按全预应力构件计算，横向按部分预应力 A 类构件设计，钢

筋混凝土构件裂缝宽度按不大于0.15mm控制；

拉索安全系数：>2.5；设计使用寿命：100年；抗震设防烈度：6度，地震动峰值加速度值0.05g；航道标准：90m×8m，单孔双向通航，船撞设防吨位1500t。

3.5.2 模型建立及分析

主梁结构按照全预应力构件设计。总体静力计算应用有限位移理论，采用MIDAS空间杆系模型，对应于施工过程及构造需要，主梁共离散划分为467个单元。边界条件如下：索塔与主梁固结，墩梁采用支座连接。主桥计算模型见下图：

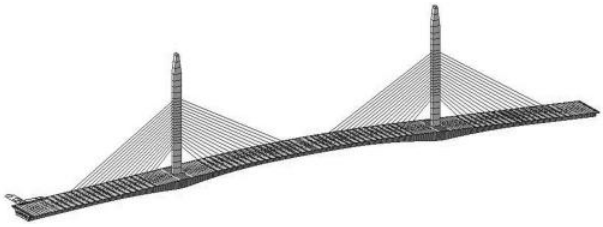

图7 主桥计算模型

3.5.3 计算工况

上部结构验算工况有：

组合1：恒载+活载（恒载包括结构重力、沉降、预加力、收缩徐变等沉降，下同）

组合2：恒载+活载+温度组合（温度组合=体系升温、降温+梁截面温差，以上组合均取包络值，下同）

组合3：恒载+活载+温度组合+汽车制动力+运营纵风

组合4：恒载+活载+温度组合+汽车制动力+运营横风

组合5：恒载+温度组合+百年纵风

组合6：恒载+温度组合+百年横风

3.5.4 主要计算结果

计算表明：持久状况承载能力极限状态下，主梁抗弯承载力满足规范要求，最不利处安全系数为1.16。主梁斜截面抗剪承载力满足规范要求，最不利处安全系数为1.35。结构在持久状况正常使用极限状态下，在最不利频遇组合下，主梁截面上下缘未出现拉应力，上缘最小压应力储备为0.07MPa，下缘最小压应力储备0.83MPa，正截面抗裂验算满足要求。主梁最大主拉应力为0.94MPa，小于1.14 MPa，抗裂验算满足规范要求。

持久状况弹性阶段验算标准值组合，主梁上缘最大压应力为17.89 MPa，主梁下缘最大压应力为14.57 MPa，均在0.5倍混凝土抗压强度标准值的允许范围内。斜截面最大主应力为17.89 MPa，在0.6倍混凝土抗压强度标准值的允许值范围内。

斜拉索最大应力为732 MPa，最大应力幅值为90.2 MPa，最小安全系数2.54。

索塔在成桥状态最大拉应力为0.1MPa，最大压应力为15.1MPa。顺桥向配置44根直径为32mm的普通钢筋，横桥向配置64根直径为32mm的普通钢筋，索塔在裸塔、最大双悬臂状态和成桥状态的承载能力均满足要求，最小安全系数为1.38（成桥状态）。索塔稳定验算最不利工况为最大双悬臂状态的面外失稳模态，其稳定系数为13.5（大于4），满足规范要求。

中跨最大挠度24.6cm，边跨最大挠度12.3cm，满足规范不大于L/600的刚度要求。

3.6 下部结构设计

主桥主墩位于水中，采用实心墩。横桥向13m宽，顺桥向5.0m。墩顶横向设置三个支座，支座间距4.7m。承台为八边形实心承台，高度4.5m，横桥向总宽度24.3m，顺桥向17.7m。桩基设置18根直径2.0m钻孔灌注桩。

主桥边墩（主引桥交接墩）采用实体花瓶墩，横桥向墩底为13.8m宽等宽段，上部通过圆弧段渐变至墩顶20.4m宽度。顺桥向墩底为2.8m等厚段，采用圆弧段渐变至墩顶3.7m。墩顶由于主引桥箱梁高度差，引桥侧墩顶设置1.7m高差的L型盖梁。由于主引桥梁端支座反力差别较大，墩身向主桥方向偏离理论跨径线0.72m，以维持恒载状态下的墩身平衡。

边墩承台为矩形实体承台，高度2.5m，横桥向长17.7m，纵桥向宽6.3m。基础为10根直径1.5m钻孔灌注桩基础。

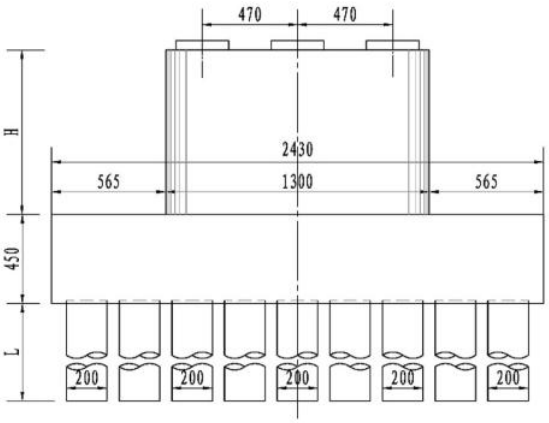

图 8　主墩构造图（单位：cm）

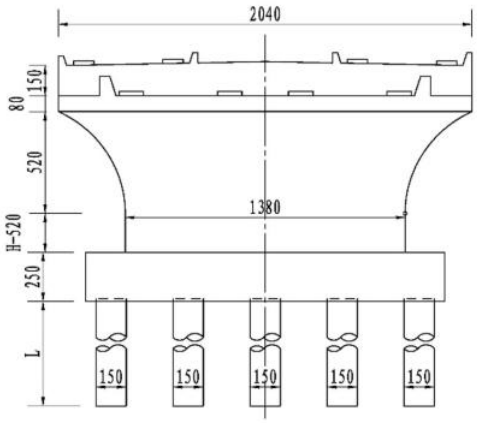

图 9　边墩构造图（单位：cm）

3.7　混凝土结构耐久性设计及措施

项目所在区域日照辐射强烈，昼夜温差大，墩身及塔柱表层日照温度效应显著[6]，已经建成的多个桥梁墩台出现温度裂缝。为提高混凝土耐久性，提出了多项措施予以改善。

3.7.1　提高混凝土保护层质量

①适当加大混凝土保护层厚度。

②提高混凝土密实度。

③采取有效措施控制混凝土裂缝。

3.7.2　控制氯离子含量

采用优质混凝土矿物掺和料和新型高效减水剂复合，配以与之相适应的水泥和级配良好的粗细骨料，形成低水灰比、低缺陷，高密度、高耐久性的混凝土材料。

3.7.3　增加抗裂设计措施

设置混凝土表层钢筋网片以及表层涂装等防裂措施。

4　施工方案

桩基采用钻孔灌注桩施工，水中桩基搭设钻孔平台施工。水中承台双壁带底钢套箱施工。墩身高度不高，采用支架现浇法施工。主梁采用观澜悬浇施工，其中 0 号块采用临时支墩法临时固结。塔柱采用爬模或翻模施工，塔柱与主梁 1 号~4 号节段无索区梁段同时施工，节省工期。

斜拉索由专业厂家制造，运输车运输到施工现场，通过塔侧的塔吊起吊提升至桥面。利用放索架进行斜拉索的桥面展索，利用塔吊配合进行塔端的挂索，利用卷扬机配门架进行斜拉索的梁端挂索。

地质条件复杂，水中主墩逐桩预钻孔，确认持力层地质情况和桩底标高。

5　结语

Norea 大桥的建设对柬埔寨首都金边市拓展城市空间，展示文化特色，提升城市形象具有重要的意义。

高塔型矮塔斜拉桥兼具斜拉桥的美观性和矮塔斜拉桥的经济性及施工便利性，是景观桥梁 100m ~ 300m 跨径范围具有竞争力的桥型。Norea 大桥桥型选择，在解决了城市桥梁景观设计的需要的同时，相比斜拉桥方案体现出显著的造价节省和施工难度的降低。充分体现安全、适用、经济、美观的桥梁设计原则。

通过增加混凝土的耐久性设计措施，改善在特殊气候条件下的混凝土表层裂缝的发生及发展问题。通过施工前逐桩预钻孔的方式，克服项目地质条件复杂多变的难题。

该桥已于 2020 年 10 月开工建设，计划工期 32 个月。

参考文献

[1] 陈从春，周海智，肖汝诚．矮塔斜拉桥研究的新进展［J］．世界桥梁，2016（1）：70-73.

[2] 胡世翔，罗敏，聂娜，林敏．预应力混凝土矮塔斜拉桥常用设计参数研究［J］．城市道桥与防洪，2019，7（7）：76-78.

[3] 袁钰，吴京．高塔型矮塔斜拉桥初探［J］．公路，2008，（1）：74-78.

[4] 谭立峰，温玉清．柬埔寨吴哥古迹建筑与装饰艺术探微［A］．见：第十八届中国民居学术会议，2010：128-130.

[5] 闫媛媛．高棉建筑的艺术特色研究［J］．渭南师范学院学报，2018，33（19）：89-96.

[6] 吕寻博．山区桥梁空心薄壁高墩日照温度场及温度效应研究［D］．长沙：长沙理工大学，2015，3-6.