

某转体斜拉桥的设计分析

饶浩森¹, 徐建根², 杨林³

(1. 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510610; 2. 中交四航局港湾工程设计院有限公司, 广东 广州 510610; 3. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610)

摘要: 某转体斜拉桥跨径布置为(99+250+116)m, 为特大型跨铁路市政桥, 同时跨越多条既有铁路及在建铁路。桥宽42 m, 设置双向8车道。桥塔为矩形混凝土塔, 主梁为预应力混凝土结构, 1号塔处采用塔墩固结并于梁底设置支座, 2号塔处采用塔墩梁固结结构体系。斜拉索采用空间中央索面布置。两桥塔采取转体施工工艺跨越所有股道, 最大转体重量约45 358 t。在同类型桥梁中, 本桥设计及施工难度均较大。重点介绍桥梁总体布置、构造设计、结构计算等情况, 以期为今后类似工程提供有益的设计思路和借鉴经验。

关键词: 斜拉桥; 转体桥; 桥塔

中图分类号: U442.5⁺4; U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)01-0064-05

Design and Analysis of a Rotating Cable-stayed Bridge

RAO Haomiao¹, XU Jiange², YANG Lin³

(1. Guangzhou Urban Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510610, China; 2. Port Engineering Design Institute Co., Ltd., China Shipping Fourth Bureau, Guangzhou 510610, China; 3. Zhongshui Zhujiang Planning, Survey and Design Co., Ltd., Guangzhou 510610, China)

Abstract: The span of a rotating cable-stayed bridge is arranged as (99+250+116) m. The bridge is a large-scale cross-rail municipal bridge, and also spans many existing and under-construction railways. The bridge is 42 m wide with two-way eight lanes. The bridge pylon is a rectangular concrete pylon. Its girder is the prestressed concrete structure. The pylon-pier consolidation is adopted at No. 1 Pylon, and the support is set at the girder bottom. The structural system of pylon-pier girder consolidation is used at No. 2 Pylon. The stayed cables are arranged in a spatial central plane. The two pylons span all the channels by rotating construction technology. The maximum rotating weight is about 45 358 t. Compared with the same kind of bridges, the design and construction of the bridge are difficult. The overall layout, construction design and structural calculation of the bridge are specially introduced in order to provide the beneficial design ideas and reference experience for similar projects in the future.

Keywords: cable-stayed bridge; rotating bridge; bridge pylon

1 工程概况

某双向8车道城市快速路需同时跨越某铁路枢纽多条股道, 为保证工程建设过程中, 最大限度降低工程建设对铁路运营的不利影响, 确保施工期间铁路运营的安全, 拟新建(99+250+116)m斜拉桥^[1], 对两桥塔采取转体施工工艺跨越所有股道, 最大转体重量约45 358 t。

2 主要技术标准

(1) 设计基准期: 100 a。

(2) 设计安全等级: 一级。

(3) 道路等级: 城市快速路。

(4) 设计时速: 80 km/h。

(5) 荷载标准: 城—A级。

为保证上跨铁路桥梁的使用安全, 取双向各车道的车道荷载值按城—A级荷载×1.3安全系数进行设计。

(6) 抗震设防标准: 桥梁抗震设防类别甲类。

工程场地基本烈度为6度, 抗震设防措施等级为7度。设计基本地震动加速度峰值为0.05g, 设计特征周期值为0.35 s。

3 总体方案设计

主桥孔跨布置为(99+250+116)m, 桥面设置双向8车道, 桥宽42.0 m, 整幅布置, 中央分隔带宽4 m(含

收稿日期: 2024-03-11

作者简介: 饶浩森(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

15.2-91、15.2-109。主跨及边跨的索距为6 m,边跨梁端加密为3 m,塔上锚固点竖向间距1.6 m。斜拉索总体布置如图5、图6所示。

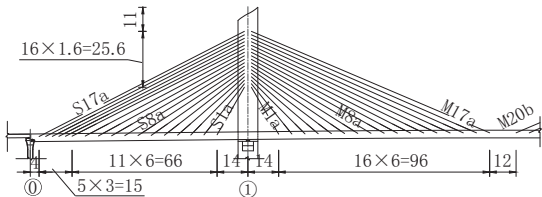


图5 拉索总体布置1(单位:m)

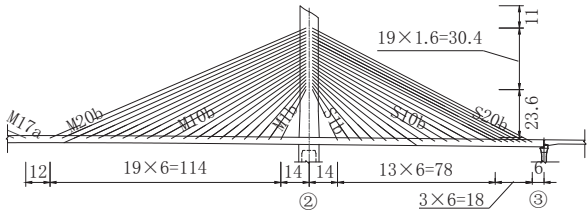


图6 拉索总体布置2(单位:m)

根据《公路斜拉桥设计规范》(JTG/T 3365-01—2020)第7.2.4条,斜拉索的承载力应满足下式要求:

γ₀N_d/A ≤ ϕ_df_d

式中:γ₀为结构重要性系数;N_d为索拉力设计值,N;A为索截面面积,mm²;ϕ_d为索的结构体系修正系数;f_d为索抗拉强度设计值,MPa,短暂状况下设计值宜提高25%。

由表2可知,在持久状况基本组合下,拉索最大应力为866 MPa,小于ϕ_df_d=1 005 MPa,拉索设计满足规范要求。拉索安全系数最小值为1.18。

拉索在短暂施工状态下最大应力为678 MPa,小于ϕ_df_d=1 256 MPa,安全储备较大。

4.4 桥塔验算

桥塔采用C60混凝土,1号塔高61.25 m,2号塔高68.5 m。塔柱锚固区为箱形截面,截面尺寸3.8 m×9.0 m,标准壁厚0.8 m。

斜拉索锚固点横桥向间距1.2 m,纵桥向间距3.2 m,竖向间距1.6 m,关于塔柱中心线对称布置,采用混凝土齿块进行锚固。塔柱在索锚区需要设置环向预应力钢束以抵抗斜拉索的拉力。桥塔构造设计如图7所示。

桥塔作为斜拉桥的重要传力构件,空间受力状态较为复杂,对其整体及局部进行详细分析。

4.4.1 整体验算

桥塔整体在竖向为压弯构件,在基本组合作用下,1号桥塔抗压弯安全系数为1.51;2号桥塔与主梁及墩柱固结,受力更为不利,安全系数为1.17。在频

表2 基本组合下拉索应力计算 单位:MPa

索号	$\frac{\gamma_0 N_d}{A}$	索号	$\frac{\gamma_0 N_d}{A}$	索号	$\frac{\gamma_0 N_d}{A}$	索号	$\frac{\gamma_0 N_d}{A}$
S1a	714	M1a	740	M1b	687	S1b	681
S2a	623	M2a	675	M2b	558	S2b	599
S3a	723	M3a	760	M3b	624	S3b	655
S4a	691	M4a	743	M4b	715	S4b	741
S5a	744	M5a	768	M5b	784	S5b	806
S6a	797	M6a	793	M6b	698	S6b	698
S7a	790	M7a	772	M7b	739	S7b	733
S8a	824	M8a	796	M8b	772	S8b	760
S9a	852	M9a	820	M9b	798	S9b	784
S10a	758	M10a	716	M10b	817	S10b	809
S11a	776	M11a	736	M11b	834	S11b	830
S12a	791	M12a	754	M12b	722	S12b	720
S13a	803	M13a	773	M13b	735	S13b	737
S14a	815	M14a	792	M14b	750	S14b	760
S15a	827	M15a	811	M15b	763	S15b	781
S16a	836	M16a	830	M16b	777	S16b	800
S17a	845	M17a	847	M17b	790	S17b	818
				M18b	812	S18b	834
				M19b	833	S19b	850
				M20b	853	S19b	866

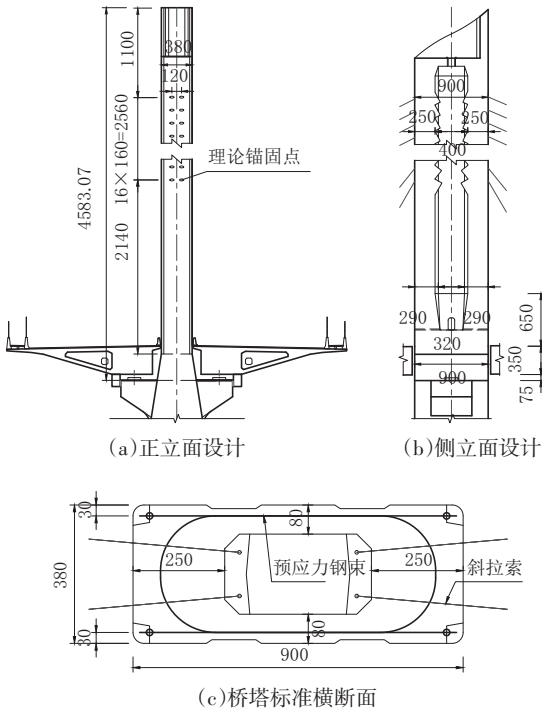


图7 1号桥塔构造设计(单位:cm)

遇组合作用下,1号、2号桥塔裂缝均为0 mm。桥塔在纵向承受斜拉索拉力,受力状态接近拉弯构件,故对其承载力按拉弯构件进行计算。正常使用极限状态按A类构件计算。横断面环框计算表

明 1 号、2 号桥塔侧板抗拉弯安全系数最小值分别为 1.23、1.58。桥塔侧板应力计算如表 3 所列,均有较大安全储备。

表 3 侧板应力计算 单位:MPa

项目	1 号桥塔 计算值	2 号桥塔 计算值	限值
频遇组合正应力	-0.18 ~ -0.9	-0.28 ~ -0.89	1.995
标准组合正应力	-6.2 ~ -10.44	-6.27 ~ -10.45	-19.25
频遇组合主拉应力	0.04 ~ 0.51	0.02 ~ 0.28	1.425
标准组合主压应力	-6.23 ~ -11.0	-6.6 ~ -10.8	-23.1

注:受拉为正,受压为负。

4.4.2 细部验算

采用 MIDAS Fea 对主塔进行实体单元细部分析,在标准组合作用下,1 号桥塔顺桥向最大拉应力 6.65 MPa,最大压应力 17.32 MPa;横桥向最大拉应力 7.93 MPa,最大压应力 16.2 MPa;主拉应力高于 1.96 MPa 的值占比 1.9% 左右,主要发生在拉索张拉区和预应力钢束通过的区域,应加强周边的配筋,主压应力均低于 26.5 MPa,满足要求。

4.5 转体结构验算

1 号转体重约 39 396 t,2 号转体重约 45 358 t,着重介绍 2 号转体系统^[3]。2 号转体上转盘平面尺寸为 20.7 m × 20.7 m,厚 4.5 m,转盘下球铰直径 7.2 m。在平面上,下承台顺桥向 27.3 m,横桥向 30.8 m,厚 5.8 m。转体系统布置如图 8、图 9 所示。

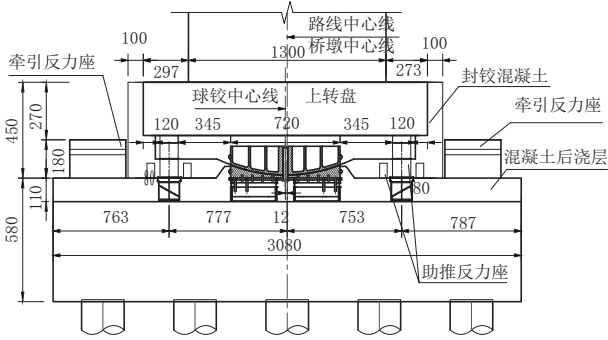


图 8 转体系统横桥向立面(单位:cm)

4.5.1 抗倾覆稳定计算

抗倾覆稳定性是转体施工桥梁的重要设计内容,转体过程中结构不平衡将导致严重后果。转体系统由临时支撑装置(砂箱)、滑道、撑脚、定位销轴等构成。砂箱及撑脚到球铰轴线距离 $r=7.65$ m。对于这些构件的设计必须进行准确的受力分析,保证各构件受力在允许范围内,避免发生破坏,从而保证结构不发生倾覆。

验算时,转体前及转体过程中同时考虑风荷载及纵、横向偏心。风荷载按 30 a 一遇考虑,上部结构

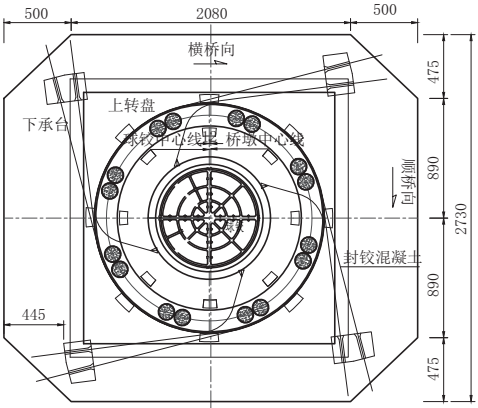


图 9 转体系统平面布置(单位:cm)

偏心值按 15 cm 考虑。两撑脚之间布置有两个砂箱,球铰偏载时,两砂箱与左右两侧各一个撑脚共同受力。转体前,考虑砂箱承担倾覆力矩的 40%。转体过程中,撤走砂箱,主要由撑脚抵抗倾覆力矩。转体前砂箱及转体中撑脚竖向力计算见表 1。

表 4 转体前砂箱及转体中撑脚竖向力计算

工况	横向倾覆力 矩/(kN·m)	纵向倾覆力 矩/(kN·m)	转体前砂 箱竖向力/ kN	转体中撑 脚竖向力/ kN
横风+横向 偏心	299 671		8 618	21 545
纵风+纵向 偏心		177 316	5 099	12 748
横风+纵、横 向偏心	2 996 671	177 316	9 699	44 165

转体前砂箱竖向力最大为 9 699 kN,砂箱直径 1.3 m,采用壁厚 20 mm 的 Q345 钢材作为圆筒,圆筒等效应力为 147.4 MPa,厚 20 mm 的 Q345 钢材板拉压弯强度设计值 310 MPa,故转体前的抗倾覆安全系数为 $310/147.4=2.1$ 。

撑脚采用直径 1 200 mm、壁厚 24 mm 的钢管,内部填充 C55 混凝土,钢材材质采用 Q345 钢,撑脚承载力按照《钢管混凝土结构设计施工规程》(CECS28:2012)第 5.1.1 ~ 5.1.4 条计算。经计算,转体过程中撑脚安全系数为 1.47。

4.5.2 牵引力计算

根据国内外转体桥梁^[2]的大量测试结果,静摩擦系数一般为 0.07 ~ 0.08,动摩擦系数一般为 0.04 ~ 0.05。本桥做控制计算时,静摩擦系数取 0.1,动摩擦系数取 0.06。启动时,静摩擦力 $F=45\,358$ kN;转动过程中,动摩擦力 $F=29\,014.8$ kN。

转体拽拉力计算:

$$T=2/3 \times (R \cdot W \cdot \mu)/D$$

式中: R 为球铰平面半径, $R=360$ cm; W 为转体总重

量, $W=453\,580.1\text{ kN}$; D 为转台直径, $D=17\,100\text{ cm}$; μ 为球铰摩擦系数, $\mu_{\text{静}}=0.1$, $\mu_{\text{动}}=0.06$ 。

计算结果:

启动时所需最大牵引力 $T=2/3 \times (R \cdot W \cdot \mu_{\text{静}})/D=6\,366.0\text{ kN}$; 转动过程中所需牵引力 $T=2/3 \times (R \cdot W \cdot \mu_{\text{动}})/D=3\,819.6\text{ kN}$ 。由已施工完同类型桥的经验知, 实际施工时最大牵引力可取计算值的 1.2 倍。

4.5.3 细部分析

转盘是本桥转体施工的关键部位之一, 其结构受力复杂, 除了对其进行常规的抗弯及抗冲切承载力计算, 有必要对上、下转盘在最不利施工阶段受力状态进行细部分析。从整体模型提取内力作为荷载, 施加于实体单元模型, 计算结果表明上下转盘受力状态良好, 正拉应力最大 1.7 MPa 出现于预应力封锚混凝土位置, 其余值均低于 1.918 MPa , 正压应力最小 -19.3 MPa , 出现于下承台底部, 均小于规范 C55 混凝土的设计限值。

转体时, 上部结构的竖向荷载主要通过上转盘与下转盘之间的球铰传递, 球铰接触面占下转盘面积较小, 故下转盘位于接触面底部区域、上转盘位于接触面顶部区域存在一定拉应力。通过适当配置预应力钢束使上下转盘混凝土拉、压应力在规范允许

范围内, 可以有效地改善上下转盘混凝土的应力状态, 确保上下转盘结构的受力安全。

5 结 语

本文扼要介绍了一座 $(99+250+116)\text{ m}$ 转体斜拉桥的设计情况, 对全桥的整体及局部的主要计算分析结果进行展示, 有以下结论及建议。

(1) 全桥各计算指标均能满足规范要求, 且有一定富余, 结构安全可以保证。

(2) 桥塔主拉应力小范围超过规范限值, 主要发生在拉索张拉区和预应力钢束通过的区域, 应加强周边的配筋。

(3) 上下转盘适当配置预应力钢束对于改善转体施工阶段转体结构混凝土应力状态有显著效果, 是确保转体施工中转盘结构受力安全的有效措施之一。

参考文献:

- [1] 刘斌. 甬舟铁路桃夭门大桥方案研究与设计[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(5): 77-81.
- [2] 左敏, 江克斌. 转体桥平转球铰转体过程应力计算方法研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(12): 36-39.
- [3] 郭亚娟, 李宏哲. 邹城转体斜拉桥转盘结构受力分析[J]. 中外公路, 2013, 33(1): 119-122.

《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

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadfloodbridge@163.com

