

常泰长江大桥主塔下横梁支架设计与施工工艺研究

曾健^{1,2}, 胡培^{1,2}, 王超³

(1.中交武汉港湾工程设计研究院有限公司,湖北 武汉 430040;2.海工结构新材料及维护加固技术 湖北省重点实验室,湖北 武汉 430040;3.中交第二航务工程局有限公司 技术中心,湖北 武汉 430040)

摘要:常泰长江大桥主塔下横梁结构施工具有施工高度高、混凝土方量大、下挠变形难控制的特点。为实施主塔下横梁的浇筑施工,在下横梁处设置落地式钢管支架,用于支撑下横梁模板及承担混凝土浇筑期间的荷载。通过有限元软件分析计算,发现在下横梁支架纵梁的跨中设置“八”字钢管撑,同时在纵梁的中跨和边跨处设置断缝,可以有效控制下横梁主体结构不对称变形,并优化支架的整体受力。支架采用地面组装、焊接,地面验收完成之后再整体吊装的施工方案,理论计算与施工工艺相结合,减少了高空作业,有效保证了支架的施工质量和施工效率,提升了主塔下横梁的浇筑质量,取得了显著的经济效益。

关键词:桥梁施工;下横梁支架;非对称荷载;有限元分析

中图分类号:U445.469

文献标志码:A

Design and Construction Process of Cross-Beam Supports for Main Tower of Changtai Changjiang River Bridge

ZENG Jian^{1,2}, HU Pei^{1,2}, WANG Chao³

(1.CCCC Wuhan Harbour Engineering Design and Research Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China; 2.Hubei Key Laboratory of Advanced Materials & Reinforcement Technology Research for Marine Environment Structures, Wuhan, Hubei 430040, China; 3.National Enterprise Technology Center, CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: The construction of the lower cross-beam structure of the main tower of Changtai Changjiang River Bridge has the characteristics of high construction height, large amount of concrete earth volume, and difficult control of down-warping deformation. In order to implement the pouring of the lower cross-beam of the main tower, floor-type steel pipe supports were set at the lower cross-beam, which were used to support the lower cross-beam formwork and bear the load during the concrete pouring. Through the finite element software analysis and calculation, it was found that the asymmetric deformation of the main structure of the lower cross-beam could be effectively controlled, and the overall force of the supports could be optimized by setting the splayed steel pipe supports in the midspan of the longitudinal beam of the lower cross-beam and making broken joints in the midspan and side span of the longitudinal beam. The supports were assembled, welded, and accepted on the ground. Then they were lifted and fixed to the installation level after completion. The combination of theoretical calculation and construction process reduces the high-altitude operation, effectively guarantees the construction quality and efficiency of the supports, improves the pouring quality of the lower cross-beam of the main tower, and achieves remarkable economic benefits.

Keywords: bridge construction; cross-beam support; asymmetric load; finite element analysis

收稿日期:2023-04-27

基金项目:中交集团科研基金项目(编号:2020-ZJKJ-03)

作者简介:曾健,男,正高级工程师.E-mail:26411967@qq.com

1 概述

常泰长江大桥是中国第一座采用“高速公路+城际铁路+普通公路”方式过江的“三位一体”跨江大桥^[1],也是目前世界上最大跨度的公铁两用斜拉桥。斜拉桥主塔采用钢-混混合结构空间钻石形桥塔,主塔设计总高 352 m,分为上塔柱、中塔柱、下塔柱 3 个区段,上塔柱采用钢-混组合结构,中、下塔柱采用钢筋混凝土结构。主塔的下塔柱与中塔柱交界处设置下横梁,下横梁高约 52 m,为预应力混凝土构件,单箱单室截面。横桥向下横梁采用变截面设计,跨中梁高 8 m,梁宽 7 m,梁底曲线半径 126 m,跨中顶板厚 1.0 m,底板及腹板厚 1.5 m,具体结构如图 1、2 所示。横桥向下横梁采用支架法现浇施工,浇筑混凝土方量大,采用设置跨中 2 m 后浇段方式对主塔下横梁进行分区浇筑,同时梁体及箱梁截面高度均较高,且存在一定倾角,现浇支架受到较大不均匀荷载作用,对现浇支架的设计及梁体的施工都提出了一定挑战^[2-3]。

2 现浇支架设计及受力分析

2.1 支架总体结构设计

主塔下横梁支架为落地式钢管支架,整个支架体系分为下部支撑系统和上部梁系,如图 3、4 所示。

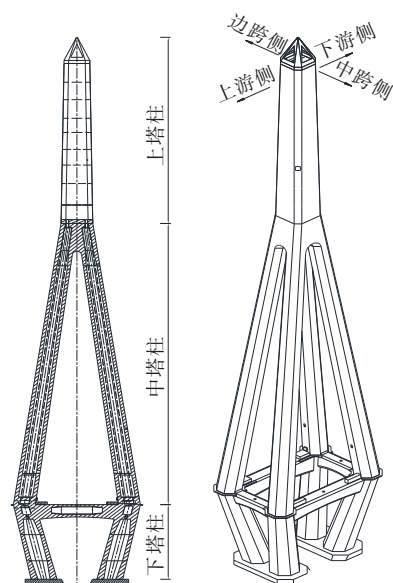


图 1 常泰长江大桥主塔结构示意图

Figure 1 Main tower structure of Changtai Changjiang River Bridge

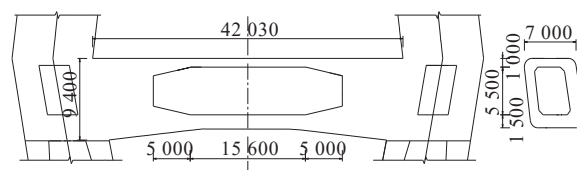


图 2 常泰长江大桥主塔下横梁结构示意图(单位:mm)

Figure 2 Lower cross-beam structure of Changtai Changjiang River Bridge(unit:mm)

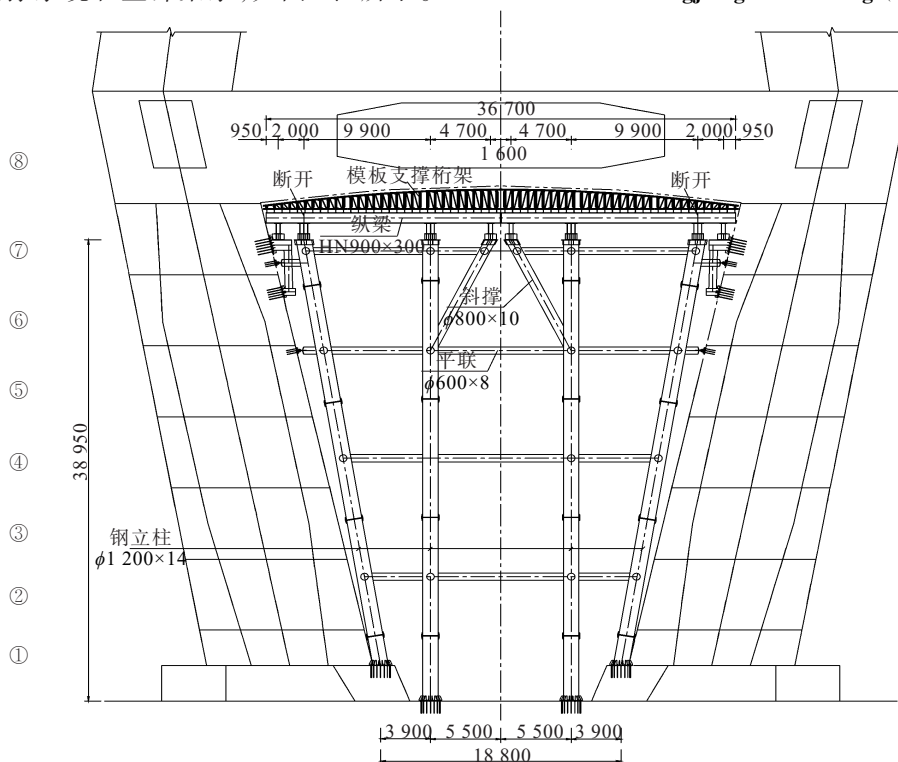


图 3 支架横桥向立面图(单位:mm)

Figure 3 Elevation of supports in transverse bridge direction(unit:mm)

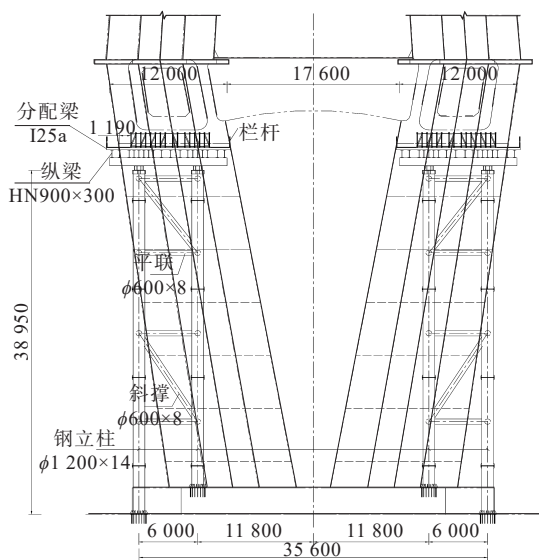


图4 支架纵桥向立面图(单位:mm)

Figure 4 Elevation of supports in longitudinal bridge direction(unit:mm)

钢立柱采用10 m的 $\phi 1\,200 \times 14$ mm法兰钢管拼装,底部锚固于承台及塔座,支撑牛腿锚固于墩身。钢立柱之间通过 $\phi 600 \times 8$ mm钢管平联及斜撑连接,扶墙采用 $\phi 600 \times 8$ mm钢管与墩身连接。钢立柱顶部设置主横梁2HN900 $\times$ 300 mm及3HN900 $\times$ 300 mm型钢,同时中部设置“八”字钢管撑,用于支撑跨中荷载重量。主横梁上设置纵梁HN900 $\times$ 300型钢,纵梁上铺设I25a分配梁,桩顶及牛腿上方设置卸荷块,分配梁上方布置模板桁架结构。下横梁现浇支架除钢管立柱及其法兰结构采用Q355钢材外,其余结构均采用Q235钢材。

2.2 支架关键细节设计

(1) 主塔下横梁以1/2跨为一个单元,与主塔第8节段塔梁结合段一同浇筑,共分为4个L形块,并预留4个合龙口,每个L形块竖向采用不分层一次性施工^[4],中间设置后浇段,使得浇筑下横梁混凝土时,支架在横桥向受到较大的半跨荷载作用,并产生下挠变形。在支架初步设计时,位于主塔下横梁下方的支架纵梁HN900 $\times$ 300整跨通长设置,2 m后浇段两侧的纵梁变形如图5、6所示。

从图6可以看出:仅浇筑半跨下横梁混凝土时,未浇筑的半跨支架纵梁HN900 $\times$ 300已经位移17.0 mm。另半跨下横梁混凝土浇筑后,其下方的纵梁将继续下挠,其最终变形如图7所示。

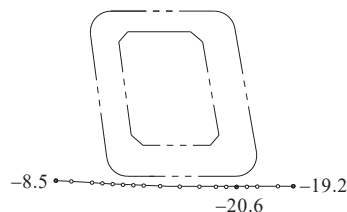


图5 荷载作用侧后浇段纵梁挠度(单位:mm)

Figure 5 Deflection of longitudinal beam at back pouring section under load(unit:mm)

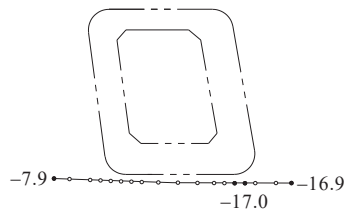


图6 荷载未作用侧后浇段纵梁挠度(单位:mm)

Figure 6 Deflection of longitudinal beam at back pouring section under no load(unit:mm)

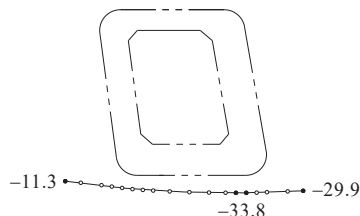


图7 后浇筑半跨混凝土侧纵梁变形(单位:mm)

Figure 7 Deformation of longitudinal beam at half-span concrete side after pouring(unit:mm)

到浇筑后浇段前,后浇段两侧纵梁最大变形为-20.6 mm和-33.8 mm,即纵梁通长设置时,后浇段合龙口将产生13.2 mm的高差,这对控制主塔下横梁线型及受力将产生不利影响。为保证主塔下横梁施工质量,支架纵梁在下横梁的跨中断开10 cm,使得支架上部结构成为相对独立的两个部分。纵梁在跨中断开后,支架上部结构在中跨形成5.45 m的悬臂结构,为优化受力和变形,在支架中跨立柱上设置 $\phi 800 \times 10$ mm钢管“八”字撑,此时支架结构在两边半跨下横梁浇筑时为对称受力,纵梁产生对称下挠,后浇段合龙口基本无高差,保证了后续后浇段施工的顺利进行。

(2) 主塔下横梁跨中采用箱形结构,靠近塔肢侧为实心结构,支架边跨承受的荷载较大。同时由于支架边跨跨度达9.9 m,支架纵梁在边跨处弯矩较大。为优化纵梁边跨处的受力,纵梁在边跨横梁3HN900 $\times$ 300 mm型钢处断开,断开前后纵梁弯矩

及应力对比如图 8~11 所示。

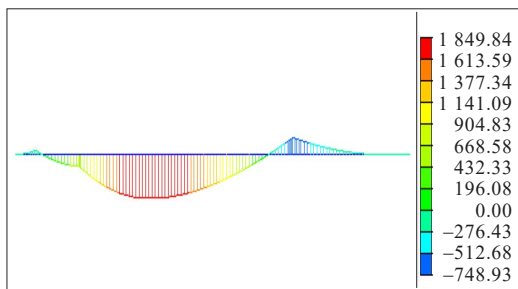


图 8 纵梁边跨断开前弯矩图(单位:kN·m)

Figure 8 Bending moment of side span of longitudinal beam before breaking(unit:kN·m)

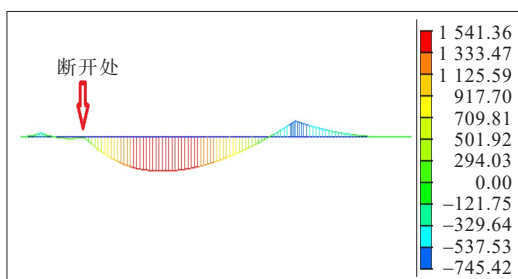


图 9 纵梁边跨断开后弯矩图(单位:kN·m)

Figure 9 Bending moment of side span of longitudinal beam after breaking(unit:kN·m)

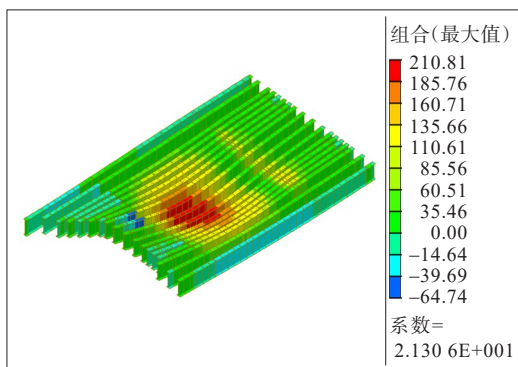


图 10 纵梁边跨断开前应力云图(单位:MPa)

Figure 10 Stress contour of side span of longitudinal beam before breaking(unit:MPa)

可以看出:支架纵梁在边跨处断开后,所承受的弯矩和组合应力均减小了 20%,而其最大挠度基本不变。所以采用边跨断开方案能在基本不影响下横梁变形的情况下增大纵梁的应力储备,提高支架的安全系数。

最终,采用“八”字撑及跨中、边跨处纵梁断开方案的主塔下横梁现浇支架各构件受力如图 12 及表 1 所示。

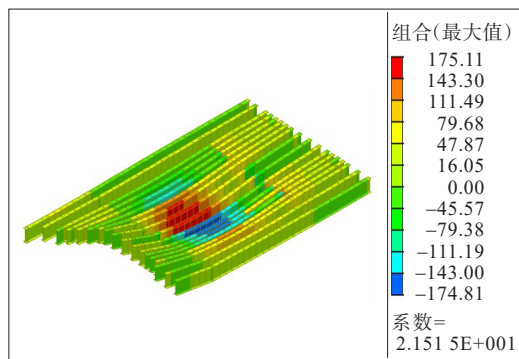


图 11 纵梁边跨断开后应力云图(单位:MPa)

Figure 11 Stress contour of side span of longitudinal beam after breaking(unit:MPa)

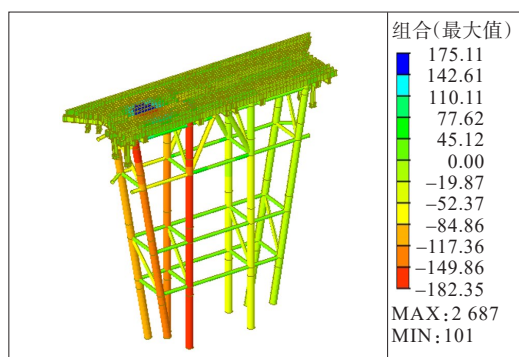


图 12 支架应力云图(单位:MPa)

Figure 12 Stress contour of support(unit:MPa)

表 1 支架各构件应力计算结果

Table 1 Stress calculation results of support members

构件	组合应力/MPa	弯应力/MPa	轴应力/MPa	剪应力/MPa
钢立柱 $\phi 1200 \times 14$	168	24	147	—
平联及斜撑 $\phi 600 \times 8$	71	64	50	—
斜撑 $\phi 800 \times 10$	48	13	37	—
扶墙 $\phi 600 \times 8$	101	86	38	—
主横梁 2HN900×300	172	169	—	102
3HN900×300	182	177	—	77
牛腿 2HN900×300	63	39	10	67
2HM588×300				

3 施工方法及重难点

3.1 施工方法

主塔下横梁支架的搭设由柱脚安装、钢立柱施工、连接系施工及梁系施工等部分组成,各部分相对独立又协调统一。

(1) 柱脚安装:承台混凝土浇筑前,在设计位置提前埋入预埋板。焊接柱脚时,在预埋件上临时固定定位楔子;起吊立柱对照安装线对位后,点焊加劲板限位;底节立柱焊接完成后,在埋件板处每两个螺栓中间焊接加劲板。

(2) 钢立柱施工:每根独立的钢立柱分为5节,标准节长度为10 m,对接接头采用法兰、螺栓对接,法兰盘的上下焊接加劲板。钢立柱自下而上分节安装,每节立柱安装完成后,必须及时焊接平联、斜撑,并且采取稳固措施后再拼装下一节钢立柱。

(3) 连接系施工:支架牛腿、扶墙及连接系均在后场加工完成,然后运至现场整体吊装。支架牛腿斜撑吊装到位后焊接在塔肢已安装的预埋件锚板上。平联斜撑等钢管构件则采用哈弗接头的形式与钢立柱焊接。

(4) 梁系施工:主横梁通过卸荷块与柱顶桩帽焊接相连,横桥向支架有8道主横梁,均在后场加工,再由塔吊整体起吊安装。纵梁置于主横梁上,单根纵梁长度最大为22.35 m,为保证纵梁施工质量和安全,单根纵梁分为两节进行加工,在柱顶进行接头对接。为保证主横梁及纵梁施工质量,单拼型钢组焊成多拼型钢,采用间断焊接,每50 cm距离内焊接20 cm长焊缝,无须打坡口处理。对于较厚板材,按照相关对接焊缝标准开坡口进行对接,并在腹板处焊接贴板。主横梁及纵梁施工完成后,在纵梁上布置分配梁,分配梁下翼缘两边与纵梁焊接牢靠。

3.2 施工重难点

现浇钢管支架施工的传统做法是将立柱安装好后,焊接斜撑及平联,但常泰长江大桥主塔下横梁支架高度高,承受荷载较大,属超过一定规模的危险性较大工程^[5],焊接要求严格,现场切割焊接难以准确下料,造成焊接接口对接不严密,同时高空作业受风力及作业人员影响较大^[6-7],焊接质量难以保证。因此,采用地面组装、焊接,验收完成之后整体吊装,该方案的重难点有:① 支架分块重量较重,不仅要保证安装精度及效率,起重吊装时还需要注意安全;② 立柱高度较高,底节立柱中心点控制尤为重要,钢管接高通过吊垂线控制其垂直度,安装精度要求严格;③ 下横梁支架存在81°夹角,在自重的作用下支架存在偏心力矩,需要尽早安装扶墙以保证结构安全;④ 爬模吊架与塔座上立柱位置冲突,待爬模拆除后才可

安装扶墙、牛腿,使得下横梁支架施工工期紧张;⑤ 下横梁支架安装系高空作业,需要做好安全防护工作;⑥ 施工过程中需要监测高程、曲率、几何参数,但整体的监测难度较大;⑦ 主塔下横梁梁体与塔柱同步施工,体积大、跨度大,易出现水化热裂缝,影响混凝土耐久性。

4 支架变形与实测

常泰长江大桥主塔下横梁在浇筑过程中对浇筑模板以及下横梁支架进行了位移监测,监测点布置如图13所示。监测得到的下横梁支架2HN900×300 mm及3HN900×300 mm型钢主横梁在塔内侧的竖向位移,与提取的有限元模型计算位移进行对比^[8-9],结果如图14所示。可以看到,浇筑完成时下横梁支架的型钢主横梁竖向位移均未超过计算位移的110%,实际监测的结果与有限元模型计算结果吻合较好。

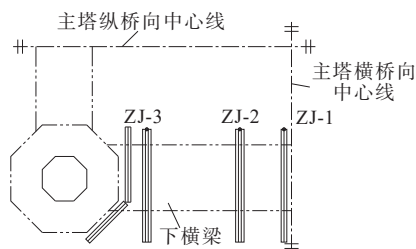


图13 位移监测点位示意图

Figure 13 Displacement monitoring points

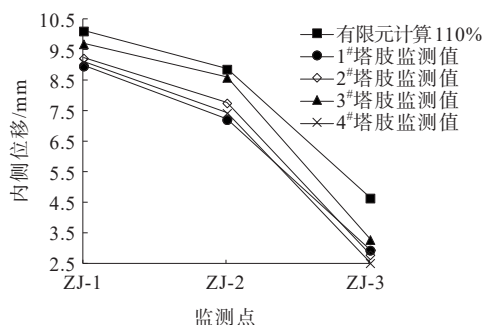


图14 浇筑完成时下横梁内侧位移

Figure 14 Inner displacement of lower cross-beam after pouring is completed

5 结语

常泰长江大桥主塔下横梁具有高度高、混凝土方量大的特点,其施工存在复杂化、难度大的特点,质量控制存在一定难度。下横梁现浇支架采用落地

式钢管支架结构,由下部支撑系统和上部梁系组成,上部纵梁中部进行断开式“八”字撑设计,解决了下横梁合龙口施工高差的问题,同时在纵梁边跨处设置断缝,优化了支架的整体受力,满足了相关设计要求,提高了支架的安全性。其地面组装、焊接,验收完成之后整体吊装的施工方案保证了施工质量,提升了施工效率,保障了施工安全。最终下横梁支架实测位移与计算值吻合较好,说明支架方案设计对施工起到了很好的指导性。

参考文献:

References:

- [1] 秦顺全,徐伟,陆勤丰,等.常泰长江大桥主航道桥总体设计与方案构思[J].桥梁建设,2020,50(3):1-10.
QIN Shunquan, XU Wei, LU Qinfeng, et al. Overall design and concept development for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge[J]. Bridge Construction, 2020, 50(3): 1-10.
- [2] 董春光,王晓佳,罗吉庆,等.下横梁支架系统创新设计与施工[J].科学技术与工程,2022,22(22):9805-9811.
DONG Chunguang, WANG Xiaojia, LUO Jiqing, et al. Innovative design and construction of support system for lower crossbeam[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(22): 9805-9811.
- [3] 王文明,柴生波,聂宁波,等.拱形桥塔施工控制措施及温度效应分析[J].中外公路,2023,43(6):140-148.
WANG Wenming, CHAI Shengbo, NIE Ningbo, et al. Construction control measures and temperature effect analysis of arch-type bridge tower[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6): 140-148.
- [4] 黄甘乐,吕昕睿,孙南昌.常泰长江大桥5号墩索塔下塔柱施工关键技术[J].施工技术(中英文),2024,53(18):69-75.
HUANG Ganle, LYU Xinrui, SUN Nanchang. Key construction technology of lower pylon of No. 5 pier for Changtai Yangtze River Bridge[J]. Construction Technology, 2024, 53(18): 69-75.
- [5] 李友明,白晓红,王启富.山区公路变宽度连续箱梁设计特点与支架法现浇施工技术[J].中外公路,2022,42(6):146-151.
LI Youming, BAI Xiaohong, WANG Qifu. Design features and cast-in-place construction technique of support methods of continuous box girder for mountain road[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6): 146-151.
- [6] 顾程磊,黄修平.临时工程风荷载计算比较研究[J].中国水运(下半月),2019,19(3):228-229.
GU Chenglei, HUANG Xiuping. Comparative study on wind load calculation for temporary structures[J]. China Water Transport, 2019, 19(3): 228-229.
- [7] 官治立,刘阿明.大跨度连续刚构桥托架体系设计验算[J].中外公路,2021,41(2):107-114.
GUAN Zhili, LIU Aming. Design and calculation of bracket system for long-span continuous rigid frame bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(2): 107-114.
- [8] 凌李华.索塔横梁支架施工优化研究[D].长沙:长沙理工大学,2016.
LING Lihua. Research on optimization of bracket construction of tower beam[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016.
- [9] 周小勇,吕志敏,王加辉,等.支架现浇系杆拱桥吊杆张拉方案优化[J].中外公路,2022,42(2):125-130.
ZHOU Xiaoyong, LYU Zhimin, WANG Jiahui, et al. Optimization of suspender tensioning scheme for cast-in-place bracket tied-arch bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 125-130.