

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202205252024101980

文章编号: 1674-599X(2025)01-0105-07

引用格式: 王达, 蔡阳. 混合式钢混叠合梁斜拉桥体系转换精细化分析[J]. 交通科学与工程, 2025, 41(1): 105-111.

Citation: WANG Da, CAI Yang. Refinement analysis of system conversion of mixed steel-concrete composite girder cable-stayed bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(1): 105-111.

混合式钢混叠合梁斜拉桥体系转换精细化分析

王达, 蔡阳

(长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要:【目的】混合式钢混叠合梁斜拉桥主要由边跨混凝土现浇加劲梁及中跨钢混叠合加劲梁组成, 边跨加劲梁的刚度明显比中跨的大。在桥梁工程的体系转换过程中, 边界约束的改变将对桥梁产生不可逆的影响, 目前可供混合式钢混叠合梁斜拉桥参考的理论及实例研究仍不完备。【方法】为了优化体系转换过程中混合式钢混叠合梁斜拉桥的受力状态与结构线形, 以四川盐坪坝长江大桥为例, 利用有限元软件建立模型, 对混合式钢混叠合梁斜拉桥的三种体系转换方案进行精细化研究。【结果】在体系转换过程中, 中跨合龙后再解除塔梁临时固结和边跨支架, 全桥应力较小, 结构线形稳定, 主梁挠度可控, 索塔偏位合理。【结论】推荐先中跨合龙再解除临时约束的施工方案。

关键词: 斜拉桥; 叠合梁; 体系转换; 挠度; 应力

中图分类号: U448

文献标志码: A

Refinement analysis of system conversion of mixed steel-concrete composite girder cable-stayed bridge

WANG Da, CAI Yang

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology,
Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] The mixed steel-concrete composite girder cable-stayed bridge mainly consists of the side-span cast-in-place concrete stiffening girder and the mid-span steel-concrete composite stiffening girder. The stiffness of the side-span stiffening girder is significantly greater than that of the mid-span one. During the system conversion process of the bridge engineering, the change in boundary constraints will have an irreversible impact on the bridge. At present, the theoretical materials available for reference on the mixed steel-concrete composite girder cable-stayed bridge are still incomplete, and there is a lack of case studies. There is still value to be explored. [Methods] To optimize the stress state and geometric shape of the mixed steel-concrete composite girder cable-stayed bridge during the system conversion process, this paper took the Sichuan Yanpingba Yangtze River Bridge as the engineering background, used a large-scale finite element software to establish a high-precision and refined calculation model, and conducted a refinement analysis of the three system-conversion schemes of the mixed steel-concrete composite beam cable-stayed bridge. [Findings] The results show that under the condition that the temporary consolidation between towers and beams and the side-span support are released after the middle span is closed, the corresponding full-bridge system has less stress during the conversion process, the geometric shape is stable, the deflection of the main girder is controllable, and the deflection of the cable tower is reasonable. [Conclusions] The construction plan

收稿日期: 2022-05-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51378071); 中南林业科技大学引进人才科研启动基金项目(ZK2021YJ036)

通信作者: 王达(1980—), 男, 教授, 主要从事桥梁与隧道工程方面的研究工作。E-mail: yxwang2006@yeah.net

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

of first closing the middle span and then releasing temporary constraints is recommended.

Key words: cable-stayed bridge; composite girder; system conversion; deflection; stress

混合式钢混叠合梁斜拉桥是近年来兴起的新型桥梁结构,能显著地提高斜拉桥的跨越能力,能充分地利用钢材的受拉性能与混凝土的受压性能。混合式钢混叠合梁斜拉桥在中跨采用钢混叠合梁来减轻自重以增加跨径,在边跨采用混凝土梁来平衡重量,这种结构形式提高了桥梁整体的刚度,经济性好,施工条件适应性强^[1]。

在混合式钢混叠合梁斜拉桥的体系转换过程中,约束条件的改变会引起桥梁应力和挠度的变化,并对成桥阶段桥梁的受力和线形产生不可逆的改变^[2]。游勇利等^[3]、刘海宽等^[4]的研究表明,斜拉桥优化后的体系转换方案可有效地引导现场施工,在施工过程中桥梁的结构受力、实测索力、主塔挠度及主梁线形均满足控制要求。戴颖^[5]的研究表明,及时拆除斜拉桥的临时约束可改善结构受力状态。罗如登等^[6]的研究表明优化后的合龙方案可改善桥梁支承体系受力的均衡性。黄耀东^[7]发现改变体系转换方式能弥补临时支撑失效带来的损失。

目前,对于混合式钢混叠合梁斜拉桥,可供参考的理论资料仍不完备,实例研究尚有欠缺,还有进一步深挖的价值。因此,本文以盐坪坝长江大桥为研究对象,借助有限元分析软件建立精细化模型,模拟三种体系转换方案的施工过程,对比不同体系转换方案下桥梁的应力、挠度及塔偏的差异,得出更优的施工方案,以期对混合式钢混叠合梁斜

拉桥的设计和施工提供参考。

1 工程背景

盐坪坝长江大桥为双塔双索面混合式叠合梁斜拉桥,总长 866 m;边跨长 193 m,采用预应力混凝土梁;中跨长 480 m,采用钢混叠合梁。中跨与边跨通过一段位于索塔附近的钢混结合段连接。桥的主梁采用塔墩固结、塔梁分离的漂浮体系,在塔墩处主梁下设置竖向支承的半漂浮体系。中跨桥面宽 40 m,边跨由于立交匝道的汇入扩展至最宽处约 57 m。索塔为箱形混凝土结构,采用“江鱼”造型。索塔总高约 183 m,在桥面以上高 128 m,塔底左右塔柱的中心距约为 27 m。索塔设置了上塔柱、上横梁、中塔柱、下塔柱和下横梁。全桥设 168 根斜拉索,采用平行钢绞线拉索体系,斜拉索钢绞线的抗拉强度为 1 860 MPa。边跨拉索的间距为 8.5 m,中跨前五对拉索的间距为 10.5 m,后 16 对拉索的间距为 11.1 m。

盐坪坝长江大桥的桥跨布置、斜拉索号及主梁节段号如图 1 所示。Z1~Z8 表示墩台编号,NS21~NS01、NC01~NC21、SC21~SC01 和 SS01~SS21 表示斜拉索编号,JDN12~JDN01、DH01~DH20、SH20~SH01 和 JDS01~JDS12 表示主梁节段编号。

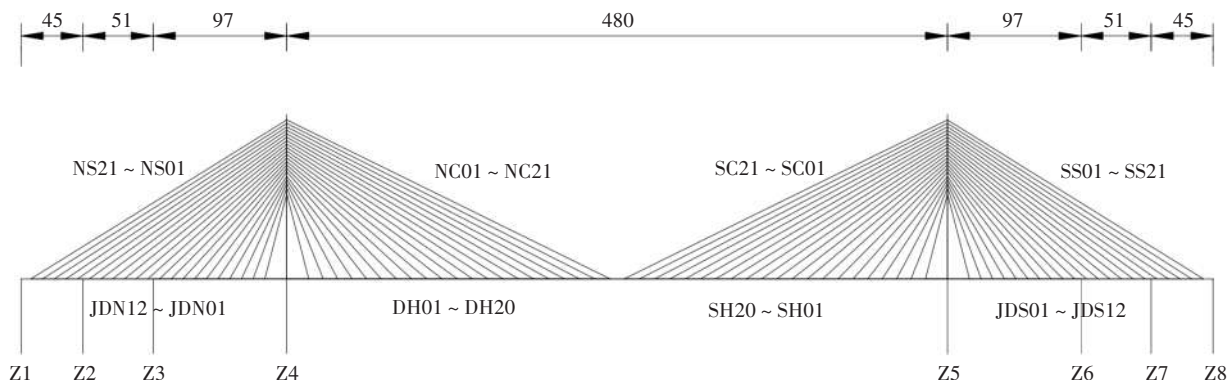


图1 盐坪坝长江大桥桥跨布置(单位:m)

Fig. 1 Span arrangement of Yanpingba Yangtze River Bridge (unit: m)

2 精细化有限元建模及体系转换方案

相较于双悬臂施工方式,先用支架法施工混凝

土边跨,再用悬臂拼装法施工钢混叠合梁中跨能使施工过程更加方便、安全。在对斜拉桥的边跨混凝土梁进行施工时,既要设置临时支架^[8],也要对主梁与桥塔的连接处进行塔梁临时固结^[9]。盐坪坝长江

大桥的施工顺序为:1) 施工桥塔与墩台;2) 采用支架现浇法施工边跨;3) 采用悬臂拼装法施工中跨、斜拉索一张、斜拉索二张;4) 体系转换;5) 施工斜拉索三张及铺装二期。

桥梁在体系转换过程中需要进行中跨合龙及解除临时约束。盐坪坝长江大桥的临时约束为边跨临时支架和塔梁临时固结。在体系转换过程中不同的施工顺序会对桥梁产生不同的影响,为了优化桥梁结构的受力状态及线形,本文针对施工顺序设计了三个方案。

方案一:先中跨合龙;再解除塔梁临时固结;最后拆除边跨临时支架。

方案二:先拆除边跨临时支架;再中跨合龙;最后解除塔梁临时固结。

方案三:先解除塔梁临时固结;再拆除边跨临时支架;最后中跨合龙。

三个方案具体的施工顺序见表1。采用 Midas/Civil 对三个方案进行模拟,分别建立仿真模型。三个模型仅体系转换过程中约束的先后顺序不同,其他参数均保持一致。预应力混凝土边跨采用 C60 混凝土,索塔采用 C55 混凝土,辅助墩采用 C40 混凝土,在仿真模型中边跨、索塔及辅助墩均采用梁单元进行模拟。中跨钢梁采用 Q370 钢材的梁单元模拟,混凝土桥面板及湿接缝采用 C60 混凝土的板单元模拟,中跨钢梁与混凝土桥面板通过弹性连接进行连系。斜拉索采用桁架单元模拟,边跨临时支架采用只受压的节点弹性支承模拟,塔梁临时固结采用弹性连接模拟。墩底引入固结边界条件,索塔承台与桩基础顶板采用刚性连接。支座采用弹性连接模拟。拉索与索塔、主梁之间采用零容重的刚臂连接。全桥共 2 475 个节点,2 214 个单元。有限元模型如图 2 所示。

表1 体系转换方案

Table 1 System conversion schemes

施工顺序	方案一	方案二	方案三
1	21号索二张	21号索二张	21号索二张
2	起吊合龙段钢梁	拆除边跨支架	拆除临时固结
3	施工合龙段钢梁	起吊合龙段钢梁	拆除边跨支架
4	合龙段小纵梁	施工合龙段钢梁	起吊合龙段钢梁
5	合龙段桥面板	合龙段小纵梁	施工合龙段钢梁
6	拆除临时固结	合龙段桥面板	合龙段小纵梁
7	拆除边跨支架	拆除临时固结	合龙段桥面板
8	张拉预应力	张拉预应力	张拉预应力

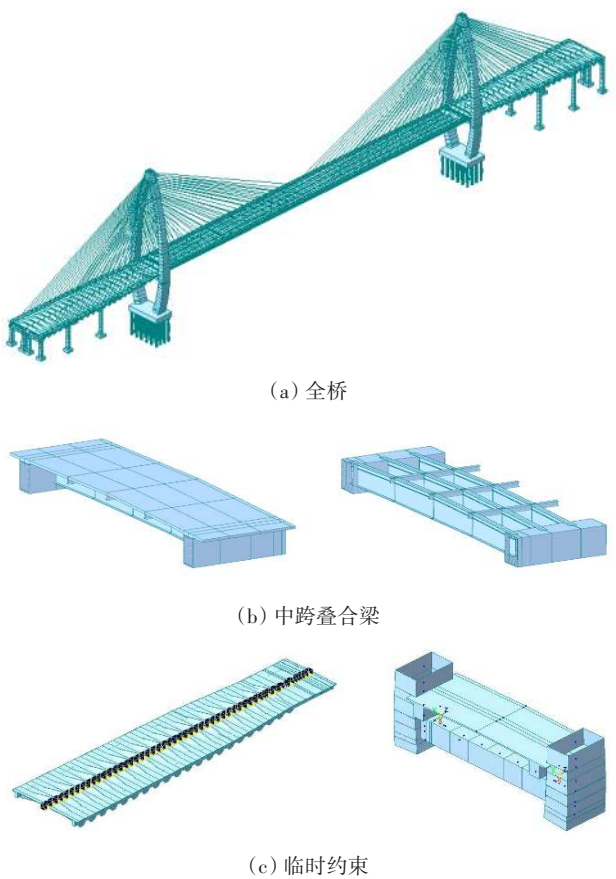


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

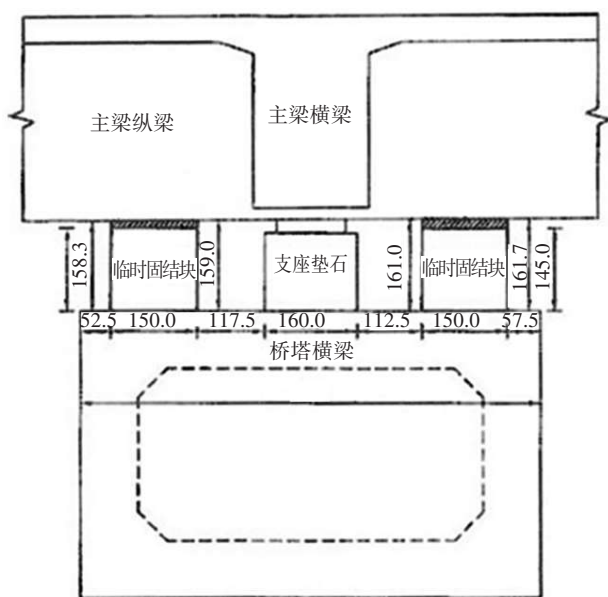
3 临时固结抗压分析

为了确保塔梁临时固结在拆除前的承力状况正常,要进行抗压承载力计算,在盐坪坝长江大桥 Z4、Z5 墩台的塔梁结合处设置塔梁临时固结,每个墩台的两侧各设置 2 个,全桥共设置 8 个。塔梁临时固结具体的设置方式为:在墩台旁设置长 225.0 cm,宽 150.0 cm,高约 160.0 cm 的 C55 现浇钢筋混凝土块;钢筋伸入桥塔横梁约 90.0 cm,伸入主梁纵梁约 90.0 cm。塔梁临时固结的具体位置及尺寸如图 3 所示。

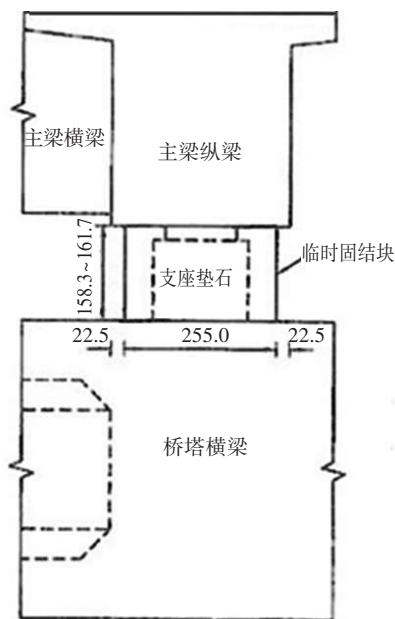
在三个方案中,临时固结解除前塔墩单侧的最大支反力均为 65 634 kN,从安全方面考虑,按最大支反力提供临时固结。参考《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)^[10],钢筋混凝土轴心受压构件正截面抗压承载力的计算公式为:

$$\gamma_0 N_d \leq 0.9\varphi(f_d A + f'_d A'_s) \quad (1)$$

式中: γ_0 为桥涵结构的重要性系数,取 0.9; N_d 为轴



(a) 顺桥向立面



(b) 横桥向立面

图3 塔梁临时固结(单位:cm)

Fig. 3 Temporary consolidation between towers and beams (unit: cm)

向力组合设计值; φ 为轴压构件稳定系数,取1.0; f_d 为混凝土轴心抗压强度设计值,采用C55混凝土时,取24.4 MPa; f'_d 为普通钢筋抗压强度设计值,采用HRB400螺纹钢筋时,取330.0 MPa; A 为构件毛截面面积; A'_s 为全部纵向钢筋的截面面积。

利用式(1)计算得到钢筋混凝土轴心受压构件正截面抗压承载力,约为200 543 kN,比临时固结解除前塔墩单侧的最大支反力(65 634 kN)大,满足规范要求。

4 体系转换方案对比分析

顾乡等^[11]在体系转换顺序对大跨度多塔斜拉桥的影响分析中对主梁应力及主塔偏位进行了研究。为了研究不同的体系转换方案对桥梁的影响,本文从斜拉索应力、主梁应力、主梁挠度及主塔位移等方面进行对比分析。

4.1 斜拉索应力

在成桥阶段不同方案下北岸斜拉索的应力如图4所示。由图4可知,在成桥阶段,临时约束的解除时机对桥塔附近的斜拉索的应力有一定影响,但不同方案下斜拉索的应力最大相差9.5 MPa,差异很小,且应力均未超过拉索的容许应力(拉索的容许应力 $[\sigma]$ 为0.4倍的拉索抗拉标准强度 R_b , $[\sigma]=0.4R_b=744$ MPa),满足安全要求。因此,可以认为不同的体系转换施工顺序对斜拉索应力的影响并不明显。

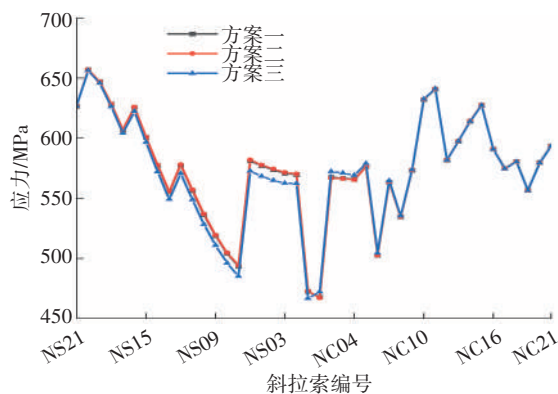


图4 北岸斜拉索应力

Fig. 4 Cable-stayed stress of north shore

4.2 主梁应力

为了研究不同的体系转换方案对主梁应力的影响,本文从两个阶段(体系转换阶段和成桥阶段)分别进行对比分析。

4.2.1 体系转换阶段应力分析

中跨合龙阶段需要解除桥梁的临时约束。由于在不同的体系转换方案中临时约束解除的时机不一致,因此,在同一施工阶段结构的超静定次数和受力状态亦有所差别。在体系转换的过程中,各方案下主梁的应力极值包络图如图5~7所示。

因为各方案的差异主要在于中跨合龙与解除临时约束的先后顺序不同,所以在体系转换的开始阶段应力基本相同,在体系转换的后期应力的差距

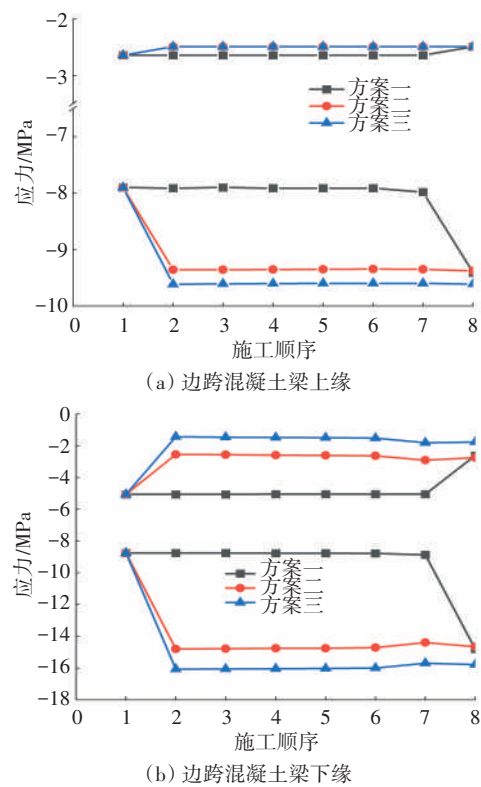


图 5 边跨混凝土梁应力极值包络图

Fig. 5 Extremum stress envelope of side-span concrete beam

也不大。由图 5 可知,在体系转换过程中各方案均未出现拉应力,采用方案一时边跨混凝土梁的应力波动最小,且下缘的应力波动比上缘的更明显。

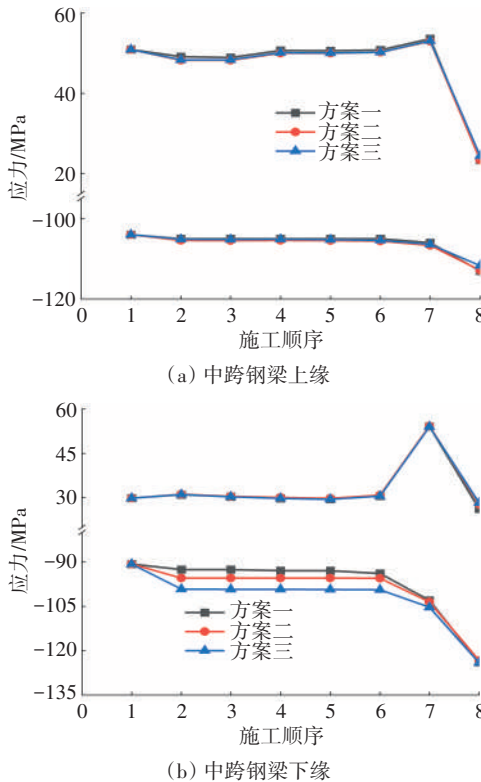


图 6 中跨钢梁应力极值包络图

Fig. 6 Extremum stress envelope of mid-span steel beam

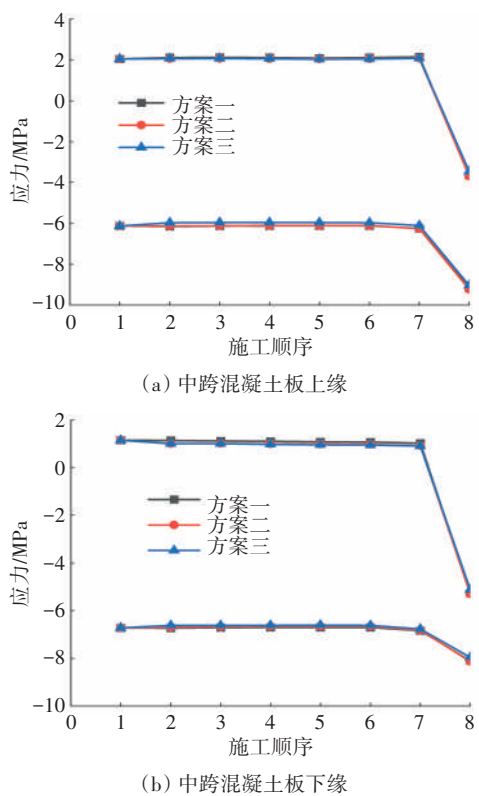


图 7 中跨混凝土板应力极值包络图

Fig. 7 Extremum stress envelope of mid-span concrete slab

由图 6~7 可知,在体系转换过程中不同方案下钢梁和混凝土板的应力极值差别很小。钢梁的应力极值均未超过钢梁的容许应力(217.6 MPa),混凝土板拉应力极值均未超过 C60 混凝土的抗拉强度标准值(2.85 MPa),满足安全要求。

4.2.2 成桥阶段应力分析

成桥阶段采用不同方案时上下缘的应力极值见表 2。

表 2 成桥阶段应力极值

Table 2 Extremum stress during bridge formation MPa					
结构	位置	极值	方案一	方案二	方案三
边跨 混凝土梁	上缘	最大值	-10.50	-10.48	-10.70
		最小值	-2.32	-2.32	-2.32
	下缘	最大值	-14.95	-14.89	-15.73
		最小值	-3.91	-3.96	-3.14
中跨 混凝土板	上缘	最大值	-10.61	-10.70	-10.48
		最小值	-4.33	-4.35	-4.15
	下缘	最大值	-9.11	-9.12	-8.97
		最小值	-5.78	-6.10	-5.97
中跨 钢梁	上缘	最大值	-146.39	-146.59	-146.00
		最小值	-0.87	-0.92	-0.15
	下缘	最大值	-126.60	-126.25	-128.00
		最小值	19.22	21.56	21.30

由表2可知,在成桥阶段采用不同的方案时上下缘的应力极值比较接近,边跨混凝土梁与中跨混凝土板均未出现拉应力。混凝土板和钢梁的应力极值均未超过容许应力,符合要求。可以认为不同的体系转换施工顺序对成桥阶段主梁的应力极值的影响并不显著。

4.3 主梁挠度

4.3.1 体系转换阶段挠度分析

在体系转换过程中,中跨合龙口的竖向挠度差如8所示,以北侧合龙口比南侧合龙口高为正值。

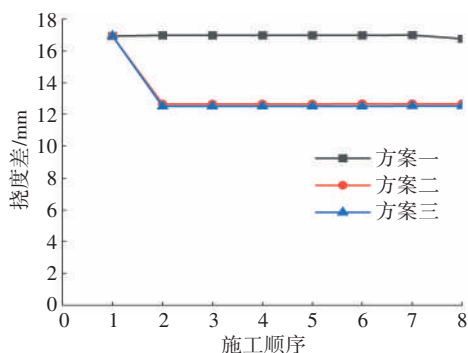


图8 中跨合龙口处挠度差

Fig. 8 Deflection differences at mid-span closure

由图8可知,各方案的中跨合龙口在21号索二张施工阶段位移相同,方案二与方案三的合龙口位移在接下来的施工阶段有一定波动,而方案一的合龙口位移变化相对较小。方案一将解除临时约束推后至中跨合龙后,这使得在体系转换过程中结构的受力状态得以维持稳定,故而变形较小,有利于施工安全。

4.3.2 成桥阶段挠度分析

各方案在成桥阶段的主梁竖向挠度值如图9所示。

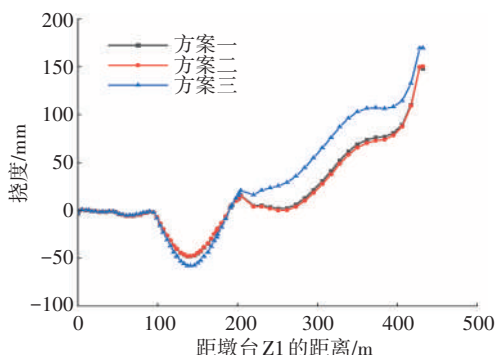


图9 成桥阶段主梁竖向挠度

Fig. 9 Vertical deflection of main girder during bridge formation

由图9可知,不同方案下主梁竖向挠度的变化

趋势相近,其中方案三的整体挠度比其他方案的大。分析可知:方案三先解除所有的临时约束,使得边跨下挠增大,进而带动中跨挠度的变化,而中跨钢混叠合梁的刚度比边跨混凝土梁的刚度小,故对中跨的影响要比对边跨的大。

4.4 主塔位移

各方案在成桥阶段和收缩徐变10年后的主塔纵向位移如图10所示。塔偏以向岸侧为正,向江心侧为负。

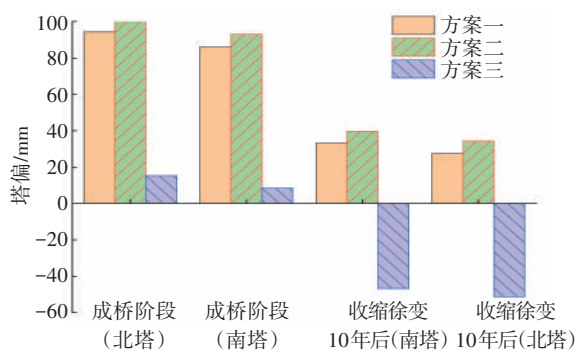


图10 主塔位移

Fig. 10 Main tower displacement

桥梁在运营期会受到收缩徐变的影响,桥塔开始逐步向江心侧偏移,因此在成桥阶段,桥塔向岸侧偏移较为合理。由图10可知,方案一与方案二的塔偏差别不大,即使在收缩徐变10年后桥塔仍未向江心侧偏移。方案三的塔偏在成桥阶段向岸侧偏移很小,而在收缩徐变10年后出现向江心侧偏移的现象,不利于结构安全。

5 结论

本文以四川盐坪坝长江大桥为工程背景,对三种体系转换方案对应的结构受力及线形进行了精细化的对比研究,主要结论如下:

1) 在应力方面,体系转换过程中先中跨合龙再解除临时约束能使边跨主梁的应力极值保持相对较小。因此,从结构受力方面来看,建议施工中先中跨合龙再解除临时约束,这样能使施工过程中结构的受力相对较小,有利于结构和施工安全。

2) 在位移方面,体系转换过程中先中跨合龙再解除临时约束能使桥梁合龙口悬臂端的挠度保持稳定,有利于桥梁合龙和施工安全。先解除临时约束再合龙会使得成桥阶段向岸侧的塔偏比其他方案的塔偏小80 mm以上,以至于收缩徐变10年后桥塔出现向江心侧偏移的现象,不利于结构安全。另

外,先解除临时约束再中跨合龙会使得成桥阶段边跨和中跨的挠度增大,而由于中跨的刚度相对较小,故该施工顺序对中跨的影响要更大。因此,从结构线形方面来看,推荐先中跨合龙再解除临时约束的施工方案。

参考文献(References):

- [1] 徐国平. 混合梁斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社, 2013.
XU Guoping. Hybrid girder cable-stayed bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [2] 程杰. 钢混叠合梁独塔斜拉桥施工过程受力性能研究[J]. 安徽建筑, 2022, 29(2): 153-156. DOI: 10.16330/j.cnki.1007-7359.2022.02.069.
CHENG Jie. Study on mechanical properties of steel-concrete composite beam single-tower cable-stayed bridge during construction [J]. Anhui Architecture, 2022, 29 (2) : 153-156. DOI: 10.16330/j. cnki. 1007-7359.2022.02.069.
- [3] 游勇利, 刘辉. 支架现浇法塔梁同步施工独塔混凝土斜拉桥仿真分析[J]. 公路交通科技, 2021, 38(12): 64-72. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.12.008.
YOU Yongli, LIU Hui. Simulation analysis on single pylon concrete cable-stayed bridge by synchronous construction of pylon girder with cast-in-place support [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (12) : 64-72. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.12.008.
- [4] 刘海宽, 于品德, 程坤, 等. 支架施工斜拉桥体系转换方案的优选与施工控制[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(5): 119-124. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.2019.05.021.
LIU Haikuan, YU Pinde, CHENG Kun, et al. Optimum selection and construction control of system conversion scheme of cable-stayed bridge under support construction [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2019, 36 (5) : 119-124. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-033X.2019.05.021.
- [5] 戴颖. 组合梁斜拉桥主梁悬臂施工过程的体系转换分析[J]. 广东土木与建筑, 2020, 27(11): 41-44. DOI: 10.19731/j.gdtmyjz.2020.11.012.
DAI Ying. System conversion analysis of cantilever construction process of main girder of composite girder cable-stayed bridge [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2020, 27 (11) : 41-44. DOI: 10.19731/j. gdtmyjz.2020.11.012.
- [6] 罗如登, 刘铸, 陈立军, 等. 新型支承体系多跨矮塔斜拉桥合龙方案研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (12) : 3286-3293. DOI: 10.19713/j. cnki. 43-1423/u. t20210036.
LUO Rudeng, LIU Zhu, CHEN Lijun, et al. Closure scheme study of multi-span extradosed cable-stayed bridge with new support system [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18 (12) : 3286-3293. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20210036.
- [7] 黄耀东. 钢混叠合梁体系转换中的施工监测与分析[J]. 铁道建筑技术, 2019(5): 70-73. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4539.2019.05.016.
HUANG Yaodong. Monitoring and analysis of system transformation for steel-concrete composite beams [J]. Railway Construction Technology, 2019 (5) : 70-73. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4539.2019.05.016.
- [8] 高勇. 大跨度简支钢混组合小箱梁桥设计与应用[J]. 交通科学与工程, 2021, 37 (4) : 93-100. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.009.
GAO Yong. Design and application of large span simple supported steel-concrete composite small box girder bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37 (4) : 93-100. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/u.2021.04.009.
- [9] 汪泉庆, 杨军宏, 曾越. 斜拉桥塔梁临时固结浅析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(增刊1):105-109.
WANG Quanqing, YANG Junhong, ZENG Yue. Brief analysis on temporary consolidation of pylon beam of cable-stayed bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (sup 1):105-109.
- [10] 交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京:人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [11] 顾乡, 赵雷, 张育智. 大跨度多塔斜拉桥最优体系转换顺序研究[J]. 中外公路, 2016, 36(2): 160-164. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2016.02.036.
GU Xiang, ZHAO Lei, ZHANG Yuzhi. Study on optimal system conversion sequence of long-span multi-tower cable-stayed bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36 (2) : 160-164. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2016.02.036.

(责任编辑:熊怡)