

佛山特大桥钢主梁架设方案研究

顾建华¹, 张晋云², 孙 军³, 王贵羽³, 陈 涛⁴, 杨景新³

(1. 广东省铁路建设投资集团有限公司, 广东 广州 510665; 2. 广州铁路职业技术学院, 广东 广州 511300;
3. 中铁广州工程局集团有限公司, 广东 广州 511458; 4. 中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034)

[摘要] 以新建广湛高铁佛山特大桥跨东平水道斜拉桥为依托, 分析了 3 种不同上部结构钢主梁架设方案, 方案主要区别是湿接缝与预应力施工时间不同。通过有限元计算分析, 从结构在施工过程中受力、成桥受力、索力、成桥线形、钢梁安装过程中的横向变形及工期等方面进行对比分析, 经综合比选后, 最终确定方案 3 为最优方案。

[关键词] 桥梁; 斜拉桥; 架设方案; 湿接缝; 索力; 线形; 有限元分析

[中图分类号] U448.27; U445.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0087-05

Erection Scheme of Steel Main Girder of Foshan Super-large Bridge

GU Jianhua¹, ZHANG Jinyun², SUN Jun³, WANG Guiyu³, CHEN Tao⁴, YANG Jingxin³

(1. Guangdong Provincial Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510665, China;
2. Guangzhou Railway Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 511300, China; 3. China Railway Guangzhou Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511458, China; 4. China Railway Bridge Science Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430034, China)

Abstract: Based on the new Foshan Bridge of Guangzhan High-speed Railway across Dongping Waterway Cable-stayed Bridge, three different erection schemes of upper structural steel girder are analyzed. The main difference among the schemes is that the wet joints and the prestressed construction time are different. Through the finite element calculation and analysis, the force of the structure in the construction process, the force of the bridge, the cable force, the alignment of the bridge, the lateral deformation in the steel girder installation process and the construction period are compared and analyzed. After comprehensive comparison, the scheme 3 is finally determined as the optimal scheme.

Keywords: bridges; cable stayed bridges; erection schemes; wet joint; cable force; linear shape; finite element analysis

1 工程概况

佛山特大桥跨东平水道斜拉桥为双塔双索面混合梁斜拉桥, 设计速度 350km/h, 轨道形式为减振型 CRTS 双块式无砟轨道。线路位于佛山市南海区境内, 本桥位于东平水道上段, 起点位于狮山镇佛山大堤, 终点位于丹灶镇下滘村。

主桥整体为双塔七跨式斜拉桥, 跨径布置为 (67.5+60+60+350+60+60+67.5)m, 墩号为 80~87 号墩, 其中 83, 84 号墩为主塔, 边跨设置 2 个辅助墩, 桥面以上有效塔高 109m; 采用混合主梁, 两端各 209.4m 为混凝土箱梁, 中间段采用结合梁, 二者结合部设置钢混结合段(见图 1, 2)。

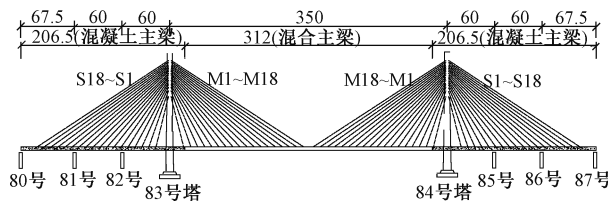


图 1 主桥立面布置(单位:m)

Fig. 1 Elevation layout of the main bridge (unit: m)

混凝土箱梁采用单箱三室等高截面, 梁顶宽 16.5m, 中心处梁高 4.5m。普通截面分为带风嘴和不带风嘴 2 种形式。标准横断面为带风嘴形式, 顶、底板及斜底板厚 40cm, 中腹板厚 50cm, 边腹板厚 170cm; 在边墩及辅助墩支点处顶、底板及斜底板加厚至 70cm, 中腹板加厚至 110cm, 边腹板加厚至 200cm。

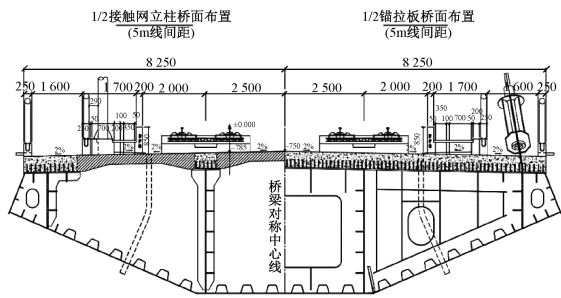


图 2 中跨叠合梁断面

Fig. 2 Cross section of mid-span composite girder

钢梁采用 Q345qD 钢材,分段为钢混结合段(长 10.6m)、节段 A(长 18m)、节段 B2~B8(每节段长 18m)。纵向每隔 9m 设置 1 道拉索横隔板,9m 横隔板间设置 3 道半环横肋,在每 2 道半环横梁间设置 1 道腹板竖肋。

顶板包括边腹板上翼缘、中腹板上翼缘及横隔板上翼缘,其中边、中腹板上翼缘标准宽分别为 1 780,900mm,厚 36mm。

底板包括平底板和斜底板,平底板内宽 5 588mm,斜底板内宽 6 433mm,平底板和斜底板为一块整板,根据受力需要在顺桥向不同区段采用 16,20mm 板厚。底板加劲肋主要采用 U 形加劲肋,厚度 8mm,间距 800mm,在靠近边腹板处斜底板上增设 1 道板肋,宽 240mm,厚 22mm。

边腹板高 1 749mm,标准段厚 30mm,与锚拉板连接范围加厚至 40mm。边腹板上设置 2 道高 280mm、厚 28mm 纵向加劲肋。

中腹板高 3 878mm,根据受力需要在顺桥向不同区段采用 20,24mm 板厚。中腹板纵向采用板式加劲肋,高度方向共设置 5 道加劲,高 250mm,厚 24mm,在横隔板和横隔肋间于中腹板两侧设置厚 22mm 横向加劲肋。

混凝土桥面板全宽 16.5m、标准厚度 30cm,在钢梁上翼缘附近区域加厚至 50cm。桥面板分为预制板与纵向湿接缝及横向湿接缝 3 部分,桥面板横向分为 3 块预制板,板宽分别为 3.72,4.3,3.72m,纵向湿接缝宽分别为 1.68,0.7,0.7,1.68m,横向湿接缝宽 0.6m。

2 主桥施工方案

根据本桥特点,对钢主梁架设提出 3 种施工方案:①方案 1,第 n 节段钢梁、混凝土及预应力全部施工完成后再进行第 $(n+1)$ 节段施工;②方案 2,各节段只吊装桥面板,湿接缝在主桥合龙后施工;③方案 3,湿接缝滞后 1 个节段施工。3 种方案的主要施工流程如表 1 所示。

表 1 混凝土桥面板湿接缝浇筑工序
Table 1 Wet joint pouring sequence of concrete bridge deck slab

施工步骤	方案		
	方案 1	方案 2	方案 3
1	n 节段钢梁吊装	n 节段钢梁吊装	n 节段钢梁吊装
2	n 节段钢梁焊接	n 节段钢梁焊接	$(n-1)$ 节段湿接缝施工、 n 节段钢梁焊接
3	n 节段斜拉索张拉	n 节段斜拉索张拉	$(n-1)$ 节段桥面板预应力施工
4	n 节段桥面板吊装	n 节段桥面板吊装	n 节段斜拉索张拉
5	n 节段湿接缝施工	起重机前移到 n 节段	n 节段桥面板吊装
6	n 节段桥面板预应力施工	$(n+1)$ 节段钢梁吊装	起重机前移到 n 节段
7	起重机前移至 n 节段	$(n+1)$ 节段钢梁焊接	$(n+1)$ 节段钢梁吊装
8	$(n+1)$ 节段钢梁吊装	$(n+1)$ 节段斜拉索张拉	n 节段湿接缝施工、 $(n+1)$ 节段钢梁焊接
9	$(n+1)$ 节段钢梁焊接	$(n+1)$ 节段桥面板吊装	n 节段桥面板预应力施工
10	$(n+1)$ 节段斜拉索张拉	起重机前移至 $(n+1)$ 节段	$(n+1)$ 节段斜拉索张拉

3 有限元分析

3.1 有限元模型

主桥采用有限元软件 Midas Civil 进行计算。主梁与桥塔均采用梁单元,斜拉索采用桁架单元模拟,主梁采用联合截面,混凝土桥面板在相应的施工阶段与钢梁结合,与钢梁共同参与受力,斜拉索与主塔、主梁采用刚性连接,有限元模型共划分了 637 个结点、494 个单元,结构离散如图 3 所示。

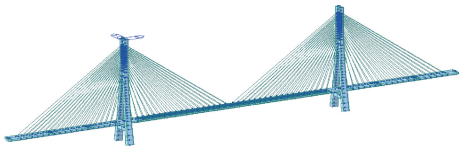


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

结构自重按实际质量修改材料重度的方式施加,二期恒载按均布荷载施加,桥式起重吊机自重与吊装钢梁重采用集中力方式施加。根据实际施工工序,划分了桥塔施工、边跨现浇梁施工、桥式起重吊机前移、钢梁吊装、斜拉索张拉、桥面板吊装、湿接缝施工、桥面板预应力张拉、二次调索等施工阶段,全过程共计 102 个施工阶段。

3.2 施工过程受力对比

施工过程钢梁与桥面板受力如表 2 所示,钢梁 3 种方案最大压应力值为 -136.9MPa,小于

TB 10091—2017《铁路桥梁钢结构设计规范》中材料 Q345 容许应力 210MPa 的要求。混凝土桥面板最大拉应力为 2.7MPa,小于 TB 10092—2017《铁路桥涵混凝土结构设计规范》中材料 C55 容许拉应力 2.97MPa 的要求。

表 2 施工过程中受力最大值

Table 2 The maximum stress during construction		
	MPa	
方案	钢梁	桥面板
方案 1	-136.9	2.7
方案 2	-139.7	1.1
方案 3	-120.7	1.7

由计算结果可知,3 种施工方案钢梁受力远小于规范要求,对钢梁影响不大,但对混凝土桥面板受力影响较大,方案 1 计算的混凝土最大拉应力达 2.7MPa,已接近规范容许值。方案 1 中,全桥混凝土在施工过程中均会受到较大拉应力,这主要是因为湿接缝施工完成后,桥面板便与钢梁形成整体参与受力,当架桥机前移,吊装下一节段钢梁时会对本节段梁体产生非常大的支反力,从而对本节段的混凝土桥面板产生较大拉应力,拉应力直到斜拉索张拉后才得到改善。方案 2 与方案 3 湿接缝均采用滞后方式施工,当桥式起重机吊梁时,由于湿接缝还未施工,桥面板不参与受力,所以桥面板的拉应力要远小于方案 1(见图 4)。

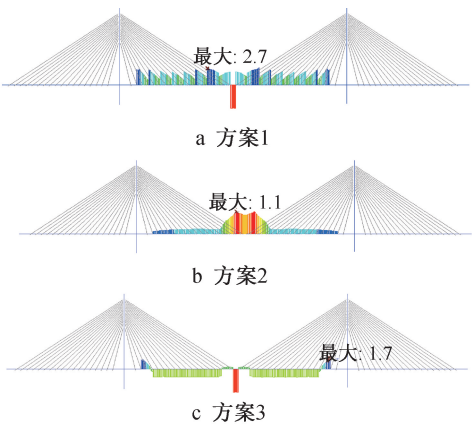


图 4 桥面板受力(单位:MPa)

Fig. 4 Stress of bridge deck slab(unit:MPa)

3.3 成桥受力对比

成桥阶段 3 种方案受力如表 3,4 所示,计算结果表明,钢梁与混凝土桥面板受力均处于受压状态,受力值小于规范要求。3 种方案钢梁与混凝土受力形状相似,只是受力峰值位置与大小不同。

3.4 索力对比

高速铁路对成桥轨道线形要求严格,时速

表 3 钢梁成桥受力

Table 3 Stress of steel girder when bridge constructing				
	MPa			
方案	上缘最大	上缘最小	下缘最大	下缘最小
方案 1	-111.6	-2.0	-101.3	-51.0
方案 2	-115.0	-23.2	-99.1	-55.8
方案 3	-101.2	-23.7	-83.4	-47.4

表 4 桥面板成桥受力

Table 4 Stress of bridge deck slab when bridge constructing				
	MPa			
方案	上缘最大	上缘最小	下缘最大	下缘最小
方案 1	-11.4	-5.4	-11.6	-6.6
方案 2	-11.6	-4.7	-10.8	-5.1
方案 3	-15.0	-7.2	-13.6	-6.9

350km 的高速铁路正线无砟轨道线路静态平顺度 60m 弦长高低指标为 7mm。如果改变主梁施工方案,而斜拉索初张力不变,则最终的成桥线形则会有较大区别,可达 1m,所以方案比选时线形也是重要控制指标。

以方案 1 的成桥线形为目标,调整方案 2 与方案 3 的初张力,以此来解决由于方案变化引起的成桥线形变化。为了实现 3 种方案成桥索力不出现较大偏差,采取以下原则:①通过调整初拉力大小,不改变 3 个方案中的二次调索索力大小,这主要是因为悬臂阶段主梁刚度相对于合龙时小,更易实现线形调整;②以合龙、成桥 2 个工况下的线形目标调整初张索力;③由于边跨为混凝土梁,刚度非常大,所以调整时以中调索力调整为主,边跨为微调。

通过索力迭代计算,调整后的初张力如图 5 所示。除 M18 号索外,总体上 3 种方案的索力增幅不大,相对于方案 1,增大 M18 号索的初张力主要原因在于方案 1 中 M18 张拉力过小,索体完成初张拉后,梁塔变形、斜拉索弹性伸长量均较小,导致 M18 索长偏短,张拉端螺母锚固长度不足。

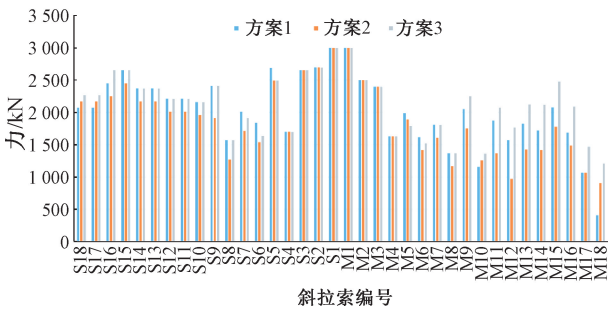


图 5 斜拉索初张力

Fig. 5 Initial tension of stay cables

3 种方案的成桥索力值如图 6 所示,从图中可看出 3 种方案成桥索力基本相同。

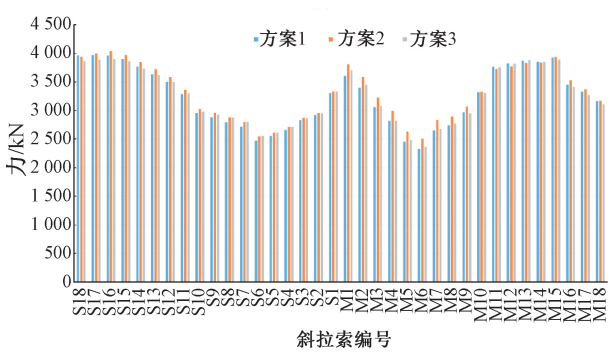


图 6 成桥索力

Fig. 6 Cable force when bridge constructing

3.5 成桥线形对比

以方案 1 成桥线形为目标,方案 2 与方案 3 的成桥线形如表 5 所示,方案 2 与方案 1 的偏差在 -13.5~11.7mm,方案 3 与方案 1 的偏差在 -9.3~9.8mm。虽然方案 2 与方案 3 的偏差超出 60m 弦长的静态验收标准,由于整体线形偏差不大,可以结合二次索力大小及底座板尺寸调整来保证成桥时的轨道标高符合验收要求(见图 7)。

表 5 成桥线形			
Table 5 Linear shape when bridge constructing			
拉索 编号	方案		
	方案 1	方案 2	方案 3
M1	0.6	1.9	3.2
M2	9.8	8.6	11.4
M3	22.3	16.6	21.9
M4	35.9	27.1	34.9
M5	49.7	38.1	47.0
M6	64.2	50.7	58.2
M7	77.9	64.5	69.5
M8	91.5	80.5	82.2
M9	103.3	97.8	96.4
M10	114.4	114.3	110.5
M11	125.7	130.0	124.8
M12	135.1	143.3	137.8
M13	143.4	154.1	149.1
M14	150.7	162.4	158.3
M15	156.9	167.7	165.3
M16	162.6	170.3	170.0
M17	166.5	170.0	173.6
M18	168.7	166.4	178.5

3.6 横向变形

本项目钢梁间采用焊接连接,当钢梁起吊后,由于桥式起重机前支点处于后一节段的中腹板上,会导致钢梁在横桥向发生变形,方案 1 由桥面板与钢梁共同受力,刚度大,方案 2,3 仅钢梁受力,刚度小,而待安装钢梁的横向变形较小,存在钢纵梁竖向错位情况,影响施工质量,所以需验算焊缝错位量,以保证钢梁顺利焊接。

当吊装钢梁时,前支点最大反力的合力为

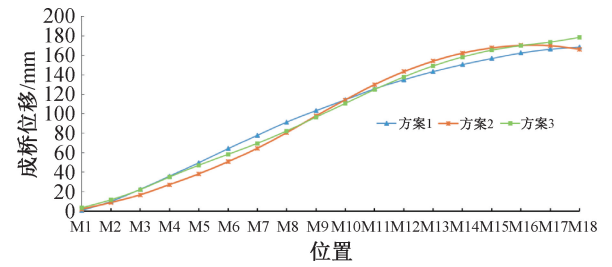


图 7 成桥跨中位移

Fig. 7 Mid-span displacement when bridge constructing

5 183kN,建立横向有限元模型,在斜拉索锚处设置约束,根据桥式起重机前支点站位位置,在中腹板处施加吊装时相应的集中力,经计算得到钢梁横向最大变形为 6mm,对钢梁安装影响较小(见图 8)。

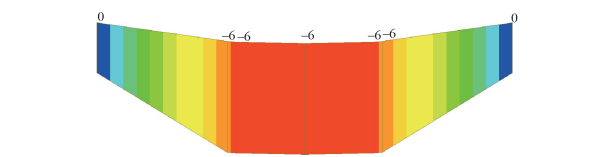


图 8 横桥向钢梁位移

Fig. 8 Transverse displacement of steel girder

4 临时结构

4.1 临时支垫设计

采用方案 2 或方案 3 施工时,当桥式起重机前移后,桥面板湿接缝尚未浇筑,桥式起重机站位于钢梁上,起重机桥面站位如图 9 所示。

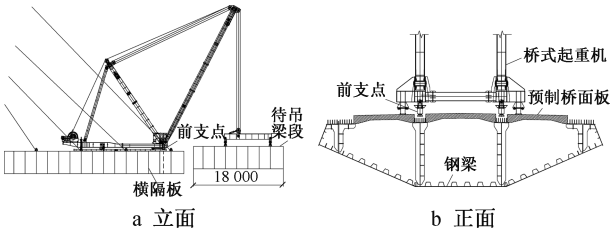


图 9 起重机站位

Fig. 9 Crane positioning

由于钢梁顶板湿接缝处有剪力钉,加之起重机前支点受力大,起重机支腿无法有效支承在钢梁顶板,所以需设计临时支垫结构,便于桥式起重机支腿落地,并能将反力有效传递到钢梁上,同时临时支垫结构还要便于移动与安装,不切割剪力钉。综合各方面因素考虑后,临时支垫构造如图 10 所示,其主要受力构件为板 N1, N2, N3,其中 N1 板厚 36mm、长 1 000mm,与钢梁腹板对齐;N2 作为 N1 板的加劲,布置在 N1 两侧,且避开剪力钉位置,N2 板厚 20mm、宽 160mm;N3 数量、板厚与 N2 相同,且与 N2 各板在同一面内,N3 伸出预制板外,与预制板间留约 4cm 间隙,在临时支垫位置调整后用钢板塞紧

间隙,既可保持临时结构稳定性,又能将部分吊装力由 N3 传到桥面板,减小钢梁受力。

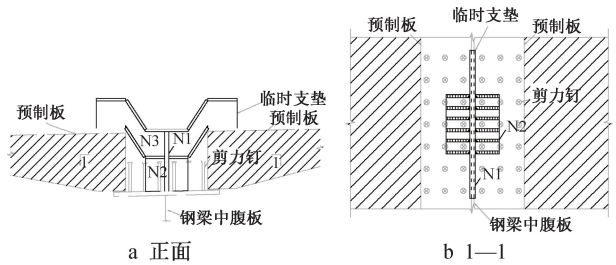


图 10 临时支垫构造
Fig. 10 Temporary cushion structure

4.2 钢梁局部受力分析

经计算,当起重机起吊钢梁时,前支点最大反力的合力为 5 183kN,前支点距钢梁横隔板 750mm,当起吊下一节段钢梁时,起重机前支点反力较大,需分析钢梁在起重机起吊钢梁荷载作用下的局部受力及稳定性。参考 JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》,钢梁局部强度结果为 302MPa,小于规范要求的 355MPa,稳定系数为 0.45,超出规范>1 的要求,所以需在腹板上进行补强,提高腹板稳定性。结合临时支垫结构设计 with 受力情况,在腹板上增加 2 道加劲板,厚 22mm,间距 380mm,加劲板与临时支垫 N2 对齐,补强后的钢梁局部强度结果为 139MPa,稳定系数为 1.34,局部强度与稳定性均符合规范要求。

5 方案比选

从钢梁 A 开始施工到最后合龙段桥面板预应力张拉完成,方案 1 每节段工期为 15d,总工期约为 129d;方案 2 每节段工期为 8d,总工期约为 80d;方案 3 每节段工期为 10d,总工期约为 94d。从工期与受力看,方案 2 与方案 3 优于方案 1。由于桥面板预应力是锚在各节段的湿接缝中,当后一节段桥面板吊装后,湿接缝宽度为 60cm,导致预应力张拉空间不足,所以方案 2 可操作性不强。综合比较后,确定方案 3 为最优方案(见表 6)。

Table 6 Comparison and selection of the schemes				
方案	工期/d	钢结构 受力	混凝土桥面 板受力	可行性
方案 1	129	小	大	可行
方案 2	80	小	小	不可行
方案 3	94	小	小	可行

6 结语

本文以新建广湛高铁佛山特大桥跨东平水道斜拉桥为背景,分析 3 种不同上部结构钢主梁架设

方案,其中方案 1 为桥面板湿接缝与预应力在本节段钢梁完成后施工,方案 2 为全桥合龙后再施工湿接缝与预应力,方案 3 为桥面板湿接缝与预应力滞后 1 个节段施工。通过有限元分析,从结构在施工过程中受力、成桥受力、索力、成桥线形、钢梁安装过程中横向变形及工期等方面对比,3 种方案工期分别为 129,80,94d;桥面板在施工过程中的拉应力分别为 2.7,1.1,1.7MPa;3 种方案索力相差不大;成桥线形方案 2 与方案 1 偏差在-13.5~11.7mm,方案 3 与方案 1 偏差在-9.3~9.8mm;吊装过程中钢梁横向最大变形为 6mm,对钢梁安装影响较小;方案 2 与方案 3 中的桥式起重机前支点对原结构产生较大支反力,但通过临时支垫设计与结构补强,补强后钢梁局部强度与稳定性均符合规范要求。方案 2 由于桥面板预应力张拉空间受限,操作性不强。综合比较后,方案 3 为最优方案。

参考文献:

[1] 阙水杰,葛路,杨文爽,等. 跨襄阳北铁路编组站大桥主梁悬臂施工工序优化及控制 [J]. 桥梁建设, 2023, 53(S2): 148-155.
QUE S J, GE L, YANG W S, et al. Optimization and control of cantilever construction process of superstructure of a bridge crossing multiple railways in Xiangyang North Station [J]. Bridge construction, 2023, 53(S2): 148-155.

[2] 叶德炳,翁方文. 跨海高速铁路结合梁斜拉桥上部结构施工关键技术 [J]. 铁道建筑, 2022, 62(9): 93-96.
YE D B, WENG F W. Key construction techniques for superstructure of sea-crossing high speed railway cable-stayed bridge with steel-concrete composite girder [J]. Railway engineering, 2022, 62(9): 93-96.

[3] 詹元林,杨勇,王荣辉,等. 大跨径斜拉桥钢-混凝土叠合梁架设工序优化及受力分析 [J]. 公路, 2021, 66(7): 160-164.
ZHAN Y L, YANG Y, WANG R H, et al. Optimization of erection process and stress analysis of steel-concrete composite beam of long-span cable-stayed bridge [J]. Highway, 2021, 66(7): 160-164.

[4] 刘发梁,王荣辉,张卓杰. 叠合梁斜拉桥混凝土桥面板湿接缝浇筑工序研究 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2021, 38(1): 104-108, 119.
LIU F L, WANG R H, ZHANG Z J. Study on the pouring procedure of the wet joints of the concrete deck of the composite beam cable-stayed bridge [J]. Journal of Guizhou University (natural sciences), 2021, 38(1): 104-108, 119.

[5] 赵子龙,张栋. 赤壁长江公路大桥钢-混结合梁施工关键技术 [J]. 桥梁建设, 2022, 52(2): 11-17.
ZHAO Z L, ZHANG D. Key construction techniques for steel-concrete composite girder of Chibi Changjiang River Highway Bridge [J]. Bridge construction, 2022, 52(2): 11-17.

[6] 孙洪斌,陈涛. 宁波三官堂大桥施工控制关键技术 [J]. 桥梁建设, 2020, 50(5): 119-124.

相结合施工技术[J]. 施工技术,2015,44(S2):736-741.

LI T, WU M C, NING Z X, et al. Construction technology of combining inclined attached scaffold with integrated lifting scaffold[J]. Construction technology, 2015, 44(S2): 736-741.

[3] 李聪正, 桂雅云, 刘鹏. 附墙式升降脚手架应对超高层收缩、倾斜及架空结构的综合技术应用[J]. 安徽建筑, 2020, 27(7):56-57.

LI C Z, GUI Y Y, LIU P. Comprehensive technical application of wall-attached lifting scaffold in dealing with shrinkage, inclination and overhead structure of super high-rise buildings[J]. Anhui architecture, 2020, 27(7): 56-57.

[4] 周磊. 倾斜附着式升降脚手架静力稳定及防坠动力特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.

ZHOU L. Study on static stability and anti-falling dynamic characteristics of inclined attached lift scaffold [D]. Jinan: Shandong University, 2020.

[5] 刘红波, 于磊, 陈志华, 等. 全钢集成式附着升降脚手架冲击性能研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(22): 72-79.

LIU H B, YU L, CHEN Z H, et al. Research on impact performance of all-steel integrated attached lift scaffold [J]. Construction technology, 2022, 51(22): 72-79.

[6] 候丹涛, 曾凡奎, 郭君. 附着式升降脚手架现场试验研究与有限元分析[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(5): 145-151.

HOU D T, ZENG F K, GUO J. Field test research and finite element analysis of attached lifting scaffolding[J]. Journal of civil engineering and management, 2022, 39(5): 145-151.

[7] 刘晓旭, 马治民, 赵明, 等. 支座形式对附着式升降脚手架影响分析[J]. 施工技术, 2017, 46(18): 70-73.

LIU X X, MA Z M, ZHAO M, et al. Effect of support style on performance of attached lifting scaffolds [J]. Construction technology, 2017, 46(18): 70-73.

[8] 戈文思, 殷晨波, 吴福宝. 新型提升方式对附着式脚手架力学特性影响分析[J]. 施工技术, 2015, 44(2): 123-125.

GE W S, YIN C B, WU F B. Influence analysis of mechanical properties of new lifting method on attached scaffold [J]. Construction technology, 2015, 44(2): 123-125.

[9] 林冰, 张志超, 张连魁, 等. 附着升降式脚手架构件性能试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(22): 106-110.

LIN B, ZHANG Z C, ZHANG L K, et al. Performance test of attached lifting scaffold components[J]. Construction technology, 2021, 50(22): 106-110.

[10] 徐洪广, 王耀, 魏伟, 等. 智能附着式升降脚手架关键技术[J]. 施工技术, 2019, 48(S1): 900-904.

XU H G, WANG Y, WEI W, et al. Key technology of intelligent attached lifting scaffold [J]. Construction technology, 2019, 48(S1): 900-904.

[11] 李改华, 郝海涛. 附着式升降作业安全防护平台产业高质量发展研究[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(16): 11-14, 21.

LI G H, HAO H T. Study on the high-quality development of attached lifting work safety protection platform industry [J]. Construction technology, 2021, 50(16): 11-14, 21.

[12] 武超, 孙桑, 伍勇军, 等. 新型曳引式内置施工升降机设计研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(11): 102-106.

WU C, SUN S, WU Y J, et al. Research on design of new traction built-in construction elevator[J]. Construction technology, 2023, 52(11): 102-106.

(上接第 91 页)

SUN H B, CHEN T. Key construction control techniques for Sanguantang Bridge in Ningbo [J]. Bridge construction, 2020, 50(5): 119-124.

[7] 余毅, 彭旭民. 平塘特大桥上部结构施工方案优化措施分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(S1): 104-108.

YU Y, PENG X M. Analysis of optimization measures to construction schemes for superstructure of Pingtang Bridge[J]. Bridge construction, 2019, 49(S1): 104-108.

[8] 刘传志, 妥鹏. 平潭海峡公铁两用大桥元洪航道桥桥塔墩顶钢梁施工技术[J]. 世界桥梁, 2019, 47(2): 39-43.

LIU C Z, TUO P. Construction techniques for pier-top steel girders of Yuanhong Ship Channel Bridge of Pingtan Straits Railcum-road Bridge[J]. World bridges, 2019, 47(2): 39-43.

[9] 陈涛, 顾惠明, 王吉. 宁波新典桥拱肋合龙施工控制关键技术[J]. 世界桥梁, 2023, 51(S1): 78-84.

CHEN T, GU H M, WANG J. Key arch rib closing control techniques for Xindian Bridge in Ningbo [J]. World bridges, 2023, 51(S1): 78-84.

[10] 陈涛, 袁建新. 宁波三官堂大桥主桥合龙控制关键技术[J]. 桥梁建设, 2021, 51(4): 141-146.

CHEN T, YUAN J X. Key closure control techniques for main bridge of Sanguantang Bridge in Ningbo[J]. Bridge construction, 2021, 51(4): 141-146.

[11] 中铁大桥勘测设计院集团有限公司. 铁路桥梁钢结构设计规范: TB 10091—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.

China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd. Code for design on steel structure of railway bridge: TB 10091—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.

[12] 中铁工程设计咨询集团有限公司. 铁路桥涵混凝土结构设计规范: TB 10092—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.

China Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd. Code for design of concrete structures of railway bridge and culvert: TB 10092—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

[13] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.

CCCC Highway Consultants Co., Ltd. Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

[14] 陈涛, 邱景奎, 王吉. 整体顶推提篮拱桥施工过程中力学性能分析[J]. 中外公路, 2025, 45(3): 145-152.

CHEN T, QIU J K, WANG J. Analysis of mechanical properties of integral jacking basket arch bridge during construction [J]. Journal of China & foreign highway, 2025, 45(3): 145-152.