

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.240290

大跨度钢桁拱桥主梁过渡段结构设计与研究

华晓勇¹, 顾民杰², 吴万忠²

[1. 中国能源建设集团华东建设投资有限公司, 上海市 200030; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 以株洲清水塘双层钢桁架拱桥工程为背景, 介绍了多跨桥梁中跨采用 UHPC 轻型组合桥面板钢主梁, 边跨采用传统钢混组合梁的主梁布置形式, 详细讨论了主梁及桥面板过渡段的设计要点; 结合空间有限元模型计算分析, 验证了该类过渡段结构能够实现传力构造和刚度的稳定过渡, 总结归纳了特大跨径桥梁过渡段结构的设计经验。

关键词: 混合梁; 过渡段; 组合梁; 桥面板; 球扁钢; 超高性能混凝土

中图分类号: U443.35 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2025)05-0076-06

Design and Study on Transition Segment Structure of Long-span Steel Truss Arch Bridge Girder

HUA Xiaoyong¹, GU Minjie², WU Wanzhong²

[1. China Energy Engineering Group East China Construction Investment Co., Ltd., Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Taking the Zhuzhou Qingshitang Double-deck Steel Truss Arch Bridge Project as the background, the layout forms of the UHPC light composite deck and steel girder used for the middle span, and the traditional steel-concrete composite girder used for the side span of multi-span bridge are introduced. The design essentials of the transition segment of the girder and deck are discussed in detail. Combined with the spatial finite element model of calculation and analysis, it is proved that this kind of transition segment structure can realize the stable transition of force transfer structure and stiffness. The design experience of transition segment structure of ultra-long-span bridge is summarized.

Keywords: combined beam; transition segment; composite beam; bridge deck; flat-bulb steel; ultra high performance concrete (UHPC)

0 引 言

株洲清水塘大桥位于湖南省株洲市, 主桥上跨湘江。为了在确保主跨跨径的同时平衡边中跨荷载, 改善受力, 提高桥梁整体经济性, 主跨桥面采用超高性能混凝土(UHPC)轻型组合桥面板钢主梁, 边跨则采用双主梁+横梁的钢混组合桥面。采用此类主梁布置的结构体系在国内应用较少, 保障其受力性能的关键在于开发合理的桥面过渡构造, 但目前缺乏开发该类构造的可靠技术^[1-11]。

清水塘大桥总体布置见图 1。

1 工程概况

株洲清水塘大桥跨湘江主桥采用长度 $L=100\text{ m}+$

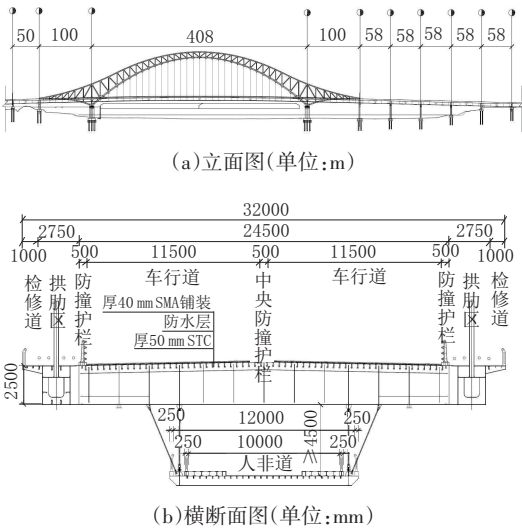


图 1 清水塘大桥总体布置

408 m+100 m 的双层钢桁架拱桥, 3 跨连续结构, 拱脚墩顶设置球钢支座; 上层桥面宽 32 m, 车行道净宽 24.5 m, 双向 6 车道; 下层布置慢行人非道, 吊杆区净

收稿日期: 2024-03-18
作者简介: 华晓勇(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事产业发展及工程项目管理工作。

宽 10 m。主跨桥面采用超高性能混凝土(UHPC)轻型组合钢桥面钢主梁,边跨采用双主梁+横梁的钢混组合桥面,主梁节段栓焊结合连接。

2 主梁结构方案设计

2.1 中跨主梁、系梁及桥面板设计

中跨钢主梁宽度为 1 800 mm,高度为 2 500 mm。钢横梁标准间距为 3 000 mm,吊点横梁下缘与边系梁齐平,在道路中心线处高 2 760 mm;非吊点梁高适当降低,道路中心线处梁高 2 097 mm。钢桥面采用面板+球扁钢加劲形式。组合桥面板,面板采用球扁钢加劲,球扁钢规格为 12 mm×260 mm,间距 400 mm。现浇 UHPC 层厚 50 mm,通过短焊钉与钢桥面板连接,焊钉规格为 $\phi 13\times 40$,间距约 210 mm。UHPC 层内设置横纵向钢筋网,钢筋直径为 10 mm,间距约 30~50 mm。桥面采用 4 cm 沥青混凝土铺装(见图 2)。

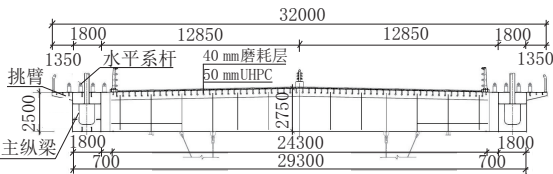


图 2 中跨主梁及桥面板构造图(单位:mm)

2.2 边跨主梁、系梁及桥面板设计

边跨钢主梁宽度为 1 800 mm,高度为 2 250 mm。钢横梁标准间距为 4 000 mm,节点横梁下缘与边系梁齐平,在道路中心线处高 2 498 mm;非节点梁高适当降低,道路中心线处梁高 1 985 mm。钢系梁、钢横梁、纵梁组成桥面格子梁体系,在钢横梁与小纵梁顶面布置 $\phi 22$ mm 圆柱头焊钉与厚度为 250 mm 预制钢混桥面板形成组合梁结构,预制板间设置横纵向接缝,接缝混凝土采用 C50 补偿低收缩混凝土,并掺加钢纤维。桥面采用 9 cm 沥青混凝土铺装(见图 3)。

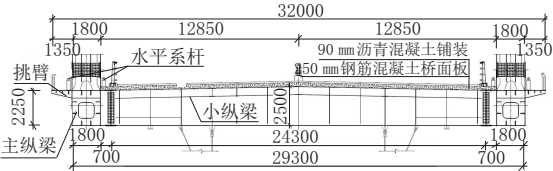
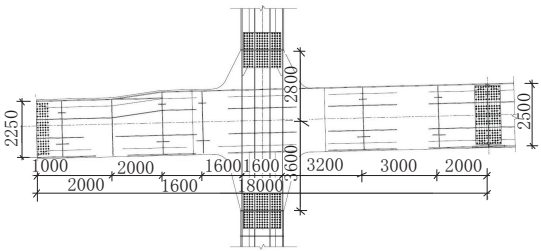


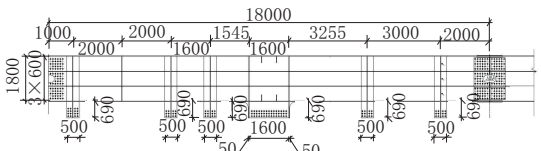
图 3 边跨主梁及桥面板构造图(单位:mm)

2.3 主梁过渡段构造

主梁过渡段底板对齐,节点板变高,具体构造及尺寸见图 4。根据总体布置和计算,节点板顺桥向长度为 18 m,两侧分别连接中跨主梁和边跨主梁;节点板竖向高度为 6.4 m,上下分别连接主桁腹杆。主梁节点板厚度为 36 mm,顶板、底板、腹板厚度均为 28 mm,横隔板厚度为 20 mm。



(a)立面图

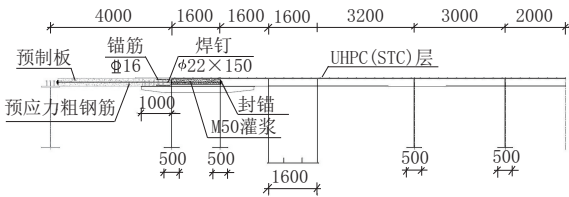


(b)平面图

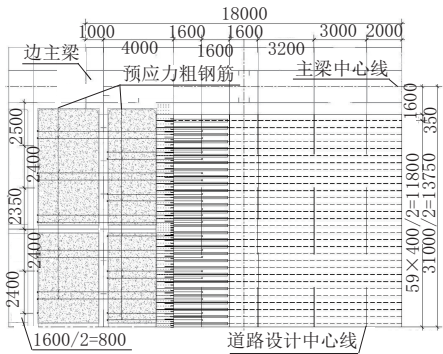
图 4 主梁过渡段构造图(单位:mm)

2.4 桥面板过渡段构造

桥面板过渡段在结合面处设置 1 道横梁,将球扁钢加劲变化为倒 T 形加劲,并在下方增设竖直加劲,在钢混组合梁侧形成混凝土板钢承托。在混凝土桥面板间设置预应力,延伸至轻型组合桥面侧,并在加劲间锚固。在连接处设置剪力钉、U 形筋等构造,以提高界面抗拉能力(见图 5)。



(a)立面图



(b)平面图

图 5 桥面板过渡段构造图(单位:mm)

3 主梁过渡段有限元模型空间分析

利用有限元分析软件 ANSYS,建立主梁节段和锚箱的板壳模型,钢结构均采用 shell63 板单元模拟。主梁过渡段有限元模型见图 6。

3.1 边界条件及计算荷载

主梁过渡段有限元模型边界条件示意图见图 7。

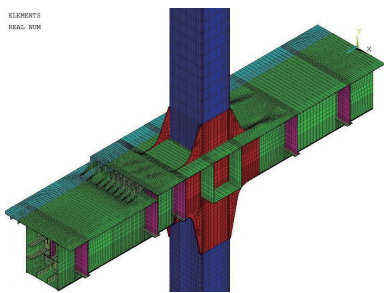


图6 主梁过渡段有限元模型图

其中:竖腹杆下端约束纵向、横向、竖向;竖腹杆上端约束纵向、横向;梁端截面设置刚臂梁,力采用节点荷载加载在刚臂梁上。

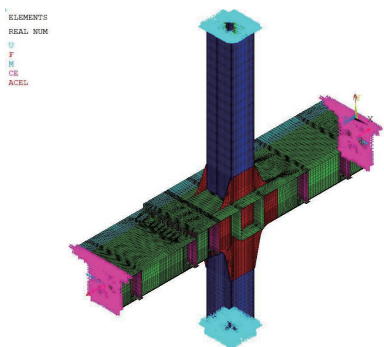


图7 主梁过渡段有限元模型边界条件示意图

主梁过渡段有限元模型计算荷载见表1。计算时,除结构自重外,由总体计算模型中节段受力状态最不利组合下对应杆件杆端力提取外荷载。表1中 F_x 、 F_y 、 F_z 分别为主梁端部横桥向、竖向、轴向集中力; T 为主梁端部扭矩; M_y 、 M_z 分别为主梁端部横桥向、竖向弯矩。

表1 主梁过渡段有限元模型计算荷载

边跨侧	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN	$T/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_z/(\text{kN}\cdot\text{m})$
标准组合	12 055	926	2 270	2 596	1 844	1 836

与总体计算模型的对比结果验证了本模型反力、应力分布等多个要素,说明本模型能正确反映主梁的受力状态。

3.2 计算结果

根据《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10091—2017),Q370qD容许剪应力 $[\tau]=125\text{ MPa}$,Q370qD容许正应力 $[\sigma]=210\text{ MPa}$ 。提取关键板件的应力计算结果,顶板和腹板的应力均小于210 MPa,满足容许应力要求。由图8、图9的Mises应力云图可见,主梁过渡段传力长度约为梁高的3倍。

4 桥面板过渡段有限元模型空间分析

利用有限元分析软件 ANSYS,建立部分主梁节

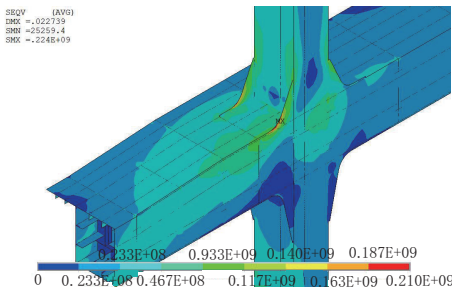


图8 全模型 Mises 应力云图(单位:Pa)

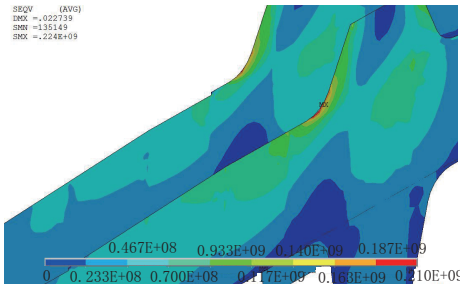


图9 腹板 Mises 应力云图(单位:Pa)

段和桥面板模型,钢板采用 shell63 板单元模拟,预应力钢筋采用 link8 单元模拟,桥面板采用 solid45 单元模拟,忽略 UHPC 层与混凝土桥面板搭接的有利影响。

桥面板过渡段有限元模型图见图10。

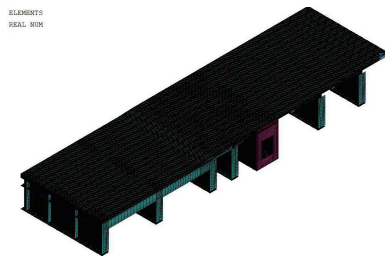


图10 桥面板过渡段有限元模型图

4.1 边界条件及计算荷载

在桥面板过渡段有限元模型中,横梁底板两端约束竖向,横梁底板一端约束横向。一侧梁端截面混凝土桥面板约束纵向,另一侧梁端截面混凝土桥面施加纵向轴力,轴力采用节点荷载加载在桥面板上。预应力钢筋和锚固区混凝土之间使用约束方程进行约束。桥面板过渡段有限元模型边界条件示意图见图11。

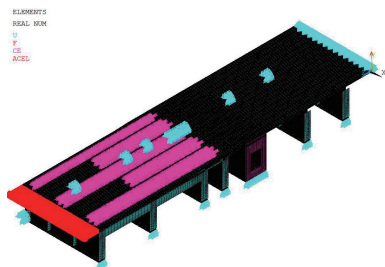


图11 桥面板过渡段有限元模型边界条件示意图

计算考虑结构自重、预应力荷载、车辆荷载和总体结构传来的纵桥向拉力。自重加速度取 10 N/kg; 预应力钢筋张拉应力为 837 MPa; 车辆荷载按照城—A 级荷载标准选取; 纵桥向拉力由 MIDAS 总体模型中获得, 取值为沿桥面宽度 701 kN/m。根据车轮布置位置的不同, 选择 2 种不利情况进行计算分析: 加载工况 1 为城—A 车辆荷载第 2、3 轴作用于结合面附近; 加载工况 2 为城—A 车辆荷载第 4 轴作用于结合面附近。

加载工况 1、工况 2 示意图见图 12。

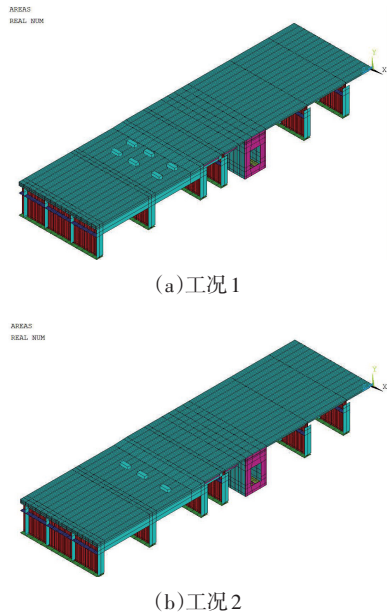


图 12 加载工况示意图

与总体计算模型的对比结果验证了本模型反力、应力分布等多个要素, 表明本模型能正确反映桥面板的受力状态。

4.2 计算结果

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018), C50 混凝土抗拉强度设计值 $f_{td}=1.83\text{ MPa}$, 有箍筋和斜筋时主拉应力容许值为 2.79 MPa, 无箍筋和斜筋时主拉应力容许值为 1.03 MPa。预应力钢筋张拉应力为 837 MPa。

桥面板过渡段有限元模型计算结果见表 2。

加载工况	桥面板最大拉应力/MPa		钢筋应力/MPa	是否满足规范要求
	结合面处	轮压作用处		
工况 1	1.52(上缘)	1.05(下缘)	804~881	满足
工况 2	1.39(上缘)	1.81(下缘)	804~881	满足

由表 2 可知, 2 种工况下的预应力钢筋应力均在 804~881 MPa 区间 (见图 13), 应力值处于合理范围,

满足上述规范要求。桥面板结合面处最大拉应力发生在工况 1, 为 1.52 MPa (见图 14(a)), 截面最大拉应力位于桥面板上缘。桥面板轮压作用处最大拉应力发生在工况 2, 为 1.81 MPa (见图 14(b)), 截面最大拉应力位于桥面板下缘。

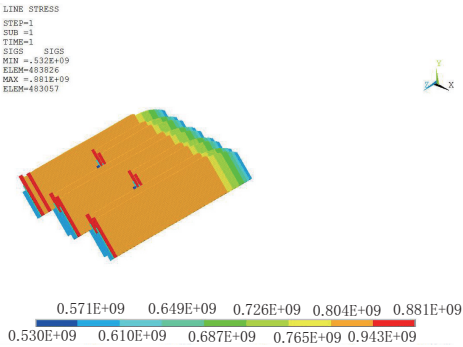
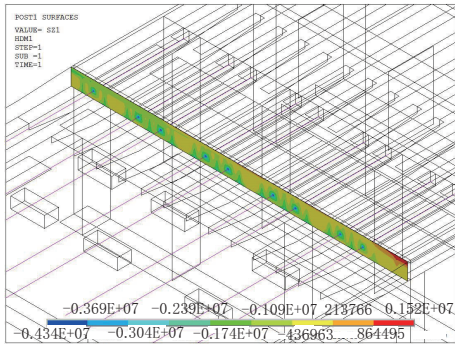
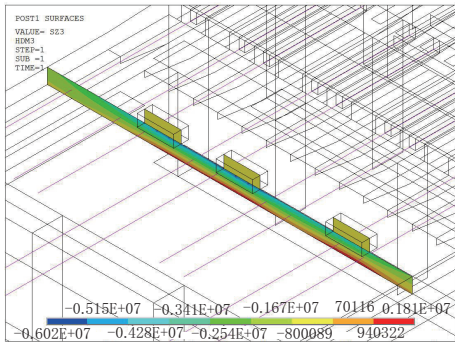


图 13 工况 1 预应力钢筋应力 (单位: Pa)



(a) 工况 1



(b) 工况 2

图 14 2 种工况下的桥面板正应力 (单位: Pa)

综上所述, 2 个关键断面处桥面板截面正应力大部分均为压应力, 仅截面边缘出现局部拉应力, 满足桥面板容许值要求。桥面板配筋时, 应注意加强桥面板结合面位置上缘抗拉钢筋、桥面板跨中位置下缘抗拉钢筋。

5 过渡段横梁有限元模型空间分析

过渡段横梁分为 H 形横梁、箱型横梁 2 类: H 形横梁高 2.5 m, 顶底板宽 0.5 m; 箱型横梁高 2.5 m,

顶底板宽 1.6 m。

2 种横梁分别采用梁格法进行计算,计算模型用 MIDAS Civil 软件建立。纵、横梁和桥面板均采用梁单元模拟(其中桥面板采用纵横向网格梁单元模拟)。桥面板与钢结构的叠合作用通过 2 层梁共节点实现。梁格模型总长为 36 m,即 3 个节间长度。节点横梁采用尺寸较小的箱形横梁截面,中间横梁为 H 形。计算模型外观见图 15。

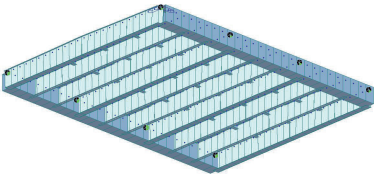


图 15 横梁有限元模型及边界条件示意图

5.1 边界条件及计算荷载

在节点横梁与主梁交界点处施加竖向约束以及必要的水平约束。Q370qD 容许正应力 $[\sigma]=210\text{ MPa}$ 。为准确模拟结构受力,共建立 4 个施工阶段,见表 3。

表 3 横梁有限元模型施工阶段

施工阶段	施工过程描述
CS1	钢结构成形
CS2	施加桥面板重量
CS3	开始计入桥面板刚度
CS4	铺装、栏杆和下层荷载
PostCS	运营阶段,施加车辆荷载和下层人群荷载

计算时,自重按结构重度和计算面积计;桥面板自重按均布荷载施加于横梁单元,荷载集度为 26 kN/m;铺装重量按均布荷载施加于桥面板横向单元,荷载集度为 8.6 kN/m;每道栏杆按 6.25 kN/m 施加于桥面板纵向单元上;施加城—A 型车辆荷载;下层桥面自重每个吊点集中力为 354 kN;下层桥面人群荷载按照 3.5 kN/m²集度取值,折合每个吊点集中力为 252 kN。

5.2 计算结果

5.2.1 H 形横梁

基本组合下 H 形横梁上缘、下缘最大应力计算结果见图 16。由图 16 可知:横梁上缘最大应力为 -115.2 MPa,横梁下缘最大应力为 277.1 MPa,均位于横梁跨中位置,满足《铁路桥梁钢结构设计规范》要求。根据验算,H 形横梁稳定性、螺栓连接强度均满足上述规范要求。

5.2.2 箱形横梁

基本组合下箱形横梁上缘、下缘最大应力见图 17。由图 17 可见,横梁上缘最大应力为 -122.5 MPa,横梁

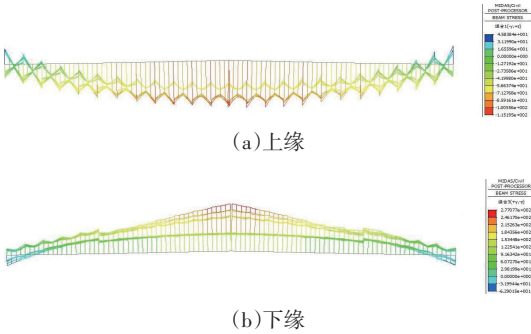


图 16 基本组合下 H 形横梁上缘和下缘最大应力(单位:MPa)

下缘最大应力为 232.9 MPa,均位于横梁跨中位置,满足《铁路桥梁钢结构设计规范》要求。

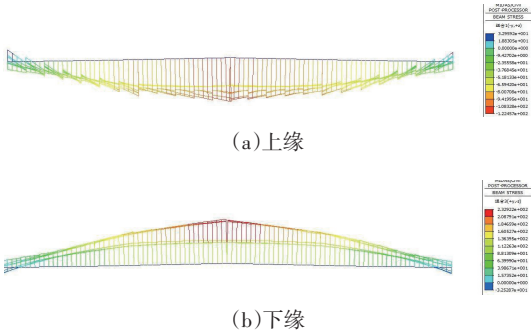


图 17 基本组合下箱形横梁上缘、下缘最大应力(单位:MPa)

为了考虑节点板处约束作用引起的负弯矩效应,偏保守地将节点横梁处设为固接进行计算。固接模型基本组合下箱形横梁上缘、下缘最大应力见图 18。由图 18 可见,箱形横梁上缘最大应力为 118.8 MPa,下缘最大应力为 -191.5 MPa,均位于横梁支两端支撑位置,满足《铁路桥梁钢结构设计规范》要求。根据验算,箱形横梁稳定性、螺栓连接强度均满足上述规范要求。

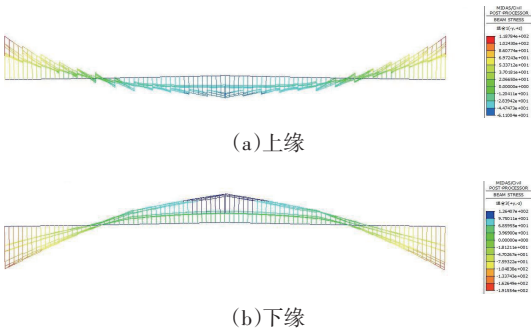


图 18 固接模型基本组合下箱形横梁上缘、下缘最大应力(单位:MPa)

6 结 语

(1)大跨径桥梁为平衡边中跨荷载,改善结构受力,提高桥梁整体经济性,主梁布置可以采用主跨超

高性能混凝土(UHPC)轻型组合桥面板钢主梁,边跨双主梁+横梁钢混组合桥面的形式。

(2)变高主梁过渡段结构应根据工程实际情况设计一定的传力长度,建议取值不小于梁高的3倍,以实现过渡段节点板与主梁节点板连接位置的均匀传力。

(3)对于传统钢混组合梁混凝土桥面与球扁钢加劲轻型组合桥面的桥面过渡段结构,采用该工程的构造措施可以实现传力构造和刚度的稳定过渡。其中,结合面处横梁、倒T型加劲、混凝土板钢承托、预应力、剪力钉、U形筋等构造均是提高界面抗拉能力的有效措施。

参考文献:

[1] 王小飞.大跨度四线铁路混合梁斜拉桥钢-混结合段有限元分析[J].铁道标准设计,2018,62(11):82-87.
[2] 蒋彦征,常付平,马翥.闵浦大桥主梁过渡段设计[J].上海公路,

2014,133(3):51-53.
[3] 马翥,邓青儿,孔德军,等.闵浦越江工程桥梁设计方案介绍[J].上海建设科技,2006(2):9-11.
[4] 郭济.大跨径自锚式悬索桥混合梁结合段受力分析[J].上海公路,2018,150(3):28-33.
[5] 陈双庆.混合梁自锚式悬索桥钢梁加劲过渡段传力机理研究[J].中外公路,2015,35(1):139-142.
[6] 李国峰,李丹,张京.混合梁结合部受力研究[J].城市道桥与防洪,2013(6):84-86;104.
[7] 何伟兵,刘玉擎,汪蕊蕊.九江长江公路大桥混合梁结合段构造分析[J].桥梁建设,2012,42(1):30-35.
[8] 陈航.沙埕湾跨海大桥主梁钢-混结合部传力机理研究[J].公路,2020,65(10):200-205.
[9] 聂利芳.铁路斜拉桥钢混结合段传力途径分析与研究[J].交通科技,2016,275(2):27-30.
[10] 蔡梦非,顾民杰,吴万忠,等.株洲清水塘大桥双层钢桁拱桥下部结构设计[J].城市道桥与防洪,2022(9):91-94.
[11] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.一种桥面过渡构造及其施工方法:CN202310086819.3[P].2023-05-16.

(上接第 75 页)

2022(252):113624.
[38] Li C, Xiang Y W, He X H, *et al.* Investigation of the Seismic Performance of a Precast CFDST Column with Internal SMA and External Energy Dissipating Devices[J]. Structures, 2024(61): 106000.
[39] Li V C, Hwai-Chung W, Maalej M, *et al.* Tensile Behavior of Cement-Based Composites with Random Discontinuous Steel Fibers [J]. Journal

of the American Ceramic Society, 1996, 79(1): 74-78.
[40] Yang E H, Li V C. Strain-Hardening Fiber Cement Optimization and Component Tailoring by means of a Micromechanical Model[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(2): 130-139.
[41] 林上顺,林永捷,夏樟华,等.现浇ECC和预制榫卯混合连接装配式RC桥墩抗震性能[J].交通运输工程学报,2023,23(5):104-117.