

梳齿榫型钢-混凝土组合梁桥结构方案研究

熊治华^{1,2}, 潘振华^{1*}, 狄荻¹, 李军³, 成立涛³, 刘宏宇¹

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2. 亚琛工业大学, 德国 亚琛 52074; 3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:为研究新型梳齿榫型钢-混凝土组合梁桥(跨径8~40 m)的结构性能并优化其设计方案, 该文以活载结构效率指数为指标, 综合考虑结构受力、工程经济、施工便利性等因素, 通过数值模拟方法, 对组合梁负弯矩区及整体式桥台无缝结合部的受力性能进行研究。研究结果表明:① 8~20 m跨径的梳齿榫型钢-混组合梁桥, 建议采用三主梁方案; 30~40 m中等跨径梳齿榫型钢-混组合梁桥, 四主梁方案具有结构及经济性优势, 五主梁方案在施工便捷性及运输等方面具有优势;② 明确了该新型组合梁合理梁高取值范围, 在四主梁方案中, 建议跨径30 m的钢腹板高度宜为600~800 mm;③ 采用小尺寸CL连接件的负弯矩区结构方案受力性能优异;④ 明确了整体式桥台无缝结合部的传力路径并提出了具体工程设计方案。

关键词:钢-混组合梁桥; 梳齿榫; 活载结构效率指数; 负弯矩区; 无缝桥

中图分类号:U441

文献标志码:A

Study on Structural Schemes of Comb-Type Steel-Concrete Composite Girder Bridges

XIONG Zhihua^{1,2}, PAN Zhenhua^{1*}, DI Di¹, LI Jun³, CHENG Litao³, LIU Hongyu¹

(1. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. RWTH Aachen University, Aachen 52074, Germany; 3. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: To investigate the structural performance of novel comb-type steel-concrete composite girder bridges (with a span of 8–40 m) and optimize their design schemes, this paper took the live load structural efficiency index as the indicator and comprehensively considered factors such as structural mechanical performance, engineering economy, and construction convenience. It also studied the mechanical performance of the negative bending moment zone and the seamless joint of the integral abutment using numerical simulation. The results show that ① for comb-type steel-concrete composite girder bridges with a span of 8–20 m, the three-girder scheme is recommended; for those with a medium span of 30–40 m, the four-girder scheme possesses structural and economic advantages, while the five-girder scheme offers advantages in construction convenience and transportation; ② The reasonable range of girder height for the novel composite girders is clarified; in the four-girder scheme, it is recommended that the height of the steel web for a 30 m span should be 600–800 mm; ③ The structural scheme of the negative bending moment zone using small-sized CL connectors exhibits excellent mechanical performance; ④ The force transmission path of the seamless joint in the integral abutment is clarified, and specific engineering design schemes are proposed.

Keywords: steel-concrete composite girder bridge; comb type; I_{LLSI} (live load structural efficiency index); negative bending moment zone; integral bridge

0 引言

自欧盟于2010年启动钢-混凝土组合梁桥研究

项目PreCoBeam以来^[1], 德国、波兰、罗马尼亚等国家已采用梳齿榫型钢-混凝土组合梁广泛应用于铁路和公路桥梁工程^[2]。钢主梁上的梳齿板既承担了

收稿日期:2024-05-21 修回日期:2024-08-29

基金项目:国家留学基金委资助项目(编号:202206305001)

作者简介:熊治华,男,博士,副教授.E-mail:zh.xiong@nwsuaf.edu.cn

*通信作者:潘振华,男,硕士研究生.E-mail:2022050880@nwfufu.edu.cn

与混凝土桥面板结合的连接件功能,同时也是主要受力构件,这与焊钉等连接件有本质区别。与开孔钢板连接件相比,梳齿榫型连接件的开口几何特点为混凝土桥面板钢筋施工提供了极大的便利。

基于上述特点,欧洲学者对梳齿榫型连接件开展了一系列的极限承载力疲劳试验和理论研究^[3-5],同时,对UHPC结合PZ及CL梳齿榫型连接件的抗拔性能、循环荷载下的疲劳裂纹扩展情况也有相关研究^[6-7]。在中国,熊治华等^[8,9]分别对PZ型连接件的抗拉拔性能、采用CL连接件的MVFT(Modified-Verbund-Fertigteile-Träger)组合梁抗弯承载能力进行了研究。在欧洲已建的梳齿榫型钢-混组合梁桥(均为中小跨径)中,其施工方案主要分为两种:第一种为工厂制作钢主梁和部分桥面板并预制叠合,运输至场地后,再对桥面板进行二次浇筑,这种方案的优点在于吊装的重量非常小,对施工机具的能力要求低;第二种方案即现场浇筑混凝土桥面板,其整体性更佳,但现场作业量及对支撑体系的要求较高。

在当前装配化、工业智能化的基建背景下,中国在钢-混凝土组合梁桥预制装配领域开展了大量的研究,如新型装配式结构^[10-12]、结构效率与稳定^[13-14]、负弯矩区受力性能^[15-16]、施工方案与装备^[17]等。考虑到快速化施工和工业化制造,笔者提出将包括桥面板在内的梳齿榫型组合梁进行整体预制^[18]。与此同时,对于小跨径桥梁,采用无缝式结构以尽可能降低运营后的检修成本,是一项具有很大发展潜力的技术方案^[19-20]。庄一舟等^[21]对3种无缝桥形式的抗震性能进行了对比分析,发现整体式桥抗震性能优异;黄福云等^[22]研究了在不同土压力状态下整体桥H型钢桩基的水平变形机理。然而,关于采用梳齿榫型上部结构与桥台整体无缝结合部的相关研究尚未见报道。

本文采用新型梳齿榫型钢-混凝土组合梁,提出一种预制装配式方案,并结合活载结构效率指数和数值模拟方法,分别对8~20 m跨径、30~40 m跨径中小桥以及整体式无缝桥台开展受力与工程经济等关键问题的研究。

1 8~20 m跨径结构方案分析

对于小跨径钢-混组合桥梁,本文选取8 m、16 m和20 m共3种典型跨径的组合梁桥为对象,进行梳齿榫型组合梁结构选型研究。桥型结构体系为简支梁,采用结构简支、桥面连续的方案,桥面总宽度为

8 500 mm。设计三主梁和四主梁两种截面方案,单主梁桥面宽度分别为2 400 mm、1 600 mm。翼缘根部厚度为200 mm,翼缘根部厚度为250 mm,厚度沿中心线方向线性增加。本文参考德国规范^[4],单个CL榫型连接件的宽度取200 mm,钢梳齿板厚度取18 mm,如图1所示。组合梁单主梁桥面宽度为 B ,总梁高为 h ,腹板混凝土部分高度为 h_c ,钢梁高度为 h_s ,钢梳齿板埋置混凝土部分深度为 h_t ,腹板混凝土部分在底部有局部加宽,腹板混凝土厚度为 t_c ,底板尺寸为400 mm×30 mm。单主梁截面布置如图1所示,对于不同跨径的截面具体的参数设计见表1,总梁高 h 的变化通过钢梳齿板的高度调整。

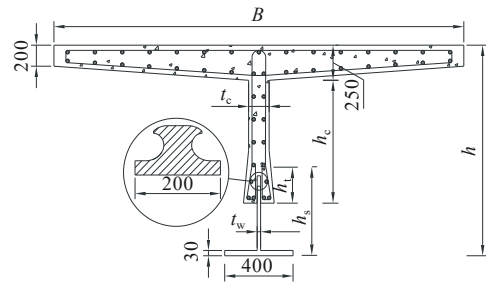


图1 单主梁截面示意图(单位:mm)

Figure 1 Section of single girder (unit: mm)

表1 组合梁截面参数设计

Table 1 Section parameter design of composite girder

跨径/ m	B /mm		h_c / mm	h_t / mm	t_w / mm	腹板混凝土厚度 t_c /mm	
	三主梁	四主梁				三主梁	四主梁
8	2 400	1 600	100	100	18	200	200
16	2 400	1 600	200	150	18	200	200
20	2 400	1 600	200	150	18	200	200

钢梁材料采用Q345qD,混凝土桥面板采用C50混凝土,车道设计为双向两车道,汽车荷载等级为公路-I级,荷载考虑恒载、车道荷载、温度作用。采用有限元软件CSI Bridge建立三维杆系有限元分析模型,CSI Bridge是一款基于SAP 2000程序内核专门针对桥梁结构分析开发的非线性软件。三主梁和四主梁横截面布置分别见图2、3,有限元模型如图4所示。

在钢-混组合梁桥设计中,既需要结构满足整体刚度的要求,以保证变形不会过大,又需要尽可能地合理控制钢材用量,以降低成本及减轻结构自重。前者往往要求使用更多的钢材,后者则要求减少钢材用量。方案设计时需要统筹二者之间存在的矛

盾,故以活载结构效率指数(I_{LLSI})为指标,综合评估结构方案的受力性能及经济性^[13]。 I_{LLSI} 的计算公式如式(1)所示:

$$I_{LLSI} = \frac{L^2}{\Delta \cdot W} \quad (1)$$

式中: I_{LLSI} 为活载结构效率指数(m/kN); L 为计算跨径(m),对于多跨连续结构, L 取最大跨径(m); Δ 为活载作用下桥梁主跨整体的最大挠度(m),取公路-I级; W 为桥梁主跨一跨钢材的重力(kN),包括钢主梁、横向联结系、普通钢筋。

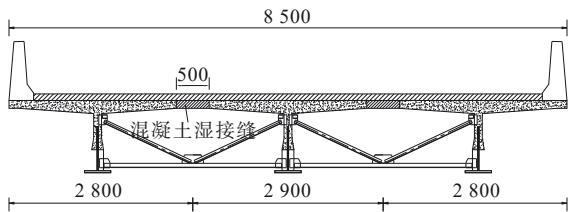


图2 三主梁截面方案示意图(单位:mm)

Figure 2 Three-girder section scheme (unit: mm)

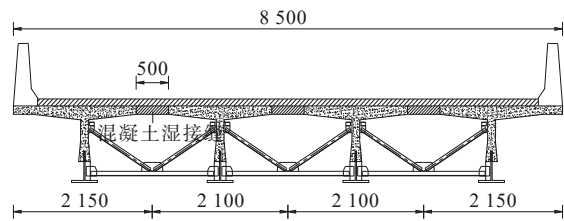


图3 四主梁截面方案示意图(单位:mm)

Figure 3 Four-girder section scheme (unit: mm)

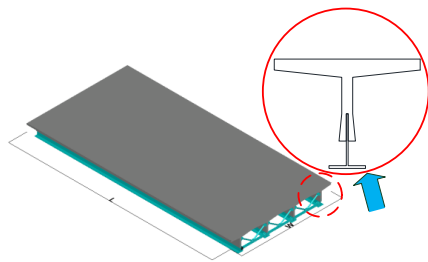


图4 有限元模型

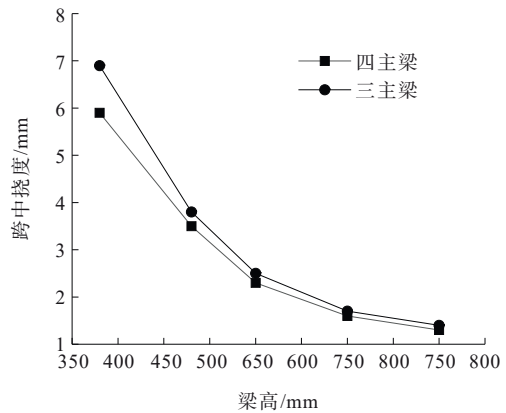
Figure 4 Finite element model

在此,定义钢梁下翼缘拉应力与强度设计值的比值为应力占比。最小梁高所对应的应力占比应小于100%且满足挠度等要求,最大梁高对应的应力水平考虑工程经济性应高于31.7%^[13]。钢材Q345qD的强度设计值为275 MPa。16 m跨径方案的计算结果如表2所示。随着梁高的变化,8 m、16 m及20 m跨径的高度与跨中挠度及 I_{LLSI} 与下翼缘应力占比关系变化分别见图5~7。

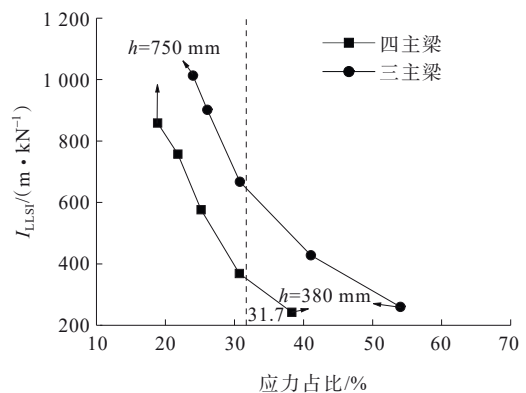
表2 16 m跨径应力水平及 I_{LLSI} 计算结果

Table 2 Stress levels and I_{LLSI} calculation results under 16 m span

截面方案	h/mm	钢梁下翼缘拉应力/MPa	钢材强度设计值/MPa	应力占比/%	$I_{LLSI}/(m \cdot kN^{-1})$
三主梁	650	198.7		72.3	450.61
	750	179.3		65.2	569.13
	850	159.6		58.1	687.21
	950	141.1	275	51.3	806.72
	1050	125.8		45.7	942.90
	1150	112.8		41.0	1096.20
四主梁	1250	101.6		37.0	1314.97
	650	169.3		61.6	457.77
	750	152.4		55.5	540.64
	850	130.8		47.6	671.93
	950	116.3	275	42.3	761.60
	1050	103.1		37.5	891.66
	1150	93.2		33.9	1056.16
	1250	85.1		30.9	1250.65



(a) 挠度-梁高 h 变化关系



(b) I_{LLSI} 与应力占比关系

图5 挠度-梁高及 I_{LLSI} -应力水平曲线图(跨径:8 m)

Figure 5 Curves of deflection-girder height and I_{LLSI} -stress level (span: 8 m)

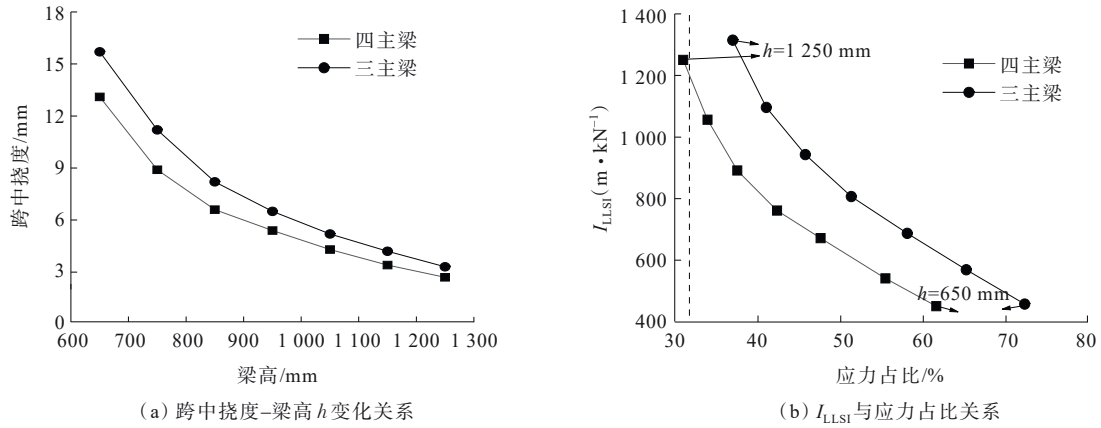


图 6 挠度-梁高及 I_{LLSI} -应力水平曲线图(跨径:16 m)

Figure 6 Curves of deflection-girder height and I_{LLSI} -stress level (span: 16 m)

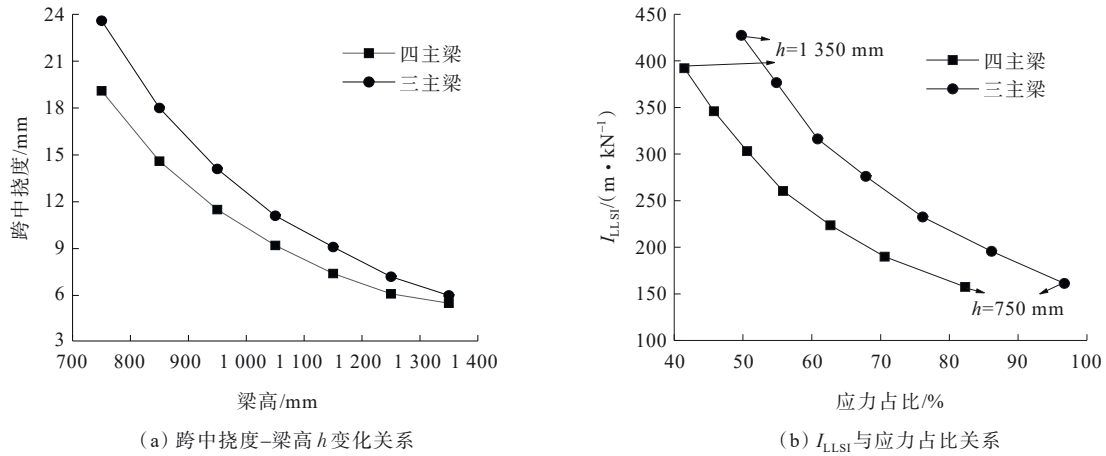


图 7 挠度-梁高及 I_{LLSI} -应力占比曲线图(跨径:20 m)

Figure 7 Curves of deflection-girder height and I_{LLSI} -stress percentage (span: 20 m)

由图 5~7 可知:在 8~20 m 跨径时,尽管在相同梁高下,四主梁方案的刚度均大于三主梁方案,但其 I_{LLSI} 系数均低于三主梁方案。在钢梁下翼缘的应力水平相同情况时,三主梁方案的 I_{LLSI} 值均大于四主梁方案。这表明综合考虑结构受力性能及经济性时,三主梁方案优于四主梁方案。因此,对于 8~20 m 跨径桥梁,在实际方案设计中建议采用三主梁方案。

对于 8 m 跨径,下翼缘拉应力水平较小,大部分小于 31.7%。由于跨径较小,荷载水平较低,主梁混凝土部分的刚度足够承担大部分荷载,钢腹板提供的刚度对于整体刚度贡献较小。在梳齿樁型钢-混组合梁桥设计时,可以适当降低梁高,建议不高于 480 mm,用钢量可低于 41.5 kg/m²,还可适当降低下翼缘的厚度或宽度,使结构效率更高。对于 16 m 跨径,建议梁高取 800~900 mm,用钢量取 51.7~56.7 kg/m²。对于 20 m 跨径,当梁高 750~850 mm 时,跨中挠度稍大,随着梁高的不断增加,挠度可低至 6 mm

左右。综合考虑,梁高为 1 000 mm 时,主梁受力性能及钢梁下翼缘拉应力水平均较好。因此,在工程设计时,可在 900~1 000 mm 范围内选取梁高,此时用钢量为 56.7~61.7 kg/m²。

2 30~40 m 组合梁桥方案分析

笔者前期研究了双腹板梳齿樁型钢-混凝土组合梁桥结构方案,并提出了中等跨度整体预制的 MVFT 钢-混凝土组合梁^[18]。该 MVFT 梁的梳齿型钢梁和混凝土桥面板均在工厂整体预制,无需现场二次浇筑。为防止桥面板混凝土悬臂根部的冲剪破坏,在桥面板悬臂根部设置倒梯形加腋;同时,在 MVFT 主梁支座负弯矩区填充混凝土。本节在此基础上,深入开展装配式主梁片数、连续梁的负弯矩区受力性能等研究。

2.1 30~40 m MVFT 梁结构形式研究

对于 MVFT 梁的一般截面,将跨径记为 L ,单主

梁桥面宽度记为 B ，腹板高度记为 h_w ，梳齿板间距记为 w ，钢主梁管内填充的混凝土长度记为 l_c ，桥面板端部等截面宽度记为 b_1 ，桥面板变截面宽度记为 b_2 ，桥面板根部等截面宽度记为 b_3 ，梳齿板厚度记为 t_w ，钢梁下翼缘宽度记为 b_t ，腹板梁高记为 h_w ，其厚度记为 t_w ，横截面具体参数示意如图 8 所示。钢主梁管内填充的混凝土长度如图 9 所示。

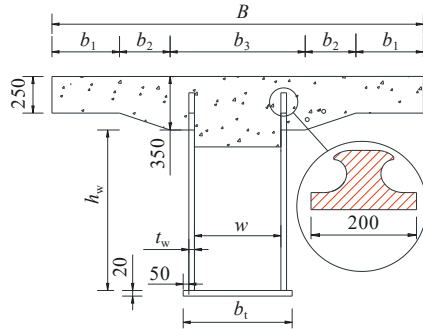


图 8 MVFT 梁截面示意图(单位:mm)

Figure 8 Section of MVFT girder (unit: mm)

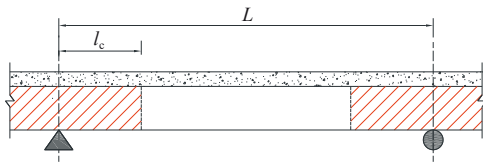


图 9 纵桥向单跨桥梁布置图

Figure 9 Longitudinal configuration of single-span bridge

30 m 及 40 m 跨径的 MVFT 梁采用先简支后连续的方案，首先以三跨(3×30 m)布置为例进行分析。设计桥面宽度 16.5 m，车道为双向四车道，设计装配式四主梁及五主梁两种方案。两块梳齿板之间间距(w)为 500 mm，剪力连接件采用 200 mm CL 榫型连接件。负弯矩区填充管内预制混凝土长度(l_c)为 3 m，负弯矩区的设计及受力性能在 2.2 节中将详细讨论。钢主梁腹板钢材为 Q345qD，桥面板采用 C50，标准板悬臂端部厚度为 250 mm，根部厚度 350 mm。设置两道端横梁，横向联结系采用 L 型角钢，尺寸为 120 mm×120 mm×10 mm。对于四主梁方案，由于单片梁桥面板较宽，钢梁跨中部分设计为分离的两根腹板，在距离支点 3 m 处由底板拼接成整体。梳齿板厚度为 20 mm，考虑梳齿板局部稳定性问题及避免设置加劲肋，将腹板高度控制在 1 000 mm 内。

对于跨径 40 m MVFT 梁仍然以三跨(3×40 m)为例，采用四主梁方案进行研究。梳齿板厚度为 28 mm，将腹板梁高控制在 1 300 mm 之内。由于单片梁

桥面板较宽，为保证截面性能需增大两片钢腹板间距。同时考虑到工程经济性，四主梁方案中单主梁截面设计如图 10 所示，不同横截面具体参数设计见表 3，四主梁及五主梁方案桥梁横断面具体布置如图 11 所示。

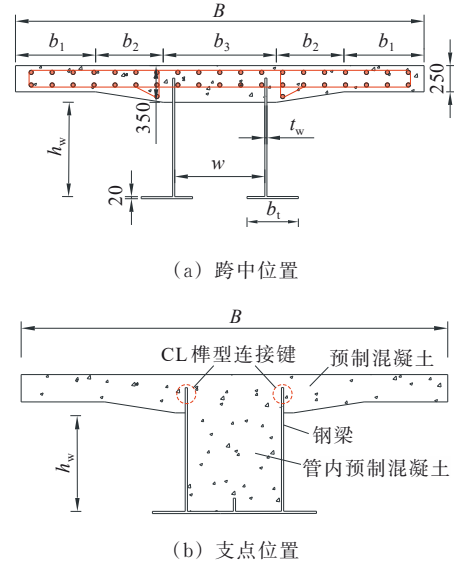
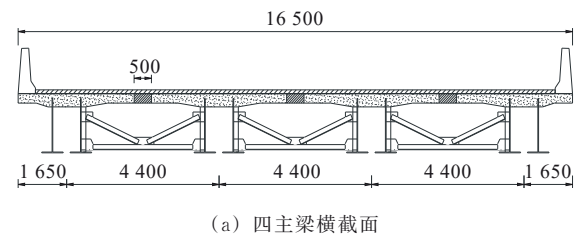


图 10 宽梁截面设计示意图(四主梁方案)(单位:mm)

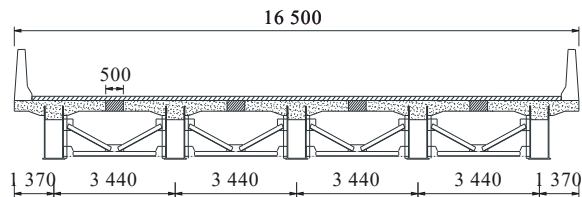
Figure 10 Design of wide girder section (four-girder) (unit: mm)

表 3 主梁截面具体参数

名称	B	b_1	b_2	b_3	b_t	t_w	w
四主梁(30 m)	3 900	765	645	1 080	640	20	860
五主梁(30 m)	2 940	545	545	760	640	20	500
四主梁(40 m)	3 900	765	645	1 080	648	28	860
负弯矩区 MVFT 梁截面	2 250	400	345	760	640	20	500



(a) 四主梁横截面



(b) 五主梁横截面

图 11 MVFT 梁桥横截面布置示意图(单位:mm)

Figure 11 Cross-section layout of MVFT girder (unit: mm)

计算得到在承载能力极限状态基本荷载组合作用下的钢主梁下翼缘拉应力,中跨最大挠度-腹板

板高度曲线及 I_{LLSI} -钢主梁应力占比曲线如图 12 所示。

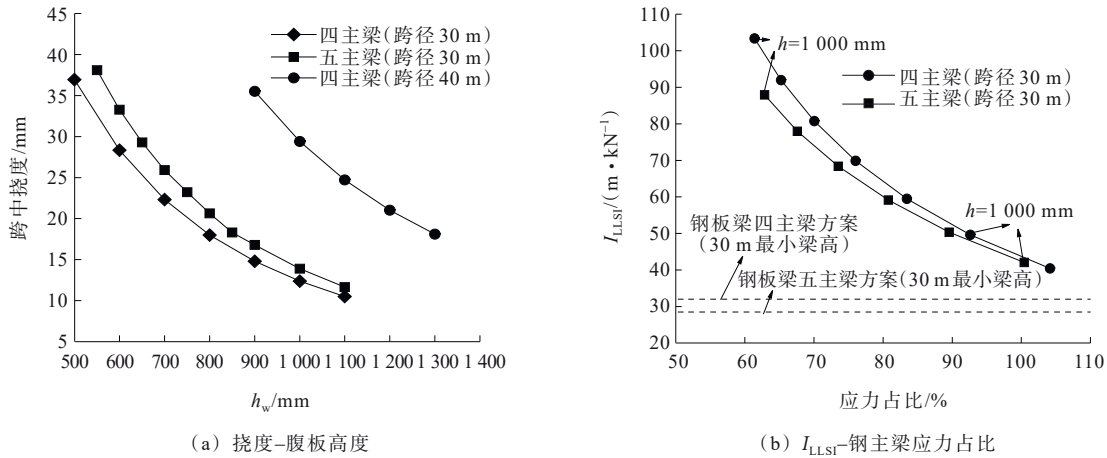


图 12 挠度-腹板高度曲线及 I_{LLSI} -钢主梁应力占比曲线

Figure 12 Deflection-web height curves and I_{LLSI} -steel girder stress percentage curves

由图 12(a)可知:随着钢腹板高度的增大,40 m 跨径四主梁方案在梁高为 1 150~1 650 mm 时,跨中挠度范围为 35.5~18.0 mm。通过 I_{LLSI} 综合评价跨径 30 m 四主梁和五主梁方案,如图 12(b)所示,当钢梁下翼缘的应力水平相同时,四主梁方案的 I_{LLSI} 值明显大于五主梁方案,说明在考虑结构受力性能及其经济性时,四主梁方案较优。钢腹板高度建议取 600~800 mm,对应用钢量为 102~124.8 kg/m²。然而,对于预制装配式组合梁,需考虑运输、吊装等工程实际问题。以 $h_w=700$ mm 为例,五主梁单片梁重量只有 80.9 t,比四主梁小 19.3%;且五主梁方案单片梁的桥面宽度较四主梁方案小将近 1 m,运输过程中成本更低且更便利。因此,在实际工程设计时,应予以综合考虑。同时,与相同主梁布置的工字型钢板梁方案对比^[13],在最小梁高时,梳齿榫型钢-混组合梁的 I_{LLSI} 值高 40%~50%,直接印证了梳齿榫型钢-混组合梁桥有较好的综合性能。

2.2 MVFT 梁负弯矩区设计

剪力连接件是连续梁负弯矩区设计的要素之一。为此,本文对梳齿榫型连续梁桥负弯矩区构造及其受力性能展开分析。研究设计了 3 种连接方案:螺栓连接、基于焊钉、CL 榫型连接件的混凝土湿接缝方案。MVFT 梁截面具体尺寸见表 3,负弯矩区的横截面结构设计如图 13 所示,具体结构尺寸参数见表 4。为研究负弯矩区抗弯性能,采用四点弯曲倒置截面作为加载方法,具体加载细节见图 14。

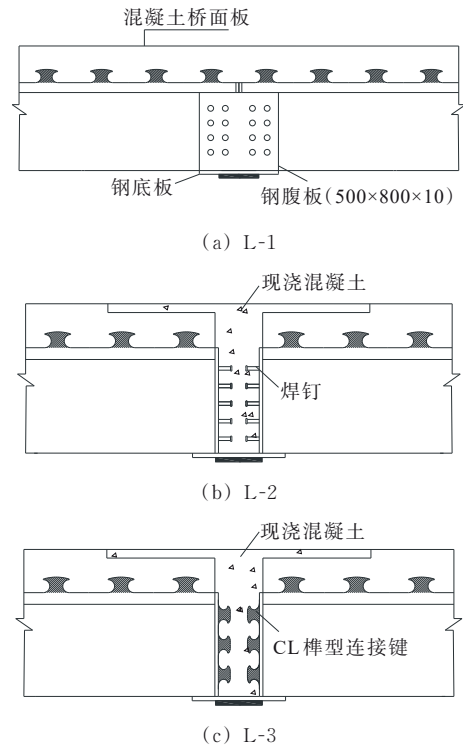


图 13 负弯矩区方案构造示意图(单位:mm)

Figure 13 Negative bending moment zone scheme design (unit: mm)

采用通用有限元软件 Abaqus 模拟加载及破坏过程。混凝土板、钢梁、加劲肋均采用三维八节点实体缩减积分单元(C3D8R),桥面板钢筋采用三维节点桁架单元(T3D2)。加载装置和支架被设置为刚体。钢材屈服强度设置为 345 MPa,弹性模量为 2.06×10^5 MPa,采用强化阶段切线模量为 $0.01 E_s$ 的

双线性本构模型。混凝土的材料本构关系采用软件内嵌的混凝土损伤塑性模型(CDP)。混凝土抗压强度设计值为50 MPa,杨氏模量为 3.42×10^4 MPa。在数值模型中,负弯矩区梁的边界条件设置为简支梁^[23]。

表4 负弯矩区方案设计参数

Table 4 Design parameters of negative bending moment zone

名称	剪力连接件	现浇混凝土强度	钢梁	连接件尺寸/(mm×mm)	数量
L-1	—	—	Q345qD	500×12	2
L-2	焊钉	C50		Φ22×100	32
L-3(200 mm)	CL	C50		200×10	12
L-3(150 mm)	CL	C50		150×10	16

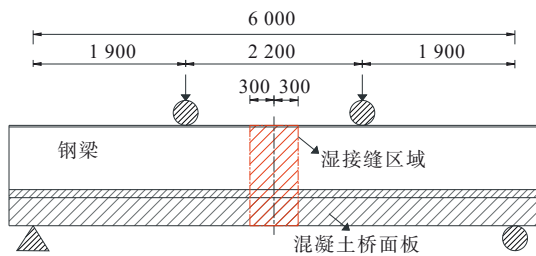


图14 负弯矩区加载示意图(单位:mm)

Figure 14 Loading of negative bending moment zone (unit: mm)

根据数值计算结果,加载力 F 与跨中挠度 D 曲线如图15所示,剪力连接件的应力分布如图16所示,取最靠近混凝土桥面板位置的连接件。混凝土桥面板内应力变化如图17所示,其中混凝土拉应力2.64 MPa设置为初始开裂应力。

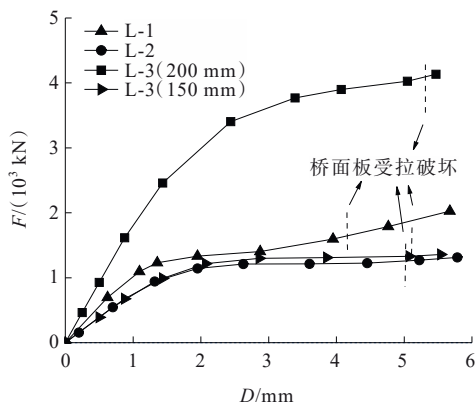


图15 荷载-位移曲线

Figure 15 Load-displacement curves

从图15可知:同为湿接缝方案,L-3连接方案的抗负弯矩能力更好,特别是在采用200 mm规格CL榫型连接件时,其极限荷载约为后者L-2的4倍。由

图16可知:沿CL榫型连接件的应力增长较为平滑,在混凝土桥面板受拉破坏后,依然有较大的储备性能。然而,L-2连接方案中焊钉的应力增长非常迅速,会导致部分焊钉破坏,整体性能明显下降。此外,在整个加载阶段,所有CL榫型连接件均参与受力,避免了局部区域应力过大的现象。

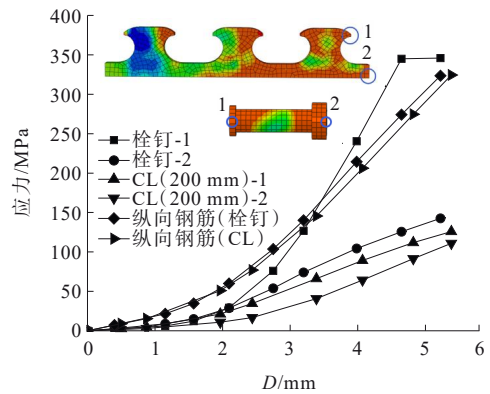
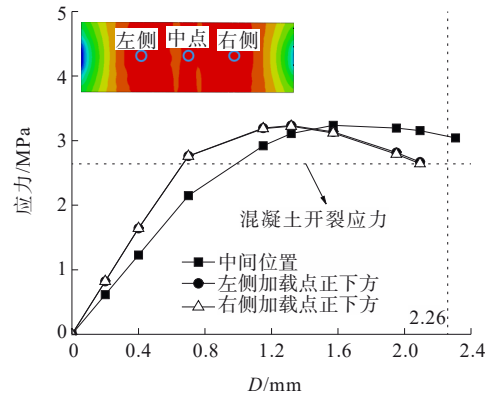
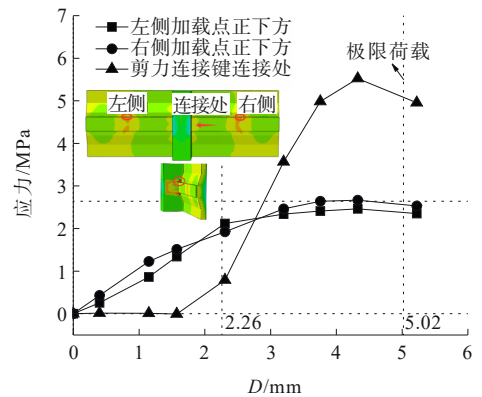


图16 剪力连接件受力情况

Figure 16 Stress of shear connectors



(a) 混凝土桥面板



(b) 桥面板与焊钉连接处

图17 混凝土桥面板应力分布(L-2)

Figure 17 Stress distribution of concrete deck (L-2)

由图17可知:在连接件与混凝土桥面的相互作用下,混凝土达到开裂应力后会产生并发展裂缝。混凝土桥面开始发生拉伸破坏,裂缝不断发展直至破坏,桥面内部的钢筋应力增幅较大。因此,纵向钢筋的布置需要特别注意。剪力连接件与混凝土桥面板的连接强度对MVFT梁的抗弯性能有一定影响。通过采用高强度混凝土或加强接缝处的钢筋配置等措施提高连接强度,可以提高负弯矩区的弯曲强度。

CL榫型连接件具有较大的刚度,为防止混凝土局部应力过大,使用CL榫型连接件的湿接缝方案时其尺寸不宜过大,建议使用200 mm左右的较小尺寸连接件。CL榫型连接件的另一种优势是其在混凝土内部的埋置深度可控,随着埋入深度的增加,其抗拔性能更好^[7],在减小CL榫型连接件的尺寸时,可适当增大其埋置深度以增强其抵抗负弯矩能力。

3 梳齿榫型组合梁无缝桥台分析

在无缝桥中,主梁的拉压刚度较大,纵桥向很小的约束变形就会产生较大的附加内力。Kim等^[24]研究发现,无缝桥主梁的设计关键是控制混凝土主梁的开裂和钢主梁的屈曲失稳。采用梳齿榫型钢-混凝土组合梁作为主梁可以有效减少上述问题。在整体桥桥台钢桩基础中最常用的是H型钢桩,其具有柔度大、水平变形能力强、材料强度高等特点。

本文以30 m整体式无缝桥的上部和桥台结合部为研究对象,研究采用3:10比例模型,对组合梁-桥台结合部进行数值模拟损伤破坏分析。组合梁原尺寸取自表4中负弯矩区MVFT梁横截面,缩尺后梳齿板插入混凝土的深度为50 mm、偏心距 $e_x=80$ mm。钢主梁和H型钢桩均采用Q345qD钢材,H型钢桩规格采用HL1100B(EN 10034:1993)。为了研究结合部的传力模式,在悬臂端采用位移加载。桥台结合部构造及加载示意如图18所示。材料及单元类型选择与3.2节相同,数值分析结果如图19所示。

由图19(a)可知,钢主梁受压屈服区域出现于钢主梁下端梳齿榫型连接件左端。对于混凝土部分,如图19(b)所示,在极限状态下,桥台与CL连接件形成榫卯部位出现裂缝,随后桥面板混凝土出现裂缝。需要注意的是,若桥面板混凝土的裂缝发展过快,不能很好地发挥整体式无缝桥的结构优势。因此,在无缝桥台的结构设计时,需要特别关注桥面板和桥台结合部位置的受拉情况,建议在该位置局部增加受拉钢筋的配置。对于整体式桥梁,荷载传递路径

通常比具有明确支撑或上部结构和桥台结构分离的传统桥梁支撑更复杂。主梁的转动受到其后端混凝土、下部梳齿榫型连接件以及外围钢筋的共同约束。H型钢桩通过焊接的梳齿榫型连接件与混凝土结合得更加紧密,使得一部分弯矩从主梁传递到桩顶,另一部分弯矩仍然通过周围的钢筋传递。

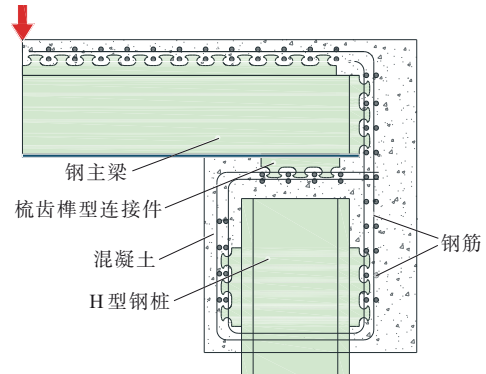
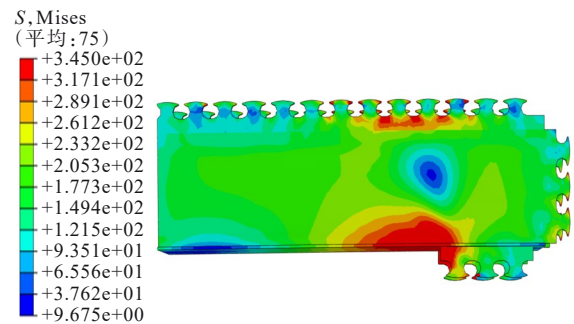
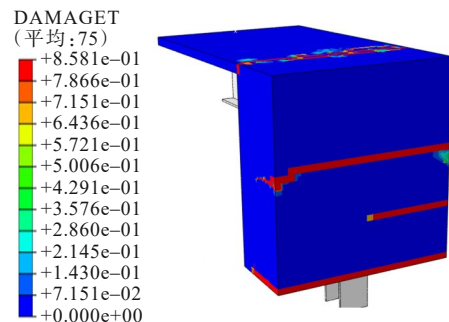


图18 整体式无缝桥及组合梁结合部示意图

Figure 18 Integral bridge and composite girder joint



(a) 钢主梁应力云图(单位:MPa)



(b) 混凝土破坏示意图

图19 结合部数值分析结果

Figure 19 Numerical analysis results of joint

选取结合部CL榫型连接件的不同排布方式进行结构受力分析(图20),设3种组合方式,其中CL-1组合,梳齿间距为80 mm,在梁端间隔160 mm排布2排;CL-2和CL-3组合梳齿间距分别为160 mm和80 mm,其梁端间隔均为75 mm;取受拉、受压两区域上钢主梁在不同CL连接件组合方式下的受力状态,如图21所示。

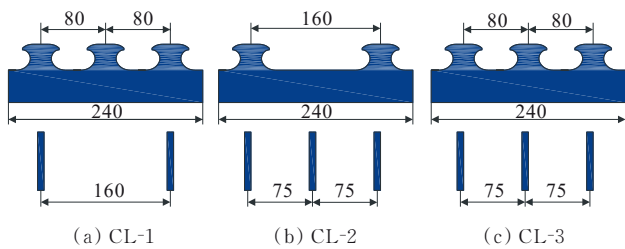


图 20 CL 榫型连接件组合方式(单位:mm)

Figure 20 Combinations of CL-type connectors (unit: mm)

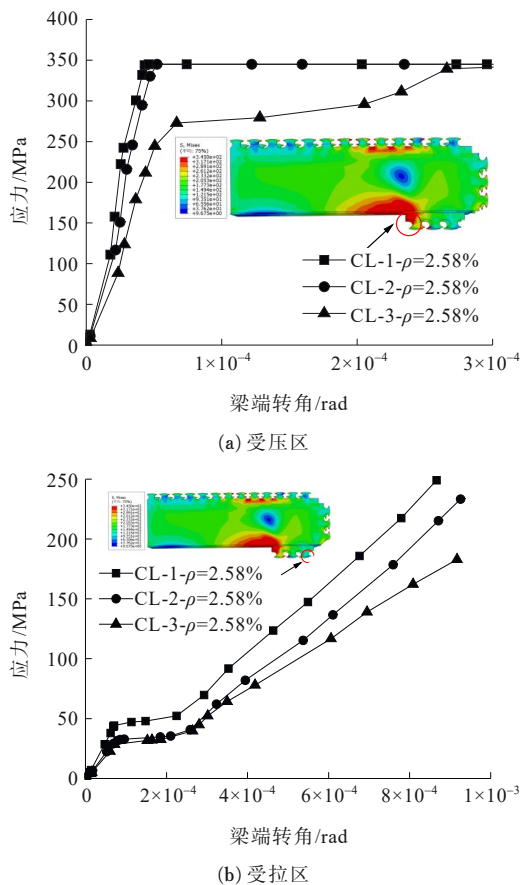


图 21 无缝桥台应力-转角曲线

Figure 21 Stress-rotation curves of integral abutment

由图 21 可知:① CL-3 组合的性能优于其他两种组合。在加载前期,其钢主梁应力上升速度稍慢,当应力到达约 275 MPa 时,呈现缓慢平稳的增长趋势,而另外两种组合加载后很快达到屈服状态;② 在相同加载条件和转角位移下,CL-2、CL-3 组合主梁的拉应力更小。综上所述,CL 榫型连接件组合方式的改变能大幅提高整体式桥台结合部的承载能力。因此,在梁端与桥台结合处的混凝土上缘应注意加强钢筋配置。

4 结论

(1) 对于 8~20 m 小跨径梳齿榫型钢-混组合梁,在结构设计时建议采用三主梁方案。8 m 跨径时,梳

齿榫型钢-混组合梁桥设计时,建议梁高不大于 480 mm;16 m 跨径时,建议梁高取 800~900 mm;20 m 跨径时,建议梁高取 900~1 000 mm。

(2) 对于 30~40 m 中等跨径梳齿榫型钢-混组合梁,在结构设计时,四主梁方案在考虑结构受力及经济性方面有一定优势,但五主梁方案在运输及吊装过程中也具有较大优势,应予以综合评估。对于四主梁方案,在跨径 30 m 左右组合梁梁高设计,建议取值 600~800 mm;当跨径为 40 m 左右时,建议钢腹板厚度设置为 28 mm 左右,高度取 900~1 200 mm。

(3) 对于组合梁负弯矩区,将 CL 榫型连接件引入负弯矩区湿接缝方案设计,该方案具有较好的抗弯性能。在设计时,建议采用小尺寸如宽度为 200 mm 的 CL 榫型连接件。

(4) 在梳齿榫型组合梁无缝桥台处,极限状态下结构破坏主要表现为混凝土的破坏;在桥面板和桥台结合部位置建议局部加强受拉钢筋的配置。H 型钢桩上焊接 CL 榫型连接件,使得混凝土与钢结构的结合更加紧密,可将部分弯矩从主梁传递到桩顶。调整 CL 榫型连接件排布方式可有效提高结合部承载力,梁端 CL 榫型连接件横桥向布置建议设置 3 排。

参考文献:

References:

- [1] HECHLER O, BERTHELLEMY J, LORENC W, et al. Continuous shear connectors in bridge construction[C]// Devil's Thumb Ranch, Tabernash, Colorado, USA: Composite Construction in Steel and Concrete VI. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2011.
- [2] SEIDL G, STAMBUK M, LORENC W, et al. Wirtschaftliche verbundbauweisen im brückenbau-bauweisen mit verbunddübeln[J]. Stahlbau, 2013, 82(7): 510-521.
- [3] CLASSEN M, HEGGER J. Shear-slip behaviour and ductility of composite dowel connectors with pry-out failure[J]. Engineering Structures, 2017, 150: 428-437.
- [4] FELDMANN M, KOPP M, PAK D. Composite dowels as shear connectors for composite beams-background to the German technical approval[J]. Steel Construction, 2016, 9(2): 80-88.
- [5] CHRISTOU G, SCHMIDT C, HEGGER J, et al. The effect of concrete fatigue on the cyclic behaviour of composite dowels-derivation of a design approach based on experimental findings[J]. Engineering Structures, 2022, 253: 113743.
- [6] XIONG Z H, ZHAO C Y, MOU X L, et al. Composite dowel's fatigue crack evaluation with loading patterns' effect[J]. Procedia Structural Integrity, 2023, 51: 179-184.

- [7] XIONG Z, LIANG Z, LIU X, et al. Steel-UHPC composite dowels' pull-out performance studies using machine learning algorithms[J]. *Steel and Composite Structures*, 2023, 48(5): 531-545.
- [8] 熊治华, 潘振华, 牟栩麟, 等. 一种装配式钢-混凝土组合梁: 中国, CN220150064U[P]. 2023-12-08.
XIONG Zhihua, MU Xulin, PAN Zhenhua, et al. A modular composite dowels beam: China, CN220150064U [P]. 2023-12-08.
- [9] 熊治华, 牟栩麟, 潘振华, 等. 新型梳齿榫型钢-混凝土组合梁桥设计方法研究: 典型截面与节点承载能力[J]. *水利与建筑工程学报*, 2024, 22(5): 134-144.
XIONG Zhihua, MU Xulin, PAN Zhenhua, et al. Novel composite dowels steel-concrete bridges' structural design approach: Typical section and joint bearing capacity[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2024, 22(5): 134-144.
- [10] 张清华, 韩少辉, 贾东林, 等. 新型装配式UHPC华夫型上翼缘组合梁受力性能[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(3): 445-452, 442.
ZHANG Qinghua, HAN Shaohui, JIA Donglin, et al. Mechanical performance of novel prefabricated composite girder with top flange of ultra high performance concrete waffle deck panel[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(3): 445-452, 442.
- [11] 张通, 李帅鹏, 邓华, 等. 整体预制Π形钢板组合连续梁桥参数优化分析[J]. *公路*, 2023, 68(9): 129-135.
ZHANG Tong, LI Shuaipeng, DENG Hua, et al. Parameter optimization analysis of integral prefabricated Π-shaped steel plate combined continuous girder bridge[J]. *Highway*, 2023, 68(9): 129-135.
- [12] 姜开明, 宋启港, 周剑, 等. 装配式波形钢腹板-UHPC组合梁抗弯试验研究[J]. *桥梁建设*, 2024, 54(6): 64-71.
JIANG Kaiming, SONG Qigang, ZHOU Jian, et al. Research on flexural test of segmental composite girder with corrugated steel webs and UHPC deck panels[J]. *Bridge Construction*, 2024, 54(6): 64-71.
- [13] 熊治华, 刘旭尧, 朱厚达, 等. 钢板-混凝土组合梁桥的活载结构效率指数研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2023, 25(10): 63-73.
XIONG Zhihua, LIU Xuyao, ZHU Houda, et al. A study on a live-loaded structural index of steel plate-concrete composite girder bridges[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2023, 25(10): 63-73.
- [14] 成立涛, 郝磊, 魏学军, 等. 钢-混凝土组合梁施工阶段钢梁稳定性实用计算方法及参数分析[J]. *公路交通科技*, 2023, 40(7): 121-128.
CHENG Litao, XI Lei, WEI Xuejun, et al. Practical design method and parameter analysis on steel beam stability of steel-concrete composite beam in construction stage[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(7): 121-128.
- [15] 余洁, 王宇航, 刘界鹏, 等. 装配整体式预应力钢-混凝土组合梁负弯矩区开裂刚度研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(S1): 316-324.
YU Jie, WANG Yuhang, LIU Jiepeng, et al. Study on the cracking stiffness in the negative bending moment zone of prefabricated integral prestressed steel-concrete composite beams[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(S1): 316-324.
- [16] 季建东, 王彬. 长挑臂闭口钢箱组合梁桥设计及其关键技术[J]. *中外公路*, 2024, 44(3): 137-144.
JI Jiandong, WANG Bin. Design and key technologies of bridges with long-cantilever closed steel box composite Girder [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2024, 44(3): 137-144.
- [17] 张鸿, 张永涛, 王敏, 等. 装配式组合梁桥一体化架设方法及装备[J]. *中外公路*, 2018, 38(6): 140-143.
ZHANG Hong, ZHANG Yongtao, WANG Min, et al. Integrated construction method and equipment of assembled composite beam bridge[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2018, 38(6): 140-143.
- [18] XIONG Z H, LI J W, ZHU H D, et al. Ultimate bending strength evaluation of MVFT composite girder by using finite element method and machine learning regressors[J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2022, 19(3): e438.
- [19] 许震, 陈宝春, 黄福云, 等. 无缝化改造的空心板桥受力性能[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(5): 66-76.
XU Zhen, CHEN Baochun, HUANG Fuyun, et al. Mechanical performance of jointless retrofitted bridge with hollow-slabs[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18(5): 66-76.
- [20] 黄育凡, 江越胜, 吴庆雄, 等. 钢混组合梁半整体桥设计与施工[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(5): 693-699.
HUANG Yufan, JIANG Yuesheng, WU Qingxiong, et al. Design and construction of steel-concrete composite bridge with semi-integral abutments[J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(5): 693-699.
- [21] 庄一舟, 应滕勇, 苏浩, 等. 无缝桥抗震性能的对比研究[J]. *世界地震工程*, 2021, 37(3): 73-84.
ZHUANG Yizhou, YING Tengyong, SU Hao, et al. Comparative study on seismic performance of main jointless bridges[J]. *World Earthquake Engineering*, 2021, 37(3): 73-84.
- [22] 黄福云, 单玉麟, 何凌峰, 等. 整体式桥台-H型钢桩基-土相互作用水平变形机理研究[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(5): 84-94.
Huang Fuyun, Shan Yulin, He Lingfeng, et al. Study on the horizontal deformation mechanism of the interaction between H-shaped steel pile foundation and soil in integral bridge piers [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(5): 84-94.
- [23] XIONG Z H, PAN Z H, WOLTERS K, et al. Structural configuration of negative bending moment zone in continuous MVFT girder bridge[C]//Manchester: IABSE Symposium, Manchester 2024: Construction's Role for a World in Emergency, 2024.
- [24] KIM W, LAMAN J A, ZAREIAN F, et al. Influence of construction joint and bridge geometry on integral abutment bridges[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(11): 5031.