

新型钢-混组合桥塔构造型式研究

王 鹏^{1,2}, 王康宁^{1,2}, 黄春雷^{1,2}

(1. 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 湖北 武汉 430034; 2. 中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034)

摘 要: 针对传统钢-混组合桥塔的钢壁板单侧约束易发生局部屈曲、加劲肋构造复杂、施工难度大等问题, 提出了两种新型的钢-混组合桥塔构造型式: 加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合桥塔、双钢板-UHPC(Ultra-High Performance Concrete)组合桥塔。以某峡谷千米级铁路悬索桥的组合桥塔为工程背景, 拟定两种新型组合桥塔的构造尺寸, 通过有限元建模分析了提出的新型组合桥塔构造受力性能, 并且从施工和经济层面对比分析了两种新型组合桥塔与原桥四肢格构式钢管-混凝土组合桥塔的技术经济指标。研究结果表明: 两种新型钢-混组合截面桥塔均能满足规范中对大跨度悬索桥主塔静力和稳定性的设计要求, 且具有构造简化、受力性能优以及施工难度降低等优势; 外包钢中空混凝土组合桥塔、双钢板-UHPC组合桥塔在材料成本上相比原设计钢管混凝土桥塔分别提高约13%、19%, 但考虑到构造简化带来的施工造价降低以及UHPC材料的高性能, 建造和后期运营维护成本大幅降低。

关键词: 桥梁工程; 大跨度结构; 悬索桥; UHPC; 钢-混组合桥塔

中图分类号: U448.25

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)01-0075-05

Study on Structural Type of New Steel-concrete Composite Bridge Pylon

WANG Peng^{1,2}, WANG Kangning^{1,2}, HUANG Chunlei^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Intelligent and Green Bridge Construction, Wuhan 430034, China; 2. China Railway Bridge Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430034, China)

Abstract: In view of the unilateral constraints of the steel panels of the traditional steel-concrete composite bridge pylon, it is easy to have local buckling, complicated stiffener structure and difficult to construct. Two new types of steel-concrete composite bridge pylon are proposed, which are the stiffened ribbed outer clad steel hollow concrete composite bridge pylon and the double steel plate - UHPC (Ultra-High Performance Concrete) composite bridge pylon. Taking a composite pylon of a canyon kilometer-level railway suspension bridge as the engineering background, the structural dimensions of two new composite bridge pylons are proposed. The structural mechanical properties of the proposed new composite bridge pylons are analyzed by finite element modeling, and the technical and economic indexes of the two new composite bridge pylons and the original four-limb lattice steel tube-concrete composite bridge pylons are compared and analyzed from the construction and economic levels. The research results show that the two new steel-concrete composite section pylons can meet the design requirements of the static and stability of the main pylon of the long-span suspension bridge in the specification, and have the advantages of simplified structure, excellent mechanical performance and reduced construction difficulty. The material cost of the outer clad steel hollow concrete composite bridge pylon and the double steel plate - UHPC (Ultra-High Performance Concrete) composite bridge pylon is about 13 % and 19 % higher than that of the original designed concrete-filled steel tube bridge pylon respectively. However, considering the reduction of construction cost brought from the structural simplification and the high performance of UHPC materials, the cost of construction and later operational maintenance is greatly reduced.

Keywords: bridge engineering; long-span structure; suspension bridge; UHPC; steel-concrete composite bridge pylon

0 引 言

钢-混凝土组合桥塔是在截面上存在钢、混凝土

两种材料,通过连接件使二者协同受力的结构。因充分利用了2种材料的特点,钢-混组合桥塔兼具良好的力学性能与施工便利性,有广阔的应用前景^[1-3]。

国内外将钢-混组合结构应用于缆索承重桥梁的桥塔的案例较少,相关研究尚处于起步阶段。西班牙阿拉米罗大桥采用了钢板外包钢-混凝土组合桥塔^[4],一方面钢壁板可以部分代替桥塔内的普通钢

收稿日期: 2024-05-14

作者简介: 王鹏(1996—),男,硕士,工程师,从事桥梁工程研究工作。

通信作者: 黄春雷(1997—),男,硕士,助理工程师,从事桥梁工程研究工作。电子邮箱: 849015537@qq.com

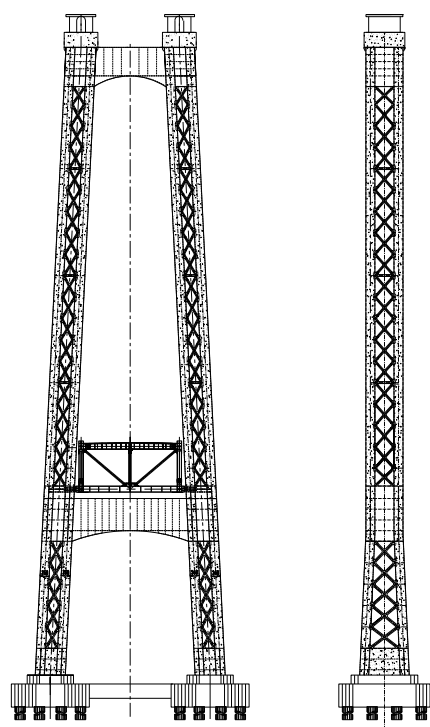
筋,另一方面可以作为混凝土浇筑模板,对施工便利性有明显改善;张喜刚等^[5]以某跨海大桥原型设计设计了一种中空型外壁钢板-混凝土组合桥塔,通过模型试验与有限元分析验证了该组合桥塔在承载力和延性上明显优于传统混凝土塔柱;王春生等^[6,7]针对钢-混凝土组合桥塔节段轴压性能进行了试验,结果表明轴压作用下组合桥塔中混凝土会产生向外的作用力,这对钢壁板稳定性造成不利影响,但是在混凝土与钢板间合理连接构造设计可减小影响;张清华等^[8]通过数值分析研究了混凝土桥塔与组合桥塔在高原环境下的温度场和温度应力特性,指出组合桥塔高原恶劣环境下相对混凝土桥塔存在施工和受力上的优势;郑瑞^[9]采用有限元方法对多格室钢-混凝土组合桥塔进行了分析,结果表明组合桥塔能够充分发挥两种材料的特性,且在索承重式桥梁中有更好的适用性。刘永健等^[1]对采用不同类型的桥塔实际桥梁工程案例从材料用量、施工措施费、防腐涂装工程量三个方面进行了定量分析,结果表明钢-混凝土组合桥塔在建造和维养成本上远低于钢桥塔,且在经济上可与混凝土桥塔形成竞争。

目前国内外尚未形成钢-混凝土组合桥塔的设计规范,而峡谷地区桥梁的服役环境更为恶劣,为优化现有组合桥塔的受力性能并降低施工、运输难度,以某峡谷千米级跨度铁路悬索桥新型钢-混组合桥塔设计为工程背景,提出了两种新型钢-混组合桥塔构造型式,对其受力性能与技术经济性进行分析,为峡谷山区铁路大跨度悬索桥设计建造提供新的参考方案。

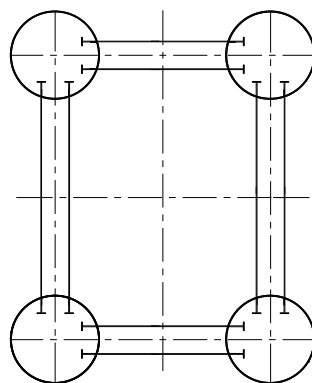
1 工程背景

以某峡谷千米级铁路悬索桥的组合桥塔为工程背景。该桥为主跨1 000 m有砟双线铁路钢桁梁悬索桥,主缆跨度布置为(170+1 000+260)m,主梁跨度为(120+1 000+80)m,加劲梁采用连续布置,加劲梁全长1 200 m。两岸主塔均采用门形框架钢管混凝土组合结构,单个塔柱由四根直径2.6 m的钢管混凝土柱组成,主塔立面布置见图1(a),截面设计见图1(b)。

上述四肢钢管混凝土组合主塔钢壁板仅受混凝土单侧约束,为避免钢壁板局部发生屈曲,需在钢壁板内部设置加劲肋。大量的焊钉等钢混连接件、加劲构造及钢筋使钢箱内部构造过于复杂,增加了施工难度,并可能出现混凝土浇筑不密实的情况^[1,10]。



(a)桥塔立面布置图



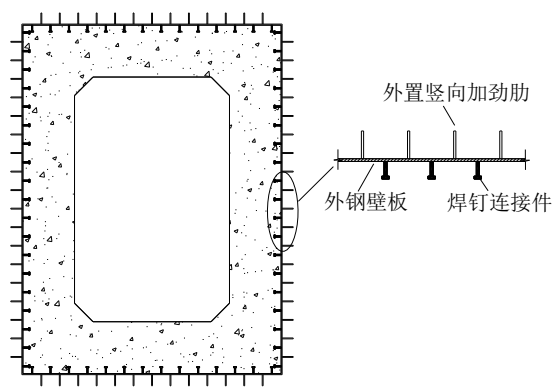
(b)四肢格构式钢管混凝土截面

图1 某峡谷千米级铁路悬索桥的组合桥塔

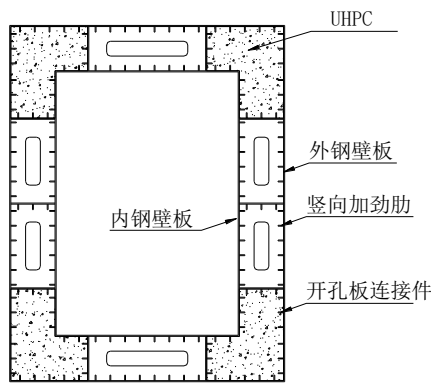
2 新型钢-混组合桥塔构造型式

针对已有的钢-混凝土组合桥塔构造设计建造过程中存在的问题,提出了两种新型的钢-混组合桥塔构造型式,见图2。

图2(a)所示加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合桥塔由外钢壁板、外置纵向加劲肋、横向加劲肋、焊钉连接件和混凝土组成,加劲肋布置在外钢壁板外侧,钢壁板内侧只需设置焊钉,外钢壁板外侧可出于景观需求设置一层外包薄钢板。该新型组合桥塔构造型式可减少钢箱内部构造,外钢壁板内只保留焊钉连接件,加劲肋布置在外钢壁板外侧,可较大程度减少施工难度,避免了传统钢混组合桥塔内部因



(a)加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合桥塔截面



(b)双钢板-UHPC组合桥塔截面

图2 新型钢-混组合桥塔截面示意图

存在大量构造导致施工不便,施工质量难以保障的问题。

图2(b)所示的新型双钢板钢-UHPC组合桥塔仅由内外钢壁板、纵向PBL加劲肋、开孔横隔板、开孔纵隔板、UHPC组成。其优势体现在钢箱内格室混凝土采用UHPC,借助钢壁板对格室内UHPC的约束效应和UHPC材料的高性能,可以取消配筋,通过调整截面尺寸、钢壁板厚度和横隔布置来满足受力要求。仅采用PBL连接件,不需设置焊钉,既可保证桥塔在荷载作用下界面剪力的传递,又简化了钢-混界面连接构造。能够节约用钢量、简化钢结构制造和现场安装工序。

3 新型钢-混组合桥塔受力性能简算

为了明确所提出的两种新型钢-混组合桥塔的力学特性,以该峡谷千米级铁路悬索桥的组合桥塔为工程背景,拟定两种新型组合桥塔的截面尺寸进行受力性能计算分析。桥塔作为偏心受压构件,轴压刚度EA和抗弯刚度EI分别反应了结构对于轴压和弯曲两种工况下的刚度。轴压刚度EA一般均可满足要求,在设计过程中保证新型组合桥塔和原设计桥塔抗弯刚度EI相同。两种新型组合桥塔截面抗弯刚

度按纵桥向 $1.6 \times 10^7 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$,横桥向 $9.3 \times 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ 。外包钢中空混凝土组合桥塔配筋取适筋配筋率,同时考虑钢筋在截面内可以合理布置,取为3%。

3.1 静力性能分析

使用MIDAS Civil软件建立两种新型钢-混组合桥塔的分析模型(见图3),荷载通过全桥杆系模型计算提取而来,荷载工况及其对应荷载值见表1。工况一考虑塔顶横梁吊机作用和主梁未安装时鞍座传递的荷载,工况二考虑塔顶横梁吊机作用和主梁安装完毕时鞍座传递的荷载,工况三考虑成桥态鞍座传递的荷载。图4、图5分别列出荷载效应最大工况下作用下两种新型钢-混组合截面桥塔钢结构与混凝土的应力状态。

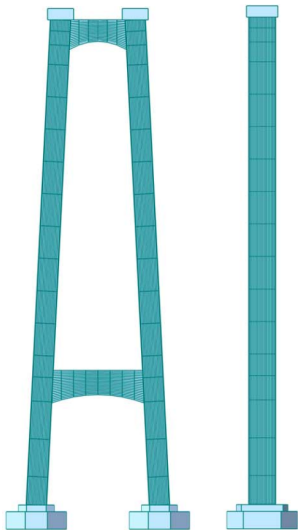


图3 新型钢-混组合桥塔有限元模型

表1 静力荷载工况

工况	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN	吊机荷载/MPa
工况一	-6 1621.77	-1 966.86	9 087.52	3.1
工况二	-187 116.67	-5 901.62	2 261.50	3.1
工况三	-315 415.18	-10 444.92	-922.63	—

由图4所示的加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合桥塔计算结果可知,在最不利工况下均处于主塔全截面受压状态,无拉应力出现,混凝土压应力最大为14.5 MPa,钢结构最大压应力为85.5 MPa,应力验算满足规范要求。

由图5所示的双钢板-UHPC组合桥塔计算结果可知,在最不利工况下主塔均处于全截面受压状态,无拉应力出现,UHPC压应力最大为36.3 MPa,钢结构最大压应力为169.8 MPa,应力验算满足规范要求。

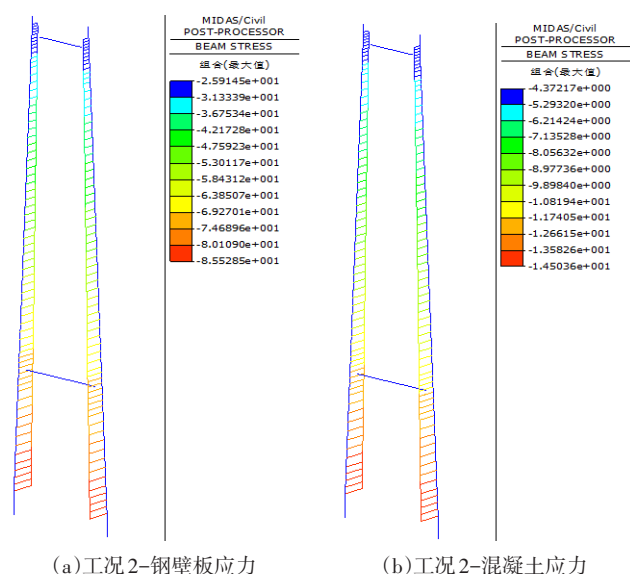


图4 加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合桥塔应力包络图
(单位:MPa)

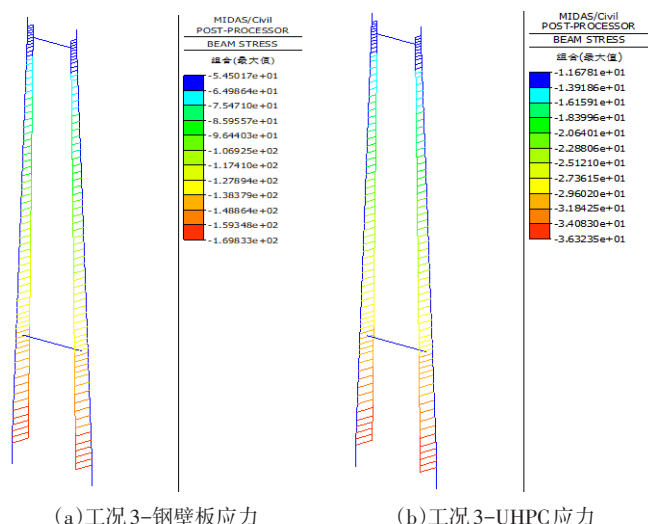


图5 双钢板-UHPC组合桥塔应力包络(单位:MPa)

3.2 桥塔稳定性分析

利用第3.1节所述杆系有限元模型计算两种新型钢-混组合桥塔分岔型失稳的稳定系数。MIDAS Civil模型屈曲模态分析结果表明,加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合桥塔、双钢板-UHPC组合桥塔在运营阶段和成桥阶段最不利工况作用下,均表现为索塔纵向压弯失稳,一阶线弹性稳定系数分别为10.5、9.68。根据《公路悬索桥设计规范》(JTG/T D65-05—2015)^[11],悬索桥索塔弹性屈曲稳定系数不应小于4,索塔弹性稳定性计算结果满足规范要求。

单从强度计算结果的对比来看,双钢板-UHPC组合桥塔的应力显著高于加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合桥塔,但当将整体稳定计算结果进行对比后可以发现,两种构造形式一阶线弹性稳定系数

差异较小。对于该桥塔,整体稳定性相对强度是起更加控制性作用的指标。

4 新型组合桥塔技术经济性分析

4.1 技术特性

加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合桥塔优势体现在:在局部受力性能上,外钢壁板借助内侧混凝土的约束作用和外侧加劲肋的加劲作用,结构局部稳定性更高;钢结构加劲肋构造简化,加劲肋布置在外钢壁板外侧,外钢壁板内只保留焊钉连接件,钢箱内部构造简化;施工难度降低,避免了传统钢混组合桥塔内部因存在大量构造导致施工不便,施工质量难以保障的问题。

新型双钢板钢-UHPC组合桥塔优势体现在:钢箱内格室混凝土采用高性能UHPC材料,借助钢壁板对格室内UHPC的约束效应和UHPC卓越的受力性能,通过调整截面尺寸、钢壁板厚度和横隔板布置即可满足受力要求,可取消配筋;采用PBL连接件,无需设置焊钉,既可保证桥塔在弯矩作用下界面建立的传递,又简化了钢-混界面连接构造;能够节约用钢量、简化钢结构制造和现场安装工序;该构造型式在耐久性、维护、碳排放等方面更具优势。

4.2 经济性

表2列出了不同型式组合桥塔材料成本分析。对比可知,外包钢中空混凝土组合桥塔材料成本与原悬索桥采用的四肢格构式钢管混凝土组合桥塔成本基本相当,提高了约13%,但考虑到其构造更简单,一定程度上可以降低施工成本,总体而言两者造价相当;双钢板-UHPC组合桥塔材料成本较原桥设计采用的四肢格构式钢管混凝土组合桥塔提高了约19%,与外包钢中空混凝土组合桥塔相当,但其在耐久性上更具优势。且基于UHPC的高强度和高抗裂性能,双钢板-UHPC组合桥塔可以取消配筋,施工便捷。

5 结 语

针对传统钢-混组合桥塔的受力、构造以及施工上存在的问题,提出了两种新型的钢-混组合桥塔构造截面型式,即加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合截面、双钢板-UHPC组合桥塔截面。经受力性能、技术经济指标分析,可得出以下结论。

(1)以某峡谷千米级铁路悬索桥的组合桥塔为工程背景,以抗弯刚度等效原则拟定方形外包钢-混

表 2 不同型式组合桥塔材料成本分析

截面型式	抗弯刚度/ (10 ³ MPa·m ⁴)		轴压承载力/ (10 ⁵ kN)	塔柱材料用量/ (m ³ ·m ⁻¹)			塔柱材料 成本/m	
	纵桥向	横桥向		钢材	混凝土	UHPC	成本/万元	比例/%
钢管混凝土组合	16.0	9.25	8.79	1.17	21.13	0.00	18.33	100
外包钢中空混凝土组合	15.8	9.52	11.7	0.92	38.08	0.00	20.80	113
双钢板-UHPC 组合	15.8	10.4	21.0	1.50	0.00	16.32	21.81	119

注:综合单价估算^[12]、普通混凝土(含钢筋)3 000 元/m³,无配筋粗骨料 UHPC 4 000 元/m³,钢材 13 000 元/t。

凝土组合桥塔和双钢板-UHPC 组合桥塔的构造尺寸,通过有限元计算分析验证了两种新型组合截面桥塔静力和稳定性能均能满足设计规范要求。

(2)从施工建造层面,对比分析了加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合截面桥塔、双钢板-UHPC 组合截面桥塔、钢管-混凝土组合桥塔技术指标,结果表明:两种新型钢-混组合桥塔具有加劲肋构造简化、钢壁板局部稳定性高、施工难度降低、混凝土施工质量易把控等优势。

(3)从经济层面,对比分析了两种新型组合桥塔与钢管-混凝土组合桥塔经济指标。结果表明:外包钢中空混凝土组合桥塔在材料成本上相比钢管混凝土组合桥塔提高了约 13%,但其构造相对简单,施工成本降低,两者造价基本相当;双钢板-UHPC 组合桥塔在材料成本上相比钢管混凝土组合桥塔提高了约 19%,但其基于 UHPC 的高强度、高抗裂性能以及高耐久性,且能取消配筋,可大幅降低造价和运营维护成本。

参考文献:

[1] 刘永健,孙立鹏,周绪红,等. 钢管混凝土桥塔工程应用与研究进展[J]. 中国公路学报, 2022, 35(6): 1-21.

[2] 樊健生,朱尧于,崔冰,等. 钢板-混凝土组合结构桥塔研究及应用综述[J]. 土木工程学报, 2023, 56(4): 61-71.

[3] 孙立鹏. PBL 加劲型薄壁钢管混凝土桥塔的计算理论与设计方法研究[D]. 西安:长安大学, 2023.

[4] 俞欣. 钢桥塔及组合桥塔设计与受力性能试验研究[D]. 西安:长安大学, 2008.

[5] 张喜刚,刘高,高原,等. 中空型外壁钢板-混凝土组合桥塔塔柱承载力研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 90-98.

[6] 王春生,王茜,王欣欣,等. 钢-高性能混凝土组合桥塔受力性能试验研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(1): 51-58.

[7] 王茜. 钢桥塔与组合桥塔受力性能试验研究[D]. 西安:长安大学, 2008.

[8] 张清华,马燕,王宝州. 高原环境新型组合桥塔温度场与温度应力特性分析[J]. 桥梁建设, 2020, 50(5): 30-36.

[9] 郑瑞. 矩形多格室高性能钢-混凝土组合桥塔轴心受压性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018.

[10] 王习之,刘玉擎,唐亮. 外包钢中空混凝土组合结构桥塔轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增刊1): 430-434.

[11] JTG/TD65-05—2015,公路悬索桥设计规范[S].

[12] 邵旭东. 基于超高性能混凝土(UHPC)的桥梁新结构-理论、试验与应用[M]. 北京:人民交通出版社, 2022.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadfloodbridge@163.com

