

外包钢中空混凝土组合桥塔轴压性能试验研究

郝聪龙^{1,2}, 陈晶^{1,2}, 徐祥龙^{1,2}, 李迎昊^{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: 为研究外包钢中空混凝土组合桥塔的轴压性能, 设计、制作了3组试件, 分析加劲肋设置形式对破坏模式、荷载-位移曲线、强度及延性的影响。提出一种新型的加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合桥塔结构, 并结合有限元模型开展应力状态分析和结构稳定性评估。试验结果表明, 各试件的破坏模式均为腰鼓型破坏, 增设加劲肋能有效提高试件的承载能力和延性, 且外置型与内置型加劲肋对承载能力和延性的提升幅度基本相同。仿真结果显示, 最不利荷载工况下新型组合桥塔结构各项指标均满足规范要求。新型组合桥塔采用加劲肋外置设计和UHPC永久模板, 克服了传统钢-混组合桥塔内部构造复杂导致的施工难题, 为保障施工质量提供了新的技术途径。

关键词: 钢-混组合桥塔; 轴压性能; 加劲肋; 试验研究; 工艺优化

中图分类号: U446; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0287-05

Experimental Study on Axial Compression Performance of Steel-encased Hollow Concrete Composite Bridge Pylon

HAO Conglong^{1,2}, CHEN Jing^{1,2}, XU Xianglong^{1,2}, LI Yinghao^{1,2}, HUANG Chunlei^{1,2}

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

Abstract: To study the axial compression performance of steel-encased hollow concrete composite bridge pylon, three sets of specimens are designed and fabricated to analyze the influence of the setting form of stiffening ribs on the failure mode, load-displacement curve, strength and ductility. A new type of steel-encased hollow concrete composite bridge pylon structure externally set with stiffening ribs is proposed, and the stress state analysis and structural stability evaluation are carried out in combination with finite element model. The research results show that the failure mode of each specimen is the waist drum type of failure. Adding stiffening ribs can effectively improve the load-bearing capacity and ductility of specimens. And the increase in load-bearing capacity and ductility of externally set and built-in stiffening ribs is basically the same. The simulation result shows that under the most unfavorable load conditions, all indicators of the new composite bridge pylon structures satisfy the requirements of the specifications. The externally set design of stiffening ribs and UHPC permanent formwork are adopted for the new type of composite bridge pylon to overcome the construction difficulties caused by the complex internal structure of traditional steel-concrete composite bridge pylons, which provides a new technical approach to ensure construction quality.

Keywords: steel-concrete composite bridge pylon; axial compression performance; stiffening rib; experimental study; process optimization

0 引言

作为大跨度缆索支承桥梁的关键承载构件, 桥塔在多塔斜拉桥结构中需要同时满足高刚度和强承载力的要求^[1]。传统混凝土桥塔易受收缩、徐变及

温度影响产生裂缝, 而纯钢桥塔则面临局部受压稳定问题^[2]。钢-混组合桥塔通过钢壁板与核心混凝土的协同作用, 既增强了局部抗屈曲能力, 又提高了整体抗压性能^[3]。钢管混凝土组合结构理论体系最早由苏联学者^[4]在20世纪50年代提出, 日本^[5]在20世纪70~80年代率先应用于桥塔设计, 后经中国团队^[6]通过试验研究和理论创新, 提出了考虑约束效应的承载力计算公式, 推动了钢-混组合桥塔在中国桥梁工程中的规模化应用。

在桥梁工程领域, 外包钢中空混凝土组合桥塔

收稿日期: 2025-05-01

作者简介: 郝聪龙(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

通信作者: 李迎昊(1998—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。电子信箱: 13971095202@163.com

优势显著。它通过外包钢板与核心混凝土形成双约束机制,有效提升结构整体受压性能;内设加劲肋能改变钢壁板局部屈曲模态,增强结构稳定性;采用中空设计,保持整体刚度的同时大幅减轻结构自重。基于此,该桥塔成为满足高耸结构轻量化与高性能化需求的理想结构,在300 m以上超高桥塔主流设计中应用前景十分广阔^[7]。

然而,常规加劲肋内置型外包钢中空混凝土组合桥塔仍有不足:钢箱内部需设置大量加劲肋防止局部屈曲,导致构造复杂,焊接工作量大,内部混凝土浇筑难以密实^[8]。

针对上述问题,本文提出一种新型加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合桥塔。目前,外包钢中空混凝土组合桥塔轴压性能研究多限于常规加劲肋内置型结构,外置型组合桥塔的应用鲜见。因此,本文以加劲肋设置形式为研究参数,开展外包钢中空混凝土组合桥塔试件的轴向受压试验,分析其破坏模式、荷载-位移曲线、强度及延性,并结合有限元模型开展应力状态分析和结构稳定性评估。

1 试验方案

1.1 试件设计

为研究外包钢中空混凝土组合桥塔中加劲肋设置形式对结构受力的影响,本文基于实际工程背景,制作了3组缩尺试件:未设加劲肋型(N)、常规加劲肋内置型(NI)、加劲肋外置型(NO)。每组设置2个平行试件(分别标记为A、B)以提高试验可靠性。试件尺寸均为250 mm×500 mm(含150 mm×150 mm中空区域),外包10 mm厚矩形钢管,总高800 mm,内壁布设 $\phi 10 \times 35$ mm剪力钉,加劲肋规格为30 mm×8 mm,具体尺寸见图1。

试验加载前测试同等养护条件下C50立方体抗压强度52.0 MPa,棱柱体抗压强度36.4 MPa,弹性模量35.8 GPa;钢筋屈服强度350 MPa,弹性模量200 GPa。

1.2 试验方法

试验在3 500 t动态压剪试验平台上进行,加载过程中试件始终保持轴心受压状态,见图2。正式加载前实施预加载,以校验加载装置与监测仪表的工作性能。正式加载分两阶段:初始阶段按力控制分级加载,每级50 kN;试件临近破坏时切换为位移控制,每级位移持续2~3 min。持续加载,直至试件承载力降至峰值荷载的80%或钢管出现明显屈曲时,

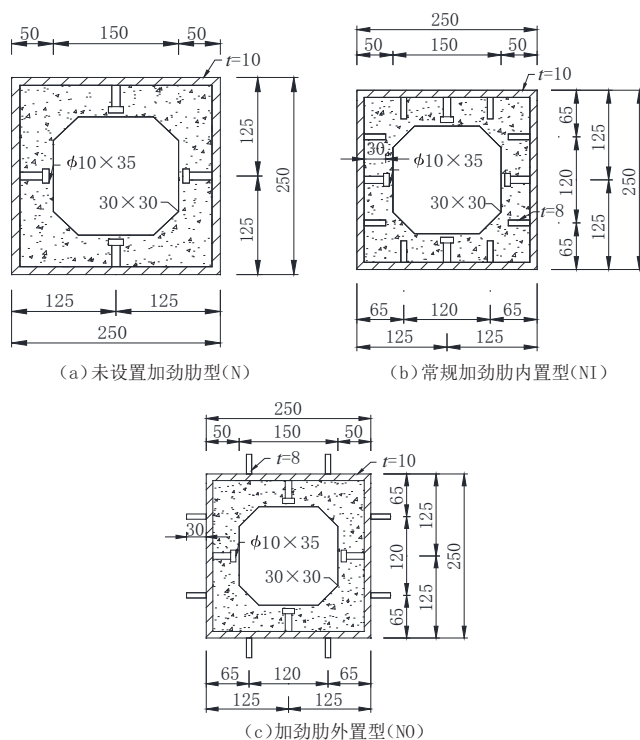


图1 试件截面尺寸(单位:mm)

终止试验。



图2 试验加载示意

2 试验结果

2.1 破坏模式

各试件均呈现以表面显著鼓曲为主、无明显剪切滑移特征的腰鼓型破坏模式。以N-A试件为例:加载初期,试件全截面均匀受压,表面无明显形变;荷载增至4 319 kN(达峰值荷载的70%~80%)时,轴向压缩变形加剧,中部钢板开始外鼓;荷载达5 783 kN(峰值荷载)时,伴随混凝土开裂声,荷载骤降,试件四周多处鼓曲,最终破坏。试件破坏形态见图3。

2.2 荷载-位移曲线

如图4所示,各试件的荷载-位移曲线呈现典型三阶段特征:弹性阶段内荷载与位移呈线性增长。荷载达峰值荷载的70%~80%后,荷载增速渐缓,进入弹塑性阶段。最终荷载达到峰值后进入破坏阶段,随后荷载逐渐下降并趋于稳定。

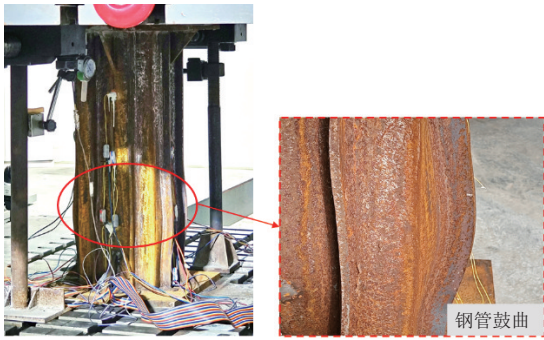


图3 试件破坏形态

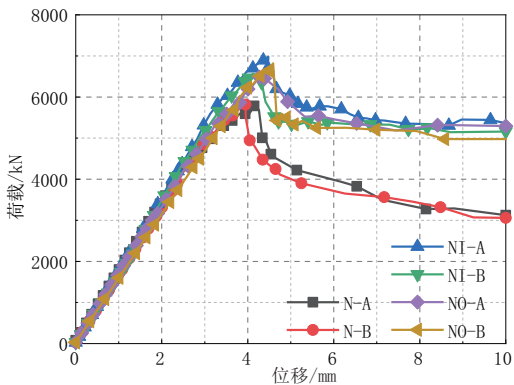


图4 荷载-位移曲线

另一方面,弹性阶段内各试件的荷载-位移曲线高度重合,且NO与NI试件平均峰值荷载较N试件分别提升14.8%和13.2%,表明增设加劲肋可有效提高试件承载能力,且外置型与内置型加劲肋对承载能力的提升幅度基本相同。

2.3 强度及延性

采用强度指标 $SI^{[9]}$ (峰值荷载 N_u 与截面理论荷载比值)量化桥塔试件的套箍效应,其中截面理论荷载为钢板、加劲板和混凝土抗压承载力叠加计算,见式(1)。试件延性通过 $DI^{[9]}$ 来评估,该延性指标定义为峰值荷载后85%荷载对应位移 $\Delta_{85\%}$ 和峰值位移 Δ_u 的比值,见式(2)。

$$SI = \frac{N_u}{A_s f_y + A_c f_{ck} + A'_s f'_y} \tag{1}$$

$$DI = \Delta_{85\%} / \Delta_u \tag{2}$$

由表1可以看出,各试件SI值均大于1且数值相近,表明该组合结构可充分发挥材料的受压性能,但加劲肋的增设及其设置形式对试件套箍效应的提升作用有限。在延性方面,各试件DI值均大于1,均具备一定程度的塑性变形能力。其中,NO和NI试件的DI值均高于N试件,但差异较小,表明增设加劲肋能增强试件延性,且不同加劲肋设置形式下试件吸收能量和发生塑性变形的能力基本相同。

表1 各试件极限承载力及延性指标

序号	编号	N_u/mm	截面理论荷载/kN	SI平均值	Δ_u/mm	$\Delta_{85\%}/\text{mm}$	DI平均值
1	N-A	5 783	4 532	1.28	4.15	4.42	1.05
2	N-B	5 817	4 532	1.28	3.95	4.05	1.05
3	NI-A	6 981	5 134	1.32	4.48	5.09	1.12
4	NI-B	6 570	5 134	1.32	4.13	4.58	1.12
5	NO-A	6 561	5 204	1.29	4.32	5.26	1.12
6	NO-B	6 819	5 204	1.29	4.59	4.66	1.12

3 受力性能分析及施工工艺

在常规外包钢中空混凝土组合桥塔构造体系中,需在钢壁板内侧设置大量加劲结构避免局部屈曲问题。但大量焊钉、加劲肋及钢筋网的存在,导致钢箱内部结构复杂,施工难度大幅提高,混凝土浇筑也难以密实。同时,实际施工过程中,通常采用临时钢模板作为内侧模板,其拆除难度大,周转率低,部分不规则模板甚至仅能一次性使用,造成资源浪费。

为解决上述缺陷,基于第2节试验结果,本文提出一种新型的加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合桥塔结构。该桥塔由外钢壁板、外置竖向与横向加劲肋、焊钉、钢筋网、填充混凝土和UHPC永久模板组成。其中,外钢壁板与UHPC永久模板共同承担模板功能,加劲肋布置于外钢壁板外侧,钢壁板内侧仅设置焊钉与钢筋网。

3.1 受力性能分析

针对某峡谷千米级铁路悬索桥工程,本文对新型组合桥塔的力学性能展开研究。在结构设计时,重点考察了桥塔作为偏心受压构件的关键刚度参数,其中抗弯刚度 EI 在纵桥向和横桥向分别取 $1.6 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 和 $9.3 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$,以确保其与原设计桥塔的弯曲刚度保持一致。基于MIDAS Civil软件建立了新型组合桥塔的有限元分析模型,其中荷载数据来源于全桥杆系模型的计算结果,边界条件和材料属性均参考源设计桥塔。

(1)应力状态分析

共设置三种典型荷载工况:工况一模拟主梁未安装时塔顶横梁吊机作业及鞍座荷载作用($F_x=-61\ 621.77 \text{ kN}$, $F_y=-1\ 966.86 \text{ kN}$, $F_z=9\ 087.52 \text{ kN}$,吊机荷载3.1 MPa);工况二考虑主梁安装完成后吊机与鞍座共同作用($F_x=-187\ 116.67 \text{ kN}$, $F_y=-5\ 901.62 \text{ kN}$, $F_z=2\ 261.50 \text{ kN}$,吊机荷载3.1 MPa);工况三则仅分析成桥状态下鞍座传递的荷载效应($F_x=-315\ 415.18 \text{ kN}$, $F_y=-10\ 444.92 \text{ kN}$, $F_z=-922.63 \text{ kN}$)。各工况下的三向

作用力及吊机荷载均通过数值模拟精确获取。

应力分析结果表明(见图5),在最不利荷载工况下,桥塔全截面受压,无拉应力产生。其中,混凝土最大压应力 14.5 MPa,钢结构最大压应力 85.5 MPa,均满足规范要求。

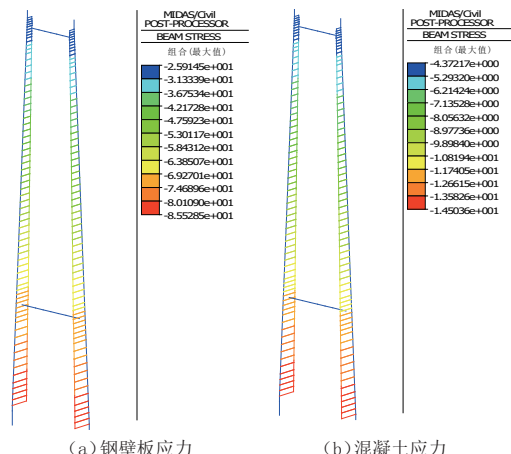


图5 最不利工况下应力包络图(单位:MPa)

(2) 结构稳定性评估

根据《公路悬索桥设计规范》(JTG/T D65-05—2015)^[10]要求,悬索桥索塔的弹性屈曲稳定系数需达到4以上。通过MIDAS Civil软件进行的模态分析显示(见图6),该组合桥塔在施工和运营最不利工况下,其一阶弹性稳定系数达到10.5,失稳模式表现为纵向压弯屈曲,完全满足规范规定的稳定性要求。

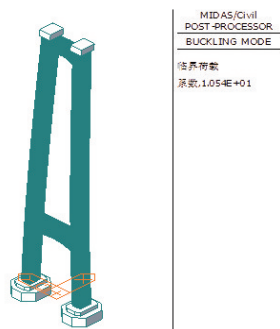


图6 一阶弹性模态图

3.2 施工流程

新型桥塔采用“工厂预制+现场拼装”模式施工(见图7)^[11],具体流程如下。

外钢壁板预制与运输:工厂按每节段4~6 m预制外钢壁板,完成外置横竖向加劲肋焊接、内置焊钉布设及钢筋网绑扎后,整体吊运至现场拼装。

UHPC永久模板预制与运输:工厂预制UHPC永久模板,在钢模板中绑扎钢筋网,将焊钉焊于纵、横向钢筋搭接处,侧面结合面预制草纹凿毛带,浇筑UHPC并养护,完成后对模板内表面水力凿毛。

模板搭设:外壁钢板和钢筋骨架吊装就位后,以

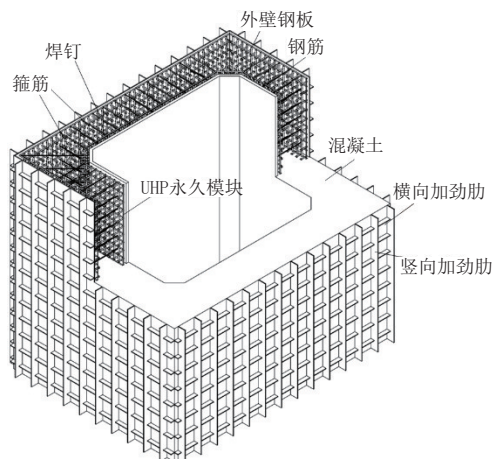


图7 加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合桥塔立体结构示意图

外壁钢板为外模板,搭设UHPC永久模板为内模板。UHPC永久模板节段间榫卯连接,结合面用环氧粘接胶粘接密封。

混凝土浇筑与养护:搭设完内模板,在节段顶面钢筋混凝土骨架预埋倒U型钢筋,浇筑自密实混凝土并充分振捣,直至混凝土养护完成。节段高度宜控制在4~6 m内,接头处需预留30~50 cm避开薄弱面。

循环施工:上一节段混凝土浇筑后,对节段顶面新旧混凝土结合面水力或机械凿毛,重复施工下一节段,直至塔顶封口。

该新型桥塔采用UHPC永久模板替代传统临时钢模板,养护后免拆且外表面免涂装、免后期维修,使用阶段能与钢板、混凝土协同承力,在简化施工流程、降低综合成本的同时,大幅提升桥梁耐久性。同时,通过优化内部构造,大幅精简钢箱内部部件,仅保留必要焊钉与钢筋网并将加劲肋外置,有效降低施工难度,克服了传统钢-混组合桥塔内部构造复杂导致的施工难题,为保障施工质量提供了新的技术途径。

4 结 语

(1)试验结果表明,各试件的破坏模式均为表面严重鼓曲且缺乏明显剪切错动的腰鼓型破坏。此外,增设加劲肋能有效提高试件的承载能力和延性,且外置型与内置型加劲肋试件的平均峰值荷载较未设置加劲肋试件分别提高14.8%和13.2%,提升幅度基本相同。

(2)提出一种新型的加劲肋外置型外包钢中空混凝土组合桥塔结构,并基于MIDAS Civil建立新型组合桥塔有限元模型开展力学性能研究。结果表

明,最不利荷载工况下桥塔全截面受压、无拉应力,一阶弹性稳定系数达 10.5,失稳模式为纵向压弯屈曲,各项指标均满足规范要求。

(3)该新型桥塔采用UHPC永久模板替代传统临时钢模板,在简化施工流程、降低综合成本的同时,大幅提升桥梁耐久性。同时,通过优化内部构造,仅保留必要焊钉与钢筋网并将加劲肋外置,有效降低施工难度,克服了传统钢-混组合桥塔内部构造复杂导致的施工难题,为保障施工质量提供了新的技术途径。

参考文献:

[1] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2024[J].中国公路学报,2024,37(12):1-160.
[2] 王雪锋,关大勇,冯玉龙.钢-混组合桥塔结合段承载性能模型试验研究[J].公路交通科技,2022,39(4):93-100.

[3] 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.
[4] Leshchinsky M Y. Composite steel-concrete structures[M]. Moscow: State Publishing House, 1956.
[5] Nishino F. Structural behavior of concrete-filled steel tubular bridge piers[J]. IABSE Symposium Reports, 1985(48): 105-112.
[6] 范立础,李杰.钢管混凝土桥塔的抗震性能研究[J].中国土木工程学报,1996,29(4):3-12.
[7] 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;450.
[8] 王鹏,王康宁,黄春雷.新型钢-混组合桥塔构造型式研究[J].城市道桥与防洪,2025(1):75-79.
[9] 钟善桐.钢管混凝土结构(第3版)[M].北京:清华大学出版社,2004.
[10] JTG/TD65-05—2015,公路悬索桥设计规范[S].
[11] 中铁大桥局集团有限公司,中铁大桥科学研究院有限公司,中铁大桥勘测设计院集团有限公司.一种组合桥塔结构及其施工方法:202411914535.X[P].2025-03-14.

(上接第 276 页)

monitoring system using similarity of symmetric responses[J]. Smart Structures and Systems, 2019, 23(3): 279-293.
[11] 陈蕊.变异系数的在线监控问题研究[D].沈阳:辽宁大学,2021.
[12] 周志华.机器学习[M].北京:清华大学出版社,2016.
[13] 元孟雅.基于信息增益的决策树算法的分析与改进[D].武汉:华中科技大学,2015.
[14] Cheng Yuzhu, Shi Qiuying. PCMIgr: a fast packet classification

method based on information gain ratio[J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(7): 1-24.
[15] Wang Jieting, Li Feijiang, Li Jue, et al. Gini index and decision tree method with mitigating random consistency[J]. Scientia Sinica Informationis, 2024, 54(1): 159-190.
[16] 段汝娇,赵伟,黄松岭,等.基于模糊ID3决策树的快速角点检测算法[J].清华大学学报(自然科学版),2011,51(12):1787-1791.