

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.12.045

装配式城市桥梁下部结构连接试验研究

郭 强,封 伟,刘耀荣,柳建设
(西安市政设计研究院有限公司,陕西 西安 710000)

摘 要:为实现在高烈度区对城市桥梁装配式下部结构的应用,提出一种可应用于城市桥梁下部结构快速装配施工的钢-混组合连接,通过模型试验展开其与既有灌浆套筒连接、金属波纹管连接以及现浇墩柱的承载力对比研究,静力试验以及拟静力试验结果均表明钢-混组合连接墩柱承载力均高于现浇墩柱,灌浆套筒连接以及波纹管连接墩柱承载力略低于现浇墩柱。拟静力试验结果表明钢-混组合连接柱相较于现浇柱具有更好的耗能能力和抗震性能,证明这种连接形式具有可应用于高烈度区(设防烈度 8 度及以上)的适用性。

关键词:装配式桥梁;预制桥墩;缩尺模型试验;钢-混组合连接;灌浆套筒连接

中图分类号: U446 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2024)12-0211-04

0 引 言

随着我国城市基础建设高速地发展,桥梁装配式技术得到了快速发展和应用,桥梁装配式技术就是将部分现场工作提前移至工厂中生产预制,通过交通工具运到现场以减少现场的工作时间,通过吊装、安装等施工技术将构件连接成整体,完成桥梁施工。相对于装配式桥梁上部结构,桥梁下部结构装配化发展较慢,且下部结构设计主要以抗震设计为主,装配式下部结构理论研究尚不成熟,目前广泛应用的灌浆套筒连接预制构件也仅适用于设防烈度为 7 度及以下地区。但我国 8 度区地域广阔,针对高烈度区桥梁下部装配式技术值得研究^[1-4]。

1 试验方案和试验模型设计

由于现行规范明确指出地震设防烈度为 8 度及以上时,目前广泛使用的套筒灌浆等既有装配式连接技术不宜使用,需要专门研究后选择性使用,这是限制高烈度区装配式桥梁启动发展的关键性技术问题,也是本研究着重解决的技术问题^[5-6]。为了在 8 度区推广应用装配式桥墩,对城市装配式下部结构进行深入研究,充分考虑经济、高效、安全、可靠、施工便利等因素,在综合分析比选现有的各类预制装配式构件连接形式后,在既有的装配式连接的基础上,创新提出一种钢-混组合装配式连接,通过模型

试验对比研究既有灌浆套筒连接、灌浆金属波纹管连接与该种连接在相同的试验条件下的力学性能,其中钢-混组合装配式连接构造(方柱)见图 1。

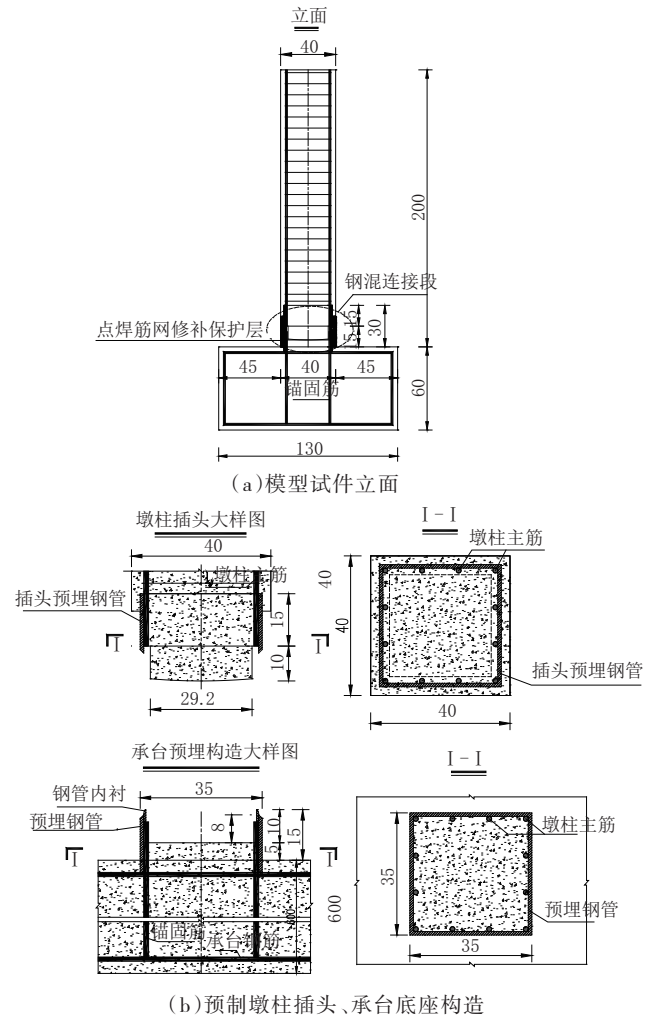


图 1 钢-混组合连接(方柱)方案(单位:cm)

收稿日期: 2024-01-08

作者简介:郭强(1993—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计与研发工作。

该钢-混组合装配式连接通过预制墩柱插头与承台预埋底座对接连接,墩柱插头和承台均有预埋连接钢管,钢管与墩柱主筋焊接连接。墩柱吊装之前在承台钢管底座内灌入灌浆料,通过机械设备吊装定位后,对接上下预埋钢管,将墩柱插头插入承台预埋钢管内,使灌浆料自然溢出,然后对连接钢管进行焊接连接;墩柱插头设计为局部弧形构造,焊接时墩柱插头端部可与承台局部接触为墩柱提供支撑,当墩柱垂直度不足时,也可通过插头进行微调,焊接完成后利用混凝土修补料修补钢混连接段保护层,见图2,预埋钢管内侧焊接有钢管内衬,方便对接焊接以及保证焊接质量。



(a)墩柱吊装对接 (b)上下连接钢管焊接

图2 钢-混组合连接墩柱安装

2 装配式桥墩静力试验

依据装配式桥墩构造,设计并制作装配式桥墩1:4缩尺模型试件,以及整体现浇桥墩1:4缩尺模型对比试件。在竖向施加压力(轴压比为0.1对应的轴力)的作用下,水平方向施加单向推力,进行静载试验(见图3),试验机加载速率为0.1 mm/s,每加载60 s后保持持荷状态20 s,直至加至构件破坏为止。测试荷载-位移的变化,观察裂缝发展与破坏形态,对钢混连接节点的力学性能进行分析研究。静力试验进行2组(圆柱和方柱)共8个试件的试验,包含现浇模型试件、装配式钢-混组合连接试件、灌浆套筒连接试件、灌浆金属波纹管连接试件,共4种接头类型试件,其中圆柱直径为45 cm,方柱边长为40 cm,同类方柱或圆柱试件除连接构造不同外,采用相同模型尺寸和配筋,试件墩柱高度均为200 cm。承台高度为60 cm,长130 cm,宽130 cm。静力试验破坏形态见图4,试验墩柱荷载-位移曲线结果见图5和图6。

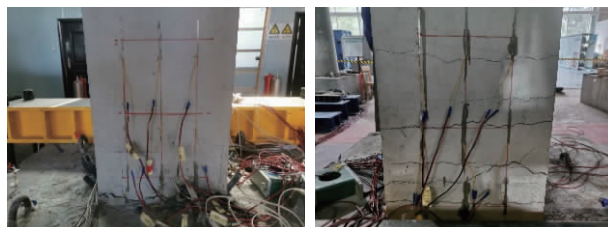
根据图4,除钢混组合连接方柱以外,其它三种试验墩柱柱底范围内受压侧混凝土局部均已压溃剥落,受拉侧产生横向裂缝,裂缝逐渐扩展直至破坏;



图3 试验加载设备



(a)现浇方柱破坏 (b)钢混组合连接方柱破坏



(c)灌浆套筒连接方柱破坏 (d)波纹管连接方柱破坏

图4 静力试验破坏结果

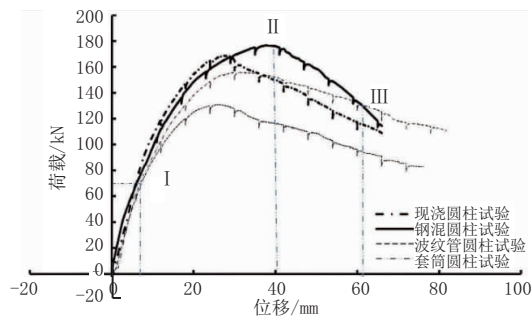


图5 圆柱静力试验位移-荷载曲线

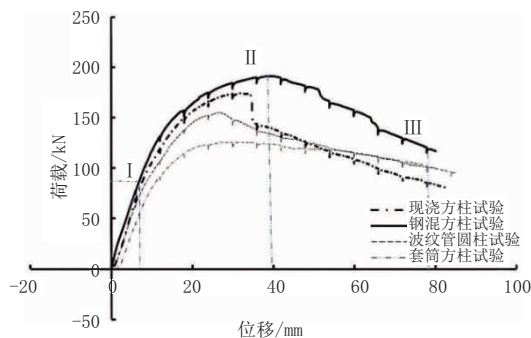


图6 方柱静力试验位移-荷载曲线

刨除保护层检查主筋均未发生受压颈缩以及受压屈服等现象;对连接钢管进行检查,柱底连接钢管相邻

上部受拉侧有多道横向裂缝,受压侧混凝土局部压溃;连接钢管无变形、无破坏,钢管接头焊接连接可靠,连接钢管外保护层未发生明显破坏、剥落,混凝土破坏均发生在连接钢管相邻上部;圆柱试验破坏形态与方柱类似。

由图 5 所示,钢混连接圆柱承载力(176.6 kN)>现浇圆柱承载力(168.4 kN)>灌浆套筒连接圆柱承载力(156.0 kN)>波纹管圆柱承载力(131.0 kN)。图 5 中 0~Ⅰ阶段可知,从四种连接圆柱弹性模量及初始加载弹性段曲线斜率可以看出,钢混连接圆柱的弹性模量在加载 70 kN 以内高于其它 3 种连接形式;到达Ⅰ~Ⅱ阶段,四种连接圆柱破坏最大位移可以看出钢-混连接圆柱的延性明显优于现浇圆柱、套筒圆柱及波纹管圆柱;到达Ⅱ~Ⅲ阶段,可以看出钢-混连接圆柱相较于其它 3 种连接形式依然具有较高的承载力;通过以上静力试验结果可以充分说明这种圆墩钢-混装配式桥墩连接形式在承载力安全性方面具有独特的优势。

由图 6 所示,钢混方柱承载力(191.4 kN)>现浇方柱承载力(174.5 kN)>波纹管方柱承载力(155.3 kN)>灌浆套筒方柱承载力(125.8kN),并且钢混方柱延性优于其它 3 种。与圆柱试验结果类似,

相较于其它 3 种连接形式,钢混连接方柱在前期(0~Ⅰ阶段)具有更高的弹性强度,中期(Ⅰ~Ⅱ阶段)混凝土开裂发展具有更好地延性,后期(Ⅱ~Ⅲ阶段)墩柱破坏之后依然可以维持较高的承载力,显然这种方墩钢混装配式桥墩连接形式在相同的使用情形下具有明显优势。

试验采用位移延性系数 μ 来评价试件的延性,即在达到极限荷载后基本保持继续承载力的情况下,极限位移和等效屈服位移的比值。取荷载下降到试验峰值荷载 85%时的位移为极限位移 Δu 。目前对于初始屈服点和极限点如何确定仍没有统一的确定方法,本文采用常用的 Park 法来确定屈服点^[7-8],见图 7。由上述方法确定的各试件的屈服位移 Δy 、极限位移 Δu 、屈服荷载 P_y 、极限荷载 P_u 见表 1。由表可知对于圆柱和方柱,钢混连接柱延性系数均均接近或高于现浇柱。

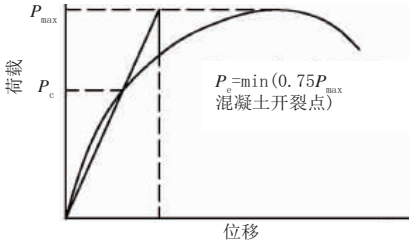


图 7 Park 法等效屈服点的确定

表 1 静力试验试件抗侧强度指标

构件	屈服位移 y/mm	极限位移 $\Delta u/mm$	位移延性系数 $\mu=\Delta u/\Delta y$	屈服荷载 P_y/kN	极限荷载 P_u/kN	静力试验峰值荷载 P_{max}/kN
现浇圆柱	14.84	44.05	2.97	134.4	143.1	168.4
钢混圆柱	18.71	53.02	2.83	143.6	150.1	176.6
灌浆套筒圆柱	14.18	41.98	2.96	107.4	132.6	156.0
波纹管圆柱	17.50	54.00	3.09	128.8	111.4	131.0
现浇方柱	16.44	34.97	2.13	143.2	148.3	174.5
钢混方柱	16.18	53.98	3.34	152.4	162.7	191.4
灌浆套筒方柱	16.15	40.84	2.53	129.8	106.9	125.8
波纹管方柱	15.48	72.00	4.65	106.4	132.0	155.3

3 装配式桥墩拟静力试验

对该装配式桥墩钢-混组合连接进行拟静力试验对比研究,依据装配式桥墩构造,设计并制作 1:4 缩尺模型试件,拟静力试验进行 2 组(圆柱和方柱)共 8 个试件的试验,包含现浇模型试件、装配式钢-混组合连接试件、灌浆套筒连接试件、灌浆金属波纹管连接试件,共 4 种接头类型试件,其中圆柱直径为 45 cm,方柱边长为 40 cm,同类方柱或圆柱试件除连接构造不同外,采用相同模型尺寸和配筋,试件墩柱

高度均为 200 cm。承台高度为 60 cm,长 130 cm,宽 130 cm。在竖向施加压力(轴压比为 0.1 对应的轴力)的作用下,进行水平方向施加反复荷载的拟静力荷载试验。拟静力试验全程采用控制位移加载,根据静力试验结果最终确定采用试验机加载速率为 1 mm/s,采用 ± 2 、 ± 5 、 ± 11 、 ± 16 、 ± 22 mm 位移荷载等级加载,每一荷载等级循环 1 次;继续采用位移 ± 22 、 ± 27 、 ± 32 、 ± 43 、 ± 65 、 ± 75 mm 等级进行加载,每一荷载等级循环 3 次,直至加至构件破坏为止。观察试验墩柱破坏形态并记录加载过程中的

荷载-位移以及破坏形态,分析不同连接节点试件的耗能面积,延性系数等,并与整体现浇试件进行对比,评估钢混组合连接节点的抗震性能,拟静力试验破坏形态见图8,其中钢-混组合连接柱和现浇柱拟静力试验滞回曲线见图9。

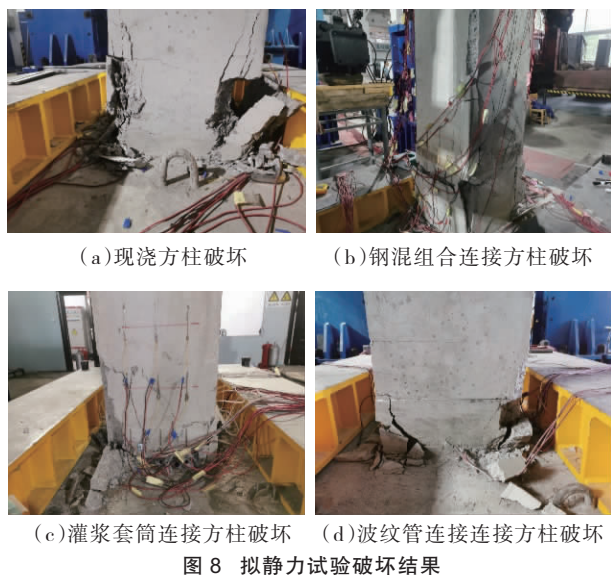
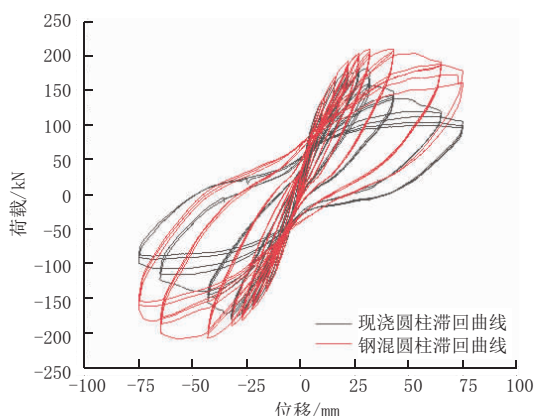
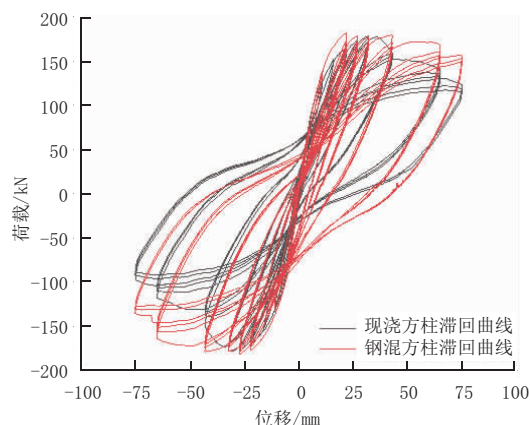


图8 拟静力试验破坏结果



(a) 现浇圆柱、钢-混连接圆柱滞回曲线



(b) 现浇方柱、钢混连接方柱滞回曲线

图9 模型试验墩柱滞回曲线

根据图8,除钢混组合连接方柱以外,其它三种试验墩柱柱底范围内两侧混凝土局部均已压溃剥

落,刨除保护层检查主筋未发生受压颈缩以及受压屈等现象;根据对钢混组合连接方柱破坏观察和检查,连接钢管无变形、无破坏,钢管接头焊接连接可靠无破坏,连接钢管外保护层发生破坏剥落,连接钢管相邻上部混凝土发生压溃,刨除保护层发现连接钢管上方主筋存在压屈变形;试验结果显示圆柱试验破坏形态与方柱类似。

根据试验结果:拟静力试验中圆柱试件极限承载力依次为钢-混连接柱(207.77 kN)>现浇柱(180.36 kN)>波纹管圆柱(122.94 kN)>灌浆套筒连接柱(88.27 kN),方柱试件极限承载力依次为钢-混连接柱(181.4 kN)>现浇柱(178.0 kN)>波纹管连接柱(130.55 kN)>灌浆套筒连接柱(82.39 kN)。

由图9可见,在地震耗能方面,图中钢-混连接柱的滞回曲线面积>现浇柱的滞回曲线面积,表明钢-混连接柱的耗能力和抗震性能优于现浇墩柱;墩柱刚度退化方面,随着加载周期加大可以看出钢-混连接柱和现浇柱的刚度退化程度均较低。综合比较,相较于现浇墩柱,钢混组合连接柱相较于现浇墩柱具有更好的耗能能力和抗震性能,证明这种连接形式具有可应用于高烈度区(设防烈度8度及以上)的适用性。

4 结论

(1)本文以应用较为广泛的灌浆套筒连接和波纹管连接为对比研究对象,研究设计了一种可适用于高烈度区(8度区)的装配式桥墩钢混组合连接形式,并对比三种不同的墩柱连接形式与现浇混凝土墩柱在静力和拟静力作用下桥墩的破坏模式和极限承载力。

(2)根据静力试验四种连接方柱破坏最大位移可以看出钢混连接方柱的延性明显优于现浇方柱、灌浆套筒方柱以及波纹管方柱。

(3)拟静力试验结果表明,钢-混组合连接柱相较于现浇柱具有更好的承载能力,拟静力试验加载条件下具有更优的塑性变形能力,试验过程验证了该种钢-混组合连接制作简单、安装方便、结构合理安全可靠,可以应用于有较高抗震设防要求地区(8度区及以上)的适用性。

参考文献:

- [1] 袁万城,钟海强,党新志,等.装配式桥墩连接形式抗震性能研究进展[J].东南大学学报(自然科学版),2022,52(3):609-622.
- [2] 石岩,张智超,钟正午,等.预制装配式桥墩连接类型及抗震性能研

(下转第220页)

5 工程应用

阻爬坎+新泽西型混凝土护栏解决了车辆易沿坡面过度爬升而导致侧翻的问题,已在实际工程中应用,可改善护栏的导向功能,提高护栏的安全防护性能,现场应用照片如图9所示。



图9 阻爬坎+新泽西型混凝土护栏

对于其它坡面形式的混凝土护栏,为改善护栏景观效果,提高诱导功能,在护栏顶部增设阻爬坎结构的形式也在实际工程中得到推广应用,现场应用照片如图10所示。



(a)加强型混凝土护栏



(b)阻爬坎+单坡面型混凝土护栏

图10 其它坡面混凝土护栏

6 结 语

在对护栏顶部设置阻爬坎的功能分析中,通过仿真和试验分析得到如下结论:

(1)顶部增设有阻爬坎的新泽西型混凝土护栏既保留了新泽西型坡面较优的缓冲性能,又降低了车辆爬升程度,避免翻车状况发生,改善了护栏的导向功能,减少了车辆的侧倾角度,能够提高护栏的防护性能;

(2)在F型混凝土护栏顶部设置阻爬坎对护栏的导向功能、缓冲功能的改善作用不大,同时也对护栏防护性能的提升不明显。

研究为阻爬坎的设置与否提供了依据,也为相关标准的制定提供了数据支撑。

参考文献:

- [1] JTG/T D81—2017,公路交通安全设施设计细则[S].
- [2] JTG D81—2017,公路交通安全设施设计规范[S].
- [3] 闫书明.有限元仿真方法评价护栏安全性能的可行性[J].振动与冲击,2011,30(1):152-156.
- [4] 刘晓波,王新,刘思源,等.基于仿真模拟技术的SB级波形梁护栏梁板中心设置高度研究[J].中外公路,2021,41(2):352-356.
- [5] 刘明虎,张门哲,亢寒晶,等.桥梁嵌固式基础中央分隔带钢护栏安全性分析[J].中外公路,2019,39(3):291-296.
- [6] JTG B05-01—2013,公路护栏安全性能评价标准[S].
- [7] T/GDHS 001—2020,公路护栏安全性能仿真评价技术规程[S].
- [8] Polivka K A, Faller R K, Sicking D L, et al. Performance evaluation of the permanent new Jersey safety shape barrier—update to NCHRP 350 TestNo.4-12 (2214NJ-2), TRP-03-178-06[R].Midwest Roadside Safety Facility (MwRSF), 2006.
- [9] 陈林,彭婷,刘涛,等.低等级混凝土护栏对厢式卡车撞击桥墩作用的影响规律[J].自然灾害学报,2020,29(5):131-139.

(上接第214页)

- [1] 究综述[J].世界地震工程,2022,38(2):205-219.
- [3] 郑杰,张凯迪,贾俊峰,等.预制装配式桥墩连接关键技术及工程应用[J].市政技术,2022,40(4):6-15.
- [4] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(2):1-97.
- [5] 戚圣强,樊泽,郭强.装配式套筒连接墩柱受力性能分析研究[J].特种结构,2023(3):22-25,82.

- [6] 樊泽,戚圣强,封伟,等.装配式桥墩抗震性能分析[J].城市道桥与防洪,2023(9):158-161.
- [7] 李运生,王泽涵,杨斌,等.高速铁路桥梁装配式桥墩足尺寸拟静力试验研究[J].铁道学报,2022,44(9):135-145.
- [8] PARK R.Evaluation of Ductility of Structures and Structural Assemblages from Laboratory Testing[J].Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1989,22(3):155-166.