

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.09.037

# 装配式桥墩抗震性能分析

樊泽, 戚圣强, 封伟, 刘耀荣

(西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

**摘要:** 基于抗震性能及施工的需求, 提出了一种新型装配式桥梁连接方法, 在连接端头预埋圆形型钢, 通过焊接连接, 对比灌浆套筒、金属波纹管的其他构造, 该连接方法施工方便, 操作容易, 施工速度更加快速。通过对型钢连接方式的试验研究, 主要得出以下结论: (1) 型钢连接的装配式桥墩与现浇桥墩破坏均为弯曲破坏。型钢连接的装配式桥墩柱根处破坏程度较轻, 混凝土破坏主要集中在预埋钢管顶部以上。(2) 型钢连接的装配式桥墩承载能力高于现浇桥墩。(3) 型钢连接的装配式桥墩与现浇桥墩的残余位移相当, 但在耗能能力及延性方面前者的表型更好。(4) 型钢连接的装配式桥墩具有优越的抗震性能, 为装配式桥墩在高烈度地震区的使用提供一种方法。

**关键词:** 桥墩; 装配式; 滞回曲线; 试验

**中图分类号:** U443.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2023)09-0158-04

## 0 引言

随着城市的大规模发展, 城市的交通设施也在大量增加, 桥梁作为城市交通的重要组成部分, 对城市的发展起到至关重要的作用。装配式桥梁的发展促使桥梁建设速度较传统的现浇方式得到很大的提升<sup>[1]</sup>, 桥梁质量得到高度保证, 施工期间对沿线环境的影响也得到改善。

装配式桥墩作为装配式桥梁的关键部位, 其连接的可靠性决定了桥梁的可靠性, 因此对桥梁的连接性能应该格外关注。学者们对多种装配式桥墩的连接构造进行了试验分析和理论研究。王志强<sup>[2-3]</sup>、樊泽<sup>[4]</sup>等对采用灌浆套筒的连接方法做了试验模型和有限元分析, 结论发现灌浆套筒的连接方式的抗震能力良好, 合理结构设计下可用于抗震设计。包龙生<sup>[5]</sup>等对金属波纹管连接方式做了研究, 发现其有较好的抗震性能。胡志坚<sup>[6]</sup>等提出了一种采用榫头+波纹管的连接方式, 并对其地震易损性进行了试验和理论分析, 结论表明其抗震性能较好。除此之外, 仍有许多新型的连接方式出现。

基于抗震性能及施工的需求, 文章提出了一种新型装配式桥梁墩柱与承台之间的连接方法, 在墩柱与承台连接端头预埋圆形型钢, 通过焊接连接, 此连接方式在焊接后不久便具有较高的承载能力。对比灌浆套筒、金属波纹管的其他构造, 该连接方法施

工方便, 操作容易, 施工速度更加快速。通过对型钢连接方式的试验研究, 分析其抗震性能。

## 1 试验概况

### 1.1 试件介绍

文章依托陕西省高效装配式下部结构标准设计项目, 根据相似原理, 采用1:4的比例设计制作了两种类型的桥墩的缩尺模型, 编号分别为1#和2#, 1#为现浇桥墩, 见图1, 2#为型钢连接桥墩, 见图2、图3。桥墩高度2m, 墩柱截面直径0.45m, 承载高度0.6m, 截面为方形尺寸为1.3m×1.3m。

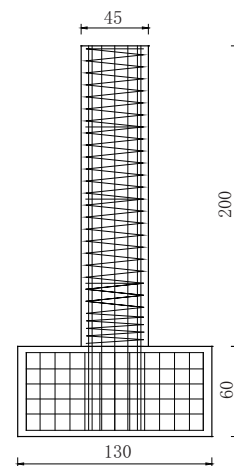


图1 1#墩柱(单位:cm)

墩柱模型均使用标号为C50的混凝土, 28d龄期试块平均抗压强度65.6MPa; 主筋及承台内锚固钢筋采用直径14mm的HRB400钢筋, 共12根, 纵筋试件的平均屈服强444MPa, 极限强度为612MPa; 箍筋采用直径8mm的HPB300螺旋钢筋, 箍筋间

收稿日期: 2022-11-11

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

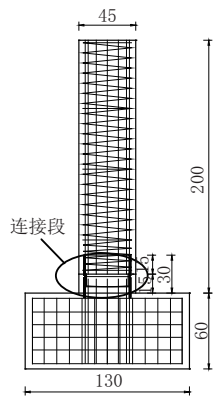


图2 2#墩柱(单位:cm)

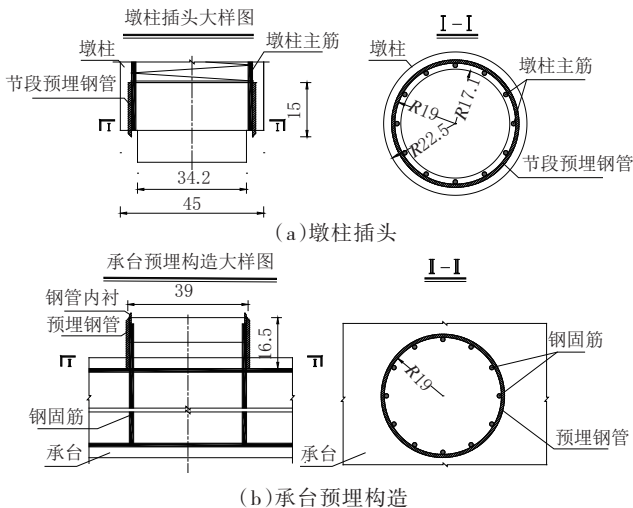


图3 2#墩柱连接大样(单位:cm)

距 8 cm, 加密区箍筋间距 5cm; 钢板采用 Q355-D, 厚度 10 mm, 钢板试件平均屈服强度为 371 MPa, 极限强度 522 MPa。

试件桥墩和承台分开预制, 到达龄期后安装组合, 桥墩插头插入承台预埋套筒内, 见图 4, 定位后焊接预埋钢管, 最后浇筑钢管混凝土保护层。



图4 立柱安装

### 1.2 加载方法

加载机制采用循环往复加载, 加载设备见图 5。

首先施加竖向轴压力, 轴压比取 0.1, 竖向轴压力大小 356.26 kN, 竖向荷载稳定后施加水平循环往复荷载, 水平荷载初始阶段控制位移大小依次为 2 mm、5 mm、10 mm、15 mm, 循环一次, 墩柱屈服后采用位移控制, 控制位移大小依次为 20 mm、25 mm、30 mm、40 mm、60 mm、70 mm、80 mm, 每级加载循环 3 次, 直至构件破坏停止加载。

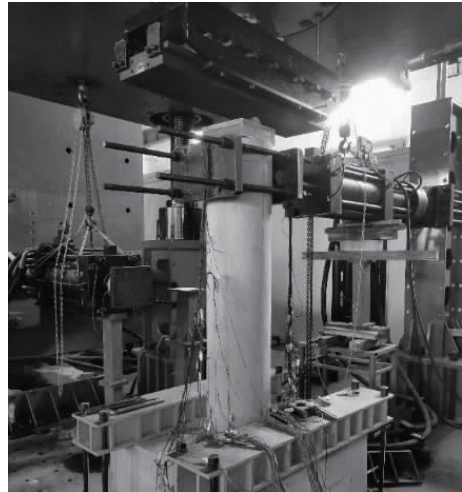


图5 试验加载设备

## 2 试验现象及破坏特征

在加载初期, 位移荷载较小时, 1# 桥墩底部出现多条细微裂缝, 且大致方向水平, 与水平方向最大角度不超过 45°, 裂缝宽度小于 1 mm, 2# 桥墩初次出现裂缝的位置主要集中在预埋钢管上方位置, 预埋钢管外层混凝土鲜有裂缝出现。随着位移荷载等级的增加, 1# 桥墩一条主要裂缝宽度及横向长度快速增大, 其他裂缝增长速度缓慢, 同时出现多条竖向斜纹及竖向裂缝, 2# 桥墩在预埋钢管顶部位置出现主要裂缝, 且在此上方出现过较大竖向裂缝, 在此位置下方出现多条细小裂缝。加载后期, 1# 墩柱柱脚混凝土压溃, 主裂缝以下混凝土几乎整块脱出, 见图 6, 2# 墩柱预埋钢管以上混凝土大范围整块脱落, 预埋钢管顶部向下位置一侧混凝土鼓起, 另一侧后浇保护层部分局部脱落, 见图 7。



(a)正面 (b)背面

图6 1#试件加载结束后裂缝分布

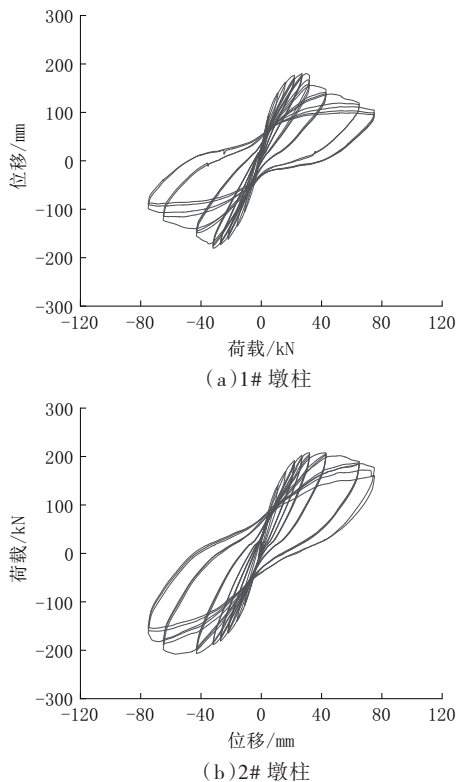


(a)正面 (b)背面  
图7 2#试件加载结束后裂缝分布

### 3 试验结果分析

#### 3.1 荷载 - 位移滞回曲线

两个墩柱的实测水平力 - 荷载位移曲线见图 8, 从图 8 中可以看出, 两个桥墩的滞回环形状比较相似, 其破坏形式均属于弯曲破坏, 但 2# 桥墩与 1# 桥墩相比较, 滞回曲线包围更大的面积, 滞回环也更加饱满。在水平位移荷载较小时, 两者的滞回环较密集, 各级差别较小, 呈现出一定的线性关系; 提高水平位移荷载, 滞回环包围面积增大, 中间位置发生“捏缩”现象, 此时混凝土出现较大裂缝, 钢筋与混凝土之间出现滑移现象。



(a)1#墩柱 (b)2#墩柱  
图8 墩柱滞回曲线(单位:kN)

#### 3.2 骨架曲线

两个试件的骨架曲线见图 9。可以看出, 加载前期, 线形基本重合, 但 2# 桥墩曲线要高于 1# 桥墩, 且加载后期, 2# 桥墩曲线下降速度明显缓于 1# 桥墩, 说明 2# 桥墩有更高的极限承载力, 且极限承载力下

降速度更缓。

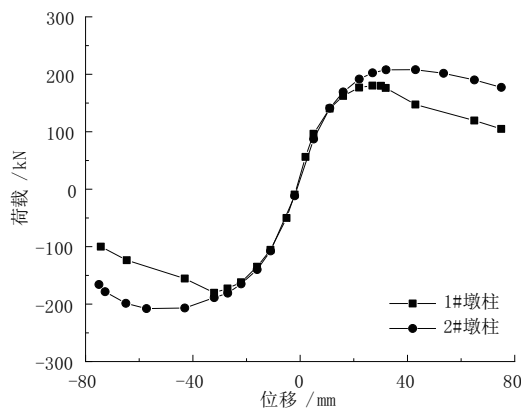


图9 骨架曲线(单位:kN)

由于桥墩骨架曲线无明显的屈服点, 因此文章按照能量法<sup>[7]</sup>分别计算正反两个方向的屈服荷载和屈服位移, 极限位移取峰值荷载下降至 85% 时的位移。两个桥墩的特征荷载及位移见表 1 所示。2# 桥墩与 1# 桥墩相比, 屈服荷载正、反向分别增大 0.77% 和 14.50, 峰值荷载正、反向分别增大 15.32% 和 15.26%, 极限位移正、反向分别增大 74.56% 和 74.4%。说明采用型钢连接的装配式桥墩承载能力要高于现浇桥墩。

#### 3.3 残余位移

两个桥墩的残余位移变化情况见图 10, 可以看出, 在位移荷载变化下, 二者的残余位移相当, 中间位置 1# 桥墩略小于 2# 桥墩, 位移等级为 40 mm 时, 1# 残余位移为 12.02 mm, 2# 残余位移为 27.49 mm, 最大差值

为 15.47 mm, 主要原因是型钢在变形后自复位能力较小。

#### 3.4 位移延性

结构位移延性表明了结构在荷载作用下变形能力的优劣, 两个桥墩的位移延性参数见表 1。2# 桥墩的延性较 1# 桥墩大 9.37%。说明型钢连接的装配式桥墩延性性能优于现浇桥墩。

#### 3.5 耗能能力

图 11 为两个桥墩在位移荷载向下的耗能性能曲线。随着位移增加, 耗能不断增大, 2# 桥墩耗能能力明显高于 1# 桥墩, 在 30 mm 荷载位移之后二者的差值逐步增大, 在 40 mm 位移荷载下两者差值达到最大, 最大差值为 12 074 kN·m。

#### 3.6 刚度退化

图 12 为两个桥墩在位移荷载作用下正、反向刚度的平均值, 可以发现, 两者刚度的变化规律一致, 随着位移荷载的增大, 刚度递减。2# 桥墩的刚度在



表 1 特征荷载和位移

试件编号	加载方向	屈服荷载 / kN	屈服位移 / mm	峰值荷载 / kN	峰值位移 / mm	极限荷载 / kN	极限位移 / mm	延性系数
1#	正向	96.51	5.02	180.37	26.97	147.34	42.97	8.54
	反向	-50.13	-5.05	-180.37	-32.05	-155.54	-43.01	
2#	正向	97.25	5.04	208.00	43.00	177.32	75.01	9.34
	反向	-57.40	-6.02	-207.88	-57.26	-165.96	-75.00	

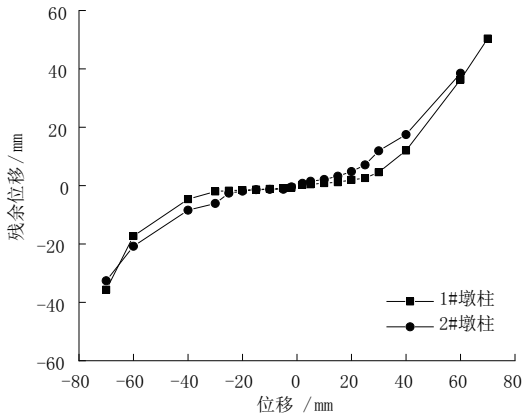


图 10 残余位移 (单位: mm)

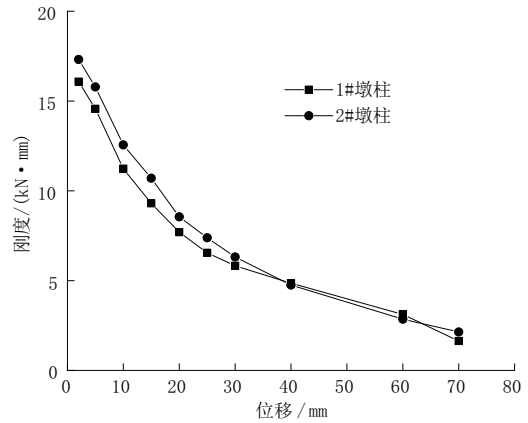


图 12 刚度退化曲线 (单位: kN/mm)

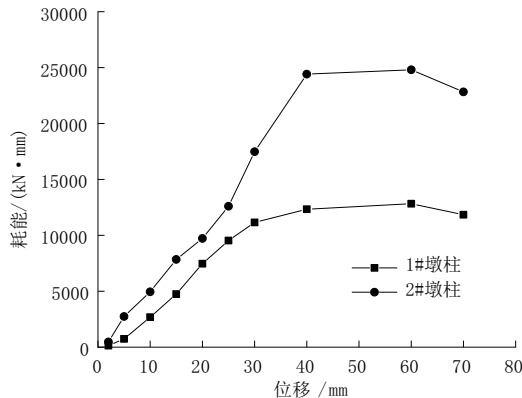


图 11 耗能性能 (单位: kN · mm)

40 mm 位移荷载之前大于 1# 桥墩, 之后曲线交叉, 刚度变化情况基本相近。说明型钢对桥墩整体刚度的贡献使得 2# 桥墩刚度增大。

### 4 结论

(1) 型钢连接的装配式桥墩与现浇桥墩破坏模式相同, 均为弯曲破坏。两者在破坏时均出现底部混凝土压溃, 不同之处在于, 现浇桥墩柱跟处出现大量混凝土破坏, 而型钢连接的装配式桥墩柱根处破坏程度较轻, 混凝土破坏主要集中在预埋钢管顶部以上, 预埋钢管增加了柱跟刚度, 使得型钢连接的装配式

桥墩塑性铰位置上移。

(2) 型钢连接的装配式桥墩峰值荷载较现浇桥提高了 15%, 表明型钢连接的装配式桥墩承载能力高于现浇桥墩。

(3) 型钢连接的装配式桥墩与现浇桥墩的残余位移相当, 但在耗能能力及延性方面前者的表现更好。

(4) 型钢连接的装配式桥墩具有优越的抗震性能, 为装配式桥墩在高烈度地震区的使用提供一种方法。

#### 参考文献:

- [1] 项贻强, 竺盛, 赵阳. 快速施工桥梁的研究进展[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12):1-27.
- [2] 王志强, 张杨宾, 蒋仕持. 套筒连接的预制拼装桥墩抗剪性能试验[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2018, 46(6):767-775.
- [3] 王志强, 卫张震, 魏红一. 预制拼装联接件形式对桥墩抗震性能的影响[J]. 中国公路学报, 2017, 30(5):74-80.
- [4] 樊泽, 曾明辉, 胡志坚. 预制拼装桥墩连接构造抗震性能分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(2):357-362.
- [5] 包龙生, 张远宝, 桑中伟. 波纹管连接装配式桥墩抗震性能拟静力试验与数值模拟[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12):242-249.
- [6] 胡志坚, 闫明辉, 周知. 预制拼装桥墩地震易损性分析[J]. 土木工程学报, 2022, 55(1):89-99, 108.
- [7] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006.