

钢板混凝土复合加固铁路重力式桥墩抗震性能研究

郝岩, 丁明波, 鲁锦华, 秦训才, 刘德安

Experimental study on seismic performance of gravity bridge pier reinforced with steel plate and concrete composite

HAO Yan, DING Mingbo, LU Jinhua, QIN Xuncui, LIU Dean

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20211116001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于增量动力分析的混凝土重力坝抗震性能分析

A study of seismic performance of concrete gravity dam based on incremental dynamic analysis

水利水运工程学报. 2018(5): 48 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.007>

配筋率对混凝土 I - II 复合型断裂过程声发射特征的影响

Effect of reinforcement ratio on acoustic emission characteristics during I - II mixed-mode fracture process of concrete

水利水运工程学报. 2020(6): 55 <https://doi.org/10.12170/20191225002>

钢筋混凝土电渗除氯防腐性能研究

Investigation on chlorine removal and corrosion resistance of reinforced concrete

水利水运工程学报. 2021(4): 138 <https://doi.org/10.12170/20201014001>

考虑率效应的混凝土压剪强度及破坏准则试验研究

Experimental studies on compressive shear strength and failure criterion of concrete considering rate effect

水利水运工程学报. 2018(4): 46 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.007>

混凝土双轴弹模-徐变试件垫层效果试验分析

Test analysis of effects of cushion on concrete specimen's elastic modulus and creep under biaxial compression

水利水运工程学报. 2019(3): 103 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.013>

带裂缝混凝土轴拉力学性能及Kaiser效应试验研究

Experimental studies on mechanical properties and Kaiser effect of concrete with cracks under axial tensile stress

水利水运工程学报. 2019(3): 67 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.009>



扫码进入官网，阅读更多精彩内容

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20211116001

郝岩, 丁明波, 鲁锦华, 等. 钢板混凝土复合加固铁路重力式桥墩抗震性能研究 [J]. 水利水运工程学报, 2022(6): 62-68. (HAO Yan, DING Mingbo, LU Jinhua, et al. Experimental study on seismic performance of gravity bridge pier reinforced with steel plate and concrete composite[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(6): 62-68. (in Chinese))

钢板混凝土复合加固铁路重力式桥墩抗震性能研究

郝 岩, 丁明波, 鲁锦华, 秦训才, 刘德安

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为探究钢板混凝土复合加固震后铁路重力式桥墩的抗震性能, 制作配筋率为 0.5% 的桥墩缩尺模型进行拟静力试验。将模型墩底破坏区域采用钢板混凝土复合加固, 对加固后的桥墩模型通过周期往复荷载试验来研究桥墩破坏形态, 从滞回曲线、骨架曲线、耗能能力、刚度退化及位移延性等参数分析其抗震性能, 并建立有限元模型进行验证。试验结果表明: (1) 模型试件中钢板加固桥墩模型墩身部分作为过渡区, 避免了加固面受集中力影响导致的破坏面转移; (2) 采用钢板混凝土复合加固, 可有效提高模型试件的刚度、耗能和承载能力, 明显提升了桥墩的抗震能力。该加固方案可用于震后铁路重力式桥墩的修复。

关 键 词: 拟静力试验; 钢板; 混凝土; 复合加固; 桥墩

中图分类号: U24

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)06-0062-07

我国铁路交通运输工程中, 桥梁占比极高, 以青藏铁路格拉段为例, 全线中大型桥梁共 317 座, 总长 156.7 km, 占总线路的 13.7%^[1]。我国地处环太平洋地震带和欧亚地震带之间, 地震活动频率大且震级高, 地震对桥梁工程产生了不同程度的影响^[2-4], 对桥墩墩底部位影响最为明显。已有加固实例主要采用外包混凝土^[5-6]、粘贴钢板^[7-8]和粘贴碳纤维布^[9-10]等技术进行加固桥墩。这些传统加固技术存在很多不足, 如: 钢板加固过程中不易生根、外包混凝土加固会增大墩身自重导致基础负荷能力不足、粘贴碳纤维布加固后墩柱的抗剪性能差等。为解决这些问题, 国内外许多学者对传统加固技术进行了改进。卢亦焱等^[11-14]提出碳纤维布与钢板复合加固技术, 有效增强了墩柱的极限承载力和抗弯刚度, 减缓了挠度的发展, 提高了墩柱的延性和耗能能力, 使约束区混凝土有更大的极限应变; 随后又采用纤维增强复合材料与钢材复合加固混凝土结构, 不但延缓了裂缝扩展, 解决了 CFRP 锚固问题, 还提高了混凝土开裂荷载和极限荷载, 改善了 CFRP 单一加固脆性破坏的特点。林佳辉等^[15]采用钢板剪力钉和原有混凝土植筋对梁进行钢-混组合加固, 提高了结构承载力和延性, 利用灌浆和外包钢板套箍的作用有效减少内部混凝土的变形。董旭等^[16]提出了新型钢筋网格加固桥墩的方法, 加固后构件延性有很大提高, 但墩身植入的横向钢筋一定程度上减弱了纵向钢筋网格的受力, 从根本来说未能解决大震耗能问题。Han 等^[17]采用夹套加固法使加固后试件的极限荷载得到了提高, 但加固后的试件存在延性差的特点, 并且加固后试件的延性与夹套的材料有关。

从现有研究来看, 桥墩粘贴钢板加固过程中钢板不易生根的问题, 以及外包混凝土加固时破坏面转移的问题仍未得到有效解决。因此, 本文提出浇筑混凝土和粘贴钢板复合加固的方法, 对配筋率为 0.5% 的铁路重力式桥墩模型进行拟静力试验, 验证该加固方法的可行性。

收稿日期: 2021-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51768036)

作者简介: 郝 岩(1996—), 男, 甘肃敦煌人, 硕士研究生, 主要从事桥梁抗震研究。E-mail: 2286349499@qq.com

通信作者: 丁明波(E-mail: ding_mingbo@126.com)

1 试验概况

1.1 模型设计

铁路桥墩上部结构质量大, 地震惯性力大。为满足列车平稳运行和保证舒适度, 我国对铁路桥跨结构的纵横向刚度提出了较高要求。因此, 在设计中要充分控制桥墩的刚度^[18], 往往仅配护面钢筋, 这使得铁路桥墩属于低配筋结构。在地震作用下, 此类桥墩表现出延性差、易发生脆断破坏的特点。试验以 7 度地震区铁路重力式桥墩为工程背景, 原型桥主梁跨度为 16 m, 墩高为 10 m。根据结构静力相似理论计算了本试验的相似参数, 其中弹性模量和应力的模型比尺为 1 : 1, 长度和位移的模型比尺为 1 : 8, 面积、质量、轴力的模型比尺为 1 : 64。根据相似关系得出试验模型桥墩的高度为 125 cm, 且将圆端型桥墩截面等效为矩形截面, 等效后的截面尺寸为 36 cm×25 cm(长×宽), 承台尺寸为 80 cm×70 cm×50 cm(长×宽×高)。制作 1 个配筋率为 0.5% 的矩形截面重力式桥墩模型为 D1 试件, 然后对其进行拟静力试验, 对桥墩模型墩底破坏区域进行钢板混凝土复合加固得到加固模型 D2 试件。试件主要参数见表 1。D1 试件纵向钢筋均采用 HRB335 钢筋, 箍筋采用 HPB300 钢筋, 混凝土采用 C30 混凝土。试件 D1 如图 1 所示。

表 1 桥墩试件主要参数

Tab. 1 Main parameters of pier specimens						
试件	桥墩高度/cm	轴压比/%	剪跨比	配筋率/%	加固钢板高度/cm	加固混凝土高度/cm
D1	125	4.0	5.0	0.5	—	—
D2	125	4.0	5.0	0.5	25	40

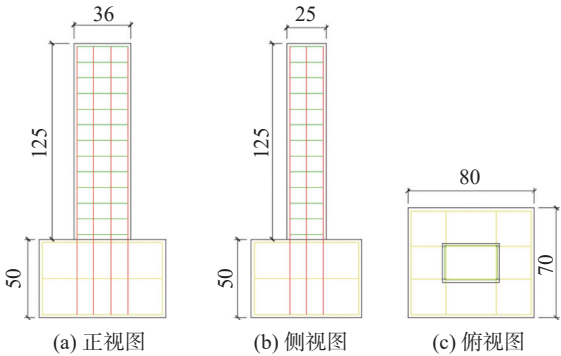


图 1 试件 D1(单位: cm)

Fig. 1 Specimen D1(unit: cm)

1.2 桥墩加固方案

本文提出钢板混凝土复合加固的方法, 用膨胀螺栓将 L 型钢板固定在墩身加固位置, 然后植筋并绑扎箍筋, 最后浇筑外包混凝土。该方案不仅解决钢板加固不易生根的问题, 而且利用 L 型钢板作为截面变化处的过渡部分, 可以确保加固后破坏面不发生转移, 提高桥墩的承载能力和耗能能力。加固方案植筋所需的纵筋采用直径为 10 mm 的 HRB335 钢筋, 箍筋采用直径 6 mm 的 HPB300 钢筋, 箍筋间距为 70 mm, 混凝土采用 C30 混凝土, L 型钢板采用 Q235 钢, 厚度为 3 mm。通过规范《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)及《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中相关公式试算, 拟取植筋深度为 150 mm, 复合加固高度为 650 mm。加固试件 D2 如图 2 所示, 立体图如图 3 所示。

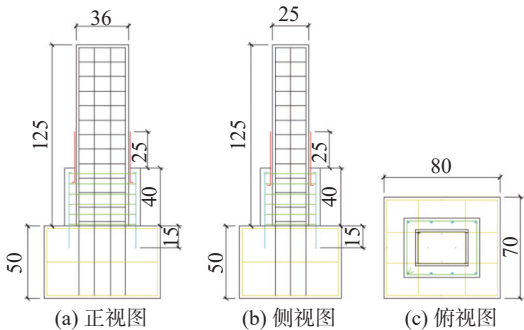


图 2 试件 D2(单位: cm)

Fig. 2 Specimen D2 (unit: cm)

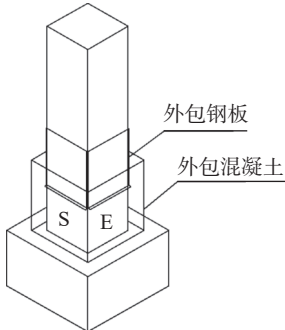


图 3 试件 D2 立体图

Fig. 3 Solid diagram of specimen D2

1.3 试验装置与加载

通过相似比计算得轴力为 51 kN。水平力采用电液伺服式加载系统进行加载,其最大加载力为 300 kN,最大位移为±200 mm,频率范围 0~12 Hz。墩身与千斤顶采用螺栓连接,承台通过 4 根直径为 32 mm 的精轧螺纹杆进行锚固,试验具体加载装置示意图 4。根据《建筑抗震试验规程》(JGJT 101—2015)有关规定,本试验采用位移控制的方法进行加载,试验第一级加载位移为 1 mm,位移在 15 mm 前以 2 mm 为增量逐级增大,15 mm 后以 5 mm 为增量逐级增大,直到荷载下降到负荷峰值的 85% 以下或纵筋拉断,停止加载。试验具体加载制度如图 5 所示。

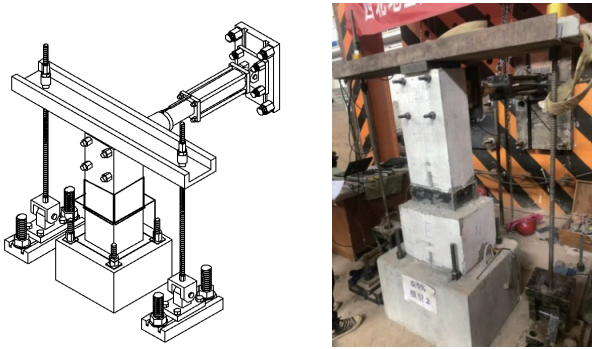


图 4 试验加载装置
Fig. 4 Testing setup

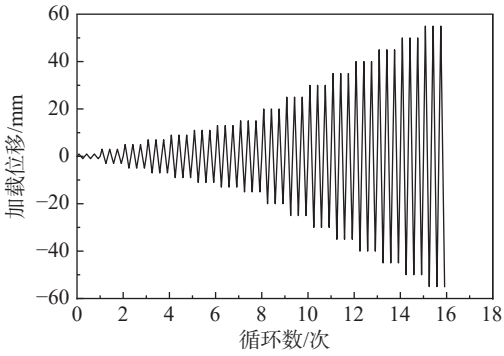


图 5 位移加载制度
Fig. 5 Displacement loading system

2 试验结果与分析

2.1 试件破坏现象

为方便试验现象描述,将墩身四面进行标记,试件加载面为 E,其余面顺时针依次为 S、W、N,如图 3 所示。模型桥墩的裂缝开展情况见图 6。

试件 D1 试验现象描述:当墩顶水平位移加载至 7 mm,水平荷载为 25.3 kN,试件 E 侧底部出现细微裂缝;加载至 15 mm 时,水平荷载为 33.5 kN,E 侧裂缝贯通并在 14.5 cm 高度处出现第 2 条裂缝;加载至 30 mm 时,水平荷载为 39.2 kN,W 侧、S 侧在 16 cm 高度处出现第 3 条裂缝;加载至 40 mm 时,墩身 51 cm 高度处出现第 4 条裂缝并贯通,混凝土压碎现象明显;加载至 50 mm,水平荷载为 37.8 kN,W 侧钢筋拉断,试件破坏。

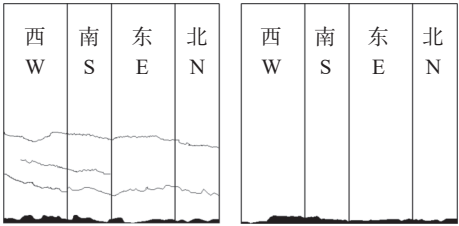


图 6 裂缝分布示意
Fig. 6 Fracture distribution diagram

试件 D2 试验现象描述:墩顶水平位移加载至 9 mm 时,水平荷载为 38.9 kN,墩底 W 侧出现细微裂缝;加载至 13 mm 时,水平荷载为 52.6 kN,E 侧底部出现细微裂缝;加载至 20 mm 时,水平荷载为 62.7 kN,W 侧底部裂缝贯通;加载至 25 mm 时,加固区出现承台植筋与钢板的摩擦声;加载至 35 mm 时,水平荷载为 70.2 kN,墩底裂缝贯通;加载至 55 mm 时,水平荷载为 58.6 kN,W 侧和 E 侧墩身底部出现脱离现象,脱离高度 10 mm;加载至 60 mm 时水平荷载下降到峰值的 85% 以下。加固后试件的破坏只在底部发生,抗震效果良好。最终破坏状态如图 7 所示。

2.2 滞回曲线

图8为试件D1和D2墩顶水平位移的滞回曲线对比图。可见,试验加载初期,两试件处于弹性阶段,滞回环窄而狭长,且加载路径与卸载路径的滞回曲线基本一致;随着水平位移持续增大,滞回环逐渐饱满,两试件耗能、极限承载力、变形均增大;当水平位移继续增大,试件底部出现严重鼓曲进而失效。

图8还表明:钢板混凝土复合加固试件D2的滞回曲线比未加固试件D1略扁,相同位移下加固后试件D2的墩顶水平力较试件D1显著提高,这表明加固试件D2极限承载力有较大提高;相同位移下加固试件D2的滞回曲线面积均大于未加固试件D1,这表明加固试件D2表现出更好的耗能能力。由此可知,钢板混凝土复合加固对试件承载力和耗能提升明显。

2.3 骨架曲线

图9为试件D1和D2的墩顶水平位移的骨架曲线比较。可见:在加载初期随着墩顶水平位移的增大,两试件骨架曲线均成线性形态,且斜率较大,试件处于弹性阶段;随着水平位移的持续增大,曲线斜率逐渐变小,刚度明显退化,试件进入弹塑性变形阶段;加载后期,水平位移继续增大,试件逐渐进入屈服阶段,随后负荷达到峰值点,试件承载力逐步衰减,试件最终破坏。钢板混凝土复合加固的试件D2峰值荷载较未加固试件D1提高75.37%。

2.4 刚度退化

为了验证不同位移对模型刚度的影响,参考《建筑抗震试验方法规程》使用割线刚度 K 作为不同侧位移时的刚度,具体计算见式(1):

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \quad (1)$$

式中: P_i 表示第 i 次加载峰值荷载值; X_i 表示第 i 次加载峰值荷载所对应的位移值。

图10给出了钢板混凝土复合加固对试件刚度退化的影响。可见,复合加固后试件的初始刚度提高了35.3%;加载过程中,两试件的刚度退化均呈现相似的形态;当位移加载至35 mm时,两试件刚度退化均变得缓慢。对比两试件的刚度曲线,整个加载过程中试件D2的刚度均高于试件D1,这表明钢板混凝土复合加固可以有效提高试件刚度。

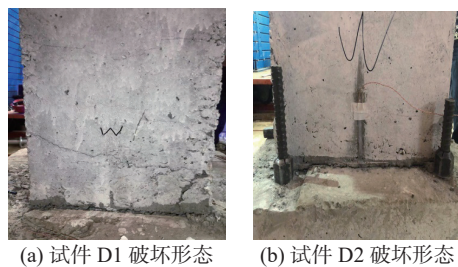


图7 桥墩破坏形态

Fig. 7 Pier failure mode

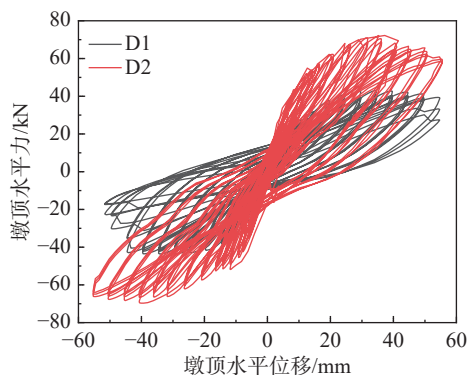


图8 试件D1和试件D2滞回曲线对比
Fig. 8 Comparison of hysteresis curves of specimens D1 and D2

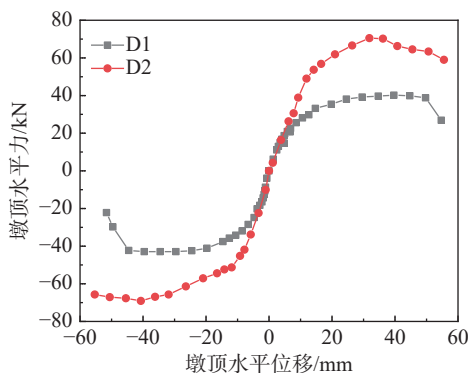


图9 试件D1和试件D2骨架曲线对比
Fig. 9 Comparison of skeleton curves of specimens D1 and D2

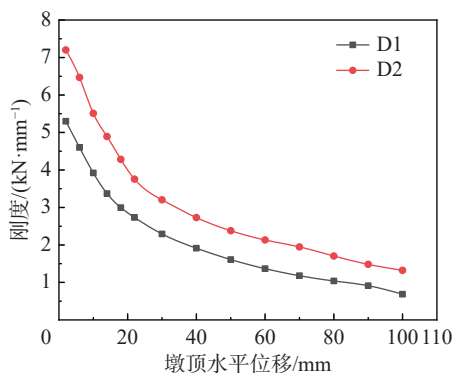


图10 刚度退化曲线

Fig. 10 Stiffness degradation curves

2.5 耗 能

试件耗能能力一般采用累积耗能进行评价。
图 11 显示了钢板混凝土复合加固对试件累积耗能的影响。总体上看,试件的累积耗能随着水平位移的增大而增大。在加载初期,试件的累积耗能曲线斜率缓慢增大,试件累计耗能较小;在加载后期,试件的累积耗能曲线斜率迅速增大,这是由于前期试件处于线弹性工作状态,试件的塑性消耗很小,随着加载位移的增加试件逐渐屈服。整个加载过程中试件 D2 的累积耗能均在试件 D1 之上,并在墩顶最大位移处,加固试件 D2 的累积耗能提高了 26.25%。

2.6 延 性

延性性能是桥梁抗震的重要指标之一,通常用曲率延性系数来衡量。屈服位移作为延性抗震设计的基本参数,对结构设计参数定义与量值的变化有重要影响。本文采用 Park 法^[19] 计算屈服位移, Park 法基于力-位移曲线确定屈服点。在骨架曲线上找出 75% 最大水平力所对应的位置,与坐标原点连接并反向延长,得到与最大水平力的交点,垂直向下作直线,与骨架曲线相交的一点为结构的等效屈服点,骨架曲线中负荷载峰值点的 85% 所对应的位移量为结构的极限位移。

经计算,得出 D1 和 D2 桥墩对应的屈服位移分别为 14.85 和 17.38 mm,极限位移分别为 47.36 和 56.52 mm,容许位移延性系数分别为 3.19 和 3.25。可见,加固试件 D2 的容许位移延性系数相较于未加固试件 D1 变化不大,这表明钢板混凝土复合加固对桥墩延性影响较小。

3 数值计算模型研究

本文采用 ABAQUS 软件对加固试件 D2 进行数值模拟,从而得到仿真试验数据,通过试验数据与模拟数据进行比较,进一步对钢板混凝土复合加固桥墩模型的抗震性能进行研究。有限元模型与拟静力试验模型相关参数及尺寸一致,混凝土及钢板采用三维实体单元(C3D8R),钢筋采用行架单元(T3D2),混凝土采用塑性损伤模型,弹性模量为 23 026 MPa,泊松比为 0.2。建立有限元模型,通过试验与数值模拟对比,研究模型试件的滞回性能,提高分析精度。

图 12 为桥墩模型试验与数值模拟的骨架曲线对比。可见,试验结果与数值模拟的结果基本吻合。

4 结 语

针对震后承载能力不足的铁路重力式桥墩,提出了钢板混凝土复合加固方法。通过拟静力试验,对比分析了加固前后铁路重力式桥墩的破坏特征、抗震性能。试验结果表明:破坏后的桥墩利用钢板混凝土复合加固,其强度、承载力、耗能和刚度均得到明显提高,且承载力较原始桥墩提高了 75.37%,达到加固的预期目标;加固后只在桥墩墩底出现破坏,试验达到了初期设想结果。通过建立有限元模型进行数值模拟,数

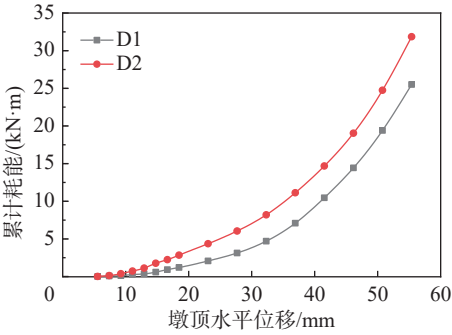


图 11 累积耗能曲线

Fig. 11 Cumulative energy dissipation curves

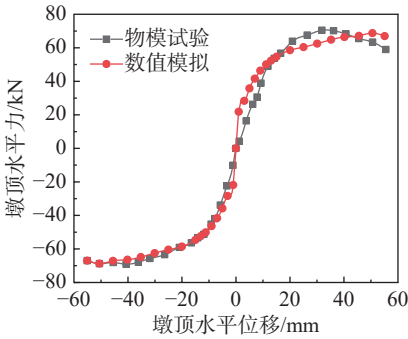


图 12 试验结果与数值模拟骨架曲线对比

Fig. 12 Comparison between experimental results and skeleton curves of numerical simulation

值模拟的骨架曲线与试验结果基本吻合,表明该震后加固方案可行。

本文加固方案解决了粘贴钢板加固桥墩中不易生根的问题,避免了加固面受集中力影响而导致的破坏面转移,为以后桥墩的复合加固研究提供了思路。

参 考 文 献:

- [1] 陈立军. 青藏高原的地震构造与地震活动[J]. 地震研究, 2013, 36(1): 123-131, 142. (CHEN Lijun. Seismotectonic and seismic activity of Qinghai-Tibet plateau[J]. Journal of Seismological Research, 2013, 36(1): 123-131, 142. (in Chinese))
- [2] 童磊, 王东升, 王荣霞. 汶川地震庙子坪特大桥主桥箱梁开裂震害分析[J]. 世界地震工程, 2020, 36(3): 161-171. (TONG Lei, WANG Dongsheng, WANG Rongxia. Seismic damage analysis of box girder cracking of the Miaoziping bridge in Wenchuan earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(3): 161-171. (in Chinese))
- [3] 陈凯, 杨立峰, 察玉亮. 玉树地震桥梁震害维修及加固措施[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2012, 30(3): 85-89. (CHEN Kai, YANG Lifeng, CHA Yuliang. Yushu earthquake caused bridge damage and reinforcement measures[J]. Journal of Qinghai University (Nature Science Edition), 2012, 30(3): 85-89. (in Chinese))
- [4] 王龙, 李小军, 杨理臣, 等. 青海玛多7.4级地震发震断裂特性及工程震害成因分析研究[J/OL]. 应用基础与工程科学学报. (2021-06-04)[2021-06-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3242.tb.20210615.1759.002.html>. (WANG Long, LI Xiaojun, YANG Lichen, et al. Study on the characteristics of seismogenic faults and the causes of engineering earthquake damage of Maduo M7.4 earthquake in Qinghai[J/OL]. Journal of Basic Science and Engineering. (2021-06-04)[2021-06-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3242.tb.20210615.1759.002.html>. (in Chinese))
- [5] 黄建锋, 朱春明, 龚治国, 等. 增大截面法加固震损钢筋混凝土框架的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12): 9-17. (HUANG Jianfeng, ZHU Chunming, GONG Zhiguo, et al. Experimental study on seismic behavior of earthquake-damaged RC frame strengthened by enlarging cross-section[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(12): 9-17. (in Chinese))
- [6] 范增昱. 铁路重力式桥墩外包混凝土抗震加固试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012. (FAN Zengyu. Experimental study on seismic reinforcement for gravity type bridge piers of railway[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [7] ALAM A, ONIK S A, NASHARUDDIN K. Crack based bond strength model of externally bonded steel plate and CFRP laminate to predict debonding failure of shear strengthened RC beams[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 27: 100943.
- [8] 唐皇, 彭建新, 王晗. 不同钢板加固方式对锈蚀钢筋混凝土梁承载性能的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(6): 103-111. (TANG Huang, PENG Jianxin, WANG Han. Influences of different steel plate strengthening methods on the bearing capacity of corroded reinforced concrete beams[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(6): 103-111. (in Chinese))
- [9] AL-ROUSAN R, AL-SARAIH S. Impact of anchored holes technique on behavior of reinforced concrete beams strengthened with different CFRP sheet lengths and widths[J]. Case Studies in Construction Materials, 2020, 13: e00405.
- [10] HUANG J, SHI J, XIAO H, et al. Stressing state analysis of reinforcement concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced plastic[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2020, 14(1): 38.
- [11] 卢亦焱, 陈少雄, 赵国藩. 外包钢与碳纤维布复合加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(8): 10-17. (LU Yiyang, CHEN Shaoxiong, ZHAO Guofan. An experimental study on the seismic behavior of reinforced concrete column strengthened with bonded steel hoops and carbon fiber reinforced polymer sheet[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(8): 10-17. (in Chinese))
- [12] 卢亦焱, 胡玲, 梁鸿骏, 等. CFRP布与钢板复合加固的钢筋混凝土梁受弯疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(11): 64-71. (LU Yiyang, HU Ling, LIANG Hongjun, et al. Experimental research on flexural fatigue behavior of RC beams strengthened with combination of CFRP and steel plates[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(11): 64-71. (in Chinese))
- [13] LU Y, HU L, LI S, et al. Experimental study and analysis on fatigue stiffness of RC beams strengthened with CFRP and steel plate[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(3): 701-707.

- [14] 卢亦焱. 纤维增强复合材料与钢材复合加固混凝土结构研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(10): 138-146. (LU Yiyan. Research advances in hybrid strengthening of concrete structures with FRP and steel[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(10): 138-146. (in Chinese))
- [15] 林佳辉, 张爱军, 朱旦, 等. 钢-混组合加固梁承载能力试验研究[J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*. (2021-01-23) [2021-06-03]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210602.1303.006.html>. (LIN Jiahui, ZHANG Aijun, ZHU Dan, et al. Experimental study on the load-bearing capacity of steel-concrete composite strengthening beam[J/OL]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. (2021-01-23) [2021-06-03]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210602.1303.006.html>. (in Chinese))
- [16] 董旭, 丁明波, 刘正楠, 等. 新型钢筋网格加固铁路重力式桥墩拟静力试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(4): 908-914. (DONG Xu, DING Mingbo, LIU Zhengnan, et al. Quasi-static test study on railway gravity pier strengthened with steel mesh[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(4): 908-914. (in Chinese))
- [17] HAN K B, SONG P Y, YANG H S, et al. Improvement of the seismic retrofit performance of damaged reinforcement concrete piers using a fiber steel composite plate[C]//Safety and security engineering V: Fifth international conference on safety and security engineering (SAFE 2013), 2013: 853-862.
- [18] 蒋丽忠, 邵光强, 姜静静, 等. 高速铁路圆端形实体桥墩抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(3): 86-95. (JIANG Lizhong, SHAO Guangqiang, JIANG Jingjing, et al. Experimental study on seismic performance of solid piers with round ended cross-section in high-speed railway[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(3): 86-95. (in Chinese))
- [19] PARK R. Valuation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing[J]. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 1989, 22(3): 155-166.

Experimental study on seismic performance of gravity bridge pier reinforced with steel plate and concrete composite

HAO Yan, DING Mingbo, LU Jinhua, QIN Xunca, LIU Dean

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to investigate the seismic performance of railway gravity pier reinforced by steel plate and concrete composite after earthquake, a scale model of pier with reinforcement ratio of 0.5% was made for quasi-static test. The damaged area at the bottom of the model pier was reinforced with steel plate concrete composite. The failure mode of the reinforced pier model was studied by periodic reciprocating load test. The seismic performance was analyzed from hysteresis curve, skeleton curve, energy dissipation capacity, stiffness degradation and displacement ductility, and the finite element model was established for verification. The test results show that: (1) The pier body of the steel plate reinforced pier model is used as the transition zone to avoid the failure surface transfer caused by the concentrated force; (2) The steel plate concrete composite reinforcement can effectively improve the stiffness, energy consumption and bearing capacity of the model specimens, and significantly improve the seismic capacity of the bridge pier. The reinforcement scheme can be used for the restoration of gravity bridge pier after earthquake.

Key words: quasi-static test; steel plate; concrete; composite reinforcement; bridge pier