

刘德安,丁明波,鲁锦华,等. 2022. 无粘结 RC 加固铁路重力式桥墩抗震性能试验[J]. 地震研究, 45(3):399–404, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2022.0038.

Liu D A, Ding M B, Lu J H, et al. 2022. Experimental study on the seismic behaviour of gravity railway bridge pier strengthened with unbonded RC[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(3):399–404, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2022.0038.

无粘结 RC 加固铁路重力式桥墩抗震性能试验*

刘德安, 丁明波^{*}, 鲁锦华, 秦训才, 郝 岩

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为研究无粘结 RC 加固受损铁路重力式桥墩的抗震性能, 制作 1 个配筋率为 0.2% 的桥墩缩尺模型进行拟静力试验, 破坏后采用无粘结 RC 进行加固。对加固前后的模型进行低周往复荷载试验, 对比分析桥墩加固前后的滞回曲线、骨架曲线、刚度退化及墩顶残余位移等抗震性能指标。结果表明: 采用无粘结 RC 进行墩底局部加固可有效地提高桥墩的耗能能力, 从而避免破坏面转移至未加固区; 采用无粘结 RC 加固, 墩顶残余位移较小, 桥墩模型的强度、承载能力、刚度和位移延性系数均得到了一定程度提高, 无粘结 RC 加固使得损伤的铁路重力式桥墩抗震性能明显提高, 该加固方案对震后桥墩的修复比较有利。

关键词: 拟静力试验; 铁路重力式桥墩; 抗震性能; 震后加固; 无粘结 RC

中图分类号: U448.13; P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000–0666(2022)03–0399–06

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2022.0038

0 引言

桥墩起着连接桥梁上部结构和下部基础的作用, 对桥梁整体结构的地震稳定性起着至关重要作用。早期修建的铁路桥梁广泛采用少筋混凝土重力式桥墩, 因配筋低、延性较差, 强震作用下桥墩破坏具有脆性特征, 严重时可发生倒塌, 容易引起落梁震害(陈兴冲等, 2016; 鲁锦华等, 2020; 鞠彦忠等, 2004)。

关于桥墩的抗震加固, 国内外学者展开了大量的研究。丁明波(2013)采用外包混凝土加固方法, 并通过对比加固前后的 2 个模型桥墩发现, 桥墩的破坏类型都属于脆性破坏, 加固后的模型水平承载能力大幅度提高, 较加固前约提高了 50%~100%, 但加固模型破坏面发生转移(范增昱, 2012)且桥墩的变形能力有所下降(Yang, Li, 2013)。张鹏翔和丁明波(2013)采用粘贴钢板法对震后桥墩进行维修加固, 发现采用粘贴钢

板法加固后的桥墩对截面刚度的影响较小, 但可显著提高桥墩的极限位移和极限承载力。以上的加固方法虽然解决了桥墩强度的问题, 但并不能很好地提高其延性。因此, 韩强等(2015)利用 OpenSees 软件建立 8 组 CFRP 加固的矩形空心桥墩模型, 研究了配布率、长细比、轴压比以及混凝土强度等变化对桥墩抗震性能的影响, 发现随 CFRP 配布率的增大, 加固模型的耗能和延性显著提高, 但对水平承载能力影响较小(李松辉等, 2005; Siddika et al, 2019; 万世成等, 2019; Watkins et al, 2015)。黄海新等(2020)利用 OpenSees 软件模拟 3 组不同方式加固的震后桥墩抗震性能, 发现体外预应力筋加固方式对抑制桥墩残余位移的效果最好。这些加固方法施工较复杂且成本较高, 很难全面推广及广泛应用。刘正楠(2020)和董旭等(2020)对钢筋网格加固既有桥墩进行拟静力试验, 结果表明加固后桥墩的强度、承载力和耗能能力显著提升。鲁锦华(2020)通过数值分析验证了墩底增设无粘结钢筋可有效提

* 收稿日期: 2022–01–11.

基金项目: 国家自然科学基金(51768036)资助.

第一作者简介: 刘德安(1993–), 硕士研究生在读, 主要从事桥梁抗震研究. E-mail: 1768329848@qq.com.

♣ 通讯作者简介: 丁明波(1975–), 副教授, 博士, 主要从事桥梁抗震研究. E-mail: ding_mingbo@126.com.

高速铁路重力式桥墩的延性性能。

与传统加固方法相比,由于无粘结钢筋混凝土(RC)无粘结段钢筋自由伸缩的特性提高了构件的延性,进而结构的抗震性能也相应得到提高。鉴于此,本文利用无粘结 RC 加固的方法,在外包混凝土中设置无粘结钢筋,对受损铁路重力式桥墩进行加固,通过拟静力试验来验证此加固方法的可行性,以期为今后该类桥墩抗震加固提供参考。

1 模型试验概况

1.1 拟静力试验模型设计

试验以Ⅶ度烈度区某铁路重力式桥墩为研究对象,原型桥墩主梁跨度为 32 m、墩高为 10 m。考虑模型与原型的相似关系,按 1:8 的缩尺比例进行设计,模型相似参数见表 1。根据相似关系得出试验模型的高度为 125 cm,将圆型桥墩截面等效为矩形截面,等效后的截面尺寸(长×宽)为 36 cm×25 cm,承台尺寸(长×宽×高)设计为 80 cm×70 cm×50 cm。模型桥墩纵向钢筋及箍筋均采用 HRB335 钢筋,纵筋配筋率为 0.2%,混凝土强度等级为 C30。通过以上参数设计制作了 1 个桥墩模型为 S1,模型尺寸及配筋如图 1 所示。对 S1 进行拟静力试验,对破坏后的桥墩进行无粘结 RC 加固得到模型 S2。2 个桥墩模型主要参数见表 2。

表 1 桥墩试验模型与原型的相似关系

Tab. 1 Similarity between the bridge pier model and the bridge pier prototype (model/prototype = 1/8)

物理量	试验模型/原模型	两个模型的相似系数
弹性模量、应变	1	1.000 0
长度	1/8	0.125 0
面积	1/64	0.015 63
质量	1/64	0.015 63
位移	1/8	0.125 0
应力	1	1.000 0
轴力	1/64	0.015 63

表 2 桥墩模型主要参数

Tab. 2 Main parameters of the bridge pier model

桥墩 模型	高度/ cm	轴压比 u (%)	剪跨 比	配筋率 ρ (%)	加固高度/ cm	无粘结钢筋 高度/cm	植筋深度/ cm
S1	125	4.0	5.0	0.2	—	—	—
S2	125	4.0	5.0	0.2	30	25	15

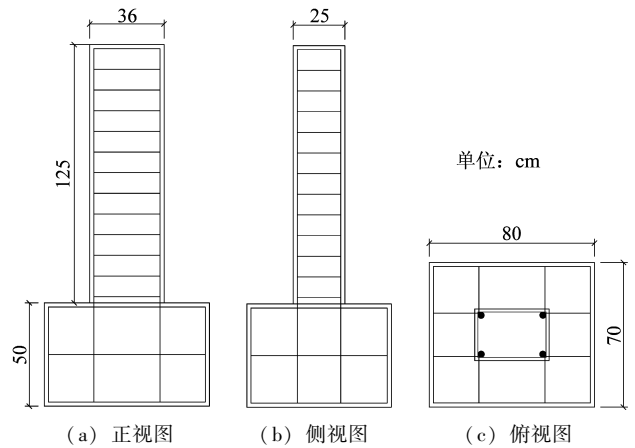


图 1 模型 S1 尺寸及配筋图

Fig. 1 Size and reinforcement of S1 model

1.2 模型加固方案

无粘结 RC 加固方法为:首先将破坏后的桥墩凿毛、钻孔和植筋,然后在所植筋外套一定长度的 PVC 管,PVC 管与纵筋之间保留一定的间隙,在 PVC 管两端包裹医疗纱布并涂上环氧树脂,防止水泥浆进入,使得这段长度内纵筋与混凝土之间没有粘结力,最后绑扎箍筋并拼装模板,浇注混凝土,完成模型加固。其中,植入承台的纵筋为 4 Φ 10、箍筋为 Φ 6@80,钢筋均采用 HRB335 钢筋,混凝土采用 C30 混凝土,PVC 管直径为 12 mm。通过《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)中相应公式进行试算,拟取植筋深度为 150 mm,混凝土加固高度为 300 mm、宽度为 40 mm。加固模型 S2 尺寸及配筋图如图 2 所示,实体图如图 3 所示。

本次试验的加载方案为:轴力采用压力传感器加载,将模型桥梁自重和二期荷载总和,按照桥墩的相似比缩小,施加在墩顶的竖向力为 53 kN,墩顶与千斤顶采用螺栓连接,承台通过螺纹钢与地面进行锚固。墩顶水平荷载采用电液伺服式系统进行加载,其允许最大荷载为 300 kN,最大位移为 ± 200 mm,频率范围 0~12 Hz,试验具体加载装置示意图如图 4 所示。依据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)试验选用位移控制的加载方式,试验开始加载位移为 1 mm,每次以 2 mm 为增量加载,加载至 15 mm 之后以 5 mm 为增量加载,每级加载循环 3 次。当水平荷载下降到峰值荷载的 85% 以下或纵筋拉断时,认为桥墩达到极限破坏状态,停止加载。

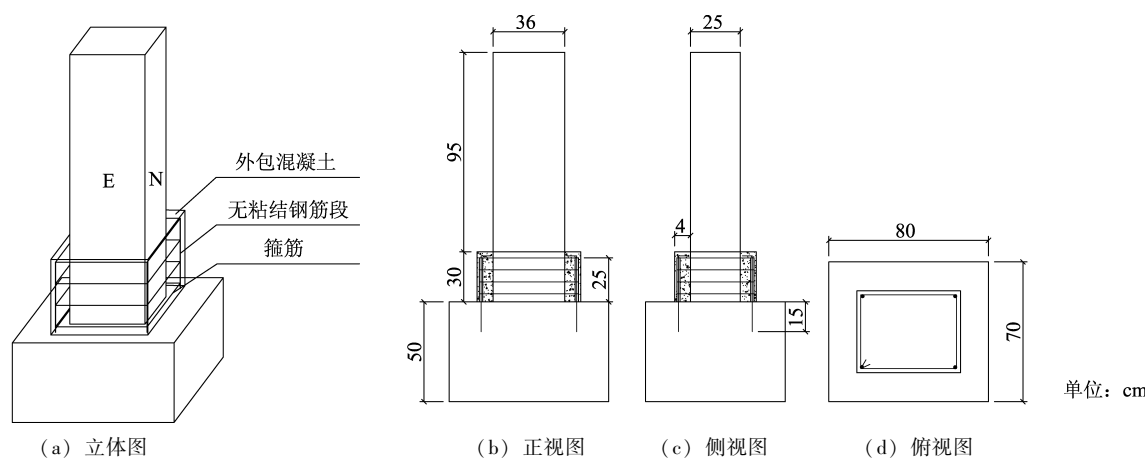


图 2 模型 S2 尺寸及配筋图
Fig. 2 Size and reinforcement of S2 model



图 3 模型 S2 实体图
Fig. 3 Solid diagram of S2 model

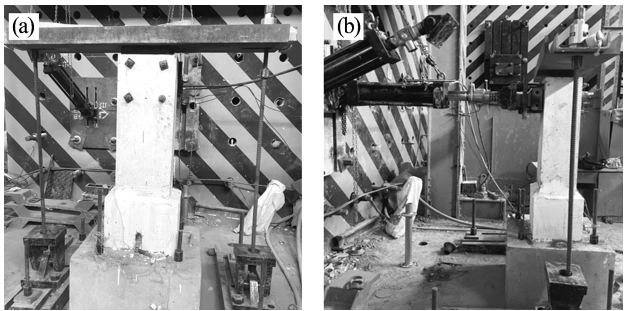


图 4 试验加载装置正视图 (a) 及侧视图 (b)
Fig. 4 Front view (a) and side view (b) of the experimental loading device

2 试验结果

2.1 模型破坏现象

为了便于描述试验现象，将桥墩 4 个面进

行了标记，水平作动器的加载面为 W 面，其余 3 个面以顺时针加载方向分别标记为 S、E、N 面，如图 2a 所示。桥墩模型的裂缝分布情况及混凝土保护层剥落现象如图 5 所示，图中阴影部分表示混凝土剥落区域。桥墩实际破坏状态如图 6 所示。

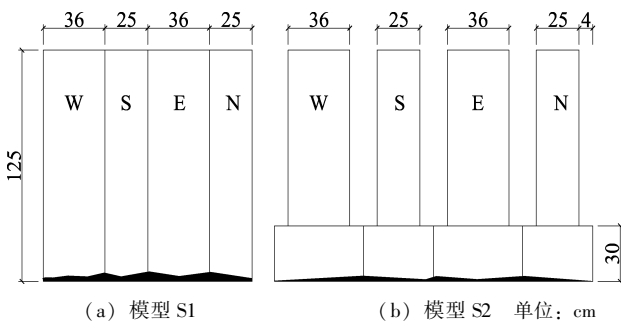


图 5 裂缝分布情况及混凝土剥落现象示意图
Fig. 5 Schematic diagram of crack distribution and concrete spalling



(a) 模型 S1 破坏状态 (b) 模型 S2 破坏状态

图 6 桥墩实际破坏状态
Fig. 6 Failure of bridge piers

(1) 模型 S1 破坏现象

当水平位移加载到 5 mm 时, 水平荷载为 17.85 kN, 模型 E 侧墩底出现裂缝; 当水平位移加载到 20 mm 时, 水平荷载为 23.92 kN, 模型墩底裂缝贯通; 当水平位移加载到 30 mm 时, 水平荷载为 26.18 kN, W 侧墩底混凝土剥落; 当水平位移加载到 35 mm 时, 水平荷载为 27.78 kN, 墩底混凝土严重剥落; 当水平位移加载到 45 mm 时, 模型纵筋断裂, 停止加载。

(2) 模型 S2 破坏现象

当水平位移加载到 7 mm 时, 水平荷载为 24.67 kN, 模型 E 侧墩底出现裂缝; 当水平位移加载到 15 mm 时, 水平荷载为 30.15 kN, 模型 W 侧墩底混凝土剥落; 当水平位移加载到

40 mm 时, 水平荷载为 30.24 kN, 模型纵筋断裂, 停止加载。

由图 6 可以看出, 模型 S1 未形成明显塑性铰, 仅在墩底形成一条贯通的裂缝。模型 S2 的底部形成一条通长裂缝, 加固后的桥墩破坏面仍出现在墩底。一般认为, 破坏面上移通常是由加固区域强度与非加固区域强度差较大导致的, 而无粘结 RC 加固并没有导致破坏面发生转移。

2.2 滞回曲线

根据试验得到的墩顶水平荷载与位移, 得到 2 个模型的滞回曲线, 如图 7a 所示。从图中可以看出, 2 个模型的滞回曲线均有“捏缩”现象。模型 S1 的滞回曲线较模型 S2 更饱满, 但模型 S2 的极限承载能力大于模型 S1。

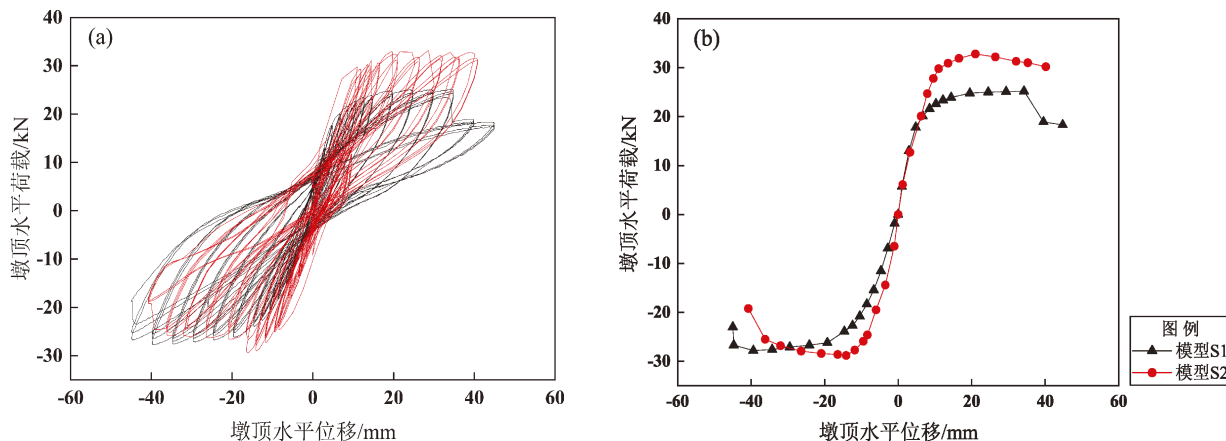


图 7 桥墩模型 S1 和模型 S2 的滞回曲线 (a) 及骨架曲线 (b)

Fig. 7 Hysteretic curves (a) and skeleton curves (b) of S1 model and S2 model

2.3 骨架曲线

根据滞回曲线绘制 2 个模型的骨架曲线, 从图 7b 可以发现, 在正向模型 S2 的最大承载力高于模型 S1, 而在反向模型 S2 的最大承载力与模型 S1 承载力相差不大。这是因为模型 S2 桥墩有一侧纵筋已经断裂, 在加固的基础上, 断裂一侧承载力低于另一侧。总体来看, 加固后的桥墩承载能力已经达到原始桥墩的承载力, 且正向模型 S2 的最大承载力较模型 S1 提高了 30.2%, 说明无粘结 RC 加固在一定程度上提高桥墩的承载能力。

3 桥墩抗震性能

3.1 刚度退化

桥墩的刚度是指在外荷载作用下抵抗变形的

能力。为了反映出模型在不同加载位移下刚度的变化, 参考《建筑抗震试验方法规程》(JGJT 101—2015) 使用割线刚度 K 作为不同侧位移时的刚度, 可表示为:

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

式中: $\pm P_i$ 为第 i 次加载等级下的正、反最大荷载值; $\pm X_i$ 为最大水平荷载所对应的位移值。

由 2 个模型的刚度退化曲线 (图 8a) 可知, 模型 S2 与模型 S1 的刚度退化趋势基本一致, 只是初始刚度略小于模型 S1, 说明无粘结 RC 加固震后桥墩基本能够达到原始桥墩的刚度。

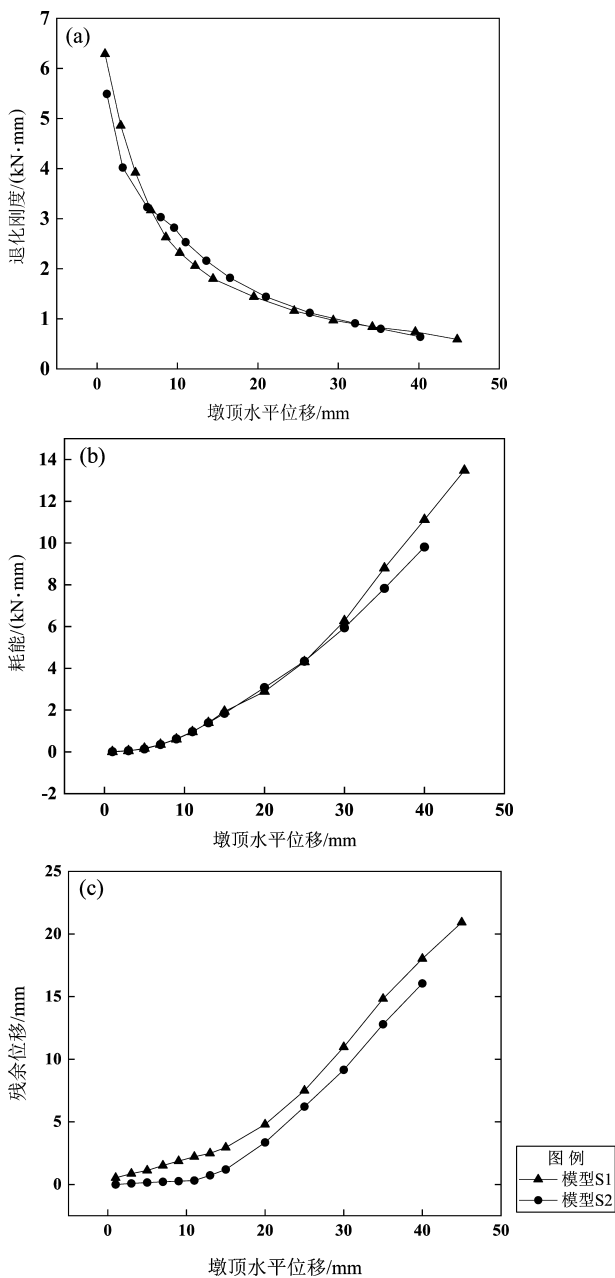


图 8 2 个桥墩模型刚度退化 (a)、累积耗能 (b) 及残余位移 (c)

Fig. 8 Stiffness degradation (a), cumulative energy dissipation (b) and residual displacement (c) of S1 model and S2 model

3.2 延性系数

本文通过 Park (1989) 所提出的方法计算得到 2 个模型的位移延性系数, 结果见表 3。模型 S2 的位移延性系数较模型 S1 提高 28.7%, 说明无粘结 RC 加固可以有效提高震后铁路重力式桥墩延性性能。

表 3 2 个模型的位移延性系数

Tab. 3 Displacement ductility coefficients of S1 and S2 model

模型	加载方向	屈服位移/mm	峰值荷载/kN	极限位移/mm	位移延性系数	平均位移延性系数
S1	正	9.96	25.12	36.36	3.65	3.56
	负	12.95	27.78	44.95	3.47	
S2	正	8.23	32.81	40.18	4.88	4.58
	负	9.32	28.87	39.76	4.27	

3.3 累积耗能

图 8b 为 2 个模型从开始加载到最终破坏时的累积耗能曲线。从图中可以看出, 从开始加载至墩顶水平位移加载到 30 mm 时, 模型 S1 和 S2 的累积耗能大小基本重合; 随着加载位移的不断增大, 模型 S1 累积耗能略大于模型 S2。总体来说, 采用无粘结 RC 加固能够将破坏桥墩的累积耗能达到原始桥墩的 90.9%。

3.4 墩顶残余位移

2 个模型的残余位移与墩顶水平位移的关系 (图 8c) 显示, 水平加载位移小于 15 mm 时, 2 个桥墩模型残余位移较小。随着加载位移不断增大, 桥墩模型残余位移呈现明显增长趋势。

4 结论

本文采用拟静力试验方法, 主要通过对比分析骨架曲线、刚度、延性、耗能以及残余位移等关键参数研究了震后无粘结 RC 加固铁路重力式桥的墩抗震性能, 得到以下结论:

- (1) 由模型破坏形态可知, 无粘结 RC 加固后桥墩模型破坏只在墩底出现, 试验达到了初期设想结果。
- (2) 通过对比原始桥墩模型和无粘结 RC 加固桥墩模型滞回曲线、骨架曲线和位移延性系数, 模型经过破坏后加固, 其强度、承载能力、刚度和位移延性系数均得到了一定程度提高, 且位移延性系数较原始桥墩提高 28.7%, 达到了加固的预期目标。
- (3) 本文提出的加固方案改善了外包混凝土加固方法提升桥墩延性性能差的问题; 无粘结 RC 进行墩底局部加固可使桥墩的耗能能力得以提升, 避免破坏面转移至未加固区, 从而达到在大震下耗能的目的。

参考文献:

- 陈兴冲,张永亮,丁明波,等. 2016. 少筋混凝土重力式桥墩抗震设计方法研究[J]. 铁道工程学报,33(3):76-80.
- 丁明波. 2013. 铁路重力式桥墩抗震加固方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学.
- 董旭,丁明波,刘正楠,等. 2020. 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,17(4):908-914.
- 范增昱. 2012. 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.
- 韩强,温佳年,杜修力,等. 2015. CFRP 布加固 RC 空心桥墩的抗震性能[J]. 土木工程学报,48(1):90-100.
- 黄海新,张望欣,程寿山,等. 2020. 钢筋混凝土圆截面桥墩抗震加固方式对比分析[J]. 世界地震工程,36(2):163-171.
- 鞠彦忠,阎贵平,李永哲. 2004. 低配筋铁路桥墩抗震性能的试验研究[J]. 铁道学报,26(5):91-95.
- 李松辉,赵国藩,王松根. 2005. CFRP 加固钢筋混凝土整体式板桥的受力性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,37(2):207-211.
- 刘正楠. 2020. 既有铁路重力式桥墩预防性抗震加固方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学.
- 鲁锦华,陈兴冲,丁明波,等. 2020. 少筋混凝土重力式桥墩抗震研究现状[J]. 世界地震工程,36(1):125-136.
- 鲁锦华. 2020. 铁路重力式桥墩抗震性能及抗震设计方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学.
- 万世成,黄侨,关健. 2019. 预应力 CFRP 板加固钢-混凝土组合梁受弯性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,51(3):80-87.
- 张鹏翔,丁明波. 2013. 粘钢加固重力式桥墩的抗震性能试验研究[J]. 兰州交通大学学报,32(1):15-19.
- Park R. 1989. Valuation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing[J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering,22(3):155-166.
- Siddika A, Mamun M, Alyousef R, et al. 2019. Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review[J]. Journal of Building Engineering,25(9):100798.
- Watkins S E, Fonda J W, Nanni A. 2015. Assessment of an instrumented reinforced-concrete bridge with fiber-reinforced-polymer strengthening[J]. Optical Engineering,46(5):051010.
- Yang L, Li Z. 2013. Research on strengthening T-beam transverse connection in the highway bridge reinforcement design[C]//Second International Conference on Transportation Information and Safety, 482-488.
- GB 50367—2013, 混凝土结构加固设计规范[S].
- GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- JGJT 101—2015, 建筑抗震试验方法规程[S].

Experimental Study on the Seismic Behaviour of the Gravity Railway Bridge Pier Strengthened with Unbonded RC

LIU De'an, DING Mingbo, LU Jinhua, QIN Xuncaì, HAO Yan

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

Abstract

In order to study the seismic performance of the damaged gravity bridge pier of railways strengthened by unbonded RC, a scale model of the pier with reinforcement ratio of 0.2% is made, and a pseudo-static test on the pier is carried out. Low-cycle reciprocating load tests on the model are carried out before and after reinforcement, and the seismic performance indexes of the pier before and after reinforcement, such as hysteretic curve, skeleton curve, stiffness degradation and residual displacement of pier top, are compared and analyzed. The results show that: Local reinforcement of pier bottom with unbonded RC can effectively improve the energy dissipation capacity of the pier, thus keeping the failure surface from transferring to the unreinforced area. By unbonded RC reinforcement, the residual displacement of the pier top becomes small, and the strength, bearing capacity, stiffness and displacement ductility of the pier model are improved to a certain degree. The unbonded RC reinforcement can significantly improve the seismic performance of the gravity bridge pier of railways. This approach can serve as a reference for the repair of the earthquake-damaged piers.

Keywords: quasi-static test; gravity railway bridge pier; seismic performance; post-earthquake reinforcement; unbonded RC