

DOI:10.11918/202201076

CFRP-EMD 加固灌浆套筒连接装配式桥墩振动台试验

辛光涛^{1,3}, 王瑾², 许维炳¹, 杜修力¹, 陈彦江¹, 王少剑¹, 杨树强¹

(1. 北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124; 2. 华北电力大学 水利与水电工程学院, 北京 102206;
3. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京 100089)

摘要: 为研究受力筋灌浆套筒连接装配式混凝土桥墩的抗震加固方法, 以受力筋灌浆套筒连接装配式混凝土桥墩和灌浆套筒-预应力筋连接装配式混凝土桥墩为研究对象, 设计制作了两个 1/6 缩尺模型, 并依据二者的震害特点提出了一种采用碳纤维复合材料-外置金属耗能装置(简称 CFRP-EMD)的组合加固方法。选取近断层地震波作为输入, 开展了单、双向激励下模型桥墩的振动台试验, 从试验现象、基本动力特性、地震响应规律等方面分析了 CFRP-EMD 对两类装配式混凝土桥墩的加固效果。结果表明: 地震作用下两类试件的主要震损包括墩身开裂、墩底接缝开合、接缝混凝土剥落压碎等; 附加预应力筋连接可提高构件刚度和自复位能力, 降低墩身和接缝的损伤速率和损伤程度; 采用 CFRP-EMD 组合加固能够显著提高震损装配式构件的刚度、抗震变形能力和耗能能力; CFRP-EMD 加固后灌浆套筒-预应力筋连接装配式混凝土桥墩的塑性变形更加合理。提出的组合加固设计方法和实施原则可用于装配式混凝土桥墩抗震加固中。

关键词: 装配式桥墩; CFRP; 抗震加固; 振动台试验; 近断层地震动

中图分类号: U443.22

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)09-0063-09

Shaking table test on fabricated pier with grouting sleeve based on CFRP-EMD

XIN Guangtao^{1,3}, WANG Jin², XU Weibing¹, DU Xiuli¹, CHEN Yanjiang¹, WANG Shaojian¹, YANG Shuqiang¹

(1. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
3. China Highway Engineering Consultants Corporation, Beijing 100089, China)

Abstract: To study the seismic reinforcement method of prefabricated concrete pier with grouting sleeve (PCP-GS), this paper takes PCP-GS and PCP with grouting sleeve-prestressed tendon combined connection (PCP-GS-P) as research objects. Two 1/6 scale models of PCP-GS and PCP-GS-P were designed and manufactured. According to the damage characteristics of the two piers, a combined reinforcement method based on carbon fiber reinforced plastic (CFRP) and external metallic dissipater (CFRP-EMD) for the specimens was proposed. The near fault ground motions were selected as input. Shaking table tests for the model piers were carried out under unidirectional and bidirectional excitations. The reinforcement effects of CFRP-EMD on the two specimens were analyzed through test phenomena, basic dynamic characteristics, and seismic response laws. Results show that the main seismic damages of the two specimens were pier body cracking, opening and closing at the joint seam, and spalling or crushing of seam concrete. Compared with PCP-GS, the stiffness and self-reset ability of PCP-GS-P were improved, and the damage velocity and damage degree of the pier body and joint seam were reduced. The CFRP-EMD could effectively increase the stiffness, energy dissipation capacity, and anti-deformation capacity of the damaged fabricated specimens. The plastic deformation of PCP-GS-P strengthened with CFRP-EMD was more reasonable. The proposed design and implementation method can be used as reference for seismic reinforcement of prefabricated concrete piers.

Keywords: prefabricated concrete pier; CFRP; seismic reinforcement; shaking table test; near fault ground motion

装配式混凝土桥墩的抗震性能是制约全预制桥梁推广应用的关键^[1-3]。灌浆套筒连接具有制造工艺简单以及连接性能良好等优点^[4], 是装配式混凝土桥墩的重要连接方式。灌浆套筒连接装配式混凝土

桥墩的破坏模式与现浇桥墩不同, 现浇桥墩的抗震设计方法在该型装配式桥墩中的适用性有待研究^[5-6]。

桥梁抗震加固技术是震后快速修复的主要技术手段, 而采用 FRP 外包桥墩是现阶段较为常用的加

收稿日期: 2022-01-17; 录用日期: 2022-07-04; 网络首发日期: 2022-08-09

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20220809.0934.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(52108428, 51908015); 国家自然科学基金面上项目(52178446, 51978021)

作者简介: 辛光涛(1987—), 男, 博士研究生; 陈彦江(1963—), 男, 教授, 博士生导师; 杜修力(1962—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 王瑾, wangjin418@126.com

固方式^[7-9]。作为 FRP 的改进材料,CFRP 具有轻质、高强、耐腐蚀等优点^[10-13]。相关学者对采用 CFRP 加固的钢筋混凝土桥墩^[14]和装配式混凝土桥墩^[15]的抗震性能进行了研究。由于装配式混凝土桥墩破坏模式与现浇桥墩存在显著差异,单纯采用 CFRP 等材料对装配式混凝土桥墩进行加固效果较差,很难保证加固后试件的抗震变形能力;且目前对桥墩加固方法的研究大多是通过拟静力试验和有限元分析,对震后加固桥墩的振动台试验研究少之又少。

鉴于此,以受力筋灌浆套筒连接装配式混凝土桥墩和灌浆套筒-预应力筋连接装配式混凝土桥墩为研究对象,设计制作了两类桥墩的缩尺试验模型,并针对其震害特点提出了采用碳纤维复合材料-外置金属耗能装置(简称 CFRP-EMD)的组合加固方法,开展了 CFRP-EMD 加固前后试验桥墩的振动台试验,探讨了 CFRP-EMD 对两类受力筋灌浆套筒连接装配式混凝土桥墩抗震性能的影响。

1 试验概况

1.1 缩尺模型

原型桥为 4 × 30 m 的装配式混凝土连续梁桥,墩高 9.6 m,混凝土采用 C40,纵筋采用 HRB400,箍筋采用 HPB300。原型桥桥墩分别为受力筋灌浆套筒连接装配式混凝土桥墩(简称 SP16)和灌浆套筒-预应力筋连接装配式混凝土桥墩(简称 PSP16),二者的纵筋和箍筋配置均相同。为对比两类桥墩的震损规律及相应的加固效果,设计了二者的缩尺模型,其相似特性见表 1。模型桥墩相关材料参数、配筋率、轴压比等均与原型桥墩一致,其中 PSP16 沿激励方向纵筋内侧设置了两根预应力钢绞线(附加轴压比 0.06),模型桥墩钢筋信息见表 2。为考虑上部主梁传递的荷载并获得设计的桥墩等效质量密度,

在试件顶部设置了现浇混凝土配重块^[16],模型总重约 60 kN。缩尺桥墩配筋参数见图 1,图 1 墩底加粗实线表示灌浆套筒。试验测得混凝土立方体抗压强度为 43.2 MPa,试验所得钢筋、钢绞线主要力学性能指标见表 3。

表 1 相似特性

Tab. 1 Similarity coefficient

物理量	量纲	相似比
尺寸 L	[L]	1/6
线位移 δ	[L]	1/6
应力 σ	[FL ⁻²]	1
力 F	[F]	1/36
加速度幅值 a	[LT ⁻²]	1
时间 t	[T]	0.408
自振频率 ω	[T ⁻¹]	2.45
阻尼比 ζ		1
结构刚度 K	[FL ⁻¹]	1/6
质量 m	[FL ⁻¹ T ²]	1/36

表 2 模型桥墩钢筋配筋信息

Tab. 2 Reinforcement information of model piers

类型	混凝土	纵筋/mm	配筋率/%	箍筋/mm	配箍率/%	钢绞线/mm	张拉力/kN
SP16	C40	12Φ12	1.86	Φ6@60 (Φ6@45)	1.51 (2.01)		
PSP16	C40	12Φ12	1.86	Φ6@60 (Φ6@45)	1.51 (2.01)	2Φ ^{15.2}	东侧 69.54 西侧 70.24

注:括号内数字表示距墩顶和承台 0.45 m 范围内加密区箍筋设置情况。

表 3 钢筋主要力学性能

Tab. 3 Main mechanical properties of steel bar

材料	型号	(公称)钢筋直径/mm	(名义)屈服强度/MPa	极限强度/MPa
钢筋	HPB300	6.00	330.5	450.9
	HRB400	12.00	430.3	560.2
钢绞线	Φ ^{15.2}	15.24	$f_{0.2} = 1\ 843.0$	1\ 982.0

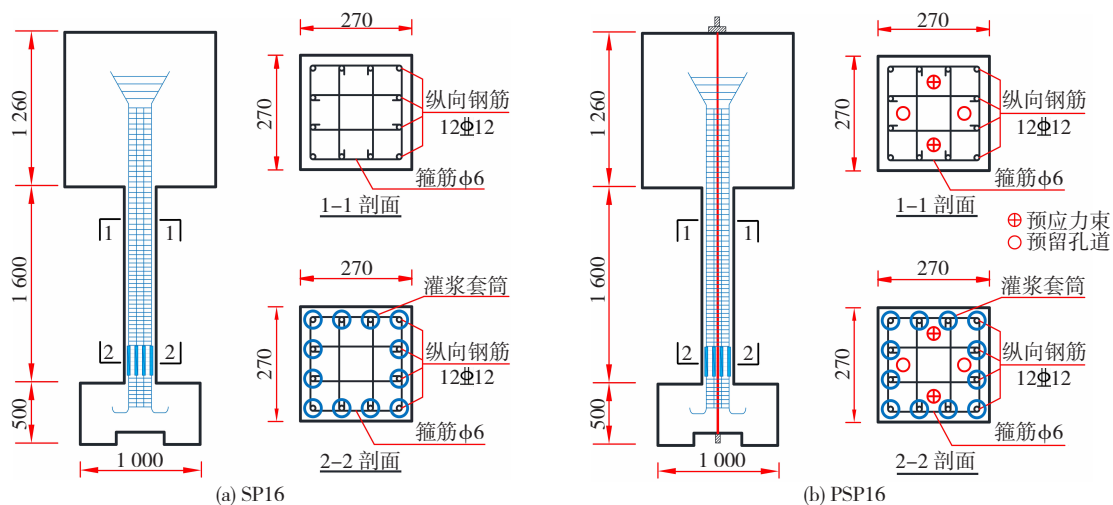


图 1 模型桥墩配筋设计 (mm)

Fig. 1 Reinforcement design of model piers (mm)

1.2 加固方法

1.2.1 CFRP 设计

鉴于桥墩-承台处采用灌浆套筒连接的装配式混凝土桥墩的震害主要有接缝处破坏和灌浆套筒上缘破坏^[16],单纯采用纤维复合材料加固装配式混凝土桥墩的墩身难以有效控制试件底部接缝处的损伤。因此,拟采用 CFRP-EMD 的组合加固措施分别对 SP16 和 PSP16 震损桥墩进行加固。墩身加固时不考虑 EMD 的影响,CFRP 包裹的装配式混凝土桥墩正截面承载力设计值可近似按式(1)~(5)计算^[17],CFRP 加固计算见图 2。

$$N \leq \alpha_1 f_{c0} b x + f'_{y0} A'_{s0} - f_{y0} A_{s0} - f_r A_f \quad (1)$$

$$Ne \leq \alpha_1 f_{c0} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{y0} A'_{s0} (h_0 - a') + f_r A_f (h - h_0) \quad (2)$$

$$e = e_i + \frac{h}{2} - a \quad (3)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (4)$$

$$A_f = 2n_f b_f t_f \quad (5)$$

式中: N 为加固后轴向压力设计值, kN; α_1 为受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值; f_{c0} 为原构件混凝土轴心抗压强度设计值, N/mm^2 ; x 为混凝土受压区高度, mm; b 、 h 分别为矩形截面宽度和高度, mm; f_{y0} 、 f'_{y0} 分别为原截面受拉钢筋和受压钢筋的抗拉、抗压强度设计值, N/mm^2 ; f_r 为纤维复合材料抗拉强度设计值, N/mm^2 ; A_{s0} 、 A'_{s0} 分别为原截面受拉、受压钢筋的截面面积, mm^2 ; A_f 为配置在同一截面处纤维复合材的全截面面积, mm^2 ; n_f 为纤维复合材层数; b_f 、 t_f 分别为纤维复合材宽度和单层厚度, mm; h_0 为构件加固前的截面有效高度, mm; e 为轴向压力作用点至纵向受拉钢筋 A_s 合力点的距离, mm; e_i 为初始偏心距, mm; e_0 为轴向压力对截面重心的偏心距, mm, 取为 M/N , 当需考虑二阶效应时, M 应按 GB 50367—2013《混凝土结构加固设计规范》^[17] 第 5.4.3 条确定; e_a 为附加偏心距, mm, 按偏心方向截面最大尺寸 h 确定: 当 $h \leq 600$ mm 时, $e_a = 20$ mm; 当 $h > 600$ mm 时, $e_a = h/30$; a 、 a' 分别为纵向受拉钢筋合力点、纵向受压钢筋合力点至截面近边的距离, mm。

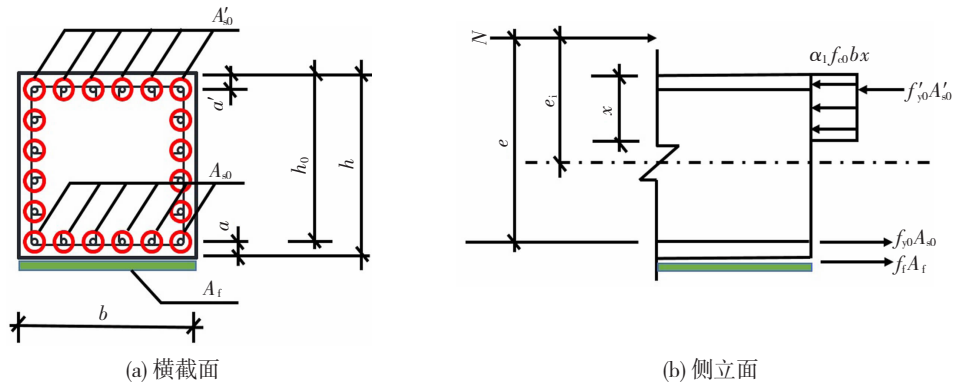


图 2 CFRP 加固计算

Fig. 2 Reinforcement calculation of CFRP

经计算确定 SP16、PSP16 的加固方案:在墩高区域内粘贴 1 层纵向 CFRP 进行墩身补强,从墩底到 2/3 墩高位置再环向包裹 3 层 CFRP,从 2/3 墩高到墩顶再环向包裹 1 层 CFRP,且墩柱 4 个角都做了 25 mm 的倒角,以减缓应力集中效应并增大有效约束面积。

1.2.2 EMD 设计

进行墩身 CFRP 加固后,在桥墩-承台灌浆套筒连接处附加 EMD。该装置由 Q235 级 U 型预紧钢板、耗能钢筋、连接支架 3 部分组成。U 型预紧钢板与连接支架焊接,并通过高强螺栓和树脂胶与墩身锚固;耗能钢筋一端与基础附加钢板焊接,另一端通过高强螺栓与连接支架连接,EMD 各组件的设计参数和实物见图 3。加固前试件的纵筋已屈服,考虑

加固后试件的耗能能力均由耗能钢筋提供,则可通过加固前后试件的耗能能力相等来设计耗能钢筋。此时 EMD 的面积可按式(6)计算,EMD 简化计算见图 4,加固用材料力学性能见表 4。

$$\sum_{i=1}^n f_{yi} [h - a_c - (i - 1) d_s] + \frac{f_i b h^2}{3} = (r + n_f t_f + h) A_{sy} f_{sy} \quad (6)$$

式中: f_{yi} 为第 i 号钢筋的屈服应力, MPa; h 为墩身截面高度, mm; b 为墩身截面宽度, mm; a_c 为混凝土保护层厚度, mm; d_s 为纵筋间距, mm; f_i 为接缝材料的抗拉强度, MPa; r 为耗能钢筋的半径, mm; A_{sy} 为耗能钢筋的截面面积, mm^2 ; f_{sy} 为耗能钢筋的屈服强度, MPa; 其他参数同前。由此选择 EMD 为 4 Φ 20 mm 钢筋,分别沿 4 个面中线布置。

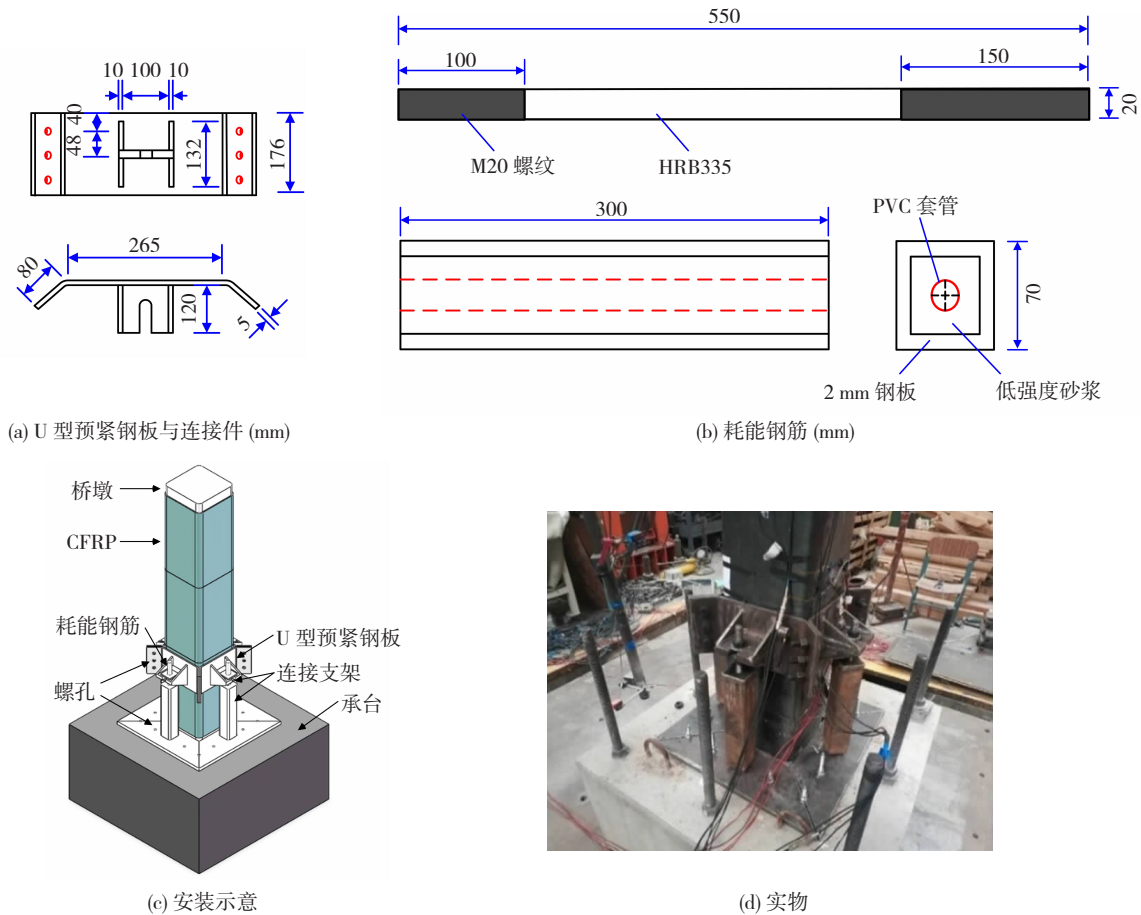


图 3 EMD 装置设计与制作

Fig. 3 Design and manufacture of EMD

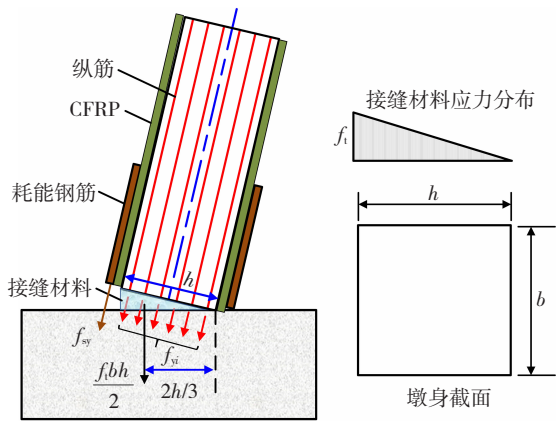


图 4 EMD 简化计算

Fig. 4 Simplified calculation of EMD

表 4 加固用材料力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of reinforcement materials

材料	屈服强度/ MPa	极限强度/ 10 ³ MPa	弹性模量/ 10 ⁵ MPa	断裂 应变/%	厚度/mm
HRB335	347.9		2.06		
Q235	259.3		2.10		5.00
CFRP		2.70	2.35	1.71	0.17

1.3 地震动

原型桥所处场地类别为 II 类,抗震设防烈度为

8 度。白噪声扫频得出的模型桥墩前 3 阶模态信息见表 5(X 向和 Y 向一致)。鉴于近断层地震动对模型桥墩的抗震性能影响更为显著,依据 JTG/T 2231 - 01—2020《公路桥梁抗震设计规范》^[18] 中确定的设计反应谱,选定的地震动信息见表 6,规范反应谱与地震波反应谱对比见图 5。由图 5 可知,桥墩前 3 阶振动频率处二者谱值差均在 ±20% 之内,满足规范要求。

表 5 模型桥墩前 3 阶模态

Tab. 5 First three modes of model piers

振型序号	SP16		PSP16	
	频率/Hz	方向	频率/Hz	方向
1	3.028	一阶平动弯曲	3.258	一阶平动弯曲
2	27.117	二阶平动弯曲	29.018	二阶平动弯曲
3	203.618	三阶平动弯曲	216.779	三阶平动弯曲

表 6 地震波详细参数

Tab. 6 Detailed parameters of seismic waves

地震波	台站	剪切波速	原始波峰值	均方差	比例 系数
		$V_{30}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	加速度/g		
RSN30	Cholame Shandon	256.82	0.243	0.061 6	1.893
RSN31	Cholame Shandon	289.56	0.248	0.174 3	1.714
RSN95	Managua ESSO	288.77	0.241	0.178 5	1.369

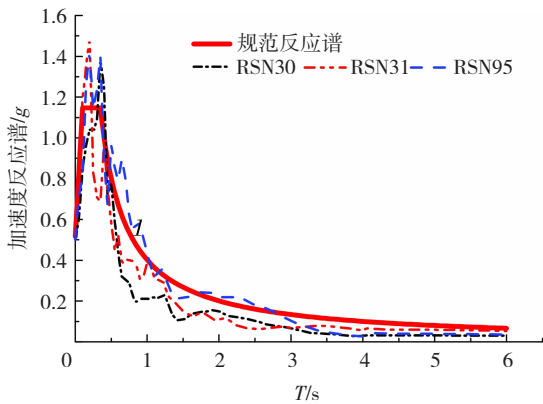


图 5 规范反应谱与地震波反应谱对比

Fig. 5 Comparison between seismic response spectrum and code response spectrum

1.4 工况设置

基于选定的地震动,分别沿单向(X 向)以及双向($X+Y$ 向)激励,其中双向输入时 X 、 Y 向的地面峰值加速度 A_{pg} 之比为 $1:0.85$ 。依据相似系数(表1),当 $A_{pg} = 0.3g$ 时,相当于抗震设防烈度8度时E1地震作用;当 $A_{pg} = 0.5g$ 时,相当于抗震设防烈度8度时E2地震作用。试验工况见表7,为便于对比,加固前后桥墩的试验工况相同。

表 7 试验工况

Tab. 7 Test conditions

工况	地震波	激励方向	A_{pg}/g	工况	地震波	激励方向	A_{pg}/g
1	白噪声	双向	0.1	9	RSN30,31,95	双向	0.5
2	RSN30,31,95	单向	0.1	10	白噪声	双向	0.1
3	RSN30,31,95	双向	0.1	11	RSN30,31,95	单向	0.8
4	白噪声	双向	0.1	12	RSN30,31,95	双向	0.8
5	RSN30,31,95	单向	0.3	13	白噪声	双向	0.1
6	RSN30,31,95	双向	0.3	14	RSN30,31,95	单向	1.0
7	白噪声	双向	0.1	15	RSN30,31,95	双向	1.0
8	RSN30,31,95	单向	0.5	16	白噪声	双向	0.1

1.5 测点布置

两个试件的测点布置见图6,加速度测点和位移测点均沿墩身相邻面4等分墩高布置;考虑到塑性铰区灌浆套筒的引入会造成桥墩塑性铰上移或下移,因此将钢筋应变测点布置在套筒底部和顶部纵筋处以监测墩底塑性发展情况;套筒基本保持弹性,

表 8 加固前试件损伤状况

Tab. 8 Damage state of specimens before strengthening

A_{pg}/g	SP16	PSP16
0.1	出现细微裂缝,裂缝宽度 <0.01 mm	套筒区出现1条发丝裂缝
0.3	新增12条裂缝,套筒顶部出现贯穿裂缝,墩底接缝宽0.15 mm	新增10条细微裂缝,主要集中在套筒顶部,墩底接缝开裂,墩底和套筒上缘裂缝宽0.10 mm
0.5	接缝垫层开始剥落,接缝宽1 mm	墩底角部压碎剥落,套筒顶部出现贯穿裂缝,裂缝宽0.12 mm
0.8	套筒顶部混凝土轻微剥落,最大裂缝宽0.20 mm	套筒顶部裂缝发展严重,裂缝宽0.15 mm,墩底接缝开裂,宽度0.20 mm
1.0	墩底4角混凝土有压溃破损,套筒顶部裂缝最大宽度0.30 mm,接缝宽1.50 mm	墩底混凝土压溃剥落

因此将套筒应变测点布置在套筒中部外表面;混凝土应变测点布置在套筒中部混凝土区域和套筒顶部混凝土区域。为对加固后试件的CFRP和EMD的动力响应进行测试,分别在距离墩底0.1 m和0.6 m的CFRP上,以及EMD上设置了应变传感器。

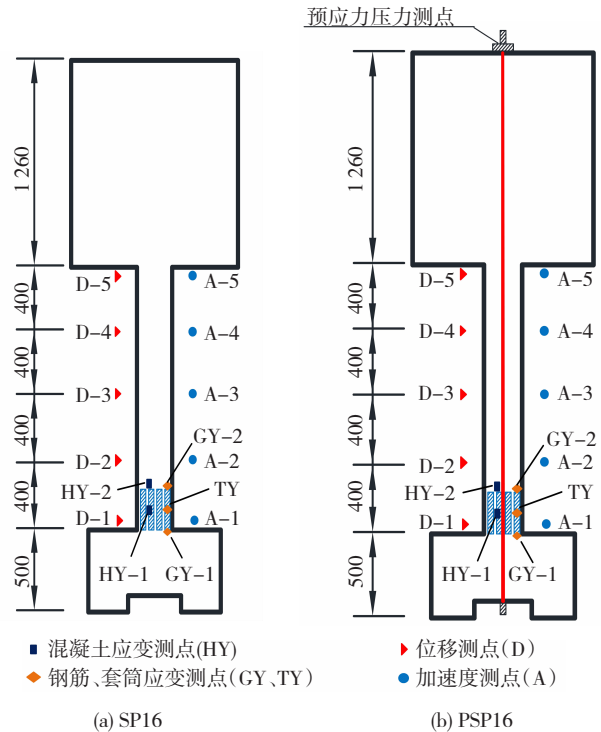


图 6 测点布置 (mm)

Fig. 6 Layout of measurement points (mm)

2 加固前后结果对比

2.1 损伤破坏模式

2.1.1 加固前

不同激励强度下加固前桥墩损伤状况见表8。加固前模型桥墩的最终损伤状态见图7。由表8和图7可知,随 A_{pg} 增加,两类桥墩墩身均出现了开裂以及墩底混凝土的破损,墩底接缝处均出现开合,接缝处、灌浆套筒上缘是受力筋灌浆套筒连接装配式混凝土桥墩的主要震损区域,且PSP16的抗震性能优于SP16,附加预应力钢筋能够降低墩身及装配式节点的损伤程度。

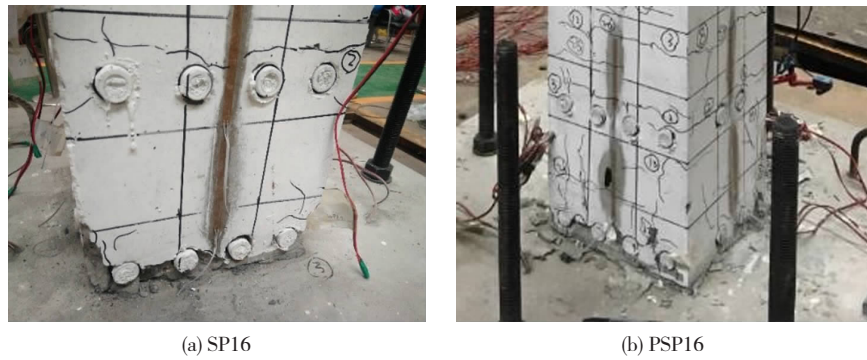


图 7 加固前桥墩试件最终震后状态

Fig. 7 Final damage phenomena of piers before strengthening after earthquake

2.1.2 加固后

对于加固后的 SP16, 当 $0.1 g < A_{pg} \leq 0.3 g$ 时, 墩身状态良好, 无明显震损现象; 当 $A_{pg} = 0.5 g$ 时, 墩身与 EMD 之间的树脂胶失效; 当 $A_{pg} = 0.8 g$ 时, 墩身底部有部分混凝土脱落, 但墩身未发生明显损伤; 当 $A_{pg} = 1.0 g$ 时, CFRP 未见明显损伤, 墩身与 EMD 发生锚固失效, 见图 8(a)。加固后的 PSP16 在整个试验过程中, 均未见明显损伤, CFRP 和 EMD 均保持良好的工作状态, 见图 8(b)。

低。结合试验现象分析, 加固前模型桥墩在 $A_{pg} < 0.3 g$ 时墩身损伤发展较快, 墩身裂缝开展较多。当 $A_{pg} > 0.3 g$ 后套筒顶部裂缝贯通, 桥墩震损主要为接缝开合, 墩身损伤减少。整个试验过程中两类试件的基频 (f) 关系为 $f(\text{PSP16}) > f(\text{SP16})$; 震前, PSP16 的初始基频 (3.258 Hz) 是 SP16 初始基频 (3.028 Hz) 的 1.08 倍; 当 $A_{pg} = 1.0 g$ 时, PSP16 和 SP16 的基频分别下降了 56.2% 和 63.8%。由此可知, PSP16 的自振频率下降速率明显小于 SP16, 预应力筋的存在能够提高构件刚度, 减缓其损伤速率。



(a) SP16



(b) PSP16

图 8 加固试件最终震后状态

Fig. 8 Final damage phenomena of strengthened specimens after earthquake

2.2 基本动力特性

加固前后两类桥墩的自振频率变化曲线见图 9。由图 9 可知, 两类试件的自振频率变化趋势相似。加固前, 当 $A_{pg} < 0.3 g$ 时两类桥墩的自振频率下降速率较快, 当 $A_{pg} > 0.3 g$ 时自振频率下降速率降

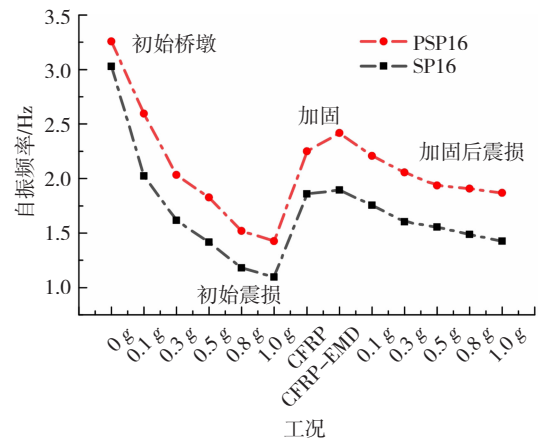


图 9 模型桥墩自振频率

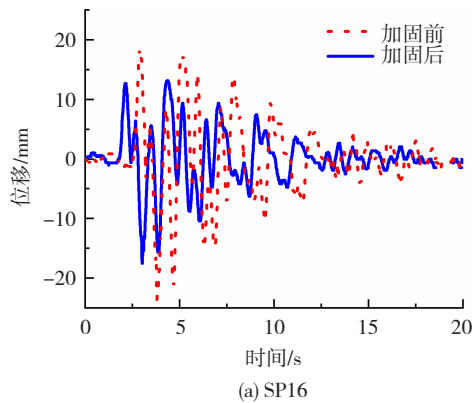
Fig. 9 Natural vibration frequency of model piers

震损桥墩经加固后刚度得到提高, 但桥墩损伤并未完全修复。单独采用 CFRP 加固后, SP16 的基频由损伤后的 1.095 Hz 提高至 1.859 Hz (+69.8%); PSP16 的基频由损伤后的 1.425 Hz 提高至 2.249 Hz (+57.8%)。安装 EMD 装置后, SP16 的基频进一步提升了 2.1% (相较于加固前提高了 71.9%); PSP16 的基频进一步提升了 7.4% (相较于加固前提高了 65.2%)。加固后, 试验结束时 SP16 和 PSP16 的基频分别下降了 24.9% 和 22.7%, 基频降低速率明显低于原桥墩, 表明加固后试件的抗震变形能力有一定程度的提高, CFRP-EMD 可用于装配式混凝土桥墩的抗震加固中。

2.3 墩顶位移

RSN30波单向激励下($A_{pg} = 1.0 g$),加固前后SP16和PSP16的墩顶位移时程曲线见图10。加固前后SP16和PSP16的墩顶位移峰值对比见表9。由图10可知,典型激励条件下加固后桥墩墩顶位移均有所降低。由表9可知,两类桥墩墩顶位移都随 A_{pg} 增加而增加;且相同 A_{pg} 条件下,双向激励的位移响应均大于单向激励。

加固前,1.0 g双向激励下,SP16和PSP16的墩



顶位移峰值最大值分别为27.8 mm和23.8 mm,PSP16的墩顶位移峰值最大值相比SP16降低了14.4%,附加预应力筋可提高桥墩的自复位能力,降低试件的位移响应。加固后,随 A_{pg} 增大,两类试件的墩顶位移峰值均呈增大趋势。1.0 g双向激励下,SP16和PSP16的最大墩顶位移峰值分别为17.5 mm和13.4 mm。加固后两类试件的墩顶位移峰值均比加固前明显减小,表明CFRP-EMD可有效控制墩顶位移。

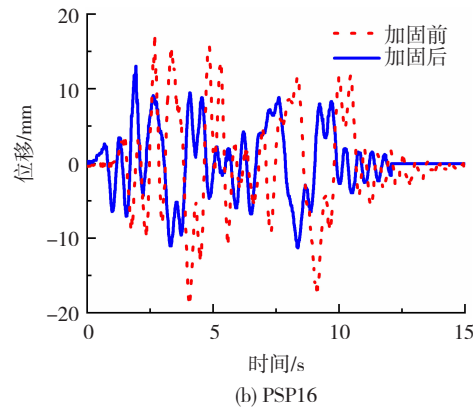


图10 RSN30波单向激励下加固前后墩顶位移时程($A_{pg} = 1.0 g$)

Fig. 10 Pier top displacement time history before and after reinforcement under RSN30 unidirectional excitation ($A_{pg} = 1.0 g$)

表9 墩顶位移峰值

Tab. 9 Peak value of pier top displacement

激励方向	A_{pg}/g	墩顶位移峰值/mm			
		SP16		PSP16	
		加固前	加固后	加固前	加固后
单向	0.1	3.6	2.8	2.8	2.1
	0.3	5.2	6.1	4.0	4.7
	0.5	8.3	9.7	6.4	7.5
	0.8	14.1	12.7	13.4	9.8
	1.0	23.6	17.5	20.1	13.4
双向	0.1	4.3	3.3	3.3	2.9
	0.3	6.1	7.2	4.7	6.1
	0.5	9.8	11.4	7.5	8.9
	0.8	16.6	15.0	16.7	12.7
	1.0	27.8	20.5	23.8	17.6

2.4 应变

2.4.1 加固前钢筋应变

加固前两类试件的墩底纵筋峰值应变随 A_{pg} 的变化曲线见图11。由图11可知,随 A_{pg} 增加,两类试件的纵筋应变增加,且相同 A_{pg} 条件下SP16的纵筋峰值应变大于PSP16,双向激励作用下墩底纵筋应变大于单向激励的纵筋应变。原因是桥墩双向弯曲时墩底纵筋的纵向拉力大于单向弯曲的墩底纵筋拉力。 $A_{pg} = 1.0 g$ 时,SP16最大纵筋峰值应变为 1.4957×10^{-3} (双向激励),PSP16最大峰值应变为 0.9612×10^{-3} (双向激励,比SP16的纵筋峰值应变小35.7%)。可见预应力筋可降低受力筋灌浆套筒连接装配式混凝土桥墩纵筋在地震作用下的应力水平。

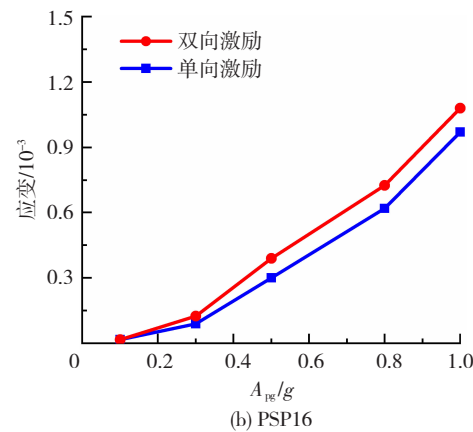
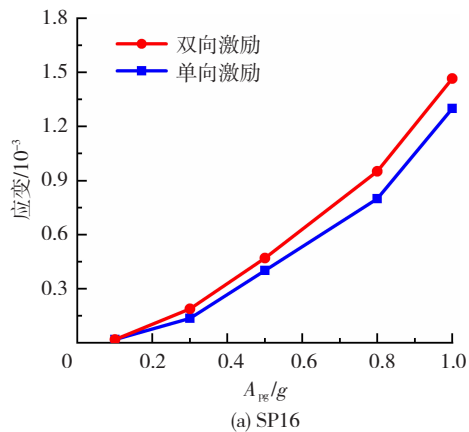


图11 纵筋峰值应变

Fig. 11 Peak strain of longitudinal reinforcement

2.4.2 加固后 EMD 应变

加固后两类试件 EMD 峰值应变随 A_{pg} 的变化曲线见图 12。由图 12 可知,对于 SP16,当 $A_{pg} < 0.8 g$ 时,EMD 应变基本呈线性增长;0.8 g 双向激励下,EMD 应变达到最大值 $1.952 3 \times 10^{-3}$,耗能钢筋进

入弹塑性阶段;而当 $A_{pg} = 1.0 g$ 时,EMD 与墩身出现锚固失效,EMD 的峰值应变下降。PSP16 在单、双向激励下,EMD 应变基本随 A_{pg} 增大线性增大;当 $A_{pg} = 1.0 g$ 时,耗能钢筋的应变达到最大值 $1.070 2 \times 10^{-3}$ (双向激励),仍处于弹性阶段。

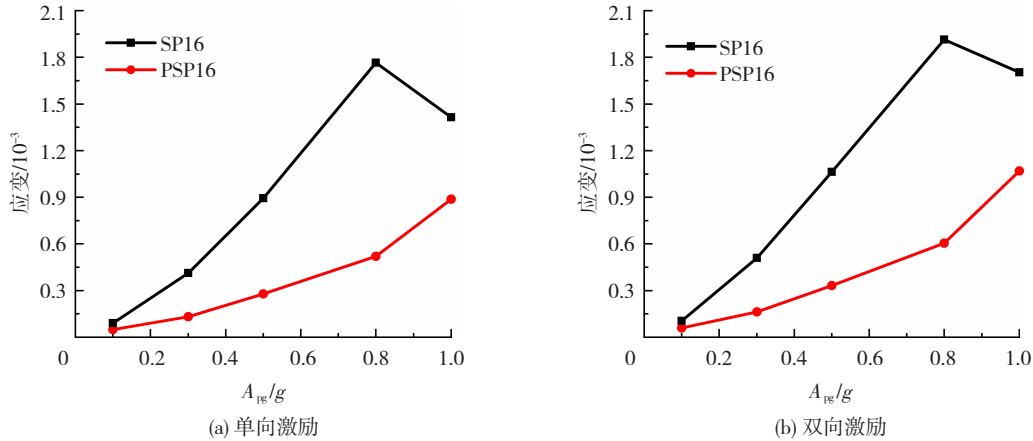


图 12 EMD 峰值应变

Fig. 12 Peak strain of EMD

2.4.3 加固后 CFRP 应变

两类试件不同高度处 CFRP 环向应变随 A_{pg} 的变化曲线见图 13。由图 13 可知,对于 SP16,1.0 g 双向激励下,CFRP 的环向应变峰值为 $2.812 0 \times 10^{-3}$,远小于 CFRP 的极限抗拉应变 $11.489 4 \times 10^{-3}$,CFRP 仍处于弹性阶段。当 $A_{pg} \leq 0.5 g$ 时,CFRP 环向应变均较小且增长平缓,对混凝土提供的约束作用不大。这是因为试件墩底接缝处的残余变形较大,EMD 装置先参与试件的振动,而 CFRP 主要用于墩身加固,墩底接缝的残余变形并不会显著引起上部墩身受力的变化;当 $0.5 g < A_{pg} \leq 0.8 g$ 时,CFRP 环向应变激增,此时 CFRP-EMD 开始协

同工作;当 $A_{pg} = 0.8 g$ 时,EMD 发生屈服为试件提供一定的附加阻尼效果,墩身 CFRP 环向应力的增大趋势减缓;与 SP16 不同,由于 PSP16 的初始损伤程度较低,CFRP-EMD 所在的墩底与试件墩身的协同工作效果更优,CFRP 的环向应变并未出现激增的情况,CFRP-EMD 一直能够提供有效的加固效果。

此外,两个试件墩底附近外包 CFRP 的环向应变响应均大于墩身中部应变响应,墩底位置的纤维复合材料加固设计需要加强。且 PSP16 底部和中部 CFRP 环向应变的差值比 SP16 小,说明预应力筋和 EMD 的共同作用下桥墩变形更加合理。

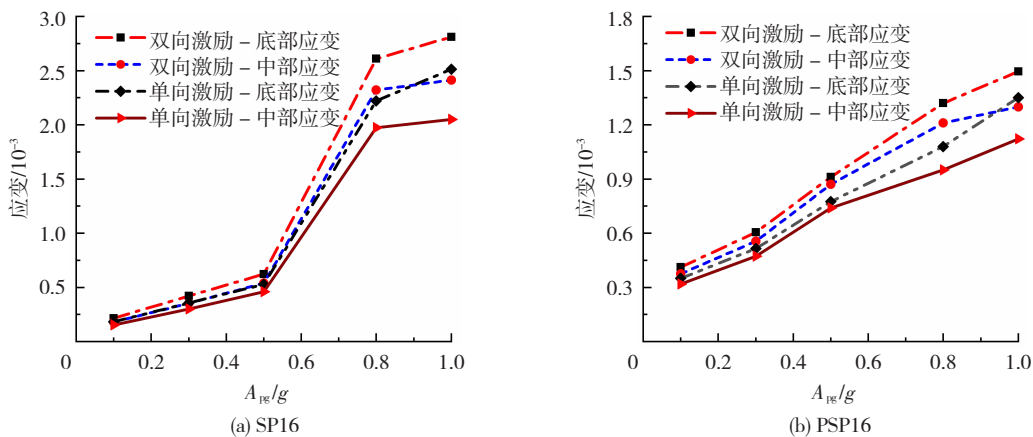


图 13 不同高度处 CFRP 环向应变

Fig. 13 Ring strain of CFRP with different heights

3 结 论

对 CFRP-EMD 加固的灌浆套筒连接、灌浆套筒-预应力筋连接装配式桥墩试件进行了振动台试验,对

比分析了加固前后两类试件的震害现象和动力响应,主要结论如下:

- 1) 近断层地震动作用下,墩底灌浆套筒连接(包括灌浆套筒-预应力筋组合连接)装配式混凝

土桥墩试件的损伤均集中于墩底接缝和灌浆套筒上缘;损伤程度随激励强度增大而增大;双向激励造成的损伤大于单向激励;附加预应力筋连接可提高构件刚度和自复位能力,降低墩身和接缝的损伤速率和损伤程度。

2)CFRP-EMD组合加固后SP16和PSP16的刚度均显著增加,CFRP-EMD可有效控制二者的墩顶位移;加固后试件的抗震变形能力和整体抗震性能均有一定程度的提高;EMD与装配式试件墩身之间的连接可靠性是影响CFRP-EMD加固效果的关键;CFRP-EMD加固后PSP16的塑性变形更加合理。提出的CFRP-EMD加固设计方法和实施原则可为其他类似工程借鉴。

参考文献

- [1] 王景全,王震,高玉峰,等. 预制桥墩体系抗震性能研究进展:新材料、新理念、新应用[J]. 工程力学,2019,36(3):1
WANG Jingquan, WANG Zhen, GAO Yufeng, et al. Review on aseismic behavior of precast piers: new material, new concept, and new application [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3):1. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.10.ST03
- [2] BILLINGTON S L, BARNES R W, BREEN J E. Alternate substructure systems for standard highway bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(2): 87. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2001)6:2(87)
- [3] 徐文靖,马磊,黄虹,等. 套筒连接的预制拼装桥墩抗震性能研究[J]. 工程力学,2020,37(10):94
XU Wenjing, MA Biao, HUANG Hong, et al. The seismic performance of precast bridge piers with grouted sleeves [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10):94. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.11.0667
- [4] 葛继平,高飞,郑焕强,等. 灌浆套筒装配式桥墩的施工工艺及其应用[J]. 应用技术学报,2018,18(2):147
GE Jiping, GAO Fei, ZHENG Huanqiang, et al. The construction technology and application of grouting sleeve in assembly bridge pier column [J]. Journal of Technology, 2018, 18(2):147. DOI: 10.3969/j.issn.2096-3424.2018.02.010
- [5] 葛继平,闫兴非,王志强. 灌浆套筒和预应力筋连接的预制拼装桥墩的抗震性能[J]. 交通运输工程学报,2018,18(2):42
GE Jiping, YAN Xingfei, WANG Zhiqiang. Seismic performance of prefabricated assembled pier with grouted sleeve and prestressed reinforcements [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(2):42. DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2018.02.005
- [6] HABER Z B, MACKIE K R, AL-JELAWY H M. Testing and analysis of precast columns with grouted sleeve connections and shifted plastic hinging [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(10): 04017078. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001105
- [7] LEE K S, LEE B Y, SEO S Y. A seismic strengthening technique for reinforced concrete columns using sprayed FRP [J]. Polymers, 2016, 8(4):107. DOI: 10.3390/polym8040107
- [8] HE Ruili, GRELLI S, SNEED L H, et al. Rapid repair of a severely damaged RC column having fractured bars using externally bonded CFRP [J]. Composite Structures, 2013, 101: 225. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.02.012
- [9] WU Ruoyang, PANTELIDES C P. Rapid repair and replacement of earthquake-damaged concrete columns using plastic hinge relocation [J]. Composite Structures, 2017, 180:467. DOI:10.1016/j.compstruct.2017.08.051
- [10] 韩强,温佳年,杜修力,等. CFRP布加固RC空心桥墩的抗震性能[J]. 土木工程学报,2015,48(1):91
HAN Qiang, WEN Jianian, DU Xiuli, et al. Seismic performance of hollow bridge columns retrofitted with carbon FRP [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1):91. DOI:10.15951/j.tjgxcb.2015.01.011
- [11] 孙治国,管璐,赵泰仪,等. CFRP修复震后RC桥墩分析模型与抗震性能[J]. 应用基础与工程科学学报,2020,28(4):878
SUN Zhiguo, GUAN Lu, ZHAO Taiyi, et al. Analysis model and seismic behavior of repaired RC bridge piers after earthquakes by using CFRP [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(4): 878. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2020.04.011
- [12] WANG Guolin, DAI Jianguo, BAI Yulei. Seismic retrofit of exterior RC beam-column joints with bonded CFRP reinforcement: an experimental study [J]. Composite Structures, 2019, 224: 111018. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111018
- [13] 王作虎,申书洋,崔宇强,等. CFRP加固混凝土柱轴压性能尺寸效应试验分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2020,52(8):112
WANG Zuohu, SHEN Shuyang, CUI Yuqiang, et al. Experimental analysis on size effect of axial compressive behavior for reinforced concrete columns strengthened with CFRP [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(8): 112. DOI: 10.11918/201906169
- [14] YANG Yang, HE Ruili, SNEED L H. Seismic repair design of RC bridge columns damaged under combined bending and torsion effects [J]. International Journal of Bridge Engineering, 2017: 171
- [15] ZHANG Yuye, TABANDEH A, MA Yu, et al. Seismic performance of precast segmental bridge columns repaired with CFRP wraps [J]. Composite Structures, 2020, 243: 112218
- [16] 葛继平,王志强. 干接缝节段拼装桥墩振动台试验研究[J]. 工程力学,2011,28(9):123
GE Jiping, WANG Zhiqiang. Shake table tests on segmental bridge columns with match-cast dry joints [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 123
- [17] 混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014
Code for design of strengthening concrete structure: GB 50367—2013 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014
- [18] 公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01—2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020
Specifications for seismic design of highway bridges: JTG/T 2231-01—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020

(编辑 赵丽莹)