

DOI:10.11918/202104092

# 不同连接构造的预制拼装桥墩地震响应分析

胡志坚<sup>1</sup>, 闫明辉<sup>1</sup>, 周知<sup>1</sup>, 王洁金<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 武汉 430063; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003)

**摘要:** 为了研究预制拼装桥墩的连接构造能否形成可靠的传力机制及其抗震性能, 基于一组预制拼装桥墩拟静力试验, 采用 ABAQUS 软件建立了试验桥墩的有限元模型并结合试验结果验证其有效性。在此基础上, 分析现浇、波纹管浆锚连接和榫头+波纹管连接的预制拼装桥墩的地震动力响应。之后, 进一步研究轴压比和配筋率对新型带榫头构造的预制拼装桥墩地震动力响应的规律。结果表明: 在结构形式和地震作用均相同的条件下预制拼装桥墩和现浇桥墩的动力响应结果基本一致。有榫头构造较平面接缝的预制拼装桥墩的位移响应、残余位移、塑性损伤程度更小, 榫头构造提高了预制拼装桥墩的抗震性能。通过参数分析发现, 轴压比越大, 桥墩的位移响应以及塑性损伤程度越大, 剪力响应和地震耗能更大; 纵筋配筋率越大, 桥墩的位移响应以及塑性损伤程度越小, 剪力响应越大, 但在 1%~2% 之间, 对地震耗能的影响不显著。

**关键词:** 预制拼装桥墩; 连接构造; 有限元模拟; 地震响应分析; 参数分析

中图分类号: U442.55

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)09-0055-10

## Seismic response analysis of precast pier with different connection structures

HU Zhijian<sup>1</sup>, YAN Minghui<sup>1</sup>, ZHOU Zhi<sup>1</sup>, WANG Jiejing<sup>2</sup>

(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** To study whether the connection of precast piers can form a reliable force transmission mechanism and its seismic performance, based on a set of quasi-static tests of precast piers, we established finite element models of the test piers by ABAQUS and verified the effectiveness through test results. Then, the seismic dynamic responses of cast-in-place pier, precast pier with grouted corrugated duct connection, and precast pier with tenon-grouted corrugated duct connection were analyzed. Finally, the influence of axial compression ratio and reinforcement ratio on the seismic dynamic response of the precast pier with tenon structure was further studied. Results show that the dynamic responses of precast pier and cast-in-place pier were basically the same under the same structural form and seismic load. The displacement response, residual displacement, and plastic damage of precast pier with tenon were smaller than those with plane joint, and the seismic performance of precast pier with tenon was improved. Through parameter analysis, it was found that with the increase in the axial compression ratio, the displacement response and plastic damage of the pier were larger, and the shear response and seismic energy consumption were greater. With increasing longitudinal reinforcement ratio, the displacement response and plastic damage of the pier decreased, and the shear response increased, while the influence on the seismic energy dissipation was not significant in the range of 1% to 2%.

**Keywords:** precast pier; connection structure; finite element simulation; seismic response analysis; parameter analysis

预制拼装桥墩的连接部位是装配式桥梁的薄弱环节<sup>[1]</sup>, 影响到桥墩的抗震性能、可施工性、耐久性和经济性<sup>[2]</sup>, 采用灌浆波纹管连接的预制拼装桥墩既能保证抗震性又能降低其拼装精度要求, 是一种较优的连接构造形式。文献[3]对采用灌浆波纹管连接的装配式桥墩进行拟静力试验, 认为只要保证装配式桥墩连接强度可靠, 基本能够达到现浇桥墩

所要求的各项性能。文献[4]和文献[5]通过拟静力试验研究, 结果发现采用灌浆波纹管连接的预制拼装桥墩与整体现浇桥墩的抗震性能较为接近。文献[6]对两个缩尺的预制墩柱试件进行了拟静力循环荷载分析研究, 波纹管填充超高性能混凝土, 试验结果表明, 与现浇墩柱相比, 灌注超高性能混凝土波纹管连接的性能优于传统现浇连接方式, 可以作为预制拼装桥墩柱-盖梁、柱-基础的连接方式。采用平面接缝的波纹管连接桥墩破坏主要集中于墩底接缝<sup>[7]</sup>, 界面之间仅有纵筋穿过, 为了进一步优化预制拼装桥墩的连接构造, 提升其抗震性能, 本文提

收稿日期: 2021-04-20

基金项目: 江西省创新驱动“5511”项目(20165ABC28001)

作者简介: 胡志坚(1974—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 周知, zhizhou@whut.edu.cn

出了一种适用于预制拼装桥墩的新型榫头+波纹管连接形式,通过在墩底增加榫头构造,缩小接缝区域并保证界面间钢筋与混凝土共同参与受力,既可以增强连接的有效性,又可以提高匹配拼装施工的便捷性。

目前,对预制拼装桥墩抗震性能的研究多采用拟静力试验和相应数值分析的方式<sup>[8-9]</sup>,虽然拟静力特性在一定程度上可以反映结构的抗震性能,但地震动作为一种动力荷载,具有很大的随机性,在强烈地震作用下,钢筋混凝土结构往往会进入弹塑性变形阶段并出现性能的衰减,表现出明显的动力非线性特征。为了进一步明晰采用新型连接形式的预制拼装桥墩的抗震性能,有必要在拟静力试验的基础上研究其在地震作用下的动力响应,并比较不同连接构造的预制拼装桥墩在实际地震作用下的抗震性能区别。

本文基于课题组开展的一组预制拼装桥墩拟静力试验,采用 ABAQUS 软件建立试验桥墩的有限元模型,并结合试验结果验证其有效性。在此基础上,对现浇、波纹管浆锚连接和新型榫头+波纹管连接的预制拼装桥墩进行地震响应分析,并进一步研究轴压比和配筋率对有榫头构造的预制拼装桥墩动力

响应的规律,以比较地震作用下不同连接构造以及不同构件参数的预制拼装桥墩的抗震性能,进而对目前的预制桥墩连接构造的优化设计提供理论参考。

## 1 背景模型拟静力试验

本文背景的预制拼装桥墩拟静力试验依托某实际工程,按照 1:5 相似比制作了 3 种桥墩试件缩尺模型,其相似常数见表 1。3 种桥墩墩身直径为 280 mm,高为 860 mm,剪跨比为 3.6,设计轴压力为 400 kN(已考虑桥墩模型的配重),相应的轴压比为 0.254 0。桥墩混凝土强度等级均为 C50,纵向钢筋和箍筋分别采用 HRB400 级和 HPB400 级,相应的纵筋率和体积配箍率分别为 1.47% 和 0.27%。混凝土平均抗压强度为 51.5 MPa,弹性模量为 33 817.5 MPa;纵向钢筋平均屈服强度为 510 MPa,极限强度为 645 MPa,弹性模量为 217 000 MPa。3 种桥墩构造尺寸及配筋形式如图 1 所示,差异主要体现在纵筋连接方式与接缝构造,RC 桥墩采用整体现浇,PR-B 与 PR-S 桥墩采用金属波纹管内纵筋锚固的预制拼装形式,其中 PR-B 桥墩墩底为平接缝,PR-S 桥墩墩底带有榫头构造。

表 1 桥墩试件模型相似常数

Tab.1 Similarity constant of pier specimen

物理量	长度	弹性模量	应变	质量密度	质量	加速度	周期
相似常数	1/5	1	1	5	1/25	1	0.447 2

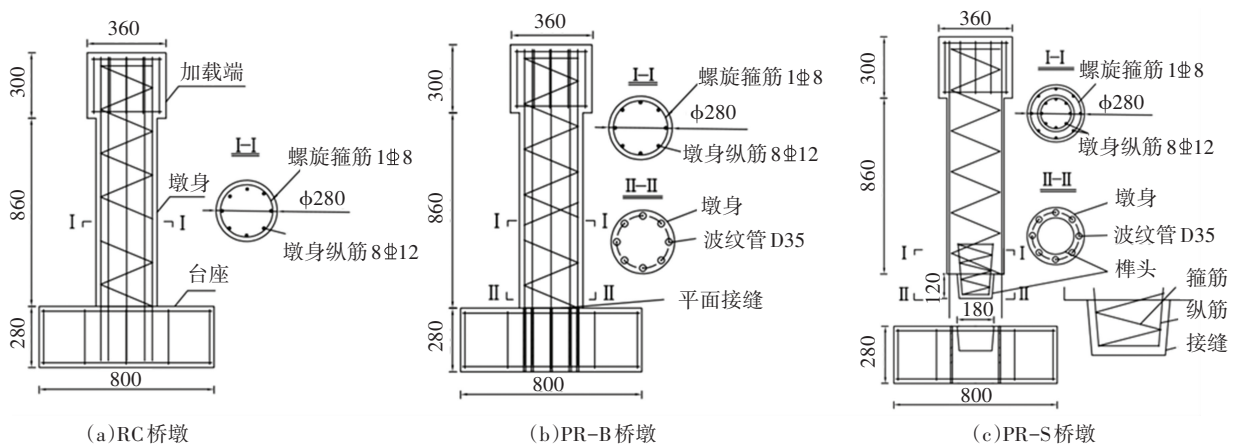


图 1 桥墩构造图(mm)

Fig.1 Structural drawing of piers (mm)

试验的加载装置如图 2 所示,对桥墩试件首先采用千斤顶施加竖向荷载到 40 t 并在之后的试验过程中保持恒定,之后采用位移加载的方式通过电液伺服水平作动器进行横向水平荷载的加载,每级荷载进行二次循环加载,由 2 mm 的位移幅值开始加

载,并以 2 mm 的幅值递增,加载制度如图 3 所示。观察并记录试件在位移加载过程中的破坏状态及承载力变化,当试件承载力下降到最大承载力的 85% 时,加载结束。

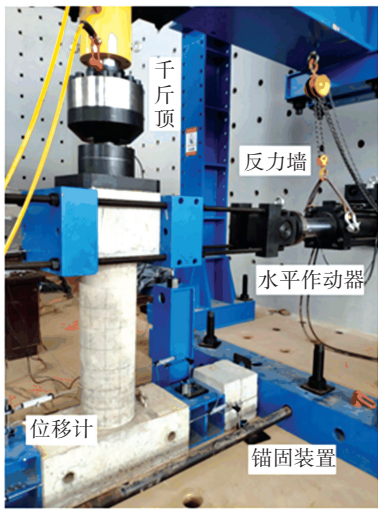


图2 试验加载装置图

Fig.2 Schematic diagram of test loading device

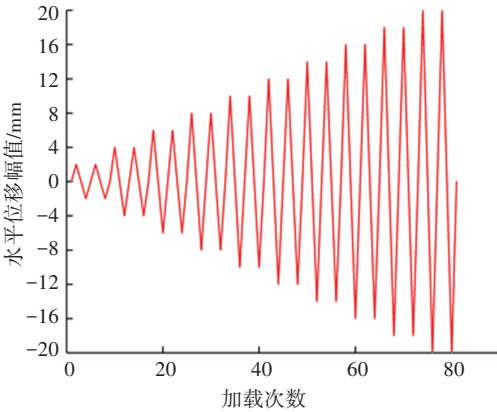


图3 水平位移加载制度

Fig.3 Horizontal displacement loading system

## 2 预制拼装桥墩有限元建模及模型验证

### 2.1 墩底接缝的模拟

目前,对于灌浆金属波纹管或钢套筒连接的预制拼装桥墩,不同学者对其接缝构造的模拟方法略有差别。文献[10]中预制桥墩的接缝垫层及灌浆材料选取了与混凝土类似的本构模型来进行模拟,数值模拟与试验结果吻合较好,但并未详细介绍其模拟方法。文献[11]采用带硬化段和软化段的弹性型模型模拟墩柱与承台之间的砂浆垫层,骨架曲线模拟结果与试验基本一致,但并未介绍本构模型参数设置。

墩底和樁头与承台之间接缝采用5 mm厚砂浆垫层,本文结合文献[10]与文献[11]研究的成果,采用ABAQUS软件中的实体单元(C3D8R)进行模拟,由于砂浆垫层弹性模量和强度较低,采用理想弹塑性模型可以较好地反映接缝处在受力后的变形。如图4所示,材料的弹性模量 $E$ 、峰值受压强度 $\sigma_1$ 和峰值受拉强度 $\sigma_2$ 为本构模型关键参数, $E$ 取值为

$E_c/100$ ,  $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 分别取值为 $\sigma_c/4$ 、 $\sigma_t/4$ ,其中 $E_c$ 为试验中墩身混凝土弹性模量, $\sigma_c$ 和 $\sigma_t$ 分别为试验中墩身混凝土单轴受压和受拉强度<sup>[12]</sup>。

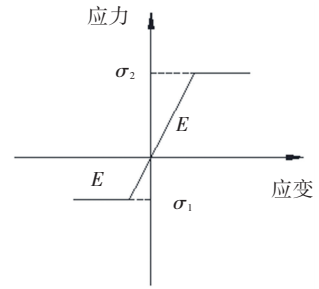


图4 砂浆垫层本构模型

Fig.4 Constitutive model of mortar cushion

### 2.2 有限元模型的建立

预制拼装桥墩有限元模型的建立过程与现浇桥墩基本一致,主要是对钢筋混凝土结构的模拟,其中混凝土采用实体单元(C3D8R),钢筋采用桁架单元(T3D2)。混凝土采用塑性损伤模型,采用Mander提出的约束混凝土本构<sup>[13]</sup>考虑箍筋对核心区混凝土抗压强度的提高,保护层混凝土应力-应变关系根据《混凝土结构设计规范》<sup>[14]</sup>取值。钢筋本构采用理想弹塑性模型,钢筋强化段刚度取 $E_s/100$ ,其中 $E_s$ 为钢筋弹性模量。由于试验中未发现钢筋与灌浆料之间明显滑移,钢筋与波纹管可分别通过嵌入(Embedded)和绑定约束(Tie)形式模拟。采用本节的墩底接缝及桥墩有限元模拟方法建立的PR-B与PR-S桥墩有限元模型如图5、6所示。

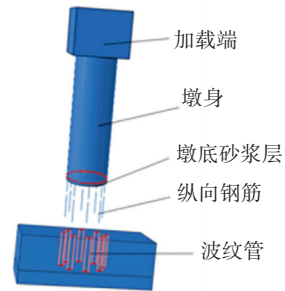


图5 PR-B桥墩有限元模型

Fig.5 Finite element model of PR-B bridge pier

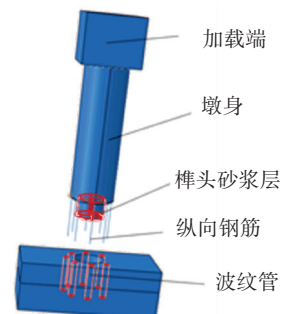


图6 PR-S桥墩有限元模型

Fig.6 Finite element model of PR-S bridge pier

### 2.3 有限元模型的验证

本节主要从桥墩的滞回曲线、骨架曲线、滞回耗能 3 个方面将有限元模拟与试验结果作对比,以验证采用本文介绍的有限元分析方法的有效性。

3 种桥墩试验及有限元模拟滞回曲线如图 7 所示,桥墩滞回曲线、承载力、滞回环大小和形状的模拟结果与试验相近,由于混凝土受拉和受压软化段的刚度退化较难准确模拟,导致模拟结果在极限荷

载附近的刚度退化更快,总体来看,有限元模型能够比较真实地模拟桥墩在低周往复加载下的荷载-位移关系及滞回耗能行为。

图 8 为桥墩试验与有限元模拟骨架曲线,从图中可以看出有限元对试件骨架曲线的弹性、塑性屈服以及承载力下降 3 个破坏阶段的承载力和主要趋势模拟均较为准确。

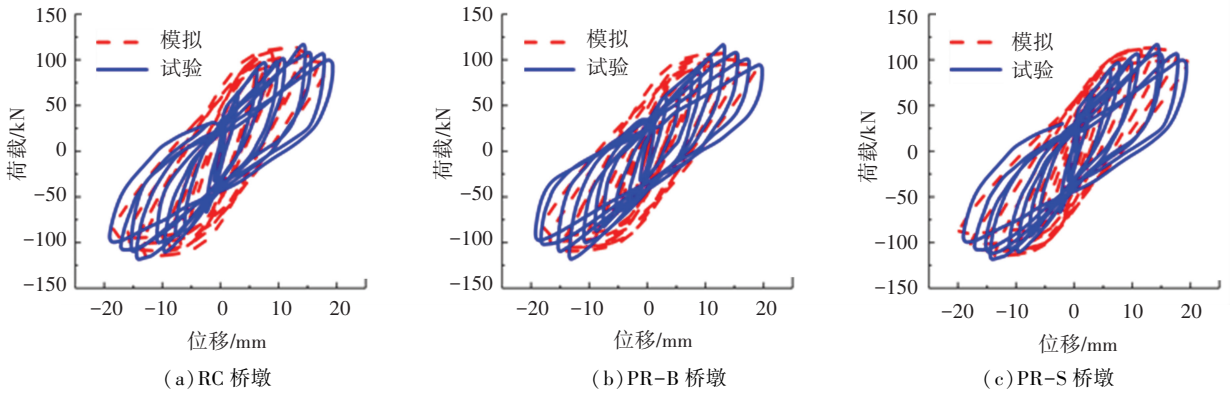


图 7 桥墩试验及有限元模拟滞回曲线

Fig.7 Hysteretic curve of pier test and finite element simulation

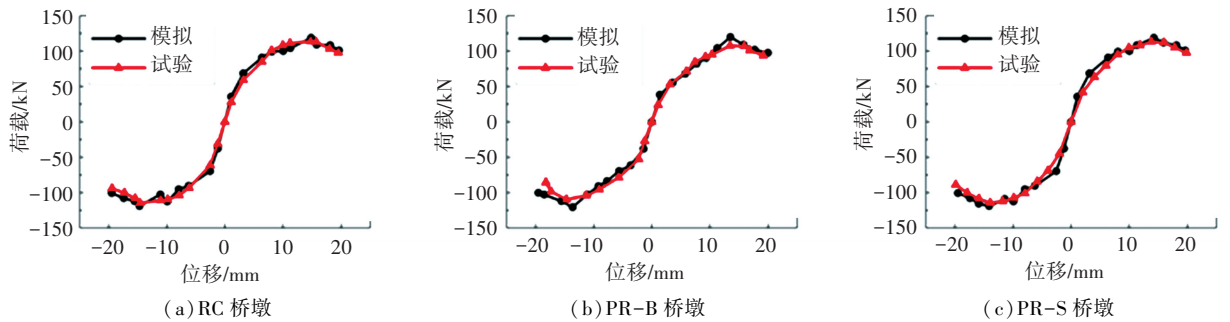


图 8 桥墩试验与有限元骨架曲线

Fig.8 Skeleton curve of pier test and finite element simulation

图 9 给出了 3 种桥墩试验及有限元模拟的滞回耗能结果,其中,模拟与试验的单周滞回耗能分别记为 E 单-模拟和 E 单-试验,模拟与试验的累积滞回耗能分别记为 E 累-模拟和 E 累-试验。由图可以看出,有限元模拟的单周以及累积滞回耗能在桥墩达到极限荷载

之前与试验能够较好地吻合,在达到极限承载力后,有限元模拟的单周滞回耗能大于试验值,这是由于有限元模拟无法精确反映钢筋屈服后和混凝土软化段的刚度退化规律。总的来看,有限元模型能够较好地模拟 3 种桥墩在往复荷载作用下的滞回响应。

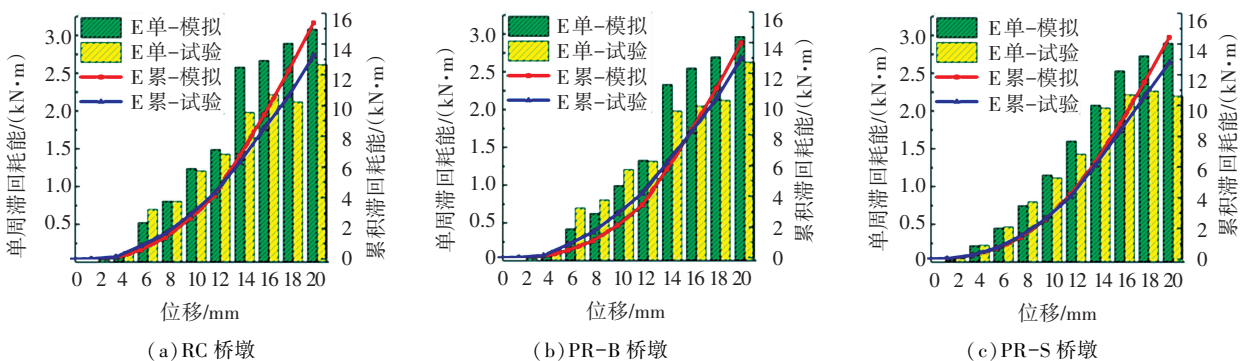


图 9 试验及有限元模拟滞回耗能对比

Fig.9 Comparison of hysteretic energy consumption between test and finite element simulation

综上所述,采用本文介绍的接缝及墩柱有限元模拟方法能够较准确且全面地反映预制拼装桥墩在往复荷载作用下的力学行为,可以用于其抗震性能分析。

### 3 基于墩底接缝模拟的预制拼装桥墩地震响应分析

#### 3.1 地震波的选取与输入

在对桥梁结构进行地震时程分析时,按照中国《公路桥梁抗震设计规范》<sup>[15]</sup>规定,未进行地震安全性评价的桥址,可以以规范设计加速度反应谱为目标拟合设计加速度时程,并且一般要选取不得少于3组地震加速度时程以供比较分析。

为了研究预制拼装桥墩在高设防要求地震作用下的地震响应,选择水平向基本地震动加速度峰值  $A$  为  $0.4g$ , 特征周期  $T_g$  为  $0.35\text{ s}$ , 将计算得到的地震加速度反应谱作为目标反应谱。采用 MATLAB 编制人工地震波生成程序,生成了与目标反应谱吻合的3条人工拟合地震反应谱,如图 10 所示。相应地生成 3 组地震波加速度时程,其持时均为  $T_d = 40\text{ s}$ 。

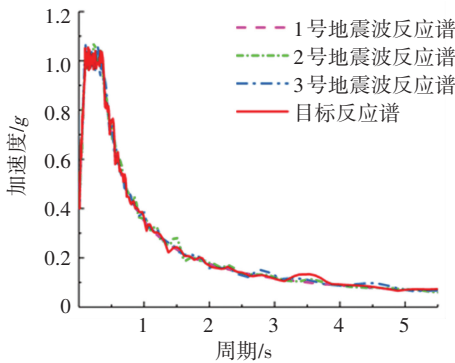


图 10 目标反应谱和拟合反应谱对比

Fig. 10 Comparison of target response spectrum and fitting response spectrum

采用 ABAQUS 软件的动力隐式分析模块对 3 种桥墩在地震荷载作用下的响应进行分析。在建立地震动力时程分析模型的过程中,材料本构模型、单元类型和网格划分情况与拟静力分析有限元模型基本相同,主要区别为桥墩模型的边界约束情况以及荷载的施加情况不同。本文重点研究桥墩在地震作用下的地震响应,建立全桥有限元模型计算量大且计算效果不一定理想,为了简化计算,突出局部连接构造研究重点,不考虑桥梁上部结构形式对桥墩受力性能的影响,将上部结构等效为墩顶集中质量点,与墩柱顶部节点耦合,此时假设桥墩与主梁采用刚性连接并具有相同的位移<sup>[16]</sup>。模型边界条件为承台底部仅放开水平向约束,桥墩顶部完全放开约束,

地震荷载通过在承台底部耦合点输入地震波即可,在 load 模块中的 amplitude 中定义地震加速度时程。

#### 3.2 墩顶位移

位移时程曲线可以直观地反映墩顶位移与时间的变化过程,进而确定墩柱的损伤破坏程度。图 11 为 3 种桥墩的墩顶位移时程曲线,表 2 为 3 种桥墩的墩顶峰值位移比较。

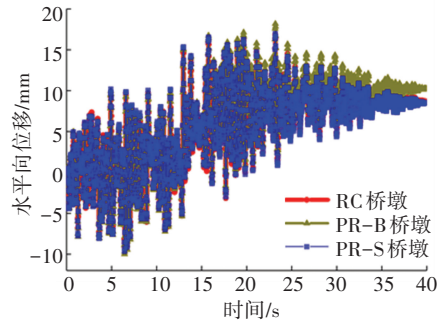


图 11 墩顶位移时程曲线(1号地震波)

Fig. 11 Time history curve of pier top displacement (No. 1 seismic wave)

表 2 墩顶峰值位移

Tab.2 Peak displacement of pier top

地震波编号	位移/mm		
	RC 桥墩	PR-B 桥墩	PR-S 桥墩
1 号	16.9	18.2	17.0
2 号	15.6	16.0	15.1
3 号	16.1	17.9	17.0

由图 11 可知,3 种桥墩在同一地震波作用下,到达峰值位移前的墩顶位移时程曲线较为接近,到达峰值位移后的墩顶位移时程曲线相差较大,由表 2 可知,3 种地震波作用下 PR-B 桥墩位移分别为 RC 桥墩的 108%、103%和 111%,PR-S 桥墩位移分别为 RC 桥墩的 101%、97%和 106%,可以明显看出 PR-B 桥墩的墩顶峰值位移相较于其他两种桥墩更大,3 种地震波作用下与现浇桥墩分别相差 8%、3%和 11%,这也说明在地震作用下,无榫头构造的波纹管连接桥墩位移响应较大,而有榫头构造的预制桥墩与现浇桥墩的位移需求较为接近,抗震性能相当,榫头构造的存在提高了开裂后的墩身刚度,降低了预制拼装桥墩的位移响应。

#### 3.3 墩底剪力

墩底剪力时程曲线可以反映桥墩在地震作用下墩底剪力与时间的变化过程,进而确定墩身抵抗地震作用外力的大小。图 12 为 3 种桥墩的墩底剪力时程曲线,表 3 为 3 种桥墩的墩底峰值剪力比较。

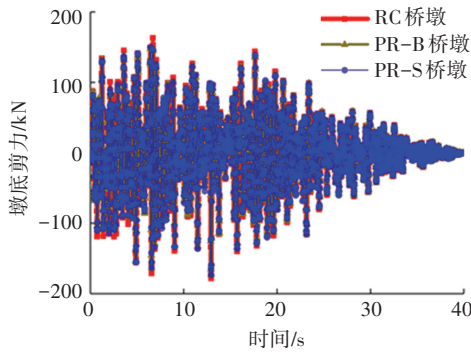


图 12 墩底剪力时程曲线(1号波)

Fig.12 Time history curve of shear force at pier bottom (No.1 seismic wave)

表 3 墩底峰值剪力

Tab.3 Peak shear force at pier bottom

地震波编号	剪力/kN		
	RC 桥墩	PR-B 桥墩	PR-S 桥墩
1 号	178.3	172.3	172.9
2 号	174.9	168.0	169.9
3 号	186.1	178.7	180.8

由图 12 可知,3 种桥墩在同一地震波作用下的墩底剪力时程曲线较为接近,由表 3 可知,3 种地震波作用下 PR-B 桥墩剪力分别为 RC 桥墩的 97%、96%、96%,PR-S 桥墩剪力分别为 RC 桥墩的 97%、97%、97%,可以看出 3 种地震波作用下预制拼装桥墩与现浇桥墩的峰值剪力差别较小,相对而言,在地震作用下有榫头构造的预制桥墩与现浇桥墩的剪力响应更相符。

### 3.4 残余变形

在地震作用下,桥墩会经历多次反复的加卸载过程,残余变形是指构件从加载变形,再将荷载卸载至零后,构件的不可恢复的塑性变形<sup>[17]</sup>,残余变形越小,墩柱在震后有利于修复并继续工作。表 4 为 3 种桥墩在 3 种地震波作用结束后的残余位移值比较。

表 4 桥墩残余位移

Tab.4 Residual displacement of piers

地震波编号	残余位移/mm		
	RC 桥墩	PR-B 桥墩	PR-S 桥墩
1 号	11.4	12.5	11.4
2 号	11.5	11.2	10.9
3 号	10.7	12.7	11.6

由表 4 可知,3 种地震波作用下 PR-B 桥墩残余位移分别为 RC 桥墩的 109%、98%、119%,PR-S 桥墩残余位移分别为 RC 桥墩的 100%、95% 和 108%,3 种桥墩在同一地震波作用后的残余位移值

较为接近,但 PR-B 桥墩的残余位移相较于其他两种桥墩更大,这是由于无榫头构造的波纹管连接桥墩采用平面接缝,在地震作用下,墩底接缝位置更容易受到损伤而张开,钢筋与混凝土的塑性应变较大,从而导致桥墩的残余位移更大。有榫头构造的预制桥墩与现浇桥墩的残余位移基本一致,这说明在地震残余位移角度来看这两种桥墩的抗震性能比较接近。

### 3.5 地震耗能

地震耗能可以反映桥墩在地震作用下的耗能大小,进而确定桥墩的耗能能力。表 5 为 3 种桥墩在 3 种地震波作用下的耗能量比较。

表 5 桥墩地震耗能

Tab.5 Seismic energy consumption of bridge piers

地震波编号	地震耗能/(kN·mm)		
	RC 桥墩	PR-B 桥墩	PR-S 桥墩
1 号	45 120	45 484	45 311
2 号	47 025	47 637	47 733
3 号	38 204	38 957	39 003

由表 5 可知,3 种地震波作用下 PR-B 桥墩地震耗能分别为 RC 桥墩的 101%、101%、102%,PR-S 桥墩地震耗能分别为 RC 桥墩的 100%、102%、102%,在同一地震波作用下预制桥墩与现浇桥墩的地震耗能基本一致,但预制桥墩略大于现浇桥墩,这说明预制拼装桥墩的耗能能力等同或优于现浇桥墩。

### 3.6 等效塑性应变

等效塑性应变是指结构在整个加载过程中塑性应变的累积结果<sup>[18]</sup>,通过对比结构的等效塑性应变,可以判断结构的损伤程度和损伤区域,进而分析结构在实际地震作用下的抗震性能。

为了直观分析桥墩的损伤程度,图 13 给出了 3 种桥墩在 1 号地震波作用结束时 ( $t = 40$  s) 墩身及接缝混凝土等效塑性应变。表 6 列出了 3 种桥墩在地震作用下墩身混凝土的最大等效塑性应变值,结合表 6 和图 13 可知,在地震作用下,3 种桥墩都在墩底附近产生塑性应变,但分布区域略有差别。现浇桥墩的等效塑性应变值最小,且分布在墩底靠上部位。波纹管连接桥墩的等效塑性应变值最大,主要分布在墩底接缝位置。有榫头构造的波纹管连接桥墩等效塑性应变值介于其他两种桥墩之间,其榫头的等效塑性应变较小,损伤主要分布在墩底接缝位置,但分布范围相较于平接缝桥墩更大。由桥墩等效塑性应变分析可知,预制桥墩与现浇桥墩的损伤区域不同,墩身损伤程度偏大,有榫头构造的预制桥墩较平接缝桥墩抗震性能更优。

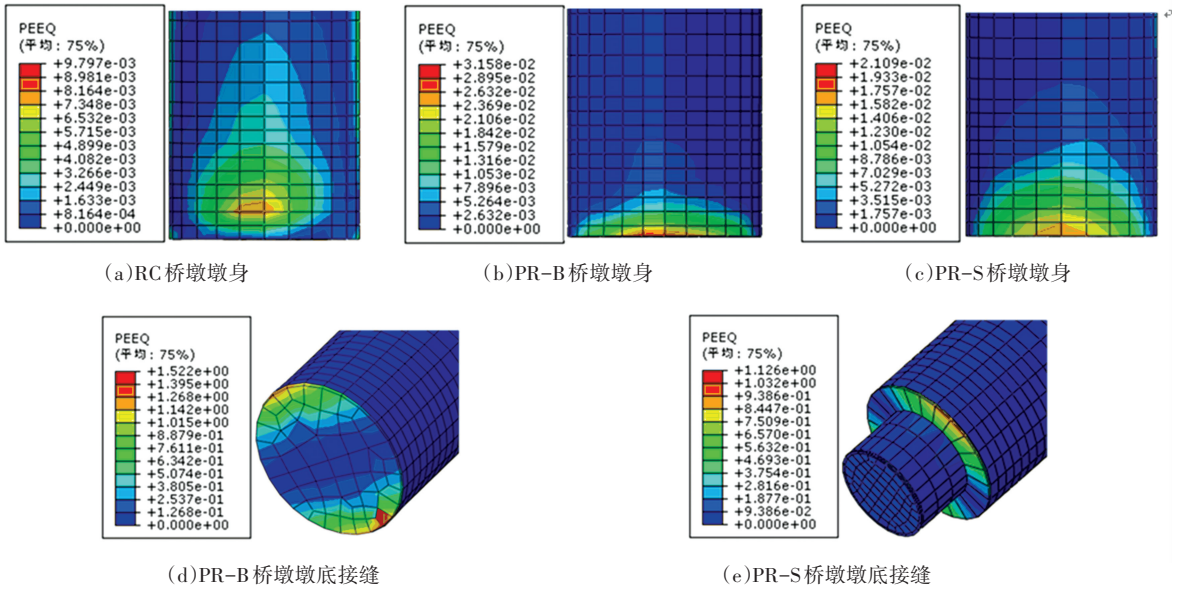


图 13 不同连接构造桥墩在同一地震波作用下混凝土等效塑性应变

Fig.13 Equivalent plastic strain of concrete for piers with different connection structures under same seismic wave

表 6 不同连接构造桥墩混凝土等效塑性应变最大值

Tab.6 Maximum value of equivalent plastic strain of concrete for piers with different connection structures

桥墩编号	等效塑性应变/ $10^{-2}$		
	1号地震波	2号地震波	3号地震波
RC	0.98	1.18	1.03
PR-B	3.16	3.12	2.18
PR-S	2.11	2.18	1.82

### 4 参数分析

通过上节对 3 种桥墩构件的地震响应结果分析发现,有榫头构造的波纹管连接预制桥墩 (PR-S 桥墩) 在两种预制桥墩中抗震性能表现更优,为进一步研究轴压比、纵筋配筋率这两种构件参数对预制拼装桥墩地震响应结果的影响,本节针对 PR-S 桥墩试件,选取的轴压比分别为 0.190 5、0.254 0、0.317 5,纵筋配筋率分别为 1.10%、1.47%、1.84%,对不同轴压比和纵筋配筋率的预制拼装桥墩的动力时程响应结果进行分析,主要包括 3 种地震波作用下的墩顶位移、墩底剪力、残余变形、地震耗能以及等效塑性应变。

#### 4.1 轴压比

图 14 和图 15 比较了不同轴压比的预制拼装桥墩的墩顶峰值位移和墩底峰值剪力。由图可知,在地震动作用下,随着轴压比的增大,墩顶峰值位移和墩底峰值剪力也越大,可见轴压比的提高会增大预制拼装桥墩的位移响应和剪力响应。

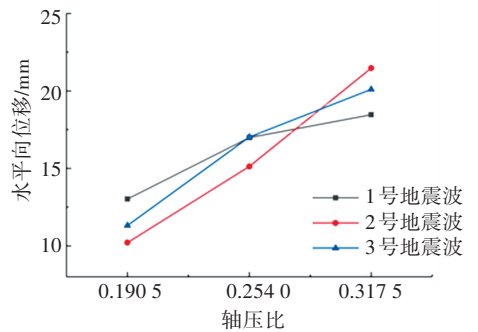


图 14 不同轴压比桥墩墩顶峰值位移

Fig.14 Peak displacement of pier top with different axial compression ratio

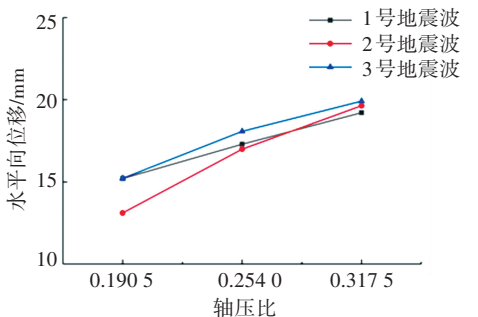


图 15 不同轴压比桥墩墩底峰值剪力

Fig.15 Peak shear force at bottom of piers with different axial compression ratio

图 16 和图 17 比较了不同轴压比的预制拼装桥墩的残余位移和地震耗能,由图可知,3 种不同轴压比的桥墩在同一种地震波作用下的残余位移和地震耗能相差较大,且随着轴压比的增大,桥墩的残余位移和地震耗能都有所增大,这说明了在地震动作用下,轴压比的提高,桥梁上部结构质量随之增大,桥

墩的塑性损伤更加严重,钢筋与混凝土材料损伤及应变更大,并且需要更大的能量耗散。

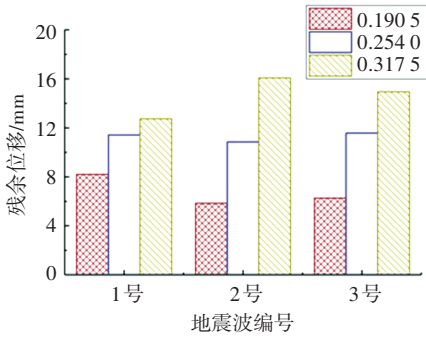


图 16 不同轴压比桥墩残余位移

Fig. 16 Residual displacement of piers with different axial compression ratio

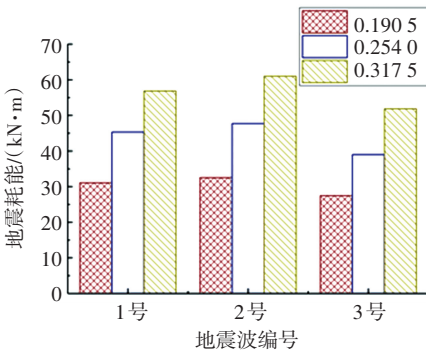


图 17 不同轴压比桥墩地震耗能

Fig. 17 Seismic energy consumption of piers with different axial compression ratio

表 7 和图 18 比较了不同轴压比的预制拼装桥墩的混凝土等效塑性应变,由表 7 可知,3 种不同轴压比的桥墩在同一种地震波作用下的混凝土等效塑性应变相差较大,随着轴压比的增大,桥墩的混凝土等效塑性应变都有所增大,这说明了在地震动作用下,轴压比的提高使得桥墩的塑性损伤程度更大,进而降低桥墩的抗震性能。

表 7 不同轴压比桥墩混凝土等效塑性应变最大值

Tab.7 Maximum value of equivalent plastic strain of concrete for piers with different axial compression ratio

轴压比	等效塑性应变/ $10^{-2}$		
	1号地震波	2号地震波	3号地震波
0.1905	1.67	1.73	1.46
0.2540	2.11	2.18	1.82
0.3175	2.34	2.41	2.16

### 4.2 纵筋配筋率

为了研究纵筋配筋率对预制拼装桥墩抗震性能的影响,本文分析了在 1%~2%之间的 3 种不同纵筋配筋率,图 19 和图 20 比较了此范围内不同配筋率的预制拼装桥墩的墩顶峰值位移和墩底峰值剪力。由图可知,随着配筋率的增大,墩顶峰值位移越小,墩底峰值剪力略有增大,可见在地震动作用下,配筋率的提高可以减小预制拼装桥墩的位移响应,但对剪力响应的影响作用并不明显。

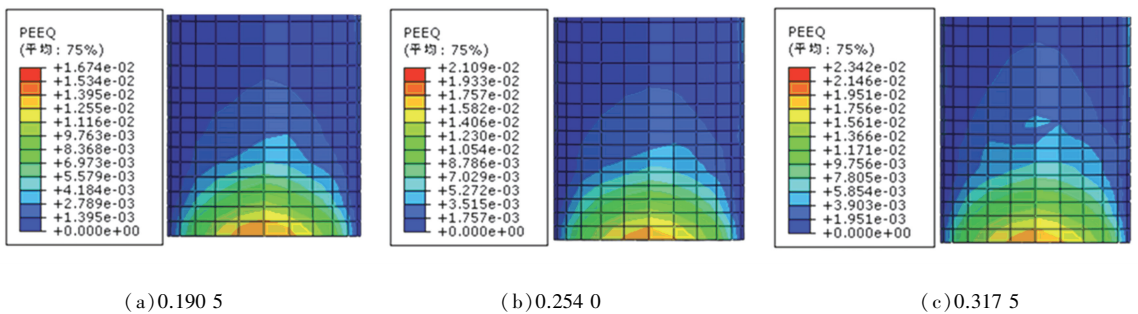


图 18 不同轴压比桥墩混凝土等效塑性应变

Fig. 18 Equivalent plastic strain of concrete for piers with different axial compression ratio

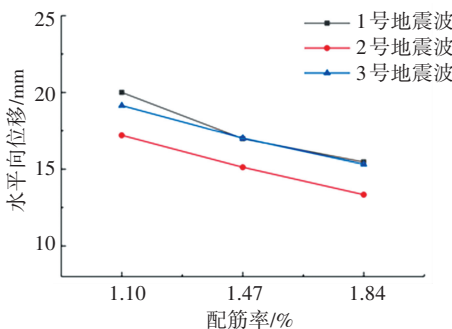


图 19 不同配筋率桥墩墩顶峰值位移

Fig. 19 Peak displacement of pier top with different reinforcement ratio

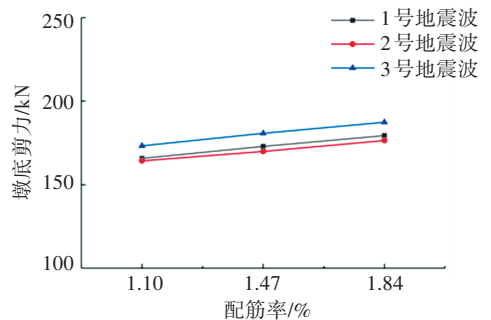


图 20 不同配筋率桥墩墩底峰值剪力

Fig. 20 Peak shear force at bottom of piers with different reinforcement ratio

图 21 和图 22 比较了不同配筋率的预制拼装桥墩的残余位移和地震耗能,由图可知,随着配筋率的增大,桥墩的残余位移越小,地震耗能略有减小,这说明了在地震动作用下,配筋率的提高可以减小预制拼装桥墩的残余位移,但在本文的研究范围内,纵筋配筋率对地震耗能的影响作用不显著。

表 8 和图 23 比较了不同配筋率的预制拼装桥墩的混凝土等效塑性应变,由表 8 可知,3 种不同配筋率的桥墩在同一种地震波作用下的混凝土等效塑性应变相差并不多,随着配筋率的增大,桥墩的混凝土等效塑性应变都有所减小,但塑性应变的分布范围基本一致,这说明了在地震动作用下,配筋率的提高对塑性损伤的改善作用较小。

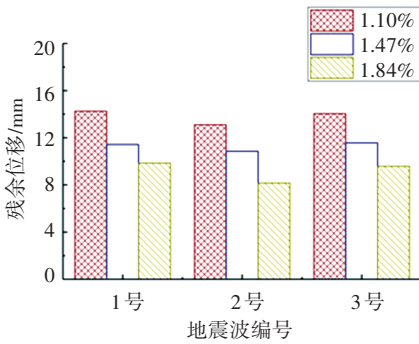


图 21 不同配筋率桥墩残余位移

Fig.21 Residual displacement of piers with different reinforcement ratio

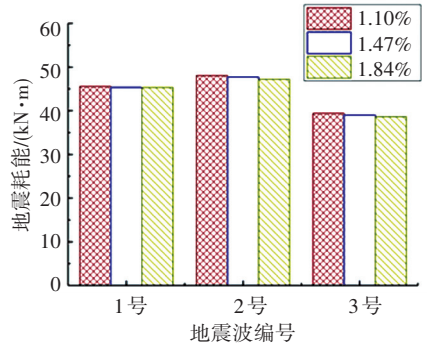


图 22 不同配筋率桥墩地震耗能

Fig. 22 Seismic energy consumption of piers with different reinforcement ratio

表 8 不同配筋率桥墩混凝土等效塑性应变最大值  
Tab.8 Maximum value of equivalent plastic strain of concrete for piers with different reinforcement ratio

配筋率/%	等效塑性应变/10 <sup>-2</sup>		
	1号地震波	2号地震波	3号地震波
1.10	2.16	2.23	1.88
1.47	2.11	2.18	1.82
1.84	2.08	2.14	1.78

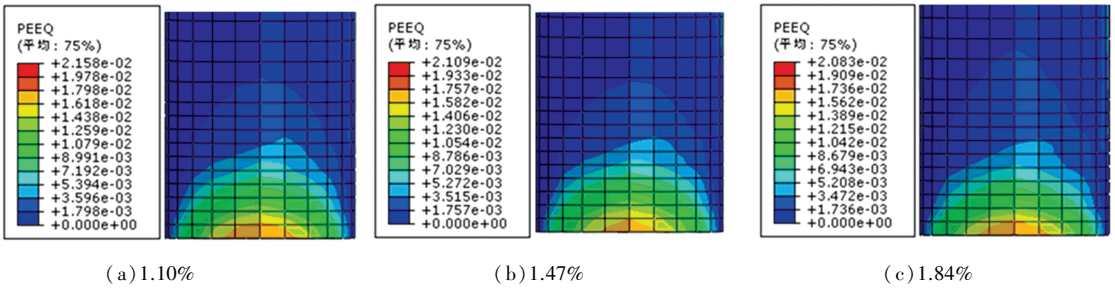


图 23 不同配筋率桥墩混凝土等效塑性应变

Fig.23 Equivalent plastic strain of concrete for piers with different reinforcement ratio

### 5 结论

本文基于一组采用波纹管连接的预制拼装桥墩拟静力试验,采用 ABAQUS 软件建立该试验桥墩的有限元模型并结合试验结果验证其有效性。在此基础上,对 3 种现浇及预制拼装桥墩进行地震响应分析,并深入研究轴压比和配筋率对新型带榫头构造的预制拼装桥墩地震动力响应的影响规律,以比较地震作用下不同连接构造以及不同构件参数的预制拼装桥墩的抗震性能,得出以下结论:

1) 在结构形式和地震作用均相同条件下预制

拼装桥墩和现浇桥墩的动力响应结果基本一致。

2) 对比两种不同连接构造的预制拼装桥墩,榫头+波纹管连接桥墩的位移响应、残余位移、塑性损伤程度更小,榫头构造的存在提高了预制拼装桥墩的抗震性能。

3) 轴压比的提高会增大预制拼装桥墩的位移响应以及塑性损伤程度,桥墩的剪力响应和地震耗能会有所增大。

4) 纵筋配筋率的提高会减小预制拼装桥墩的位移响应以及塑性损伤程度,桥墩的剪力响应有所增大,但在 1%~2%之间,纵筋配筋率的提高对地震

耗能的影响不显著。

## 参考文献

- [1] 韩超,郑毅敏,赵勇.钢筋套筒灌浆连接技术研究与应用进展[J].施工技术,2013,42(21):113  
HAN Chao, ZHENG Yimin, ZHAO Yong. Research and application development of grout sleeve splicing for reinforcement[J]. Construction Technology, 2013, 42(21): 113
- [2] 闫畅,刘朵,张建东.预制拼装桥墩连接构造的研究进展及工程应用[C]//2019年泛长三角公路发展论坛论文集.镇江:江苏省公路学会,2019:148  
YAN Chang, LIU Duo, ZHANG Jiandong. Research progress and engineering application of precast pier connection structure[C]// Proceedings of 2019 Highway Development in the Pan Yangtze River Delta. Zhenjiang: Jiangsu Highway and Transportation Society, 2019: 148. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.047286
- [3] 桑中伟.灌浆波纹管连接装配式桥墩拟静力试验及数值分析[D].沈阳:沈阳建筑大学,2018  
SANG Zhongwei. Quasi-static test and numerical analysis of grouted bellows connected assembly piers[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018
- [4] 姜海西,王志强,沈佳伟.灌浆金属波纹管连接预制拼装立柱抗震性能试验研究[J].结构工程师,2016,32(5):132  
JIANG Haixi, WANG Zhiqiang, SHEN Jiawei. Anti-seismic performance testing of prefabricate assembly pillars connected with grouting metal corrugated pipe[J]. Structural Engineers, 2016, 32(5): 132. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2016.05.019
- [5] 包龙生,张远宝,桑中伟,等.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  
BAO Longsheng, ZHANG Yuanbao, SANG Zhongwei, et al. Quasi-static test and numerical simulation analysis for seismic performance of fabricated assemble bridge piers base on bellows connection[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 242. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.12.024
- [6] TAZARV M, SAIDI M S. UHPC-filled duct connections for accelerated bridge construction of RC columns in high seismic zones[J]. Engineering Structures, 2015, 99:413
- [7] 夏樟华,余舟扬,葛继平,等.灌浆波纹管装配式PC双柱墩双向拟静力试验[J].中国公路学报,2021,34(1):93  
XIA Zhanghua, YU Zhouyang, GE Jiping, et al. Bi-axial quasi-static experiment for assembled double-column piers with grouting metal corrugated pipe and prestressed tendons[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(1): 93. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.01.009.
- [8] 王志强,卫张震,魏红一,等.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  
WANG Zhiqiang, WEI Zhangzhen, WEI Hongyi, et al. Influences of precast segmental connector forms on seismic performance of bridge pier[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(5): 74. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.05.010
- [9] 葛继平,夏樟华,江恒.灌浆波纹管装配式桥墩双向拟静力试验[J].中国公路学报,2018,31(12):221  
GE Jiping, XIA Zhanghua, JIANG Heng. Biaxial quasi-static experiment of precast segmental bridge piers with grouting corrugated pipe connection[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 221. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.12.022.
- [10] 黄宜,邱文亮,黄才良,等.单节段装配式桥墩抗震性能试验研究[J].大连理工大学学报,2016,56(5):481  
HUANG Yi, QIU Wenliang, HUANG Cai liang, et al. Experimental study of seismic performance of single segmental precast bridge piers[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2016, 56(5): 481
- [11] 贾俊峰,郭扬,宋年华,等.基于灌浆波纹管锚固连接的预制拼装RC墩柱抗震试验[J].中国公路学报,2018,31(12):211  
JIA Junfeng, GUO Yang, SONG Nianhua, et al. Seismic testing of precast RC bridge pier columns anchored by grouted corrugated ducts[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 211. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.12.021
- [12] 胡志坚,闫明辉,周知,等.预制拼装桥墩地震易损性分析[J].土木工程学报,2022,55(1):89  
HU Zhijian, YAN Minghui, ZHOU Zhi, et al. Seismic vulnerability analysis of precast segmental bridge piers[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(1): 89. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2022.01.006
- [13] MANDER J A B, PRIESTLEY M J N. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8):1804
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [15] 中华人民共和国交通运输部.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  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for seismic design of highway bridges: JTG/T 2231-01—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020
- [16] 李军,肖岩.钢管混凝土桥墩动力时程分析及累积损伤评估[J].自然灾害学报,2016,25(1):120  
LI Jun, XIAO Yan. Dynamic time-history analysis and cumulative damage assessment of concrete-filled steel tube bridge pier[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(1): 120. DOI: 10.13577/j.jnd.2016.0115
- [17] 江恒.灌浆波纹管连接节段拼装桥墩双向拟静力试验研究[D].福州:福州大学,2017  
JIANG Heng. Bi-axial quasi-static experimental study of precast segmental bridge piers with grouting corrugated pipe connection[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017
- [18] 王欢.配筋率对高速铁路圆端形实心桥墩地震响应影响研究[D].长沙:中南大学,2014  
WANG Huan. Influence of reinforcement ratio on seismic response of round-ended bridge piers in high speed railway[D]. Changsha: Central South University, 2014

(编辑 魏希柱)