

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201912029

近断层地震动下预制拼装桥墩桥梁结构碰撞 响应分析*

赵建锋¹, 孟庆一^{1,2}, 刘雪飞¹

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 中建八局第四建设有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要: 为研究近断层地震下预制拼装桥墩桥梁结构的碰撞响应及影响碰撞的参数, 基于OpenSees有限元分析软件, 建立一座五跨预制拼装桥墩桥梁分析模型, 选取8组近断层脉冲型地震动对桥梁进行非线性动力时程分析; 探究了碰撞效应对桥梁地震响应的影响及节段数目、节段长度、初始预应力、接缝刚度等参数对桥梁碰撞效应的影响。结果表明: 桥梁碰撞效应可以减小桥梁震时最大位移和震后残余位移, 碰撞效应可以减小下部预制拼装桥墩地震中预应力筋的最大预应力、接缝最大竖向压力, 但不能改变接缝水平剪力的大小; 碰撞主要发生于桥梁中部伸缩缝处, 中部伸缩缝碰撞力和碰撞次数均明显大于两侧边伸缩缝; 增加预制拼装桥墩的节段数目可以减小桥梁的震时最大位移, 但会增大桥梁的碰撞力和碰撞次数, 其中6个节段时主梁中缝、左边缝和右边缝最大碰撞力比3个节段时分别增大约38.8%、36.5%和33.3%; 初始预应力的大小对桥梁碰撞效应影响较小; 引入的系数 δ 可以有效控制桥墩干接缝的刚度, δ 增大时桥墩接缝刚度增大, 接缝张开量减小, 桥墩接缝耗能能力增强, 桥梁碰撞力减小。

关键词: 桥梁抗震; 预制拼装桥墩; 桥梁结构; 碰撞效应; 动力时程分析

中图分类号: U443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0069-12

Pounding Response of Bridge with Precast Segmental Bridge Piers under Near-fault Ground Motions

ZHAO Jianfeng¹, MENG Qingyi^{1,2}, LIU Xuefei¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

2. The Fourth Construction Co. Ltd of China Construction Eighth Engineering Division, Qingdao 266100, China)

Abstract: In order to study the pounding response and pounding parameters of bridge structure with precast segmental bridge piers under near-fault ground motions. Based on OpenSees finite element analysis software, an analysis model of five-span bridge structure with precast segmental bridge piers was established. Eight groups of near-fault pulse ground motions were selected to carry out non-linear dynamic time history analysis of the bridge. The pounding effect on the seismic response of the bridge and the number of segments, the length of segments, the initial prestress, joint stiffness and other parameters on the pounding effect of the bridge were explored. The results show that the pounding effect can reduce the maximum displacement and the residual displacement of the bridge, and the pounding response can reduce the maximum prestress of the prestressed bar and the maximum vertical pressure

* 收稿日期: 2019-12-13; 修回日期: 2020-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778314)资助

作者简介: 赵建锋(1976—), 男, 副教授, 博士。主要从事桥梁抗震等方面的研究。E-mail: zhaojf@bjut.edu.cn

of the joint in the earthquake of the precast segmental bridge piers, but cannot change the horizontal shear force of the joint. The pounding mainly occurs at the expansion joint in the middle of the bridge. The pounding force and pounding times of the middle expansion joint are significantly bigger than those of the expansion joints on both sides. Increasing the number of pier segments can reduce the maximum displacement of the bridge, but it will increase the pounding force and pounding times of the bridge. Among which the maximum pounding force of the middle joint, the left joint and the right joint of the girder increases about 38.8%, 36.5% and 33.3%, respectively, in six segments compared with three segments. The initial prestressed force has little influence on the pounding effect of the bridge. The introduced coefficient can effectively control the stiffness of the dry joint of the pier, when δ increases, the joint stiffness increases, the joint opening decreases, the joint energy dissipation capacity increases, and the pounding force of the bridge decreases.

Keywords: seismic resistance of bridges; precast segmental bridge pier; bridge structures; pounding effect; dynamic time history analysis

引 言

为了加快现代社会桥梁的施工速度,桥梁下部结构的预制拼装技术被运用到桥梁施工中。与传统整体现浇的桥墩相比,预制拼装桥墩不仅施工速度快,不阻碍交通的正常运行,其地震中残余位移小、震后可恢复能力强的优点,使得这种类型的桥墩被越来越多地使用于地震区的桥梁建设中。

为了更加了解预制拼装桥墩在地震中的工作机理,研究人员进行了大量关于预制拼装桥墩抗震性能的研究工作:Y.C.Ou等^[1-2]进行了一系列大比例尺预制拼装桥墩拟静力试验,发现预制拼装桥墩具有较小的残余位移,该类型桥墩耗能能力欠缺,节段采用耗能钢筋,增大塑性铰节段的长度,采用承插式连接方式等都可以提高桥墩在高烈度地震区的使用性能。R.Hassanli等^[3]发现节段混凝土受到约束限制时,混凝土的损伤将大幅度减小,有利于增大桥墩地震中的极限位移和延性。M.A.EIGawady等^[4]研究发现自复位桥墩组成的框架结构比整体现浇RC桥墩组成的框架结构具有更小的残余位移,如何提高桥墩承载力是设计的关键。S.Motaref等^[5]研究发现当桥墩塑性铰节段与基础间采用整体式连接时,桥墩的耗能能力可通过纵筋屈服提供,耗能能力是不连接时的2~4倍;采用合适的连接装置,可以有效减小塑性铰区的损伤,增强桥墩耗能。P.Sideris等^[6]在预制拼装桥墩接缝处涂抹硅氧树脂,形成一种特殊的接缝,这种接缝被称为“滑移-摇摆混合接缝”,并随后对这种结构的桥墩开展

了拟静力和振动台试验,结果表明:该体系可以通过调节地震时桥墩接缝处的滑动量,减小接缝摩擦力,避免桥墩过大的地震损伤。大量的研究工作集中于桥墩节段和接缝的研究,这也是预制拼装桥墩研究的重点。

在现阶段研究中对预制拼装桥墩成桥后研究很少,而对于整桥的研究工作开展也十分必要。L.Zhao等^[7]基于OpenSees建立了整体现浇桥墩整桥和预制拼装桥墩整桥两种分析模型,对两种形式桥墩成桥后的地震响应进行分析,研究发现预制拼装桥墩具有更小的残余位移和更大的桥面碰撞力。

桥梁碰撞问题已经成为桥梁抗震领域的研究的关键,对于桥梁碰撞方面的研究:R.Desroches等^[8]建立2D连续梁桥模型,对影响碰撞的因素进行了分析,研究结果显示相邻跨的周期比及地震特征周期对碰撞影响显著;王军文等^[9]采用数值模拟方法研究了地震下钢筋混凝土梁桥的碰撞效应,对碰撞影响因素进行了总结;贾宏宇等^[10]总结出地震作用下桥梁碰撞间隙宽度的概率分析方法,具有很强的实用性。关于桥梁碰撞的研究主要集中于整体现浇的桥墩形式,对预制拼装桥墩桥梁碰撞的研究工作很少。

以一座实际工程中20 m+30 m+30 m+30 m+20 m的预制拼装桥墩五跨梁桥作为算例,基于美国加州大学伯克利分校开发的有限元计算软件OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation)分别建立预制拼装桥墩梁桥2D模型,选取近断层地震动记录,对桥墩模型进行非线性动力时程分析,研究桥梁的地震碰撞效应及影响碰撞效

应的因素。

1 有限元模型的建立

1.1 桥墩纤维模型

为了探究预制拼装桥墩与普通整体现浇 RC 桥墩在抗震性能方面的差异, Z.Y.Bu 等^[11]进行了 5 个缩尺比为 1:3.5 的圆形截面预制拼装墩柱拟静力加载试验。本文选取试验中试件 2 桥墩作为预制拼装桥墩有限元模型的原型桥墩, 利用 OpenSees 有限元软件建立与试件 2 构造尺寸相同的纤维桥墩模型, 桥墩立面构造如图 1 所示, 对应的桥墩有限元模型如图 2 所示, 桥墩混凝土和钢筋相关力学参数均可在文献[11]中找到。

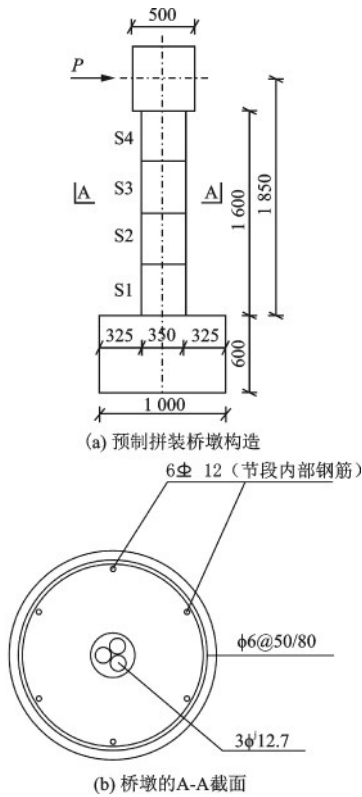


图 1 桥墩试件 2 的构造

Fig.1 Structure of the pier specimen 2 (mm)

桥墩墩身采用非线性梁柱单元模拟, 单元考虑受压弯曲产生的 $P-\Delta$ 效应。混凝土采用基于 Kent-Scott-Park 本构的 Concrete01 模型^[12], 节段纵筋和箍筋均采用基于 Giuffre-Mnegotto-pinto 本构的 Steel02 模型^[13], 图 3、4 给出了模式使用的 Concrete01 模型和 Steel02 模型的应力—应变本构关系。

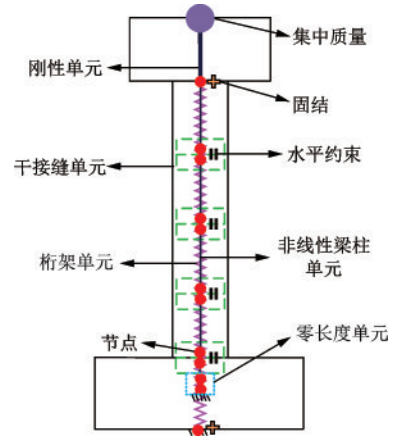


图 2 桥墩有限元模型

Fig.2 Finite element model of the pier

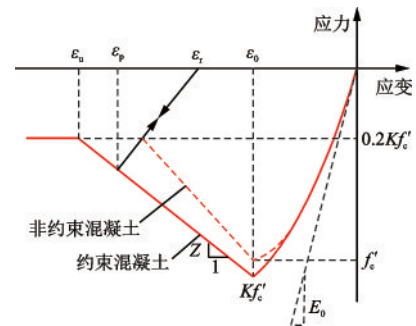


图 3 Concrete01 模型应力—应变关系

Fig.3 Stress—strain relationship of Concrete01 model

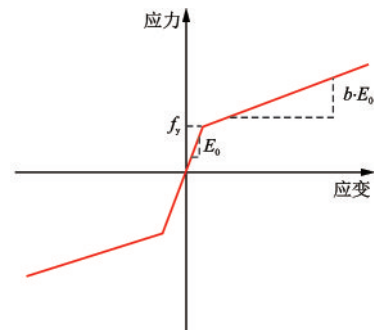


图 4 Steel02 模型应力—应变关系

Fig.4 Stress—strain relationship of Steel02 model

桥墩中部预应力钢筋单元采用桁架单元模拟, 预应力筋的墩顶和墩底节点三个方向自由度全部约束, 中间节点与相应墩身节点具有相同坐标, 约束水平面内两个平动自由度, 竖向自由度放松, 以模拟预应力筋的无粘结状态。初始预应力通过初应变的方式施加。

进行模拟时预制拼装桥墩干接缝区域具有特殊的力学性能, 这里采用特殊的干接缝单元进行模拟, 干接缝单元设置如图 5 所示, 在接缝区刚性单元

两端分别设有零长度单元,零长度单元上下节点具有相同的节点坐标,两节点采用ENT材料连接,此材料定义只在受压状态下才具有弹性模量,受拉时弹性模量为0(用来模拟干接缝处受拉张开的情况),刚性单元中部两节点之间没有连接材料。图6给出了ENT材料的应力—应变本构关系,目前针对干接缝单元ENT材料刚度仍没有明确的计算公式,这里给出经过反复计算确定的ENT材料弹性模量 E_{en} 的经验计算公式,公式如下:

$$E_{en} = \frac{5E_c A}{LD} \quad (1)$$

式中, E_c 为无约束混凝土受压弹性模量; A 为接缝截面面积; D 为接缝截面宽度;预制拼装桥墩墩身截面几乎保持一致,所以在进行抗震计算时桥墩可以简化为具有集中质量的单自由度体系, L 为桥墩简化为单自由度体系时桥墩桩基顶部与集中质量点的高度差。

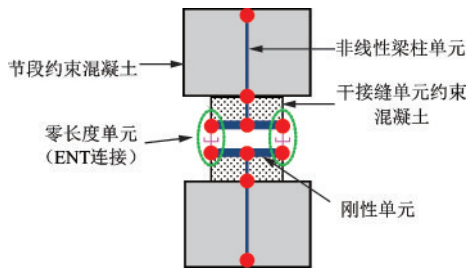


图5 干接缝单元模型

Fig.5 Dry Joint element model

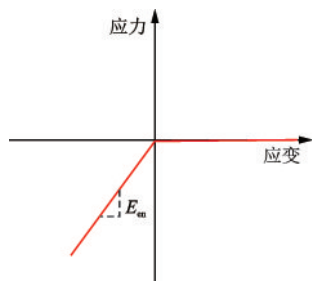


图6 ENT材料应力—应变关系

Fig.6 Stress—strain relationship of the ENT material

图7给出了桥墩纤维模型模拟计算结果与试验结果滞回曲线与骨架曲线的对比情况。从图7可以看出,模拟结果左右对称,但试验结果受加载过程和环境影响导致结果并不对称,其次在反复加载过程中桥墩接缝之间会产生刚性转动现象,这也增大了接缝之间的滑移量,使试验结果不对称,总体来看模拟计算结果与试验结果吻合良好,说明基于

干接缝单元的桥墩纤维模型模拟方法具有较高精度,该纤维模型可以准确模拟预制拼装桥墩的滞回性能、水平承载力和刚度。

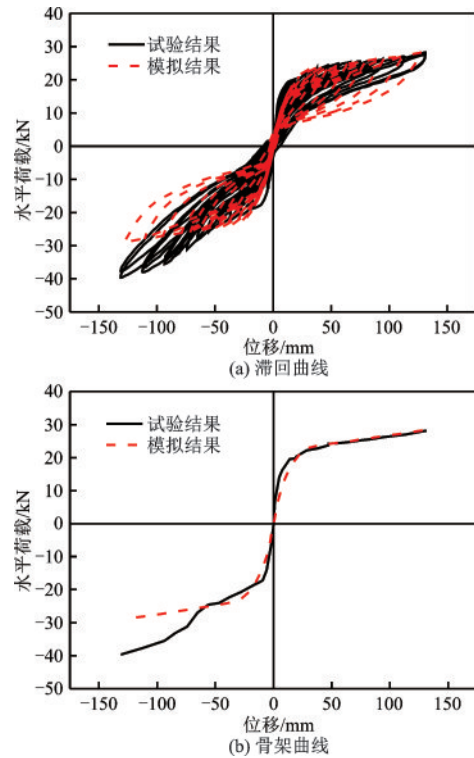


图7 模拟结果与试验结果对比

Fig.7 Comparison between simulation and test results

1.2 桥梁算例概况

在之前桥墩纤维模型模拟方法的基础上,参考文献[7]中的桥梁模型,通过OpenSees建立一座实际工程中的5跨梁桥模型作为有限元分析的桥梁模型。

桥梁总长为130 m,最外侧左右两跨长均为20 m,中部左右两跨长为30 m,中跨长30 m,下部结构采用预制拼装形式的桥墩,桥墩顶部节段采用销栓与主梁下部连接,销栓由销栓钢管、螺钉和橡胶垫层组成,该类型构造传递来自上部结构的弯曲应力和剪力,显著减小弯矩的传递^[14],布置于节段顶部的橡胶垫层具有较小的刚度,这样可以大大减小桥墩地震中的损伤,有效保护桥墩的上部节段。结构整体布置如图8所示,销栓连接构造如图9所示。

桥梁主梁采用单箱单室箱型截面,箱梁高度为1.8 m,上顶板宽8.4 m,下底板宽4.5 m,横截面尺寸如图10所示。下部结构桥墩采用节段预制拼装实心墩,总墩高为10 m,共分为4个节段,预应力钢筋

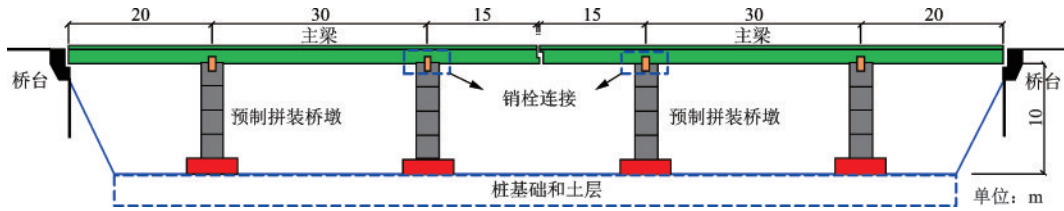


图8 桥梁结构整体布置

Fig.8 Bridge structural arrangement plan (m)

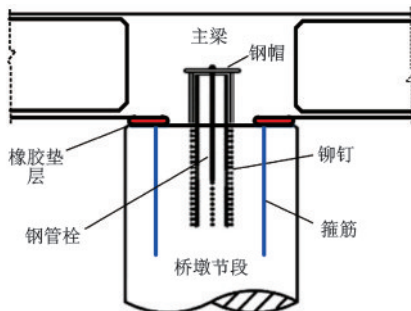


图9 销栓连接构造

Fig.9 Pin bolt connection structure

锚固于墩顶和墩底位置,预应力筋牵拉4个节段,每个节段高2.5 m,底部承台高1 m,节段干接缝处没有纵筋和箍筋,桥墩整体构造和节段横截面如图11所示。主梁和桥墩混凝土均采用C40混凝土,纵筋为HRB400钢筋,箍筋为HPB300钢筋,预应力筋采用 $3\Phi 15.7$ 的无粘结预应力钢绞线。

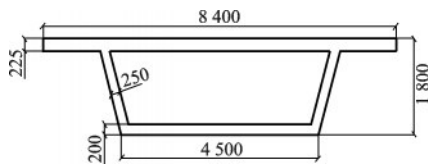


图10 主梁横截面尺寸

Fig.10 Cross-section size of the girder (mm)

1.3 桥梁模型的建立

基于Opensees建立桥梁结构有限元模型如图12所示。桥梁模型中主梁采用Elastic beam-column单元模拟,相关计算参数见表1。桥墩仍采用纤维模型模拟,建立模型时不考虑承台高度对模型的影响。

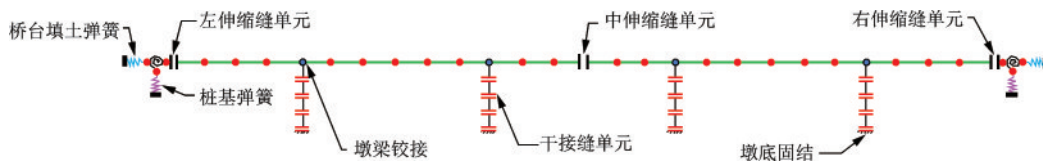


图12 桥梁结构有限元模型

Fig.12 Finite element model of the bridge structure

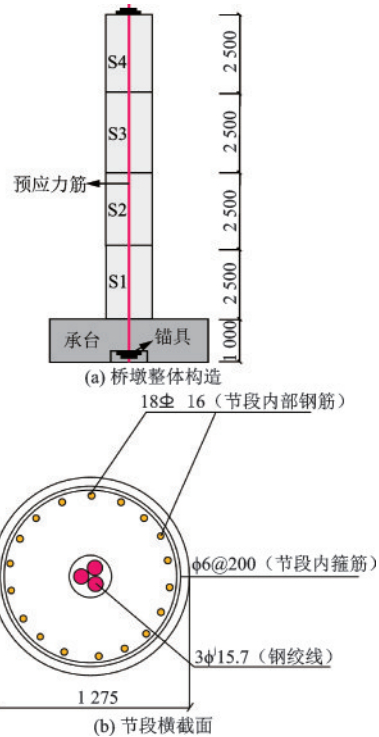


图11 桥墩构造

Fig.11 Arrangement of the bridge pier (mm)

响,墩底固结,墩梁铰接(铰接点处设置转动弹簧,弹簧刚度等于销栓的连接刚度)。模型考虑桥台填土及桩基的作用,同时考虑主梁的碰撞效应。桥台采用刚性单元模拟,桥台填土和桩基的模拟;桥台填土采用零长度单元配合 Elastic-perfectly plastic Gap材料模拟,缝隙长度取0,弹簧初始刚度为200 000 kN/m,极限力为10 000 kN;桩基础由24根桩组成,桩基采用零长度单元配合 ENT材料和 Elastic-perfectly plastic材料模拟,两材料采用 Series Materi-

al进行组合,ENT材料只受压模拟主梁搭接在桥台上, Elastic-perfectly plastic材料受拉受压弹性模量相同模拟桩基对桥梁的支承,两材料叠加后弹簧极限力为4 000 kN。两种材料的本构力—位移曲线如图13所示。

表1 主梁计算参数

Table 1 Calculation parameters of girder

截面积 A/m^2	弹性模量 E/MPa	剪切模量 G/MPa	扭转矩 J/m^4	惯性矩 I_x/m^4	泊松比
4.59	3.25e7	2.35e6	3.65	3.11	0.3

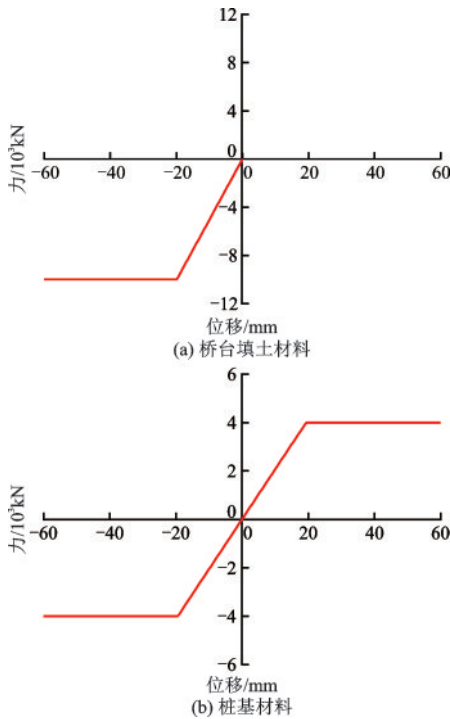


图13 桥台填土和桩基材料力—位移曲线

Fig.13 Force-displacement curves of the embankment fill and pile materials

桥梁在地震作用时产生振动,梁体的碰撞发生于梁体的伸缩缝处,为了模拟出桥梁上部梁体之间的碰撞效应,在上部主梁设置3个碰撞单元,单元分别位于主梁最中间和两侧桥台连接处。伸缩缝碰撞单元采用如图14所示的非线性碰撞单元模拟,单元由Elastic-perfectly plastic Gap材料和阻尼材料组成,单元的非线性力—位移关系可以描述为^[9]:

$$f = \begin{cases} k(\Delta_d - \Delta_G)\Delta_d - \Delta_G > 0 \\ 0 & \Delta_d - \Delta_G \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, Δ_G 为无碰撞前伸缩缝间隙; Δ_d 为地震中伸缩缝处相邻碰撞梁体产生的相对位移; k 为碰撞弹簧

(梁体)刚度,根据王东升等^[15]的直杆共轴碰撞理论,这里取为相邻梁体的轴向刚度。

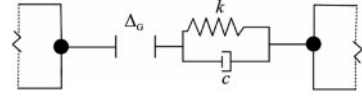


图14 主梁碰撞模型

Fig.14 Impact model of the girder

碰撞单元中设置阻尼器以模拟碰撞过程中能量的耗散,阻尼器的阻尼系数和阻尼比按如下公式计算:

$$c = 2\xi \sqrt{k \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right)} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{-\ln e}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}} \quad (4)$$

式中, c 为阻尼器阻尼系数; ξ 为阻尼比; e 为恢复系数,阻尼的大小与碰撞过程的恢复系数取值有关,对于完全弹性碰撞 e 取1,对于完全塑性碰撞 e 取0,对于混凝土材料 e 取0.65。计算桥梁以中部伸缩缝为界,划分为左右两个碰撞体系,左右两侧碰撞体系具有相同的质量,取值为 $m_1 = m_2 = 440\,965\text{ kg}$ 。

2 地震动的选取及输入

2.1 地震动选取

近断层地震动是指当震源距较小时,震源辐射地震波中的近场和中场项不能忽略的区域的震动。目前,近断层区域没有一个统一的具体定义,大部分研究人员将距离断层破裂面小于20 km的区域看做近断层区域。

本次模拟桥梁抗震设防烈度为Ⅷ度,场地为II类场,设计基本加速度为0.4g。从PEER地震动数据库中选取与桥梁抗震区所在II类场地规范谱拟合较好8条地震动作为动力分析的地震动,所选择EQ1-EQ8地震动均为短周期($PGV/PGA < 0.2\text{ s}$)近断层脉冲型地震动。如图15所示,以EQ1号波(GOF 160)为例,地震动在速度时程曲线中可见明显速度脉冲。地震动相关数据见表2,图16绘制出8条地震动阻尼比为5%时的加速度反应谱,图17为8条地震动按加速度0.4g调幅后平均反应谱与II

类场地规范谱的对比。所选地震动平均谱短周期时段略小于规范谱, 中长周期时段略大于规范谱, 这在桥梁设计中属于偏保守设计^[16], 保证桥梁地震中不发生破坏。

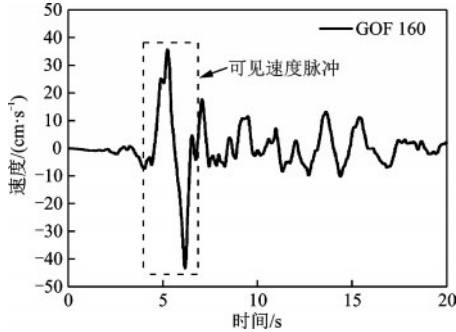


图 15 EQ1地震动速度时程曲线

Fig.15 Time history curve of velocity of EQ1 ground motion

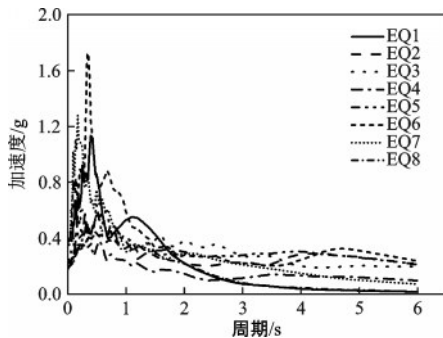


图 16 地震动加速度反应谱

Fig.16 Acceleration response spectrum of ground motions

2.2 地震动输入

进行动力时程分析时, 需要对原地震动记录持时和幅值按照相应的相似关系进行调整, 将 8 组地震动 PGA 均调整为 0.4g 进行输入。

OpenSees 软件可以实现结构的多维地震动力

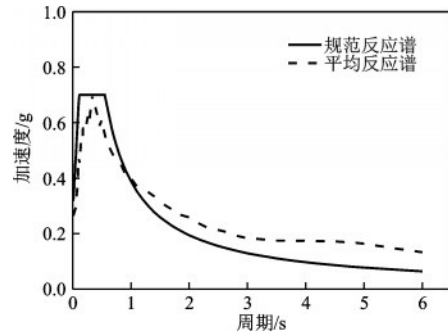


图 17 加速度反应谱对比

Fig.17 Comparison of acceleration response spectrum

分析, 本文只研究桥梁结构纵桥向地震响应, 所以沿桥梁纵桥向施加所选择的地震动。设置桥墩结构的阻尼比为 5%, 结构阻尼矩阵构建采用 Rayleigh 阻尼, 采用能量收敛准则, 积分方法选择 Newmark- β 逐步积分方法。

分析时先进行桥墩恒载重力和上部主梁恒载重力的施加, 单根桥墩重 86 650 kg, 主梁总重 655 330 kg; 而后进行非线性动力时程分析。

3 碰撞作用对桥梁结构的影响

地震作用下主梁振动产生的绝对位移超过伸缩缝的间距时, 主梁就会发生碰撞, 因为本文研究涉及桥梁的碰撞问题, 所以先研究碰撞对桥梁各项性能的影响后研究影响碰撞的因素。以 1989 年 Loma Prieta 地震中在 Gilroy-Historic Bldg 台站测得的地震动记录 GOF 160 波作为输入的地震动, 原始加速度时程如图 18 所示。

将 GOF 160 波的 PGA 调整为 0.4g 沿桥梁纵向输入, 以下分析均为桥梁纵桥向的动力分析结果。

表 2 近断层地震动相关数据

Table 2 Relevant data of near-fault ground motions

地震动序号	RSN	地震名称	发生时间	记录台站	震级	PGA/g	方向
EQ1	764	Loma Prieta	1989	Gilroy-Historic Bldg(GOF160)	6.93	0.285	UP
EQ2	1 480	Chi-Chi_Taiwan	1999	TCU036	7.62	0.137	EW
EQ3	1 482	Chi-Chi_Taiwan	1999	TCU039	7.62	0.197	EW
EQ4	1 486	Chi-Chi_Taiwan	1999	TCU064	7.62	0.142	EW
EQ5	1 548	Chi-Chi_Taiwan	1999	TCU128	7.62	0.144	EW
EQ6	8 606	El Mayor-Cucapah	2010	Westside Elementary School	7.2	0.281	NZ
EQ7	178	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #3	6.53	0.133	UP
EQ8	722	Superstition Hills-02	1987	Kornbloom Road(KRN270)	6.54	0.114	

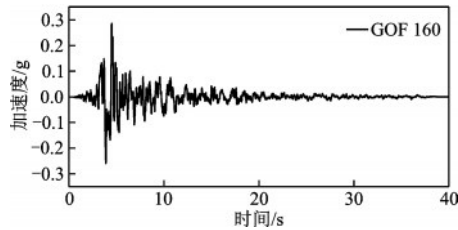


图18 GOF160地震动加速度时程

Fig.18 Time history curve of acceleration of GOF160 ground motion

取伸缩缝初始间距为 20 mm,图 19 给出了地震动激励下桥梁主梁纵桥向的位移响应时程,可以看出没有碰撞时,主梁与桥台各自独立振动,主梁地震中产生了较大的位移,最大达到了 0.45 m。考虑碰撞时,桥梁的震时位移明显减小,最大为 0.28 m,说明主梁和主梁以及主梁和桥台伸缩缝处的碰撞对主梁的位移起到了限制作用。另外,主梁震后的残余位移可以表征地震中主梁所受地震能量的大小,在没有碰撞的情况下,主梁残余位移为 0.015 m,考虑碰撞后主梁残余位移下降为 0.009 m,说明碰撞时桥梁伸缩缝的阻尼特性起到了消能作用,使得主梁所受地震能量减小,震后残余位移减小。

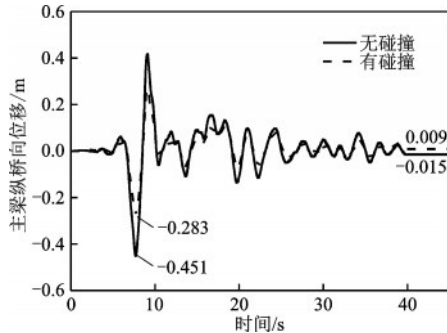


图19 主梁位移时程

Fig.19 Time history curves of displacement of the girder

图 20 给出了主梁中部及左右两边伸缩缝的碰撞力时程。可知,桥梁中部伸缩缝拥有最多的碰撞次数和最大的碰撞力,最大碰撞力达到 10 494 kN,左右两侧伸缩缝的碰撞次数和碰撞力均要小于中缝,最大碰撞力分别为 8 568 kN 和 8 798 kN,这是由于主梁相比于桥台具有更大的质量,中部伸缩缝为两侧具有更大质量的主梁碰撞,同时桥台及填土的振动速度要小于主梁的振动,造成两侧伸缩缝具有更小的碰撞力和更少的碰撞次数。

研究人员指出预制拼装桥墩地震作用下预应力筋预应力的变化,以及桥墩干接缝处的受力对此

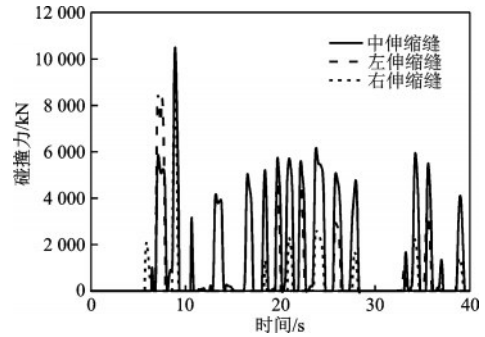


图20 桥梁伸缩缝碰撞力时程

Fig.20 Time history curves of pounding force of the bridge expansion joint

类型桥墩的抗震性能起到至关重要的影响,其中 S1-承台接缝被称作关键接缝区域,是地震中最容易受到损伤的接缝,本文主要研究 S1-承台接缝区受力。

经计算后绘制出桥墩预应力筋应力时程以及 S1-承台接缝竖向压力和水平剪力时程如图 21~23 所示。当桥墩节段接缝张开至截面中心位置时,预应力筋受拉产生预应力的改变,同时受压侧混凝土压应力持续增加,这里定义受拉应力为负值,受压应力为正值。

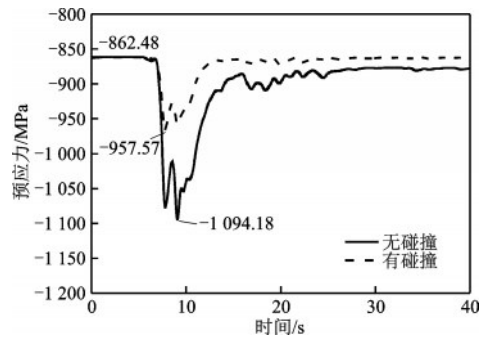


图21 预应力筋应力时程

Fig.21 Time history curves of stress of the prestressed bar

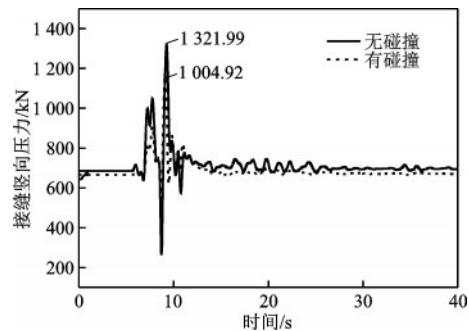


图22 S1-承台接缝竖向压力时程

Fig.22 Time history curves of vertical pressure of S1-base joint

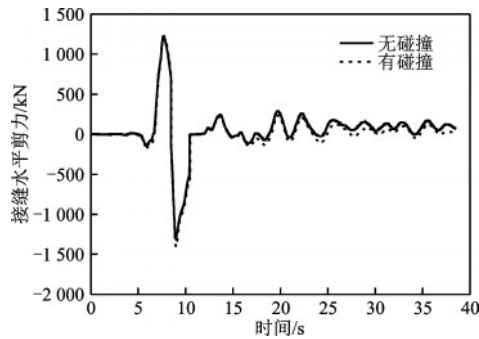


图23 S1-承台接缝水平剪力时程

Fig.23 Time history curves of horizontal shear force of S1-base joint

由图 21 和图 22 可以看出,无碰撞时预应力最大拉应力为 1 094.18 MPa,考虑碰撞时预应力筋最大拉应力减小为 957.57 MPa,减小 12.5%;无碰撞时接缝竖向压力最大值为 1 321.99 kN,考虑碰撞时接缝最大压力减小为 1 004.92 kN,减小 24%。碰撞减小了桥墩预应力筋的最大预应力和接缝最大竖向压力,这对桥墩的抗震是有利的。但从图 23 可以看出,有无碰撞并不能影响接缝水平剪力大小,这是因为干接缝单元模拟方法对接缝剪切滑移和刚性转动的模拟效果欠佳。

4 桥梁结构碰撞影响因素分析

在关于碰撞作用影响因素的研究方面,国内外研究者对桥梁伸缩缝力学性能参数^[8]和桥梁振动特性方面^[9]研究已经初具规模。为了体现预制

拼装桥墩的特殊性,本文研究突出预制拼装桥墩所特有的构造形式对桥梁碰撞作用的影响,研究对象包括节段数目和长度,预应力筋预应力,接缝的刚度。为了使分析结果更具有普遍性和准确性,以下分析数据均取 8 条地震动激励下的平均值进行分析。

4.1 节段数目的影响

节段预制拼装桥墩桥墩的墩身由若干节段组成,墩身节段长度和数目直接影响桥墩地震中的碰撞和耗能。分别建立 5 组不同节段数目的桥墩,桥墩总墩高保持不变,节段数目不同的情况下节段长度也不同,桥墩除节段数和节段长度不同,其他条件均相同。地震动激励下 5 组桥墩节段数目与主梁最大碰撞力关系见图 24,表 3 整理出主梁最大碰撞力、碰撞次数与节段数的关系。

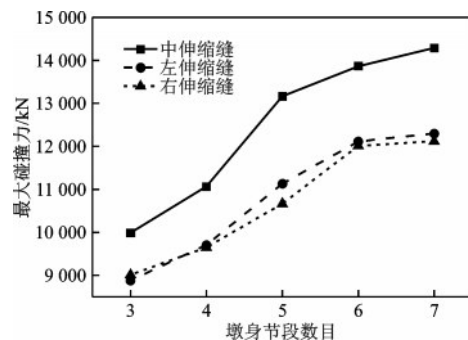


图 24 节段数目对碰撞效应的影响

Fig.24 Influence of number of segments on pounding response

表 3 节段数目对碰撞效应的影响

Table 3 Number of segments effect on pounding response

节段数目	中缝		左边缝		右边缝	
	最大碰撞力/kN	碰撞次数	最大碰撞力/kN	碰撞次数	最大碰撞力/kN	碰撞次数
3	9 987.52	11	8 877.56	5	9 012.56	5
4	11 068.56	15	9 707.20	6	9 651.43	7
5	13 166.56	19	11 133.02	9	10 667.05	10
6	13 866.77	25	12 113.59	12	12 011.57	13
7	14 289.86	26	12 297.86	13	12 119.68	15

从图 24 可以看出,无论是桥梁中间伸缩缝还是两边的伸缩缝,伸缩缝最大碰撞力及碰撞次数都随着节段数目的增加而不断增大,这是因为节段较多且较短时,桥墩拥有更多在摇摆中可以张开的干接缝,接缝的张开降低了桥墩地震中的耗能能力,使得更多的地震能量通过桥墩传递到了上部主梁。

节段数目较少时碰撞力增大较快,节段数目多于 5 个时,碰撞力增大幅度变缓,碰撞力的增大和节段数的增加不符合线性关系。从表 3 可知,6 个节段时主梁中缝、左边缝和右边缝最大碰撞力分别达到 13 866.77 kN、12 113.59 kN 和 12 011.57 kN,比 3 个节段时分别增大 38.8%、36.5% 和 33.3%。

从图 25 可知,在没有碰撞情况下桥墩节段数目和长度对主梁最大位移影响较小,有碰撞后碰撞限制了主梁的位移,节段数越多,碰撞对主梁的位移限制作用越强。

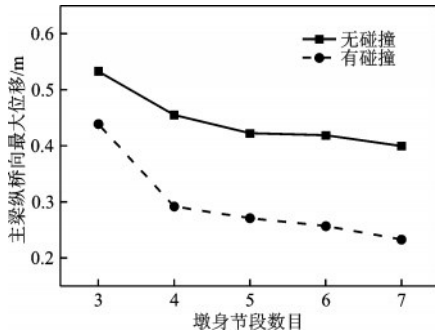


图 25 节段数目对主梁位移的影响

Fig.25 Influence of number of segments on the girder displacement

4.2 初始预应力的影响

预制拼装桥墩节段受到较大的水平向地震力,桥墩节段接缝处受拉侧边缘混凝土应力变为零时接缝开始张开,如图 26 所示,此时预应力筋会发生拉伸,预应力增大,当上部结构恒载确定后,初始预应力的将直接决定桥墩所受轴压比的大小和接缝在地震中的张开情况,进而影响上部主梁的碰撞。分别建立 4 组具有不同初始预应力的桥墩,桥墩除初始预应力不同其他条件均相同。地震动激

励下 4 组桥墩初始预应力与主梁最大碰撞力关系如图 27 所示,表 4 整理出主梁最大碰撞力、碰撞次数与初始预应力的关系。

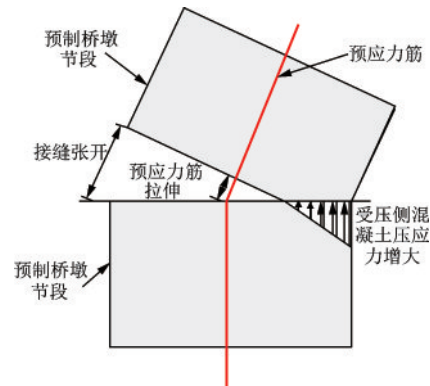


图 26 接缝张开及预应力筋拉伸

Fig.26 Joint opening and tension of the prestressed bar

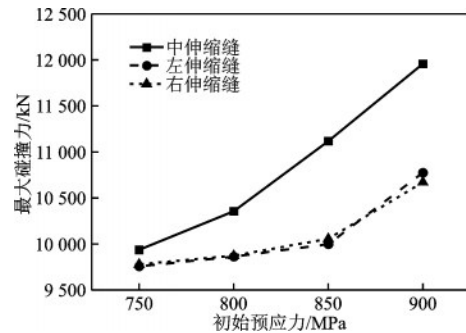


图 27 初始预应力对碰撞效应的影响

Fig.27 Influence of initial prestressed force on the pounding effect

表 4 初始预应力对碰撞效应的影响

Table 4 Influence of initial prestressed force on the pounding effect

初始预应力/MPa	中缝		左边缝		右边缝	
	最大碰撞力/kN	碰撞次数	最大碰撞力/kN	碰撞次数	最大碰撞力/kN	碰撞次数
750	9 935.26	11	9 755.34	6	9 777.43	5
800	10 355.48	13	9 862.56	7	9 872.35	6
850	11 117.62	16	9 998.22	7	10 055.33	8
900	11 957.96	17	10 775.36	9	10 669.25	8

从图 27 可以看出,无论是桥梁中间伸缩缝还是两边的伸缩缝,伸缩缝最大碰撞力及碰撞次数都随着初始预应力的增加而不断增大,这是因为此类型桥墩侧向承载力主要依靠预应力轴压和接缝摩擦提供,增大初始预应力桥墩地震中会遭受更大的侧向荷载,传递到上部主梁的力随之增大。随初始预应力的不断增大,主梁碰撞力增加幅度提高,从表 4 可知初始预应力为 850 MPa 时主梁中缝、左边缝和

右边缝最大碰撞力分别达到 11 117.62 kN、9 998.22 kN 和 10 055.33 kN,比 750 MPa 时分别增大 11.9%、2.49% 和 2.84%,总体来看初始预应力对碰撞影响相对较小。

4.3 接缝刚度的影响

预制拼装桥墩墩身节段与节段间出现干接缝,干接缝区域的刚度决定了桥墩的总体刚度,模拟干

接缝区域是采用自己定义的干接缝单元模型,其接缝刚度主要取决于ENT材料的弹性模量的定义,将公式(1)进行变形引入控制接缝刚度的系数 δ ,公式变形为:

$$E_{en} = \frac{5E_c A}{LD} \delta \quad (5)$$

式中, δ 的物理意义在于控制接缝的刚度和张开量, δ 增大时干接缝单元ENT材料的弹性模量增大,单元刚度增大,接缝张开量减小^[17]。

讨论 δ 取值范围对桥梁碰撞作用的影响,并通过计算对比给出适合干接缝单元 δ 的取值范围,经过与拟静力试验结果对比初步拟定 δ 取值范围为0.5~1.5。分别建立10组具有不同 δ 取值的桥墩,桥墩除接缝不同,其他条件均相同。地震动激励下10组桥墩 δ 取值与主梁最大碰撞力关系绘制于图28中。

从图28可以看出,随着 δ 由0.5增大为1.5,桥梁最大碰撞力不断减小,这是因为ENT单元受力变形性能类似于弹簧,力与变形符合胡克定律,桥墩遭受到相同PGA的地震激励时,桥墩干接缝刚度增大,在摇摆状态下接缝张开量将减小,使得桥墩拥有更多混凝土损伤带来的能量耗散,传递到上部主梁的能量减小。另外,从图28中仍可得到, δ 取值0.9~1.3时,桥梁最大碰撞力变化较为稳定,说明本文干接缝单元 δ 取值0.9~1.3较为合适。

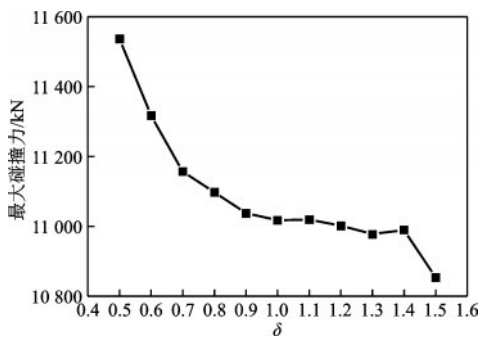


图28 δ 取值对碰撞效应的影响
Fig.28 Influence of δ values on the pounding effect

输出桥墩S1-承台接缝在地震激励下的能量耗散如图29所示。在较小的侧移幅值下不同 δ 取值的桥墩接缝耗能能力相当,但随着侧移幅值的增大,具有更大 δ 值的桥墩接缝表现出更强的耗能能力,进一步验证了图27中的结论。

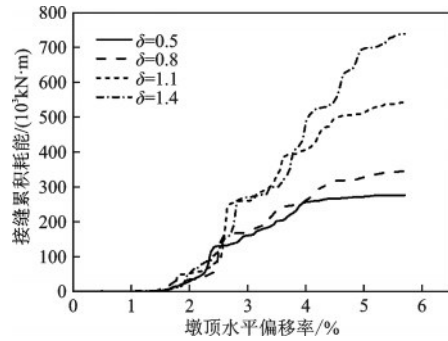


图29 δ 取值对接缝耗能能力的影响
Fig.29 Influence of δ values on joint energy dissipation

5 结 论

研究近断层地震激励下预制拼装桥墩桥梁结构的碰撞作用及碰撞影响因素,选取实际工程中的一座桥梁作为算例,基于OpenSees有限元软件建立考虑碰撞效应的桥梁模型,选取8条近断层脉冲型地震动对桥梁结构进行动力时程分析,得出结论如下:

(1)近断层地震动下桥梁碰撞效应可以减小预制拼装桥墩桥梁震时的最大位移和震后的残余位移,碰撞效应可以减小下部预制拼装桥墩地震中预应力筋的最大预应力、接缝最大竖向压力,对桥墩起到保护作用,但不能改变接缝水平剪力的大小。碰撞主要发生于桥梁中部伸缩缝处,中部伸缩缝碰撞力和碰撞次数均明显大于两侧边伸缩缝。

(2)增加预制拼装桥墩的节段数目可以减小桥梁的震时最大位移,但会增大桥梁的碰撞力和碰撞次数,其中6个节段时主梁中缝、左边缝和右边缝最大碰撞力比3个节段时分别增大约38.8%、36.5%和33.3%,桥墩设计时合理选择节段数目和长度较为重要。

(3)桥墩初始预应力的对桥梁碰撞效应影响较小,其中初始预应力为850 Mpa时主梁中缝、左边缝和右边缝最大碰撞力比750 MPa时仅增大约11.9%、2.49%和2.84%。

(4)文中引入的系数 δ 可以有效控制桥墩干接缝的刚度, δ 增大时桥墩接缝刚度增大,接缝张开量减小,桥墩接缝耗能能力增强,上部碰撞效应碰撞力减小,经过计算本文干接缝单元 δ 取值在0.9~1.3

范围内时较为合适。

参考文献:

- [1] Ou Y C, Wang P H, Tsai M S, et al. Large-scale experimental study of precast segmental unbonded posttensioned concrete bridge columns for seismic regions[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 136(3): 255-264.
- [2] Ou Y C, Tsai M S, Chang K C, et al. Cyclic behavior of precast segmental concrete bridge columns with high performance or conventional steel reinforcing bars as energy dissipation bars [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 39(11): 1181-1198.
- [3] Hassanli R, Youssf O, Mills J E. Seismic performance of precast posttensioned segmental FRP-confined and unconfined crumb rubber concrete columns[J]. Journal of Composites for Construction, 2017, 21(4): 04017006.
- [4] ElGawady M A, Sha'lan A. Seismic behavior of self-centering precast segmental bridge bents[J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 16(3): 328-339.
- [5] Motaref S, Saïdi M S, Sanders D. Shake table studies of energy-dissipating segmental bridge columns [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 19(2): 186-199.
- [6] Sideris P, Aref A J, Filiatrault A. Large-scale seismic testing of a hybrid sliding-rocking posttensioned segmental bridge system[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(6): 04014025.
- [7] Zhao L, Bi K, Hao H, et al. Numerical studies on the seismic responses of bridge structures with precast segmental columns [J]. Engineering Structures, 2017, 151: 568-583.
- [8] Desroches R, Muthukumar S. Effect of pounding and restrainers on seismic response of multiple-frame bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(7): 860-869.
- [9] 王军文,李建中,范立础.连续梁桥纵向地震碰撞反应参数研究[J].中国公路学报,2005(4):42-47.
Wang J W, Li J Z, Fan L C. Parametric study of longitudinal seismic pounding response for continuous girder bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005(4): 42-71. (in Chinese)
- [10] 贾宏宇,杜修力,李兰平,等.地震作用下梁体碰撞间隙宽度的概率分析方法[J].工程力学,2018,35(8): 39-45.
- [11] Jia H Y, Du X L, Li L P, et al. Probability analysis of pounding separation distance of bridges subjected to earthquake excitations [J]. Engineering mechanics, 2018,35(8):39-45. (in Chinese)
- [12] Bu Z Y, Ou Y C, Song J W, et al. Cyclic loading test of unbonded and bonded posttensioned precast segmental bridge columns with circular section [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 21(2): 04015043.
- [13] Blakely R W G, Park R. Prestressed concrete sections with cyclic flexure [J]. Journal of the Structural Division, 1973, 99(8): 1717-1742.
- [14] Meneuotto M, Pinto P E. Method of analysis for cyclically loaded R. C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending [C] //Proceedings of IARSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering, 1973:15-22.
- [15] Zaghi A E. Seismic design of pipe-pin connections in concrete bridges [M]. Reno: University of Nevada, 2009.
- [16] 王东升,冯启民,王国新.基于直杆共轴碰撞理论的桥梁地震反应邻梁碰撞分析模型[J].工程力学,2004(2):157-166.
Wang D S, Feng Q M, Wang G X. Analysis model of pounding between adjacent bridge girders during earthquakes based on collinear impact between rods [J]. Engineering Mechanics, 2004(2): 157-166. (in Chinese)
- [17] 石岩,王东升,孙治国.基于位移的中等跨径减隔震桥梁抗震设计方法[J].中国公路学报,2016,29(2): 71-81.
Shi Y, Wang D S, Sun Z G. Displacement-based seismic design method for medium span bridges with seismic isolation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016,29(2): 71-81. (in Chinese)
- [18] 司炳君,谷明洋,孙治国,等.近断层地震动下摇摆-自复位桥墩地震反应分析[J].工程力学,2017,34(10): 87-97.
Si B J, Gu M Y, Sun Z G, et al. Seismic response analysis of the rocking self-centering bridge piers under the near-fault ground motions [J]. Engineering Mechanics, 2017,34(10): 87-97. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)