

引用本文:赵建锋,孟庆一,薛振兴,等.基于不同隔震体系的预制拼装桥墩桥梁结构地震响应分析[J].建筑科学与工程学报,2020,37(4):97-107.  
ZHAO Jian-feng, MENG Qing-yi, XUE Zhen-xing, et al. Seismic Response Analysis of Bridge Structures with Precast Segmental Bridge Piers Based on Different Isolation Systems[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 97-107.

DOI:10.19815/j.jace.2019.09054

# 基于不同隔震体系的预制拼装桥墩桥梁结构 地震响应分析

赵建锋, 孟庆一, 薛振兴, 刘雪飞

(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘要:**为了研究预制拼装桥墩桥梁结构的地震响应,基于 OpenSEES 有限元分析软件建立墩顶隔震和墩底隔震的预制拼装桥墩连续梁桥分析模型;通过分析桥梁模型在 3 组不同强度、不同特性地震动激励下的动力特性、位移、内力、残余位移、预应力筋预应力、接缝压力等参数的变化,对隔震体系的隔震效果进行评估并给出了墩底隔震桥梁的设计建议。结果表明:预制拼装桥墩连续梁桥采用墩顶隔震体系和墩底隔震体系均可以大幅减小桥梁在地震中的位移和内力,延长桥梁自振周期;采用墩梁固接、墩底隔震的桥梁结构相比于直接采用隔震支座连接墩梁的桥梁结构具有更长的自振周期、更小的震中位移和墩顶残余位移,表现出更好的隔震效果,在大地震中墩底隔震体系隔震优势更加明显;采用墩底隔震体系的桥梁预制拼装桥墩会有更大的预应力变化、预应力损失和接缝竖向压力,因此隔震支座也应具备更高的性能。

**关键词:**桥梁抗震;预制拼装桥墩;桥梁结构;隔震体系;动力时程分析

**中图分类号:** TU352.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-2049(2020)04-0097-11

## Seismic Response Analysis of Bridge Structures with Precast Segmental Bridge Piers Based on Different Isolation Systems

ZHAO Jian-feng, MENG Qing-yi, XUE Zhen-xing, LIU Xue-fei

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China)

**Abstract:** In order to study the seismic responses of bridge structures with precast segmental bridge piers, based on OpenSEES finite element analysis software, the analysis models of continuous beam bridge with precast segmental bridge piers with top isolation and bottom isolation were established. The isolation effect of the isolated systems was evaluated by analyzing the dynamic characteristics, displacement, internal force, residual displacement, prestress of prestressed bar and joint pressure of the bridge model under three groups of ground motions with different intensities and characteristics. At the same time, suggestions for the design of pier bottom isolation bridges were put forward. The results show that both pier top isolation system and pier bottom isolation system can greatly reduce the displacement and internal force of the bridge in earthquake and prolong the natural vibration period of the bridge. The bridge structure

收稿日期:2019-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51778314)

作者简介:赵建锋(1976-),男,河南叶县人,副教授,工学博士,E-mail:zhaojf@bjut.edu.cn。

with pier-beam consolidation and pier base isolation has longer natural vibration period, smaller epicenter displacement and residual displacement of pier top, which shows more superior isolation effect, the isolation advantage of pier base isolation system is more obvious in large earthquake. However, the precast segmental bridge pier in the bridge with base isolation system will have greater prestressed force change, prestressed force loss and joint vertical compressive force, and the isolation bearing should also have higher performance.

**Key words:** seismic resistance of bridge; precast segmental bridge pier; bridge structure; isolation system; dynamic time history analysis

## 0 引言

近年来,世界各地大地震频发,导致许多桥梁结构出现严重的破坏且短期内不易修复<sup>[1]</sup>。桥梁结构作为交通运输中的枢纽环节,一旦在地震中遭到破坏,势必会引起交通的瘫痪从而影响震后的救援工作,间接造成更大的人员伤亡和经济损失。随着桥梁抗震学科的发展,桥梁抗震设计理念从基于性能开始向基于可恢复抗震设计方法转变<sup>[2]</sup>。

与延性结构抗震相比,隔震体系表现出优越的抗震性能和震后快速恢复能力,逐渐在桥梁抗震中得到应用。在隔震桥梁的研究中,1995 年日本的阪神-淡路大地震后,重建的 Benten 高架桥采用了墩底隔震技术,极大地提高了结构整体的抗震性能<sup>[3]</sup>。李曙光<sup>[4]</sup>以某简支变连续的桥梁为例,使用 NBA 程序对桥梁采用墩顶隔震和墩底隔震 2 种形式进行了计算评估,结果表明墩底隔震体系比墩顶隔震体系更能够有效延长桥梁的基本周期和降低桥梁的地震反应。

目前桥梁隔震技术和工程实践已较为广泛<sup>[5-7]</sup>,但传统的桥梁结构体系桥墩多为整体现浇构造;相比于整体现浇桥墩,预制拼装构造形式的桥墩具有施工速度快、自复位能力强、震后残余位移小的优点,将成为未来抗震区桥梁下部结构应用的趋势。在预制拼装桥墩桥梁抗震方面的研究多以单墩为主,例如王志强等<sup>[8-9]</sup>通过对预制拼装桥墩进行拟静力加载试验和振动台试验发现,此类型桥墩地震中耗能能力不足,塑性铰节段受损严重,但桥墩自复位能力强、残余位移小的性能使桥墩具有较好的震后可恢复性,另外可以通过外加耗能连接装置提高桥墩的耗能,减小桥墩损伤。Roh 等<sup>[10]</sup>在基础与桥墩节段之间设置形状记忆合金(SMA)作为耗能减震装置,发现其可以提高桥墩的抗震性能。Elgawady 等<sup>[11]</sup>在预制拼装桥墩墩底节段与承台之间设置氯丁橡胶支座,发现橡胶支座可以减小桥墩在地震中

的预应力损失并延长桥墩的自振周期,进而增大桥墩在地震中的位移需求。Motaref<sup>[12]</sup>在预制拼装桥墩墩底节段与基础之间设置橡胶隔震垫支座,对桥墩进行拟静力加载试验,研究表明墩底设置橡胶隔震支座可以显著提高桥墩的延性和滞回耗能,但并没有对隔震支座的隔震性能进行研究。预制拼装桥墩成桥后研究很少,Zhao 等<sup>[13]</sup>基于 OpenSEES 建立了整体现浇桥墩整桥和预制拼装桥墩整桥 2 种分析模型,对 2 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。现阶段缺乏对预制拼装桥墩成桥之后的研究工作,对于预制拼装桥墩隔震桥梁的研究开展工作也较少。

鉴于国内外在预制拼装桥墩连续梁桥隔震研究方面仍存在不足,本文以一座 20 m+30 m+20 m 的预制拼装桥墩三跨连续梁桥作为算例,基于美国加州大学伯克利分校开发的有限元计算软件 OpenSEES 分别建立墩顶和墩底设置铅芯橡胶支座的预制拼装桥墩连续梁桥 2D 模型,选取地震动记录,对桥墩模型进行非线性动力时程分析,通过分析桥梁的地震响应来评价隔震效果,为预制拼装桥墩连续梁桥隔震设计提供参考。

## 1 铅芯橡胶支座的模拟

### 1.1 铅芯橡胶支座模型

铅芯橡胶支座是一种在支座中加入铅芯或铅棒,使得原有橡胶支座阻尼特性得到改善的一种抗震支座。当支座发生剪切变形时钢板和橡胶把铅芯紧紧裹住,迫使铅芯发生塑性剪切变形,铅芯和橡胶具有的恢复力改变了支座原有的滞回曲线,支座会拥有较大的滞回耗能能力,所以该类型支座在桥梁抗震中得到广泛应用。

目前用于分析铅芯橡胶支座的模型主要有:双线性滞回模型和圆滑的 Bouc-Wen 模型<sup>[14]</sup>。此次模拟选取双线性滞回模型作为铅芯橡胶支座的恢复

力模型,其力-位移曲线如图 1 所示。

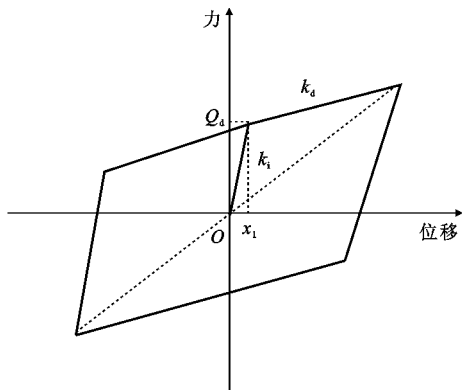


图 1 铅芯橡胶支座的力-位移曲线

Fig. 1 Force-displacement Curve of Lead Rubber Cushion

双线性恢复力  $F$  表达式如下

$$F = \begin{cases} k_i x & x \leq x_1 \\ k_d x - k_d x_1 + Q_d & x > x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $k_i$  为初始刚度(1 阶刚度);  $k_d$  为屈服后刚度(2 阶刚度);  $Q_d$  为屈服强度。

### 1.2 铅芯橡胶支座的模拟

OpenSEES 具有大量其他有限元软件所不具有的支座模拟模型,并拥有多种模拟铅芯橡胶支座的方法,为了模拟方便,多将支座的力学性能进行简化,简化后双线性滞回模型可以采用零长度单元配合 Steel01 模型模拟,也可以采用专门模拟橡胶弹性支座的单元模拟(例如 Elastomeric Bearing 单元等)。本文采用第 1 种方法在桥墩墩顶和墩底设置零长度单元配合 Steel01 模型模拟铅芯橡胶支座。

Steel01 模型可用来模拟铅芯橡胶支座是因为 Steel01 模型滞回性能与双线性模型极为相似,如图 2 所示。往复荷载下应力-应变曲线由弹性段和强化段组成<sup>[15]</sup>,用 OpenSEES 进行材料设定时,Steel01 材料命令流中对钢筋屈服应力  $f_y$ 、钢筋初始弹性模量  $E_0$  和屈服后模量  $E_p$  的定义<sup>[16]</sup>,分别对应于铅芯橡胶支座双线性模型中屈服强度、1 阶刚度和 2 阶刚度。

## 2 桥墩纤维模型及桥梁算例

### 2.1 桥墩纤维模型的建立及验证

布占宇等<sup>[17]</sup>对 3 个缩尺比为 1 : 3.5 的圆形截面墩柱试件进行了循环加载试验,探究了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。本研究选取其中的试件 2 作为预制拼装桥墩纤维有限元模型的原型,利用 OpenSEES 有限元软件建立与试件 2 相同的纤维桥墩模型,桥墩构造如图

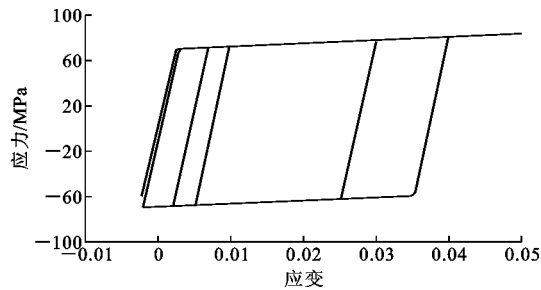


图 2 Steel01 模型应力-应变关系

Fig. 2 Stress-strain Relationship of Steel01 Model

3 所示,桥墩混凝土和钢筋材料参数见文献[17],对应的桥墩有限元模型如图 4 所示。

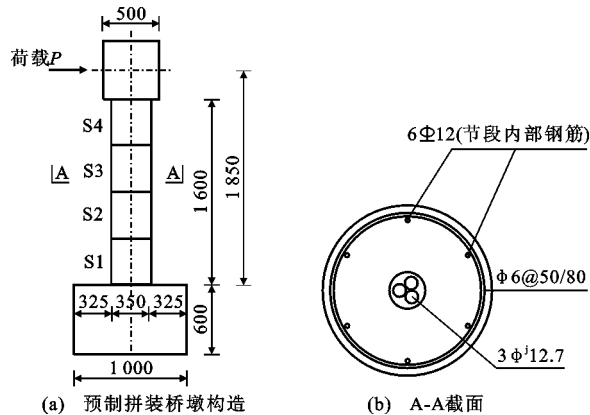


图 3 文献[17]试件 2 的立面构造及横截面(单位:mm)

Fig. 3 Elevation Structure and Cross Section of Specimen 2 in Literature [17] (Unit:mm)

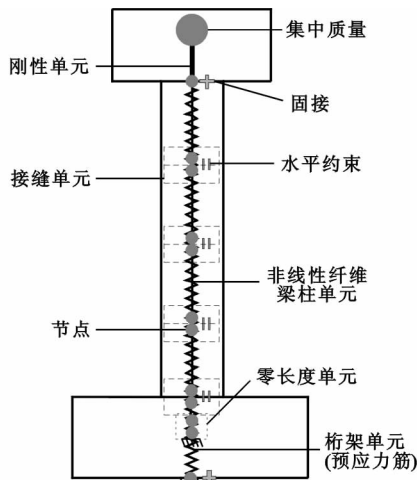


图 4 桥墩有限元模型

Fig. 4 Finite Element Model of Pier

桥墩的每个节段均为普通的钢筋混凝土节段,采用基于柔度法的纤维单元 Nonlinear Beam-Column 模拟,并考虑竖向弯曲产生的荷载-位移( $P-\Delta$ )效应。混凝土采用基于 Kent-Scott-Park 本构的 Concrete01 模型<sup>[18]</sup>,节段纵筋和箍筋均采用基于

Giuffre-Mnegotto-Pinto 本构的 Steel02 模型<sup>[19]</sup>。

预应力筋单元采用 Corotaional Truss(桁架)单元模拟,预应力筋的顶节点和墩顶节点以及预应力筋底节点与承台底节点 3 个方向自由度全部约束,为模拟预应力筋的无黏结,中间节点与相应墩身节点约束水平面内 2 个平动自由度,竖向自由度放松。初始预应力通过定义初始应变的方式施加。

预制拼装桥墩干接缝区域采用笔者重新定义的干接缝单元进行模拟,干接缝单元模型如图 5 所示,干接缝单元两端采用零长度单元配合 ENT 材料,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)。零长度单元两端 2 个节点坐标相同,两节点之间用 ENT 材料连接,接缝处中部两节点之间没有连接材料。

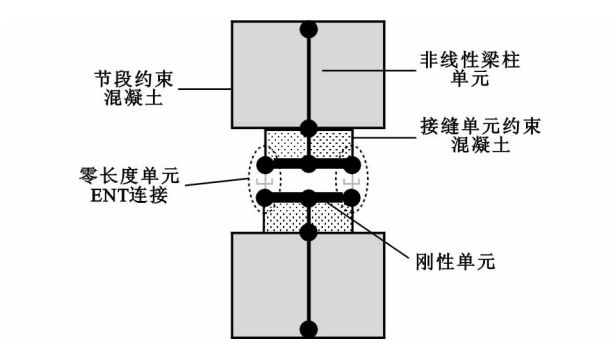


图 5 干接缝单元模型  
Fig. 5 Dry Joint Element Model

图 6 给出了桥墩纤维模型模拟计算结果与试验结果水平荷载-位移滞回曲线的对比情况。从图 6 可以看出,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。

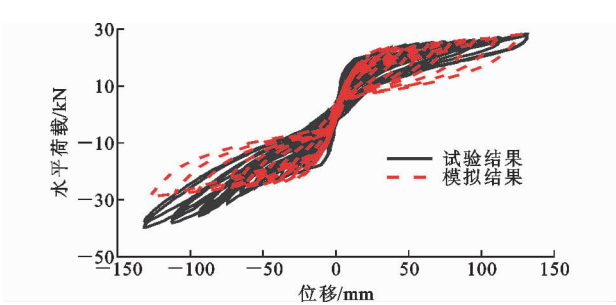


图 6 水平荷载-位移滞回曲线  
Fig. 6 Horizontal Load-displacement Hysteresis Curves

2.2 桥梁算例概况

在之前桥墩纤维模型模拟方法的基础上,通过

OpenSEES 建立一座三跨预制拼装桥墩隔震连续梁桥 2D 模型作为非线性动力时程分析的桥梁模型<sup>[13]</sup>。桥梁左右两跨长均为 20 m,中跨长 30 m,三跨一联,结构整体布置如图 7 所示。

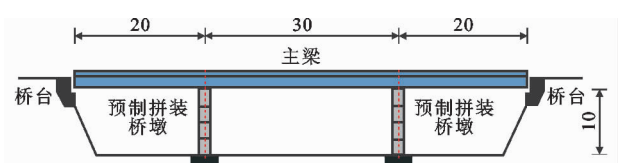


图 7 桥梁结构整体布置(单位:m)  
Fig. 7 General Arrangement of Bridge Structure(Unit:m)

桥梁主梁采用单箱单室箱型截面,箱梁高 1.8 m,顶板宽 8.4 m,底板宽 4.5 m,横截面尺寸如图 8 所示。桥墩采用节段预制拼装形式的实心墩,墩高 10 m,共分为 4 个节段,每个节段高 2.5 m,承台高 1 m,桥墩整体构造和节段横截面见图 9。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。

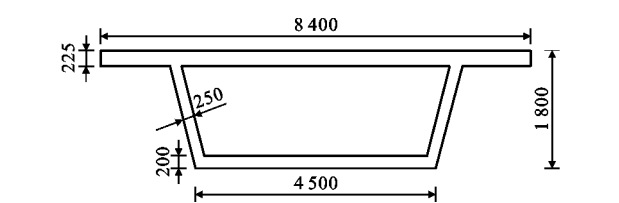


图 8 主梁横截面尺寸(单位:mm)  
Fig. 8 Cross Section Size of Girder (Unit:mm)

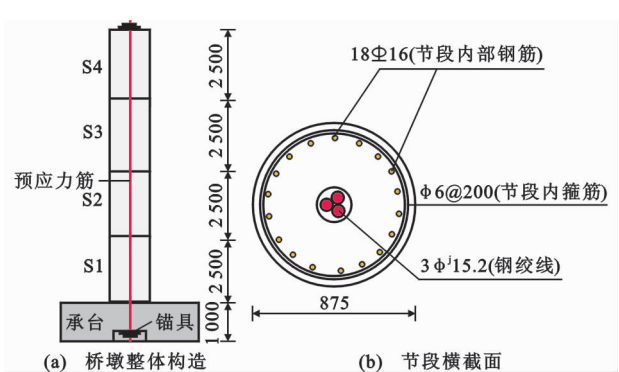


图 9 桥墩构造(单位:mm)  
Fig. 9 Structure of Bridge Pier (Unit:mm)

墩顶隔震体系桥墩的构造如图 10(a)所示,桥墩在上部主梁和桥墩盖梁之间设置铅芯橡胶支座,支座通过螺栓分别锚固在主梁底部和桥墩顶部,预应力筋穿过支座中部孔道,上部锚固在箱梁底板上,下部锚固在承台底部,节段纵筋不穿过支座。

墩底隔震体系桥墩的构造如图 10(b)所示,桥墩在底节段(S1 节段)和承台之间设置铅芯橡胶支座,支座通过螺栓分别锚固在桥墩底节段底部和承

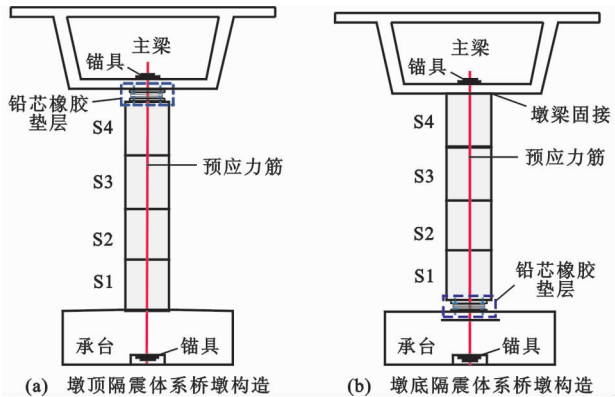


图 10 不同隔震体系桥墩构造

Fig. 10 Structure of Bridge Pier with Different Isolation Systems

台顶部,预应力筋穿过支座中部孔道,上部锚固在箱梁底板上,下部锚固在承台底部,节段纵筋不穿过支座。

2.3 桥梁模型的建立

采用 OpenSEES 建立的非隔震桥梁有限元模型如图 11(a)所示,墩顶隔震桥梁有限元模型如图 11(b)所示,墩底隔震桥梁有限元模型如图 11(c)所示。

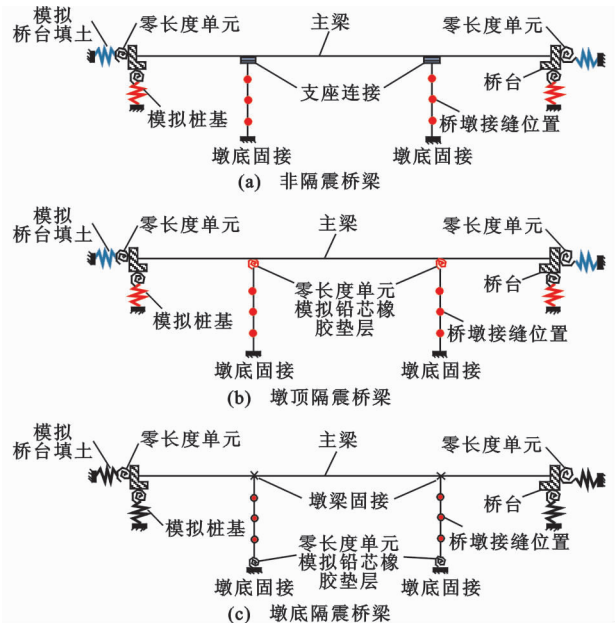


图 11 不同体系桥梁有限元模型

Fig. 11 Finite Element Models of Bridges with Different Systems

桥梁模型中主梁采用 Elastic Beam-Column 单元模拟,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,墩底固接。模型考虑桥台填土及桩基对桥墩结构的影

表 1 主梁计算参数

Tab. 1 Calculation Parameters of Girder

截面面积	弹性模量	剪切模量	扭转矩	惯性矩	泊松比
$A/\text{m}^2$	$E/10^7 \text{ MPa}$	$G/10^6 \text{ MPa}$	$J/\text{m}^4$	$I_x/\text{m}^4$	
4.59	3.25	2.35	3.65	3.11	0.3

响,但不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<sup>[11]</sup>;桥台填土采用零长度单元配合 Elastic-perfectly Plastic Gap 材料模拟,模拟缝隙长度取为 0,弹簧初始刚度为  $200\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ,极限力为  $10\,000 \text{ kN}$ ;桩基础由 24 根桩组成,采用零长度单元配合 Elastic-perfectly Plastic 材料模拟,考虑桩周土的作用,弹簧极限力为  $4\,000 \text{ kN}$ 。2 种材料的本构力-位移曲线如图 12 所示。

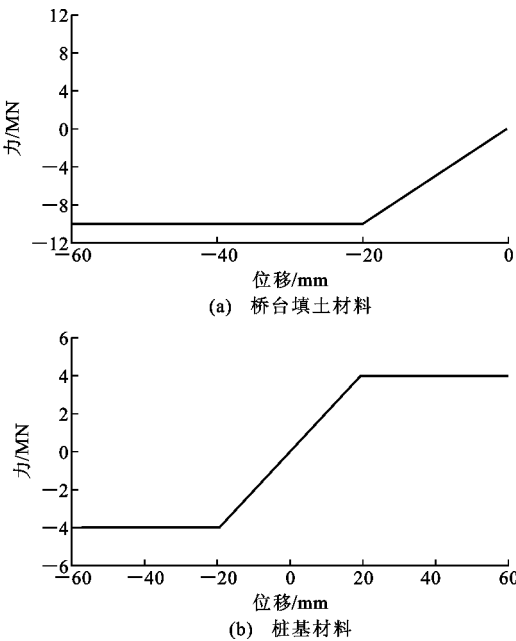


图 12 桥台填土和桩基材料力-位移曲线

Fig. 12 Force-displacement Curves of Embankment Fill Soil and Pile Materials

2.4 铅芯橡胶支座的选取及隔震桥梁模拟

铅芯橡胶支座的选取可以根据《公路桥梁铅芯隔震橡胶支座》(JT/T 822—2011)初步选择适合本桥型的铅芯橡胶支座,支座尺寸和力学参数应符合下面 3 条规定<sup>[20]</sup>。

(1)竖向承载力要求:

$$F' \geq k(1.2F_{DL} + 1.4F_{LL}) \quad (2)$$

式中: $F'$ 为减隔震规范中支座的竖向承载力; $k$ 为安全系数,本文取 1.5; $F_{DL}$ , $F_{LL}$ 分别为上部结构的恒载和活载。

(2)水平恢复力要求:支座屈服力应大于桥梁制动力。

(3) 支座与桥墩的刚度要求: 选取的减隔震支座应保证在地震中发生较大的位移变形, 最大限度消耗地震能量, 中国抗震规范建议隔震度在 2 或 2.5 以上, 隔震度为桥梁采用隔震支座和全桥支座视为

铰接的基本周期之比。  
经过初步计算, 选择桥梁隔震支座中的 LRB600 支座<sup>[14]</sup>作为本次模拟的支座, 支座相关参数见表 2。

表 2 LRB600 支座参数  
Tab. 2 Parameters of LRB600 Cushion

1 阶刚度 $k_1/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	2 阶刚度 $k_d/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	屈服强度 $Q_d/\text{Pa}$	屈服位移 $x_1/\text{mm}$	硬化位移 $x_2/\text{mm}$	垂直刚度 $/( \text{kN} \cdot \text{mm}^{-1} )$
12 545	965	132 000	10. 522	275	3 211

在不同隔震形式的模拟方面:  
(1) 非隔震桥梁支座采用 GYZ600 普通板式橡胶支座, 在墩顶利用 Elastomeric Bearing 单元模拟, 支座连接墩顶和主梁。  
(2) 墩顶隔震桥梁隔震支座采用 LRB600 支座, 在墩顶利用零长度单元配合 Steel01 模型模拟, 支座连接墩顶和主梁。  
(3) 墩底隔震桥梁隔震支座采用 LRB600 支座, 在墩底利用零长度单元配合 Steel01 模型模拟, 为防止主梁横桥向产生过大变形, 桥墩与上部主梁固接成整体, 形成框架体系共同受力。

3 地震动的选取及输入

3.1 地震动选取

在进行结构动力分析时, 地震动的选取是十分重要的, 根据中国《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011) 和《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008) 中的规定, 需要选取 2 条天然地震动和 1 条人工地震动进行动力分析。桥梁抗震设防烈度为Ⅷ度, Ⅱ类场地, 设计基本加速度为 0. 4g ( $g$  为重力加速度)。因此从美国太平洋地震工程研究中心 (PEER) 数据库中选取 3 组地震动记录作为本次动力时程分析的地震, 其中包括近断层地震动 (Tabas 波) 和远场地震动 (Taft 波) 以及人工地震动 (兰州波), 地震动场地类别均为Ⅱ类场地, 持时均小于 60 s, 分析时选取地震动拥有最大地震动峰值加速度 (PGA) 的方向, 地震动相关数据如表 3 所示, 3 组地震动加速度反应谱如图 13 所示。

表 3 地震动相关数据  
Tab. 3 Earthquake-related Data

地震名称	发生时间	记录台站	持时/s	峰值加速度 (水平)	场地类别
Tabas, Iran	1978 年	Tabas	33. 00	0. 85g	Ⅱ
Kern Country	1952 年	Taft	54. 16	0. 18g	Ⅱ
兰州波		人工生成	20. 00	0. 20g	Ⅱ

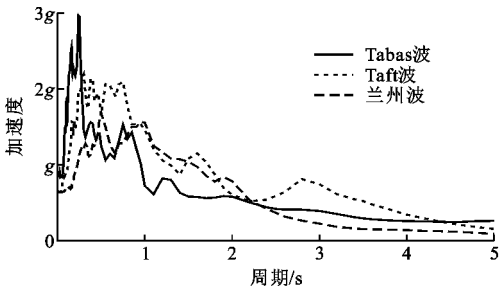


图 13 地震动加速度反应谱  
Fig. 13 Response Spectrum of Ground Motion Acceleration  
3.2 地震动输入

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 3 组地震动峰值加速度依次调整为小震 0. 2g、中震 0. 4g、大震 0. 6g 进行输入, 以研究不同地震动强度下桥梁隔震结构的隔震效果。

通过 OpenSEES 软件定义相关命令流可以对结构进行多维地震分析, 由于本文模拟铅芯橡胶支座为水平 X 向铅芯橡胶支座, 所以按 X 方向 (系统 1 方向) 对桥梁结构施加所选择的地震动。阻尼采用 Rayleigh 阻尼, 设置桥墩结构的阻尼比为 5%, 采用能量收敛准则和 Newmark- $\beta$  积分方法。

分析时先进行桥墩重力和上部主梁重力的施加, 单根桥墩质量为 59 000 kg, 主梁总质量为 320 000 kg; 而后进行非线性动力时程分析。

4 预制拼装桥墩隔震连续梁桥地震响应分析

4.1 桥梁动力特性分析

为探究不同隔震形式对桥梁结构动力特性的影响, 在动力分析前利用 OpenSEES 对不同隔震体系的桥梁进行模态分析。

OpenSEES 无法直接计算桥墩的自振频率  $\omega$  和周期  $T$ , 而是通过给出结构模态特征值  $\lambda$ , 再利用公式  $T=2\pi/\omega$  计算得出, 其中  $\lambda=\omega^2$ ; 变换后可得  $T=2\pi/\sqrt{\lambda}$ , 模态分析得出各组桥梁模型动力特性, 见表 4。

表 4 桥梁模型动力特性

Tab. 4 Dynamic Characteristics of Bridge Model

阶次	无隔震桥梁		墩顶隔震桥梁		墩底隔震桥梁		$T_1/T_0$	$T_2/T_0$
	$\lambda$	$T_0/s$	$\lambda$	$T_1/s$	$\lambda$	$T_2/s$		
1	24.438	1.271	8.556	2.148	6.429	2.477	1.69	1.95
2	30.377	1.140	9.589	2.029	6.572	2.451	1.78	2.15
3	30.753	1.133	11.724	1.835	10.040	1.983	1.62	1.75
4	32.865	1.096	14.607	1.644	12.995	1.743	1.50	1.59
5	39.321	1.002	16.798	1.533	13.612	1.703	1.53	1.70

注： $T_0$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  分别为无隔震桥梁、墩顶隔震桥梁、墩底隔震桥梁的自振周期。

由表 4 可知,采用铅芯橡胶支座进行隔震可以延长桥梁的自振周期,墩顶隔震体系桥梁自振周期最大为无隔震时的 1.78 倍,墩底隔震体系桥梁自振周期最大为无隔震时的 2.15 倍,显然墩底隔震体系使得桥梁结构具有更长的自振周期。墩顶隔震和墩底隔震桥梁前 5 阶自振周期均大于 1.5 s,这使得地震中的桥梁在振动时能有效避开地震的卓越周期,避免了高频地震带来的损伤。

4.2 桥梁位移响应分析

由于铅芯橡胶支座具有较小的水平刚度,导致加入铅芯橡胶支座后墩底隔震桥墩地震响应增大,采用绝对位移无法评价铅芯橡胶支座的隔震效果。因此墩底隔震桥梁使用墩顶(主梁)节点的绝对位移与铅芯橡胶支座顶部节点的绝对位移之差(相对位移)作为位移响应评判指标,来评价桥梁结构的隔震效果。

3 组地震动激励下隔震桥梁模型水平向位移响应幅值数据见表 5。因为墩底隔震桥梁采用墩梁固接形式,主梁位移和墩顶位移数值相同,仅计算主梁的位移即可。定义减震率为隔震桥墩隔震前后地震响应幅值绝对值之差与隔震前地震响应幅值绝对值的比值<sup>[21]</sup>。

表 5 隔震桥梁位移响应幅值

Tab. 5 Displacement Response Amplitude of Isolated Bridge

地震波名称	峰值加速度	无隔震桥梁 墩顶位移/m	无隔震桥梁 主梁位移/m	墩顶隔震桥梁 主梁位移/m	墩底隔震桥梁 主梁位移/m	墩顶隔震桥梁 减震率/%	墩底隔震桥梁 减震率/%
Tabas 波	0.2g	0.034	0.031	0.025	0.018	19.4	41.9
	0.4g	0.071	0.065	0.049	0.027	24.6	58.5
	0.6g	0.116	0.103	0.061	0.035	40.8	66.0
Taft 波	0.2g	0.039	0.031	0.021	0.015	32.3	51.6
	0.4g	0.098	0.077	0.040	0.026	48.1	66.2
	0.6g	0.155	0.122	0.059	0.030	51.6	75.4
兰州波	0.2g	0.022	0.018	0.013	0.011	27.8	38.9
	0.4g	0.043	0.033	0.026	0.022	21.2	33.3
	0.6g	0.075	0.066	0.039	0.026	40.9	60.6

由表 5 可知,不同地震动激励下隔震体系位移和减震率有所不同,Tabas 波特征为典型的短周期(地震波峰值速度与峰值加速度的比值小于 0.2 s)近断层脉冲波,Taft 波则表现出较少的长周期(地震波峰值速度与峰值加速度的比值大于 0.2 s)远场地震动特征<sup>[22]</sup>,说明桥梁结构的地震反应和隔震效果与输入地震的频谱特性有关。墩顶隔震体系桥梁在 Tabas 波激励下的减震率为 19.4%~40.8%,Taft 波激励下的减震率为 32.3%~51.6%,兰州波激励下的减震率为 27.8%~40.9%;墩底隔震体系桥梁在 Tabas 波激励下的减震率为 41.9%~66%,Taft 波激励下的减震率为 51.6%~75.4%,兰州波激励下的减震率为 38.9%~60.6%,证明采用墩底隔震体系的桥梁具有更小的位移响应,隔震效果更显著。同一地震动激励下,随着峰值加速度激励增大,隔震体系的减震率也不断增大,说明隔震支座隔震效果较好。

4.3 桥梁内力响应分析

3 组地震动激励下隔震桥梁模型水平向内力响应幅值数据整理于表 6 中。由表 6 可知,整体来看相比于无隔震的桥梁,采用墩顶隔震体系和墩底隔震体系均可以大幅减小桥梁结构在地震作用下的墩底剪力和墩底弯矩,墩底隔震桥梁隔震效果更为显著,且桥梁结构内力隔震效果与输入地震的频谱特性依旧有关。地震动强度较小时,2 种隔震体系隔震效果相近,但随着地震动强度的增大,墩底隔震体系表现出更好的隔震能力。

4.4 残余位移分析

桥梁遭受地震发生振动,振动使得桥墩发生塑性变形,隔震支座也存在震后一部分塑性变形无法恢复,这些无法恢复的变形使得桥梁具有震后的残余位移,它可以表征地震中桥梁承受地震能量大小



表 6 隔震桥梁内力响应幅值

Tab. 6 Internal Force Response Amplitude of Isolated Bridge

地震波名称	峰值加速度	无隔震桥梁		墩顶隔震桥梁		墩底隔震桥梁		墩顶隔震桥梁减震率/%		墩底隔震桥梁减震率/%	
		墩底剪力/kN	墩底弯矩/(kN·m)	墩底剪力/kN	墩底弯矩/(kN·m)	墩底剪力/kN	墩底弯矩/(kN·m)	墩底剪力	墩底弯矩	墩底剪力	墩底弯矩
Tabas 波	0.2g	772	3 630	289	1 615	335	1 532	62.6	55.5	56.6	57.8
	0.4g	1 061	4 571	404	3 302	433	2 261	61.9	27.8	59.2	50.5
	0.6g	1 465	11 100	446	5 652	477	2 689	69.6	49.1	67.4	75.8
Taft 波	0.2g	893	3 580	374	1 910	342	1 333	58.1	46.6	61.7	62.8
	0.4g	1 374	8 081	438	6 071	426	2 103	68.1	24.9	69.0	74.0
	0.6g	1 912	17 170	480	8 966	450	2 335	74.9	47.8	76.5	86.4
兰州波	0.2g	438	2 210	185	1 026	210	1 065	57.8	53.6	52.1	51.8
	0.4g	732	4 190	372	1 832	399	1 902	49.2	56.3	45.5	54.6
	0.6g	900	7 000	417	2 911	432	2 258	53.7	58.4	52.0	67.7

的情况(图 14)。由于篇幅限制仅给出 Taft 波(峰值加速度为 0.2g)和兰州波(峰值加速度为 0.4g)激励下的墩顶位移时程。

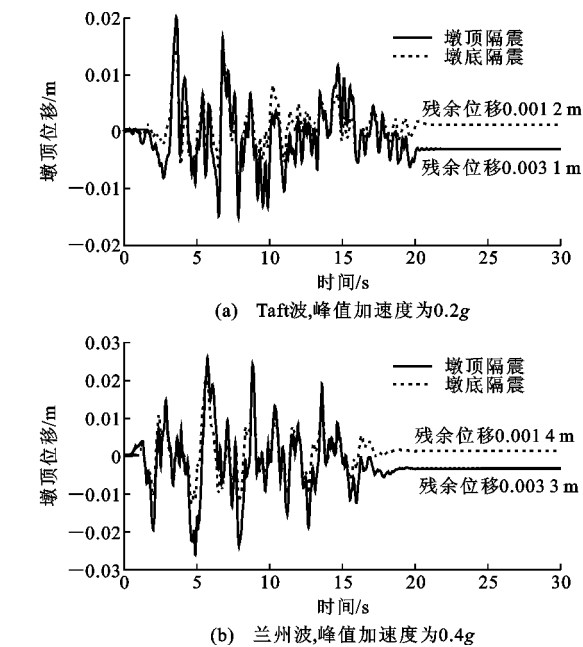


图 14 桥梁墩顶位移响应时程

Fig. 14 Displacement Response Time History of Bridge Pier Top

将 3 组地震动激励下隔震桥梁模型振动稳定后的水平向残余位移值整理于表 7 中,不同峰值加速度地震动激励下的残余位移取 3 条地震动的平均值。

由表 7 可知,对于预制拼装桥墩形式的桥梁,桥墩在震后具有较小的残余位移,即使在峰值加速度为 0.6g 的地震动激励下,墩顶水平残余位移最大也仅有 12 mm,说明预制拼装桥墩残余位移小的优势在地震中得到了充分发挥。

表 7 墩顶水平向残余位移

Tab. 7 Horizontal Residual Displacement of Pier Top

峰值加速度	墩顶隔震残余位移/m	墩底隔震残余位移/m
0.2g	0.002 2	0.001 2
0.4g	0.005 7	0.001 6
0.6g	0.012 0	0.002 1

墩底隔震体系桥梁桥墩具有更小的残余位移,这是因为当预制拼装桥墩连续梁桥采用墩底隔震体系时,可以充分利用桥墩较强的自复位能力减小残余位移。

4.5 支座内力及变形分析

在桥梁减隔震中,隔震支座的内力大小和承受变形能力对隔震效果起到决定性作用。以 Taft 波为例,因为采用的铅芯橡胶支座具有较强的大变形能力,所以本文只研究较大地震力作用下支座的性能。图 15 为 Taft 波(地震动峰值加速度为 0.6g)激励下墩顶和墩底的铅芯橡胶支座剪力-位移滞回曲线。

从图 15 可以看出,在峰值加速度为 0.6g 的 Taft 波激励下,2 种隔震体系中铅芯橡胶支座工作良好,并未出现破坏。墩顶支座的最大位移为 42.09 mm,最大剪力为 148.73 kN,墩底支座最大位移为 77.28 mm,最大剪力为 192.01 kN。拟静力试验表明,桥墩在地震中 S1 节段(塑性铰节段)较大纵向压应变下可形成柱脚的刚性转动,加载后混凝土的开裂和剥落现象均主要集中于 S1 节段和承台接缝位置<sup>[23]</sup>,当铅芯橡胶支座被设置在墩底时相比于墩顶会承受更大的水平剪力和位移,这与试验结果吻合。

4.6 预应力筋预应力及接缝压力分析

预制拼装桥墩节段受到较大的水平向地震力,



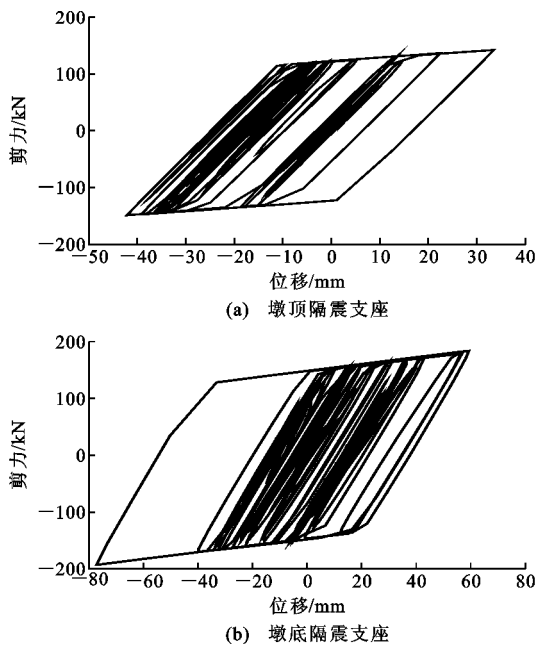


图 15 铅芯橡胶支座剪力-位移滞回曲线  
Fig. 15 Shear Force-displacement Hysteresis Curve of Lead Rubber Cushion

桥墩节段接缝处受拉侧边缘混凝土应力变为 0 时接缝开始张开,如图 16 所示,此时预应力筋会发生拉伸,预应力增大,一旦预应力超过预应力筋的屈服强度,桥墩将发生巨大损坏;同时预应力的增大会增大接缝处受压侧混凝土的竖向压力,因此需研究不用隔震体系桥墩预应力筋预应力及接缝竖向压力的变化。这里以 Tabas 波激励下桥墩为例进行研究,输出 Tabas 波不同峰值加速度激励下桥墩的预应力筋预应力时程和 S1-承台接缝竖向压力时程,如图 17,18 所示。

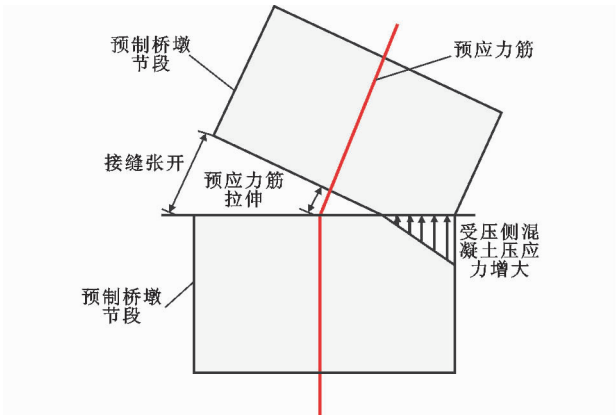


图 16 接缝张开及预应力筋拉伸  
Fig. 16 Joint Opening and Tension of Prestressed Bar

由图 17 可知:墩底隔震体系桥墩由于采用墩梁固接的构造,上部结构质量更大,地震激励下桥墩接缝张开量增加使得预应力筋具有更长的拉伸量,预

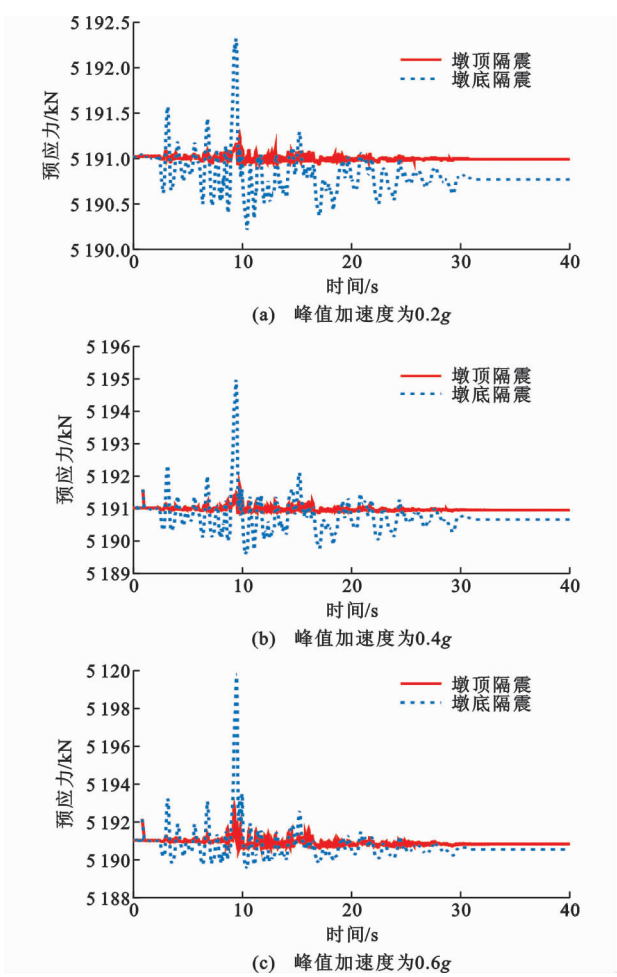


图 17 Tabas 波激励下的预应力时程  
Fig. 17 Prestress Time History Under Tabas Wave Excitation

应力变动幅度更大;此外桥墩预应力筋初始预应力为 5 191 kN,在桥梁振动平稳后,不同峰值加速度下墩顶隔震体系桥墩的预应力几乎都维持在 5 191 kN,而墩底隔震体系桥墩的预应力均小于 5 191 kN,墩底隔震相比于墩顶隔震预应力筋具有更多的预应力损失。

图 18 为接缝竖向压力时程,直接反映出桥墩 S1-承台接缝受压侧混凝土在地震中的受力情况。由图 18 可知,不同峰值加速度地震激励下墩底隔震体系桥墩的 S1-承台接缝混凝土会受到更大的竖向压力,且混凝土压力变化幅度明显大于墩顶隔震,墩梁固接的设计会给接缝区混凝土带来更大的损伤风险,这对预制拼装桥墩是不利的。

## 5 结 语

(1)预制拼装桥墩连续梁桥采用墩顶隔震体系和墩底隔震体系均可以大幅减小桥梁在地震中的位

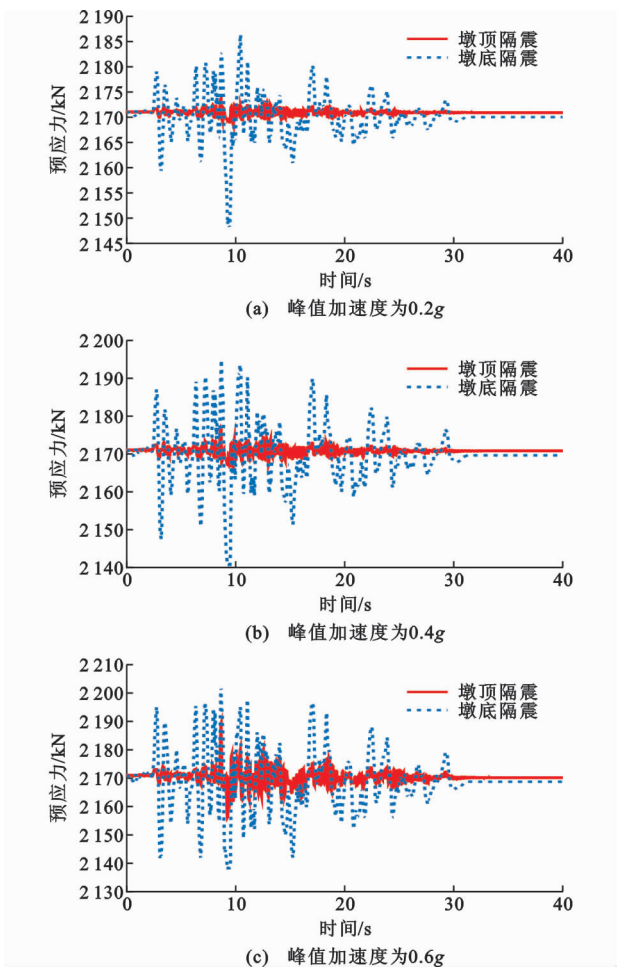


图 18 Tabas 波激励下接缝竖向压力时程

Fig. 18 Joint Vertical Compressive Force Time History Under Tabas Wave Excitation

移和内力,延长桥梁自振周期,隔震效果较好,这种形式的隔震桥梁可用于改善抗震区桥梁的地震损伤。

(2)地震动激励下采用墩梁固接、墩底隔震的桥梁结构相比于直接采用隔震支座连接墩梁的桥梁结构具有更长的自振周期、更小的桥梁震中位移和墩顶残余位移,表现出更加优越的隔震效果,在大地震中墩底隔震体系隔震优势更加明显。

(3)当铅芯橡胶支座设置在墩底时相比于墩顶会承受更大的水平剪力和位移,因此在采用墩底隔震体系时铅芯橡胶支座需要具备更大的抗剪能力和变形能力,在选择时应当予以考虑,必要时需要设置挡块。

(4)采用墩底隔震体系墩梁固接设计的预制拼装桥墩相比于墩顶隔震会有更大的预应力筋预应力变化、预应力损失和接缝竖向压力,这可能会导致预应力筋的屈服和接缝的过早破坏,对桥梁产生不利

影响。

参考文献:

References:

[1] 曹飒飒,孙卓,闫聚考,等.一种墩底隔震高架桥梁结构体系[J].地震工程与工程振动,2017,37(5):162-168.  
CAO SA-sa,SUN Zhuo,YAN Ju-kao,et al. Study of Base-isolated Viaduct System[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2017,37(5):162-168.

[2] NEES/E-defense. Report of the Seventh Joint Planning Meeting of NEES/E-defense Collaborative Research on Earthquake Engineering[R]. Berkeley: University of California,2010.

[3] YOSHIKAWA M,HAYASHI H,KAWAKITA S,et al. Construction of Benten Viaduct, Rigid-frame Bridge with Seismic Isolators at the Foot of Piers[J]. Cement and Concrete Composites,2000,22(1):39-46.

[4] 李曙光.梁桥墩顶隔震与墩底隔震减震效果比较研究[D].西安:长安大学,2004.  
LI Shu-guang. A Comparative Study on the Effect of Top and Bottom Isolation of Beam Piers[D]. Xi'an: Chang'an University,2004.

[5] KUNDE M C,JANGID R S. Seismic Behavior of Isolated Bridges;A-state-of-the-art Review[J]. Electronic Journal of Structural Engineering,2003,3(2):140-169.

[6] 韩强,杜修力,刘文光,等.不同地震烈度下隔震连续梁桥模型振动台试验[J].中国公路学报,2008,21(6):50-56.  
HAN Qiang,DU Xiu-li,LIU Wen-guang,et al. Shaking Table Test of Isolated Continuous Girder Bridge Model Under Different Earthquake Intensity Excitations[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(6):50-56.

[7] 刘彦辉,谭平,周福霖,等.高墩隔震连续梁桥地震模拟振动台试验[J].中国公路学报,2015,28(2):60-68,94.  
LIU Yan-hui,TAN Ping,ZHOU Fu-lin,et al. Shaking Table Test for Seismic Simulation of Continuous Isolation Girder Bridge with High Piers[J]. China Journal of Highway and Transport,2015,28(2):60-68,94.

[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):74-80.

- WANG Zhi-qiang, WEI Zhang-zhen, WEI Hong-yi, et al. Influences of Precast Segmental Connector Forms on Seismic Performance of Bridge Pier[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(5):74-80.
- [9] 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):42-52.
- GE Ji-ping, YAN Xing-fei, WANG Zhi-qiang. Seismic Performance of Prefabricated Assembled Pier with Grouted Sleeve and Prestressed Reinforcements[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(2):42-52.
- [10] ROH H, REINHORN A M. Hysteretic Behavior of Precast Segmental Bridge Piers with Superelastic Shape Memory Alloy Bars[J]. Engineering Structures, 2010, 32(10):3394-3403.
- [11] ELGAWADY M A, SHA'LAN A. Seismic Behavior of Self-centering Precast Segmental Bridge Bents[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(3):328-339.
- [12] MOTAREF S. Seismic Response of Precast Bridge Columns with Energy Dissipating Joints[D]. Reno: University of Nevada at Reno, 2011.
- [13] ZHAO L U, BI K M, HAO H, et al. Numerical Studies on the Seismic Responses of Bridge Structures with Precast Segmental Columns[J]. Engineering Structures, 2017, 151:568-583.
- [14] 吴倩芸, 何文福, 刘文光, 等. 铅芯橡胶隔震支座大变形硬化模型及隔震结构弹塑性分析研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(15):90-97.
- WU Qian-yun, HE Wen-fu, LIU Wen-guang, et al. Large Deformation Hardening Model of Lead Rubber Bearings and Elastic-plastic Analysis for a Structure with Seismic Isolation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(15):90-97.
- [15] 王景玄, 王文达, 魏国强. 基于 OpenSees 平台的钢管混凝土结构力学性能数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2014(5):613-618, 631.
- WANG Jing-xuan, WANG Wen-da, WEI Guo-qiang. Numerical Simulation on Mechanical Performance of Concrete Filled Steel Tubular Structures Based on OpenSees Platform[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014(5):613-618, 631.
- [16] 孙治国, 刘亚明, 司炳君, 等. 基于 OpenSEES 的桩-土-桥墩相互作用非线性数值分析模型[J]. 世界地震工程, 2018, 34(4):67-74.
- SUN Zhi-guo, LIU Ya-ming, SI Bing-jun, et al. Non-linear Analysis Model for Pile-oil-pier Interaction Based on OpenSees Platform[J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(4):67-74.
- [17] 布占宇, 吴威业. 预制拼装混凝土桥墩抗震性能拟静力循环加载试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(1):42-50.
- BU Zhan-yu, WU Wei-ye. Experiment on Seismic Behavior of Precast Segmental Concrete Bridge Piers Under Quasi Static Cyclic Loading[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(1):42-50.
- [18] KENT D C, PARK R. Flexural Members with Confined Concrete[J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(7):1969-1990.
- [19] 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]//International Association for Bridge and Structural Engineering. 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.
- [20] 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 Yan, WANG Dong-sheng, SUN Zhi-guo. Displacement-based Seismic Design Method for Medium Span Bridges with Seismic Isolation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(2):71-81.
- [21] 贾俊峰, 赵建瑜, 郭扬, 等. 三维隔震连续梁桥模型结构地震模拟振动台试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12):290-298.
- JIA Jun-feng, ZHAO Jian-yu, GUO Yang, et al. Shaking Table Tests on Seismic Simulation of Three-dimensional Isolated Continuous Girder Bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12):290-298.
- [22] 孙颖, 陈天海, 卓卫东, 等. 长周期地震动作用下隔震连续梁桥地震反应特性研究[J]. 工程力学, 2016, 33(增):244-250.
- SUN Ying, CHEN Tian-hai, ZHOU Wei-dong, et al. Study on Seismic Response Characteristics of Isolated Continuous Bridges Under Long-period Ground Motion[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(S):244-250.
- [23] HEWES J T, PRIESTLEY M J N. Seismic Design and Performance of Precast Concrete Segmental Bridge Columns[R]. San Diego: University of California, 2002.