

# 近场简支梁铅芯橡胶支座隔震特性分析

魏红一<sup>1</sup>, 逯宗典<sup>2</sup>, 王志强<sup>1</sup>

(1. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

**摘要:** 随着公路桥梁的建设和隔震技术的发展, 近断层隔震桥梁的抗震性能研究十分必要. 以一座简支微弯梁桥为例, 通过非线性时程的方法, 探讨简支梁桥在近场地震作用下桥梁的减隔震特性及参数变化规律. 分析结果表明, 该隔震简支梁桥在近场地震作用下, 墩底弯矩和支座位移比远场地震作用下大; 采用隔震技术后, 在近场地震作用下, 减震效果仍有效; 纵横向支座位移随屈服强度的增加而减小, 且均有随初始刚度增加而减小的趋势; 墩底弯矩因波脉冲不同和各墩刚度不一, 随初始刚度和屈服强度的变化不一.

**关键词:** 近场; 简支梁; 铅芯橡胶支座; 隔震

**中图分类号:** TU 352

**文献标识码:** A

## Isolation Characteristic Analysis of Simple Supported Bridge to Near Fault Ground Motions

WEI Hongyi<sup>1</sup>, LU Zongdian<sup>2</sup>, WANG Zhiqiang<sup>1</sup>

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Communication Second Highway Institute Co. Ltd., Wuhan 430056, China)

**Abstract:** Based on the nonlinear dynamic time history analysis, a slightly curved simple supported isolated bridge is studied, to investigate the characteristic and the rule of parameters of the lead rubber bearing (LRB). Results show that the moment at the bottom of piers and the displacements of LRB to near fault earthquake ground motions are larger than those to far fault earthquake ground motions. It is efficient to reduce the response of isolated bridge to the near fault earthquake ground motions by isolation technology. The bearing displacement decreases with the increment of the initial stiffness and the yielding strength, while the moment at the bottom of the pier varies with the change of the different stiffness and pulse types.

**Key words:** fault earthquake ground motion; simply

supported bridge; rubber bearing; isolation

近场, 定义为“在震源周围一定比例波长范围内的位置”。Blume 提出, “近场的定义在某种程度上是主观的, 在不同的地面情况、设施的敏感度和其他因素下, 近场的定义是有变化的. 在具体的情况下, 近场包括对地震震级、断层长度等因素的考虑. 总地说, 震中距离小于 50 km 或 65 km 的, 就可以看作近场.”<sup>[1]</sup>通常, 近场地震指场地距断层不超过 15 km 且震级在 6.5 以上的浅源地震. 近场地震动以短持时高能量脉冲运动为特征, 具有强方向效应、长周期速度和位移脉冲效应、较大的峰值加速度脉冲以及高频震动效应, 给结构带来较大的位移和变形, 破坏能力极强. 特别在最近几次大地震中, 近场地震表现出巨大的破坏能力. 如 1999 年台湾集集地震和 2008 年汶川地震中, 许多坐断层桥梁遭受严重损伤乃至倒塌<sup>[2]</sup>, 一些所谓经过抗震设计的桥梁, 在中等强度的地震作用下也遭到严重破坏, 反映出以往的桥梁抗震设计存在着一定不足.

目前, 国内外学者已经开始对普通桥梁在近场地震下的响应特点开展研究, 但对减隔震桥梁近场地震响应的研究相对还很少. Anderson 研究表明, 近场地震动显著破坏性的因素不是其峰值地面加速度而是其长持时脉冲, 主要表现为地面运动所激起的高速度. 这对隔震技术的应用形成较大的冲击<sup>[3]</sup>. 但也有研究表明, 只要提供合适的耗能装置, 隔震对近场抗震仍是一个有效的策略. 朱晞等根据 Eurocode8“全隔震”桥梁的设计要求, 用非线性时程分析的方法, 对减隔震连续桥梁在近场地震作用下的有效性和响应特性进行分析研究, 得出一些有益的结论, 但没考虑竖向地面运动对桥梁的影

收稿日期: 2008-07-20

作者简介: 魏红一(1961—), 女, 教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震. E-mail: wei\_hongyi@163.com

逯宗典(1984—), 男, 工学硕士, 主要研究方向为桥梁抗震. E-mail: dian0930@163.com

王志强(1971—), 男, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震. E-mail: wangzhiq@tongji.edu.cn

响<sup>[4]</sup>. 台湾在集集地震后, 便对建筑规范调整并考虑近场地震的作用<sup>[5]</sup>. Nicos Makris 等对脉冲和近场地震动下结构的各种耗能效率进行了计算研究, 认为隔震对含有产生大部分非常大位移和高速度的长持时脉冲的近场地震动更有意义<sup>[6]</sup>. Jerry Shen 等通过参数分析得出, 当脉冲周期等于隔震体系的有效周期时, 隔震桥梁的近场反应效应将扩大. George C. Lee 等提出, 用近场系数  $I_{NF}$  反映近场地震动对隔震桥梁的影响, 地面峰值加速度(简称 PGA)值越大, 近场效应越大<sup>[7]</sup>. 张明显等分别考虑竖向地震动、水平地震动与竖向地震动共同作用下单墩桥梁的反应, 得出近断层竖向地震动的高频成分更丰富、衰减更快, 并建议采用近场因子的方法, 通过修正《公路桥梁抗震设计规范(征求意见稿, 2005)》竖向反应谱来得到设计使用的近场竖向反应谱<sup>[8]</sup>. 综上, 目前针对隔震桥梁各参数进行敏感性分析研究的还很少, 因此, 对减隔震技术在近场地震作用下的响应特性的认识明显不足.

考虑到我国山区采用中小跨径简支体系桥梁较多, 笔者以一典型山区桥梁为工程背景, 通过非线性时程的方法, 探讨了近场简支梁桥的减隔震特性、参数变化规律以及近、远场下隔震桥梁的反应比较, 加深对近场地震作用下减隔震桥梁响应特性的认识, 促进减隔震技术在断层附近桥梁中的应用.

## 1 分析模型及基本参数

### 1.1 分析模型

以往对铅芯橡胶隔震支座(lead rubber bearing, LRB)特性分析时, 常用独柱墩, 且不考虑竖向地震动的影响. 而在山区公路的高桥墩中, 简支框架体系应用广泛. 现研究的桥梁为一联  $2 \times 30 \text{ m} + 3 \times 40 \text{ m}$  的五跨桥面连续微弯简支梁桥, 下部结构为框架墩、群桩基础, 墩高  $22.2 \sim 26.1 \text{ m}$  不等, 支座分别采用板式橡胶支座(常规设计方案)和铅芯橡胶支座(隔震设计方案), 以杆系梁单元模拟主梁、桥墩、系梁和桩基础的力学行为, 建立空间有限元分析模型. 其中, 以土弹簧单元模拟桩土相互作用, 以非线性弹簧单元模拟铅芯橡胶支座的非线性力学行为. 有限元分析模型如图 1 所示(图中 P 表示支座墩, 各数字代表墩号).

### 1.2 铅芯橡胶隔震支座

铅芯橡胶支座在较低水平力作用下, 具有较高

的初始刚度, 变形很小; 在地震作用下, 因铅芯屈服, 一方面消耗地震能量, 另一方面降低刚度、延长结构的周期. 铅芯具有较低的屈服剪应力(约  $10 \text{ MPa}$ )、足够高的初始剪切刚度  $G$ (近似为  $130 \text{ MPa}$ ), 且对于塑性循环具有很好的耐疲劳性能<sup>[9]</sup>. 在国外, 大量已建成的隔震桥梁采用了铅芯橡胶隔震支座, 是目前应用比较好的一类隔震装置. 其恢复力  $y$  与往复位移  $x$  的滞回特性曲线如图 2 所示.

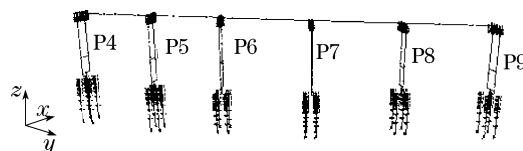


图 1 简支梁桥模型

Fig.1 Model of the simply supported bridge

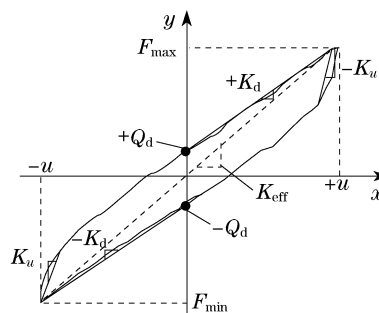


图 2 铅芯橡胶支座的滞回曲线

Fig.2 Hysteretic curve of LRB

在地震作用下, 在对铅芯橡胶支座进行地震响应分析时, 采用双线性模型 LRB 的力学特性, 其动力性能主要受屈服后刚度  $K_d$ 、特征强度  $Q_d$ 、初始弹性刚度  $K_u$  和硬化比  $\alpha$  的影响. 通常  $\alpha$  取值在  $0.100 \sim 0.154$ , 日本规范规定  $\alpha = 0.15$ . 本文采用 SAP2000 中的 Nlink 单元模拟 LRB 的非线性特性进行非线性动力时程分析, 探讨隔震支座力学参数变化对桥梁近场地震响应的影响.

### 1.3 地震波

采用台湾集集(ChiChi)地震 TCU120 记录的东、西、南北波以及竖向地震波, 日本阪神(Kobe)地震 KJMA 记录的  $0^\circ$  和  $90^\circ$  波以及竖向地震波, 远场 Aqaba 的东、西向和竖向波进行参数分析研究. 各地震波参数特征如表 1 所示, 其中 Kobe  $90^\circ$  地震波的加速度时程和速度时程均脉冲; ChiChi-WE 地震波、ChiChi-NS 地震波和 Kobe  $0^\circ$  地震波, 加速度时程无脉冲, 速度时程有脉冲.

表 1 地震波参数特性  
Tab.1 Parameters of waves

地震波	$a_{pg}/g$	$v_{pg}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	断层距/km
ChiChi-WE	0.225 0	63.2	8.1
ChiChi-NS	0.192 5	36.9	
ChiChi-V	0.162 4	32.1	
Kobe 0°	0.821 3	81.3	0.6
Kobe 90°	0.598 5	74.3	
Kobe-V	0.342 7	38.3	
Aqaba-EW	0.019 0	3.4	412.1
Aqaba-NS	0.014 0	2.1	
Aqaba-Up	0.010 0	3.6	

注： $a_{pg}$ 为地面峰值加速度， $v_{pg}$ 为地面峰值速度。

2 铅芯橡胶支座隔震性能分析

2.1 近场地震作用下隔震桥梁的响应特性及隔震有效性

采用隔震技术后,桥梁隔震周期延长(如表 2).采用隔震支座前后,桥梁结构的动力响应见图 3a,b 所示.从图中可以看出,使用隔震支座后,墩底弯矩  $M_2, M_3$ (下标 2 表示纵向,3 表示横向,后同)明显减小.可见,铅芯橡胶支座对近场地震作用仍具有一定的减震效果.从表 3 采用隔震技术前后关键部位位移的响应可以看出,采用隔震支座后,位移比采用非隔震支座时的位移增大,但由于隔震支座的性质,其位移在可接受的范围内.对于普通板式橡胶支座,最大位移通常为总橡胶层的厚度,分析结果表明,大部分已经超过了允许位移,支座可能已破坏.由表 3 支座的位移和图 3 墩底弯矩响应结果表明,隔震支座发挥了较好的减震效果.

表 2 隔震前后动力特性比较

Tab.2 Dynamical property comparison between bridges with LRB and without LRB

周期	隔震前/s	隔震后/s	振型
第一	1.718	2.200	纵向
第二	1.231	1.889	横向
第三	1.077	1.632	横向反对称

表 3 隔震与未隔震支座位移

Tab.3 Displacement of bridges bearings with LRB and without LRB

位移方向	隔震情况	cm					
		cm					
纵向	未隔震	13.7	7.1	8.0	8.1	9.7	14.4
	隔震	18.0	11.6	14.3	14.0	16.7	19.8
横向	未隔震	11.3	9.3	10.4	11.4	12.8	15.5
	隔震	13.2	11.0	12.9	14.4	17.2	21.1

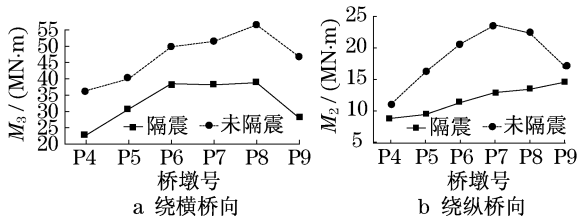


图 3 墩底弯矩图

Fig.3 Moment at the pier bottom

2.2 近场地震作用下铅芯橡胶支座主要参数研究

已有大量研究人员对隔震桥梁在非近场地震作用下的减隔震特性进行分析研究,本文选用典型近场特性地震波,对隔震桥梁支座水平位移和墩底弯矩随隔震支座初始刚度和屈服强度的变化规律进行分析研究,详细分析工况见表 4 所示.

表 4 分析工况

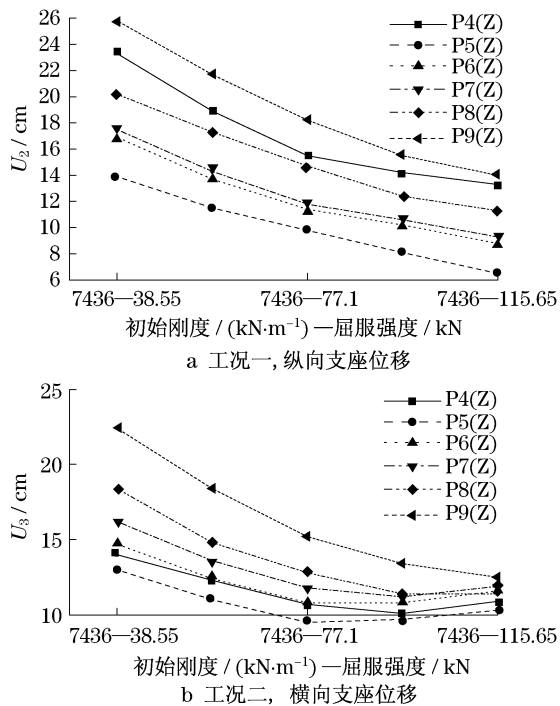
Tab.4 Case analysis

工况	地震波	加载方向
1	ChiChi-WE + ChiChi-V	纵桥向 + 竖向
2	ChiChi-WE + ChiChi-V	横桥向 + 竖向
3	ChiChi-NS + ChiChi-V	纵桥向 + 竖向
4	ChiChi-NS + ChiChi-V	横桥向 + 竖向
5	Kobe 0° + Kobe-V	纵桥向 + 竖向
6	Kobe 0° + Kobe -V	横桥向 + 竖向
7	Kobe 90° + Kobe-V	纵桥向 + 竖向
8	Kobe 90° + Kobe-V	横桥向 + 竖向

ChiChi-WE 地震波和竖向地震波同时作用于结构的分析结果如图 4~8.对于支座位移,初始刚度一定时,纵向支座位移随着屈服强度的增加而减小,横向支座位移随着屈服强度的增加先减小后增加;屈服强度一定时,支座纵向和横向位移均随初始刚度的增加而减小.对于墩底弯矩,屈服强度一定时,墩底绕纵、横桥向弯矩均随初始刚度的增加而增加;初始刚度一定且纵向加载时,墩底绕横桥向弯矩随屈服强度的变化很小,横向加载时,墩底绕纵桥向弯矩随着屈服强度的增加先减小后增加.各图中,横坐标采用初始刚度—屈服强度的表达形式,如 3718—77.1,表示初始刚度为 3 718 kN · m<sup>-1</sup>,屈服强度为 77.1 kN.以下相同.

ChiChi-NS 和竖向地震波同时作用时,对于位移来说,初始刚度一定时,支座纵、横向位移随着屈服强度的增加而减小;屈服强度一定时,支座纵向位移  $U_2$  和横向位移  $U_3$  均随初始刚度的增加而减小.对于弯矩,屈服强度一定时,墩底绕横桥向弯矩和墩底绕纵桥向弯矩均随着初始刚度的增加先增大后减小;初始刚度一定时,纵向和竖向加载时,墩底绕横

桥向弯矩随着屈服强度的增加而增加. 横向和竖向加载时, 除伸缩缝外, 墩底绕纵向弯矩随屈服强度的增加而增加. 图 9, 10 给出关键部位地震响应的主要结果.



注: 括号中的“Z”指纵向输入的情况. 后同.

图 4 支座位移随屈服强度的变化

Fig. 4 Longitudinal diplacement varying with  $F_y$

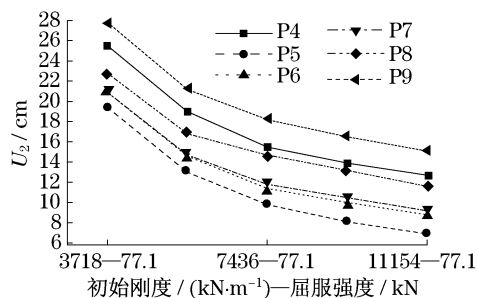


图 5 工况一, 纵向支座位移随初始刚度的变化

Fig. 5 Longitudinal diplacement varying with  $K_u$  in case 1

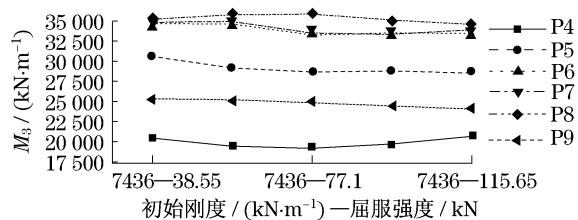


图 6 工况一, 墩底绕横桥向弯矩随屈服强度的变化

Fig. 6 Transverse moment at pier bottom varying with  $F_y$  in case 1

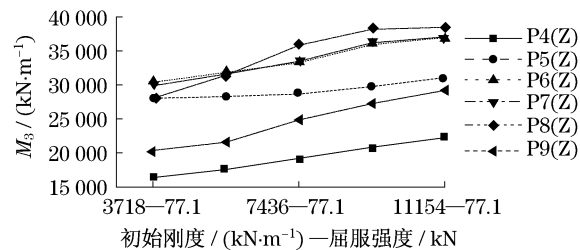


图 7 工况一, 墩底绕横桥向弯矩随初始刚度的变化

Fig. 7 Transverse moment at pier bottom varying with  $K_u$  in case 1

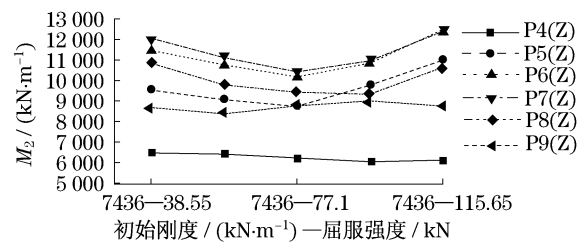


图 8 工况二, 墩底绕纵桥向弯矩随屈服强度的变化

Fig. 8 Longitudinal moment at pier bottom varying with  $K_u$  in case 2

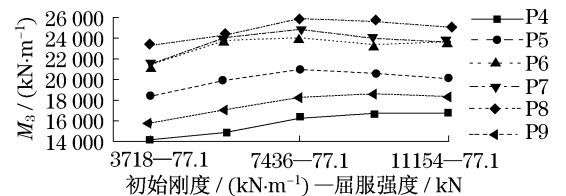


图 9 工况三, 墩底绕横桥向弯矩随初始刚度的变化

Fig. 9 Transverse moment at pier bottom varying with  $K_u$  in case 3

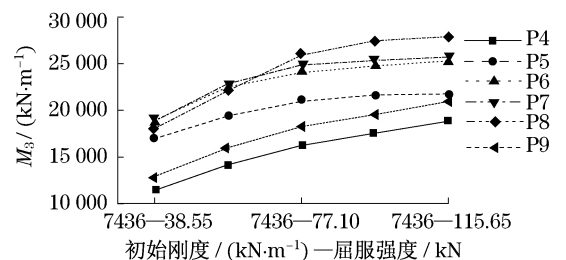


图 10 工况三, 墩底绕横桥向弯矩随屈服强度的变化

Fig. 10 Transverse moment at pier bottom varying with  $F_y$  in case 3

当 Kobe  $0^\circ$  波和竖向波共同作用于结构时, 对于支座位移来说, 初始刚度一定的情况下, 纵向和横向支座位移均随屈服强度的增加而减小. 屈服强度一定时, 纵向支座位移随初始刚度的增加而减小, 一定程度后对初始刚度作用不明显 (如图 11); 部分墩横向支座位移随初始刚度的增加先减小后增加, 部分墩的横向位移不敏感, 如所示 P5 墩顶支座位移 (见

图12). 对于墩底弯矩,屈服强度一定时,墩底绕横桥向弯矩随初始刚度的增加先减小后增加(如图13);墩底绕纵向弯矩除伸缩缝外均随初始刚度的增加而增加. 在初始刚度一定时,墩底弯矩随屈服强度变化较小;墩底绕纵桥向的弯矩随屈服强度的增加而减小(如图14).

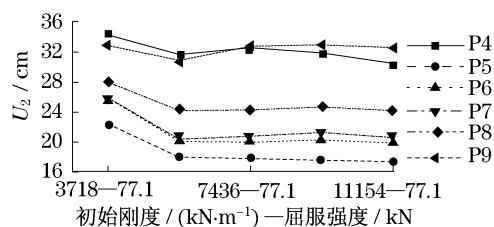


图11 工况五,纵向支座位移随初始刚度的变化

Fig.11 Longitudinal diaphragm displacement varying with  $K_u$  in case 5

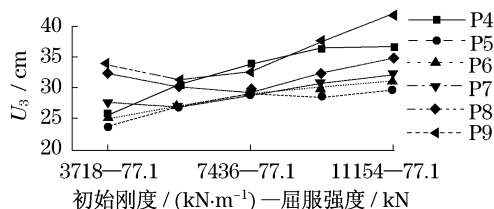


图12 工况六,横向支座位移随初始刚度的变化

Fig.12 Transverse diaphragm displacement varying with  $K_u$  in case 6

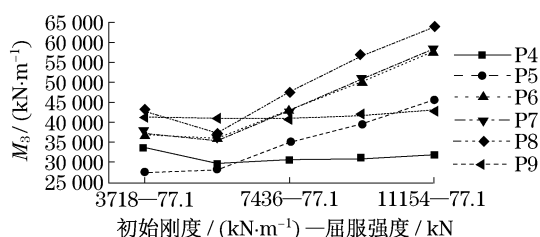


图13 工况五,墩底绕横桥向弯矩随初始刚度的变化

Fig.13 Transverse moment at pier bottom varying with  $K_u$  in case 5

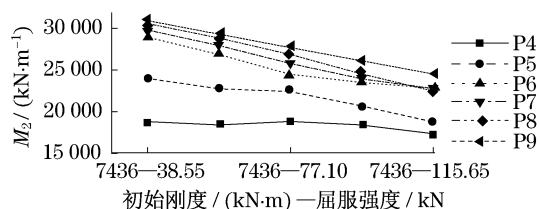


图14 工况六,墩底绕纵桥向弯矩随屈服强度的变化

Fig.14 Longitudinal moment at pier bottom varying with  $F_y$  in case 6

Kobe 90°波和竖向波共同作用于结构时,当初始刚度一定时,支座纵横向位移均随屈服强度的增加而减小;屈服强度一定时,支座纵向位移随初始刚度的增加而减小,一定程度后对初始刚度不敏感;作

用于横桥向时,除 P5 墩支座外,支座横向位移随初始刚度的增加先减小后增加,与图12类似. 对于墩底弯矩,初始刚度一定时,墩底绕横桥向弯矩随屈服强度的变化较小,墩底绕纵桥向弯矩随屈服强度的增加而减小. 屈服强度一定时,纵向和竖向加载时,墩底绕横桥向弯矩随初始刚度的增加先减小后增加;横向和竖向加载时,除伸缩缝处桥墩外,墩底绕纵桥向弯矩随初始刚度的增加而增加.

### 3 近场和远场地震作用下隔震桥梁的响应特性

由于近场地震具有远场地震所不具有的脉冲性能,可产生比远场地震动更剧烈的反应. 为更好地研究近场区别于远场地震动对桥梁结构墩底弯矩和支座位移的影响,选取 Aqaba 波东西方向波和竖向波,以及 ChiChi 地震波分别作用于结构. 为方便研究,对 Aqaba 地震的加速度峰值进行调整,使其和 ChiChi 地震的东西方向波和竖向波的峰值加速度对应相等;分别就装有铅芯橡胶支座的隔震桥进行弹性状态下的线性时程分析和支座非线性分析,并假定桥墩保持在弹性状态. 纵横向地震作用下的结果如图15~18所示.

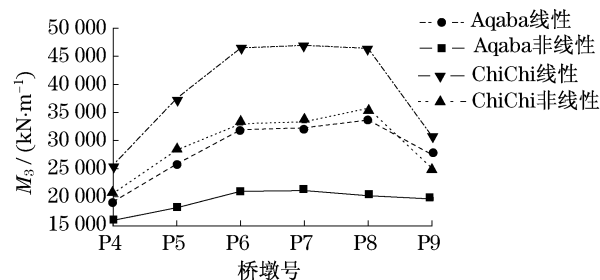


图15 纵向加载时墩底绕横桥向弯矩

Fig.15 Cross moment at pier bottom under longitudinal excitation

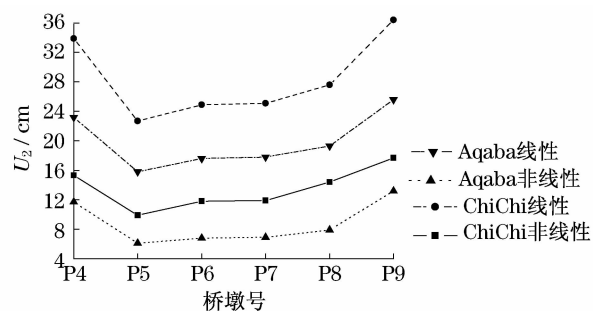


图16 纵向加载时支座位移

Fig.16 Longitudinal diaphragm displacement under longitudinal excitation

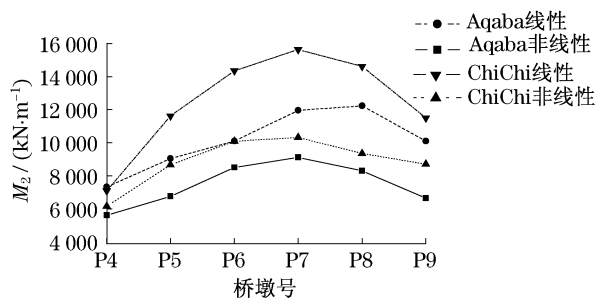


图 17 横向加载墩底绕纵桥向弯矩

Fig. 17 Longitudinal moment at pier bottom under transverse excitation

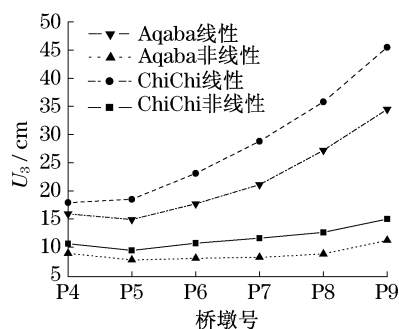


图 18 横向加载支座横向位移

Fig. 18 Transverse diaphragm displacement under transverse excitation

从图 15~18 可以看出,在相同峰值加速度作用下,无论线性时程分析还是非线性时程分析,近场地震动所引起的纵横桥向支座位移和墩底绕横纵桥向弯矩,均比远场地震动大.此外还可看出,由于采用隔震支座,墩底内力和支座位移均有所减小.这进一步说明隔震技术在近场条件下也是可应用的.

## 4 结论

(1) 针对该简支梁桥的分析表明,近场地震作用下,该桥结构仍具有较好的减震效果;在相同地面峰值加速度的地震作用下,大部分近场地震动的墩底弯矩和支座位移,相应比远场地震作用下大.

(2) 初始刚度一定时,纵横向支座位移随屈服强度的增加而减小;屈服强度一定时,纵桥向支座位移随初始刚度的增加而减小;横向支座位移因墩高和地震波特性的不同,均有随初始刚度增加而减小的趋势,但对于加速度、速度均有脉冲的波,其随初始刚度的增加有先减小后有增加的趋势.

(3) 以框架桥墩墩底弯矩为分析对象时,屈服强度一定时,因地震波脉冲特性不同,墩底绕横桥向弯矩随初始刚度变化不一;绕纵桥向弯矩都有随初始刚度增加而增加的趋势,个别桥墩的地震响应会先增加后减小;初始刚度一定时,墩底绕横桥向弯矩随屈服强度变化较小;绕纵桥向弯矩因脉冲特性不同,随屈服强度的变化不一,既有先随屈服强度的增加而减小的趋势也有随屈服强度增加而增加的趋势.

## 参考文献:

- [1] Blume J A. Earthquake ground motion and engineering procedures for important installations near active faults[C]//3rd Wld Conf Earthquake Engng. New Zealand; [s. n.], 1965: 53-59.
- [2] CHEN Chengcheng, HUANG Chingtung, CHENG Rweyhua. Preliminary investigation of damage to near fault buildings of the 1999 Chi-Chi Earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Seismology, 2000, 2(1): 79.
- [3] Anderson J C, Betero V. Uncertainties in establishing design earthquake[J]. ASCE, 1987, 113: 1709.
- [4] 江辉, 朱晞. 近断层强震速度脉冲效应及连续梁桥减隔震特性分析[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(12): 57.
- [5] JIANG Hui, ZHU Xi. Velocity pulse effects of near-fault earthquakes and Isolation characteristic of continuous girder bridge[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(12): 57.
- [6] Chai J F, Liao W I, Teng T J, et al. Current development of seismic design code to consider the near-fault effect in Taiwan [J]. Earthquake Engineering and Engineering Seismology, 2001, 3(2): 48.
- [7] Nicos Makris, CHNAG Shihpo. Effect of damping mechanisms on the response of seismically isolated structures[R]. Report No. PEER - 98/06. Berkeley: University of California. Pacific Earthquake Engineering Research Center of College of Engineering, 1998.
- [8] SHEN Jerry, TSAI Menghao, CHANG Kuochun, et al. Performance of a seismically isolated bridge under near-fault earthquake ground motions [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004(1): 861.
- [9] 张明显. 近场竖向地震动的特征及其对桥梁结构地震响应的影响[D]. 北京: 北京交通大学土木工程学院, 2006.
- [10] ZHANG Mingxian. The characteristics of the vertical ground motion and the bridge response under near fault[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University. Civil Engineering, 2006.
- [11] 范立础, 王志强. 桥梁减隔震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [12] FAN Lichu, WANG Zhiqiang. Design of isolated bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2001.