

近场地震动对桩基础高墩摇摆反应的影响

夏修身^{1,2}, 李建中¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 200092 上海; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 730070 兰州)

摘要: 为明确桩基础高墩自复位隔震装置的适用范围, 研究了近场地震动特性对桩基础高墩摇摆反应的影响. 以断层距作为识别近场地震动的主要参数来选取地震动, 采用两弹簧模拟桥墩的提离摇摆, 基于某铁路高墩桥梁, 采用非线性时程分析方法, 讨论了近场地震动对高墩摇摆反应的影响. 结果表明, 近场水平地震动显著增大墩顶的摇摆位移, 竖向地震动对桩基础高墩的摇摆反应有不利影响. 在近断层地震区桩基础高墩应谨慎采用摇摆隔震装置.

关键词: 高墩; 摇摆隔震; 近场; 地震动

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)04-0082-05

Effect of near-field ground motion on the rocking response of tall pier with pile foundations

XIA Xiushen^{1,2}, LI Jiangzhong¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 730070 Lanzhou, China)

Abstract: To determine the scope of self-centering for the tall pier with pile foundations, the effect of near-field ground motion on rocking response was investigated. Fault distance was used as parameters identifying near-field to select ground motion. Two springs simulated the uplift and rocking of the pier. Rocking response of a railway tall pier was investigated through nonlinear time history analysis by inputting strong ground motions. The results show that the displacement at pier top is significantly increased by near-field horizontal ground motion. It is also observed that vertical ground motion is unfavorable to the rocking response of tall pier with pile foundations. Rocking devices for tall piers in near-fault zones should be cautious.

Keywords: tall pier; rocking; near-field; ground motion

高墩桥梁是抗震不利的结构体系, 在我国西部高烈度地震区被广泛应用^[1]. 强震作用下, 简支梁桥及连续梁桥的高墩顶产生较大位移, 墩中可能会形成两个以上的塑性铰区及承台底的地震作用巨大, 给高墩及其桩基础的抗震设计带来很大困难^[2-3]. 常用的支座减、隔震装置变形能力及自复位能力有限、适用频率范围较窄^[4-5]. 粘滞阻尼器不改变结构周期减震效果较好, 但其方向性较强、冲程有限、价格昂贵, 还需要定期维护^[6].

桩基础高墩自复位隔震通过桥墩与桩基础在承台处的分离设计, 充分利用竖向荷载(桥跨重及桥墩自重)来平衡风荷载、车辆活载的制动力及中小地震作用引起的水平荷载以满足正常使用, 强震时利用桥墩的提离进行摇摆隔震, 震后靠竖向恒载实现自复位. 自复位隔震高墩的墩底提离弯矩基本恒定^[1], 通过能力设计很容易同时保证桥墩及其桩基础免受地震损伤.

地震动输入是结构地震反应的重要影响因素之一. 对地震动特性最基本的认识是: 振幅、频谱和持时三要素. 随着地震动特性研究的深入, 对结构有重要影响的近场地震动特性及远场地震动特性被揭示^[7-9]. 本文重点讨论近场地震动对高墩摇摆反应的影响, 为自复位隔震装置适用范围的确定提供参考.

收稿日期: 2013-05-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51268027, 51278371);

国家重点基础研究发展计划(2013CB036302).

作者简介: 夏修身(1978—), 男, 副教授, 博士后;

李建中(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 李建中, lijianzh@tongji.edu.cn.

1 近场地震动及其主要特征

1994 年美国 Northridge 地震,1995 日本 Kobe 地震和 1999 年台湾集集地震中近场地震动的不利影响得到显现^[10].国内外学者提出了根据震中距、震源深度及距断层距离定义近场地震动的方法.近场地震动通常指到断层距离不超过 20 km 场地上的地震动.一般震中距小于 50 km 的地震动可以被认为是近场地震动^[7].考虑到近场效应受震级和场地条件等因素的影响,文献[11]提出通过[20~60 km]断层距区域界定近场地震动,得到了较多认同.

尽管近场定义不统一,但近场地震有较长的周期、明显高出的峰值、类似脉冲的波形,以高能量速度脉冲运动为特征^[12].高能量速度脉冲会引起结构较大的加速度、速度、位移冲击,特别是在小阻尼情况下,会使结构产生较大的位移和变形.大多数近场地震均具有明显的速度脉冲效应、较大的 PGV/PGA 值和竖向加速度^[13].由于速度脉冲显著,近场地震动的 PGV/PGA 比值远大于普通的地震记录.当 $PGV/PGA > 0.2$ 时,结构的近场效应明显^[10,14].

通常地震中的竖向加速度比相应的水平向加速度要小^[15].对于普通结构抗震设计来说,竖向加速度效应引起的轴力变化对结构的地震反应及抗震性能影响不大.对自复位摇摆隔震高墩来说则不然,竖向地震作用会引起桥墩对提离有重要影响的轴力变化^[1,4].此外,近场竖向地震动还包含更多的高频成分^[7].

2 输入地震动

为研究近场地震动效应对高墩摇摆反应的影响,以断层距作为识别近、远场地震动的主要参数,综合考虑 PGV/PGA 比值,从美国太平洋强震数据库(PEER)选取 1999 年台湾集集地震的强震记录作为地震动输入.表 1 为 2 条强震记录的震级、地面峰值加速度、地面峰值速度 (PGV) 和地面峰值位移 (PGD) 及断层距等信息.其中,近场地震动 CHY101 水平分量的 $PGV/PGA = 0.26 > 0.2$.

为了便于对比分析,摇摆反应分析时表 1 中 CHY101 所示信息保持不变,而把 CHY074 水平地震波的幅值调整到与 CHY101 相同.图 1、图 2 为幅值调整后 5%阻尼的伪加速度谱和位移谱.竖向地震波的幅值按原来的竖向与水平比例相同调整.地震反应分析时,分“水平”及“水平+竖向”两种地震动输入方式.

表 1 地震波信息

地震记录	震级	分量	$PGA/$ g	$PGV/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$PGD/$ cm	断层距/ km
CHY101						
Chi-Chi, Taiwan 1999-09-20	7.6	竖向	0.165	28.0	19.73	11.14
		水平	0.440	115.0	68.75	
CHY074						
Chi-Chi, Taiwan 1999-09-20	7.6	竖向	0.094	15.6	9.40	82.49
		水平	0.234	28.1	19.04	

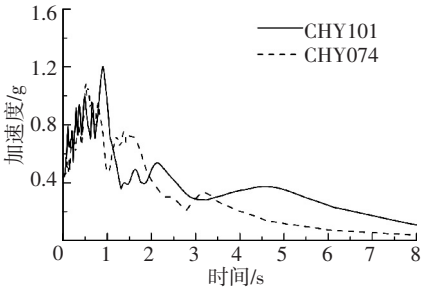


图 1 伪加速度谱

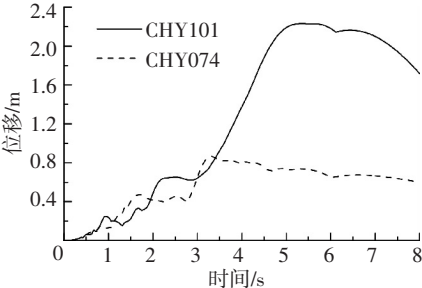


图 2 位移谱

3 桩基础高墩摇摆隔震分析模型

文献[4]提出了桩基础高墩摇摆隔震装置(见图 3),强震下通过提离摇摆能达到既保护桥墩又保护基础的抗震目标.

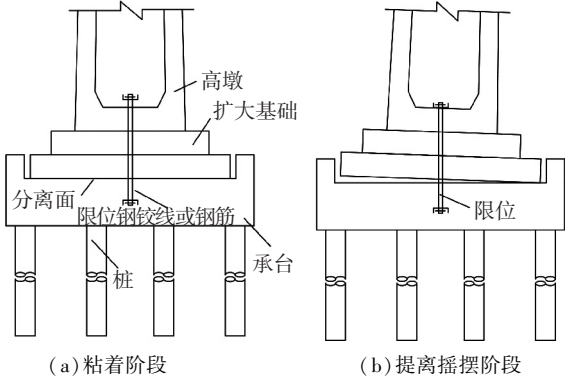


图 3 高墩基础摇摆隔震装置

桥墩在正常使用及多遇地震作用下的水平力由桥跨重及桥墩自重共同抵抗,桥墩不发生提离见图 3(a),此时按岩石地基上的扩大基础进行抗震设计.强震下当墩底地震弯矩超过恒载提供的抗倾覆弯矩时墩底的一侧相对于桩基础产生竖向的位移,发生提离(图 3(b)),提离后绕另一侧摇摆,桥墩利用提离摇摆达到隔震目的^[4].摇摆过程

中可通过钢筋或钢绞线限制墩顶产生过大位移.若地震过程中不允许限位钢筋发生屈服,限位钢筋的用量可由其所受的地震作用及其强度来确定;若允许限位钢筋发生屈服,则可根据地震中限位钢筋的最大变形不超过其极限变形这一原则来确定其用量.

图 3 所示的桩基础高墩摇摆隔震装置,桥墩在承台上提离摇摆.墩底扩大基础本身的变形很小,承台接近刚性.不考虑限位装置的影响,本文用两个竖向弹簧模拟强震下桩基础高墩的提离摇摆^[1](见图 4).模型中弹性梁单元模拟墩柱,集中质量模拟桥跨重,刚臂单元模拟墩底扩大基础,基础质量堆积于扩大基础的重心,模型采用瑞利阻尼,提离弹簧只受压.假定刚度与自振频率不相关,置于半空间地基上矩形刚性基础的竖向刚度,近似表示为^[16]:

$$K_v = \frac{4GR_0}{1-\nu}, \tag{1}$$

$$R_0 = \sqrt{A_0/\pi}. \tag{2}$$

式中: K_v 为竖向刚度; R_0 为等效半径; A_0 为墩底扩大基础的截面积; G 为基础材料的剪切模量; ν 为基础材料的泊松比.

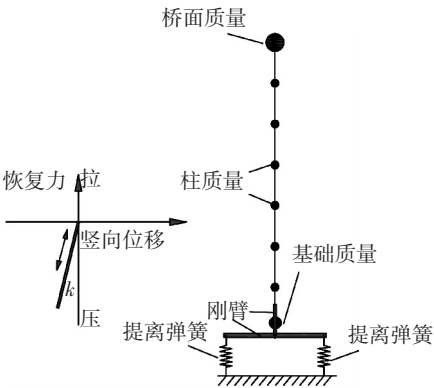


图 4 两弹簧模型

4 桩基础高墩摇摆反应分析

4.1 基本分析数据

某单线铁路特大桥,上部结构为等跨布置 32 m 简支箱形梁,下部结构为圆端形空心高墩、群桩基础,桥型立面布置示于图 5.以 58 m 高的 18#桥墩为摇摆隔震研究对象,隔震前 18#顺桥向的第 1 周期为 0.95 s.顺桥向隔震设计时墩底扩大基础为 C30 混凝土、宽 $B=10$ m,扩大基础底作用的恒载竖向力 $N=33\,873$ kN,截面积 $A_0=120$ m².每端提离弹簧的刚度 $k=0.5K_v=2.1\times10^8$ kN/m.文中以上参数取值能满足正常使用^[1],以下分析计算借助 MIDAS 有限元软件完成.

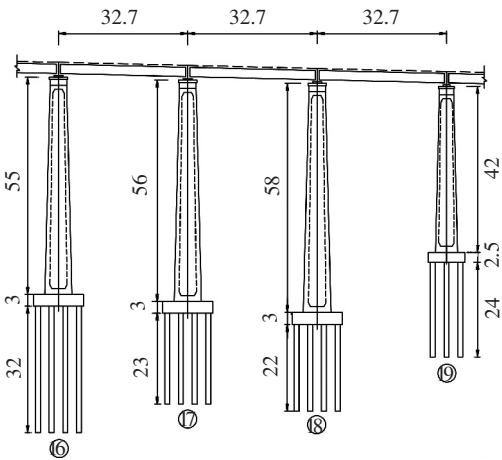


图 5 某铁路高墩桥梁的立面布置 (m)

4.2 结果及分析

3 条强震记录下的墩顶位移及墩底弯矩列于表 2.图 6~10 为仅水平地震动输入下顺桥向的摇摆反应.图 11~16 为水平地震动及竖向地震动同时输入下顺桥向的摇摆反应.

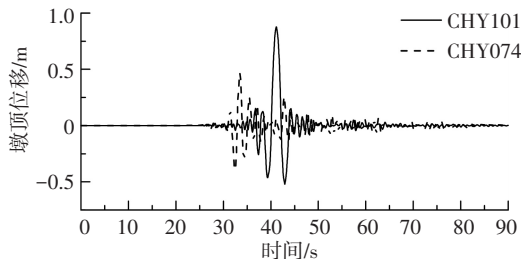


图 6 墩顶水平位移时程曲线

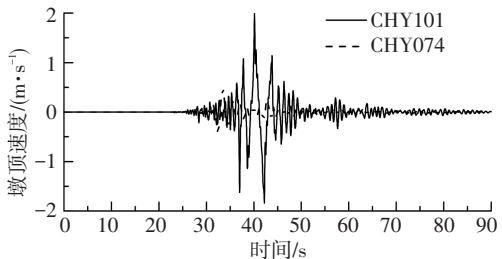


图 7 墩顶水平速度时程曲线

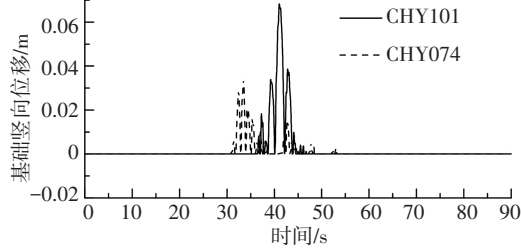


图 8 基础中心竖向位移时程曲线

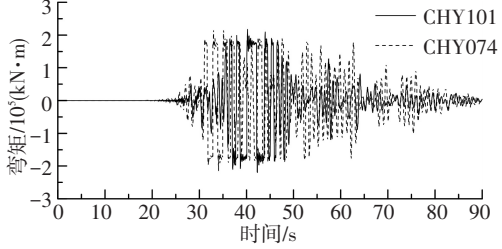


图 9 墩底弯矩时程曲线

由图 6、表 2 可知,相同地震波峰值加速度下,CHY101 波的墩顶水平摇摆位移远大于 CHY074,约为 1.9 倍.这表明,近场地震动会显著增大墩顶摇摆位移.文献 [1] 中 Taft 波、El-centro 及 Northridge 波的计算结果也有相同的现象.

由图 2 可知,近场与普通地震下的位移谱曲线在 3 s 以后相差较大,这可能是造成两计算结果差异较大的主要原因.墩顶摇摆位移对近场地震动特性比较敏感,与近场地震动以高能量速度脉冲运动为特征也不无关系.近场地震动 CHY101 作用下引起的墩顶水平速度(见图 7)远大于普通

地震动(CHY074).近场速度脉冲对小阻尼结构有不利影响^[11].尽管钢筋混凝土结构有较大阻尼,但当桥墩脱离摇摆时,桩基础(含地基土)等边界约束减弱,结构的阻尼会有所减小,此时直接承受高能量脉冲速度的冲击,会造成桥墩产生较大的基础竖向脱离位移(见图 8),较大的基础脱离位移也会由刚体转动效应引起水平摇摆位移.本算例在 CHY101 波下,基础的竖向脱离位移为 68.2 mm,由其引起的墩顶水平位移为 791 mm,约占总位移的 90%.因此,近场采用自复位摇摆隔震时应注意采用相应的限位措施,以控制墩底脱离转动引起的刚体位移.

表 2 摇摆隔震反应比较

地震动记录	墩顶水平位移/cm		相差/%	墩底弯矩/(kN·m)		相差/%
	顺桥向输入	(顺+竖向)输入		顺桥向输入	(顺+竖向)输入	
CHY101	87.7	121.7	39	219 374	260 574	19
CHY074	46.5	50.2	8	216 688	229 268	6

由图 9、10 及表 2 可知,近场 CHY101 与普通 CHY074 的墩底弯矩时程曲线形状相近,且 CHY101 的墩底弯矩峰值为 219 374 kN·m,仅比 CHY074 的大 1.2%,脱离摇摆后墩顶水平加速度也相差较小.这说明,就墩底弯矩而言,对近场地震动特性不敏感.这是因为,地震下摇摆隔震高墩具有明确的脱离条件,当墩底的地震弯矩大于其抗倾覆脱离弯矩 $M_y = N \cdot B/2$ 时桥墩发生脱离^[1,4],而水平地震动下对桥墩的轴力影响很小,故脱离后桥墩发生摇摆,墩底约束变弱,其弯矩也基本不增加.本文算例的抗倾覆脱离弯矩 $M_y = 169\,365\text{ kN}\cdot\text{m}$,表 2 中的墩底地震弯矩略大于 M_y 是由于桥墩的动力放大效应所致.

时,轴力变小进而减小抗倾覆脱离弯矩 M_y ,从而增加墩底脱离次数、增大脱离位移(见图 13).前面已经分析,脱离转动引起的墩顶水平位移在总位移中占绝对优势.这可以解释为何产生了竖向地震动增大墩顶水平位移.近场的竖向地震动影响较大是因为近场的竖向地震动效应显著.

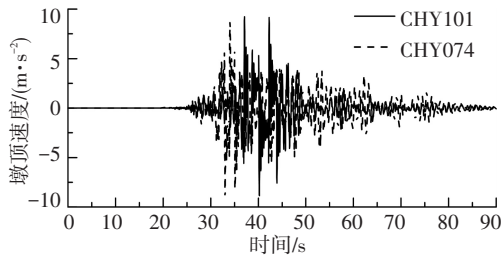


图 10 墩顶水平加速度时程曲线

由图 11、12 及表 2 可知,考虑竖向地震动作用后近场地震动 CHY101 下墩顶的位移增加 39%,普通地震动 CHY074 下墩顶的位移增加 8%.这说明,竖向地震作用对墩顶水平位移有较大影响,且近场的竖向地震动效应相对更加显著.

这是因为,竖向地震动作用使墩底产生较大的地震轴力,并且地震轴力的方向随地震动方向的变化而时刻在变.当地震轴力方向与恒载竖向力相反

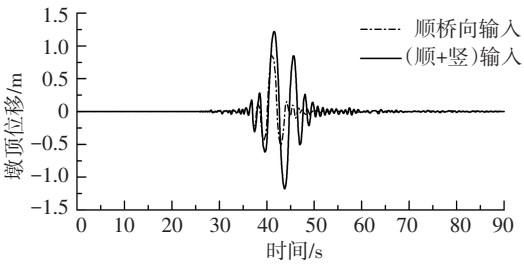


图 11 墩顶水平位移时程曲线(CHY101)

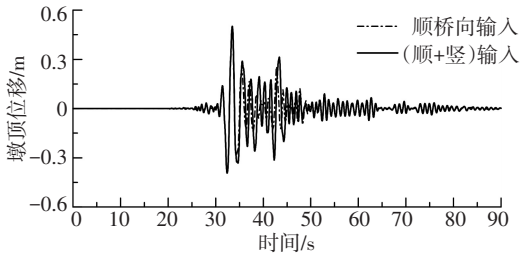


图 12 墩顶水平位移时程曲线(CHY074)

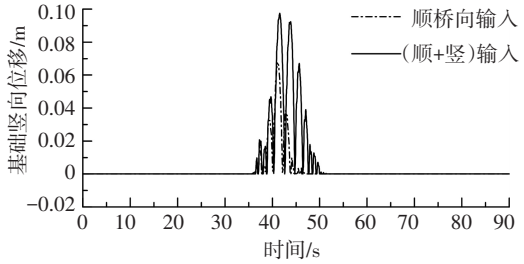


图 13 基础中心竖向位移时程曲线(CHY101)

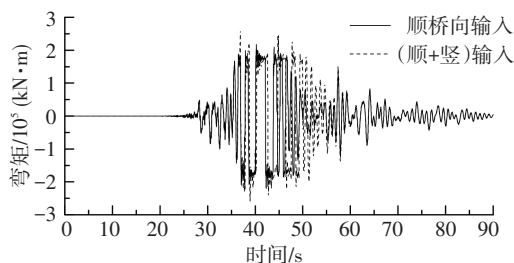


图14 墩底弯矩时程曲线(CHY101)

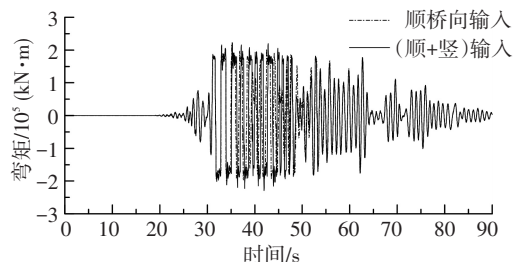


图15 墩底弯矩时程曲线(CHY074)

由图14、15及表2可知,竖向地震作用均增大了墩底弯矩,其中近场地震动CHY101下墩底弯矩增大了19%,普通地震动下增大了6%。与墩顶位移相似,也是近场地震动的竖向地震动效应影响较显著。这是因为,当地震轴力方向与恒载竖向力一致时,会增大抗倾覆提离弯矩 M_y (见图16),减少墩底提离次数,从而增大墩底弯矩。

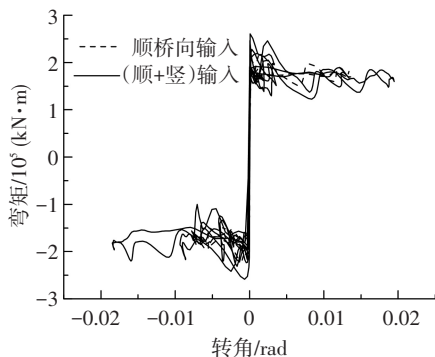


图16 基础底面中心的弯矩-转角关系(CHY101)

综合以上分析,桩基础高墩自复位隔震装置用于近场隔震时,由于产生较大的墩顶位移,为避免产生邻梁或梁、台之间的碰撞,应采取相应的限位及防碰撞措施。

5 结论

1) 摇摆隔震高墩的墩顶位移反应对近场地震动特性比较敏感。近场地震动引起较大的墩顶位移,摇摆隔震设计时应注意采用限位措施。

2) 摇摆隔震高墩的墩底弯矩反应对近场水平地震动特性不敏感,其结果与普通地震动接近。

3) 近场竖向地震作用对墩顶位移有重要影响,会显著增大墩顶位移。

4) 近场竖向地震作用对墩底弯矩有较大影响,会明显增大墩底弯矩。

参考文献

- [1] 夏修身. 铁路高墩抗震设计方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012.
- [2] 梁智垚, 李建中. 桥梁高墩合理计算模型探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(2): 91-98.
- [3] 夏修身, 陈兴冲, 王常峰. 铁路高墩弹塑性地震反应分析[J]. 世界地震工程, 2008, 24(2): 117-121.
- [4] 夏修身, 陈兴冲. 铁路高墩桥梁基底转动隔震与墩顶减震的效果对比研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(9): 102-107.
- [5] 夏修身, 陈兴冲, 王希慧, 等. 剪力键对隔震桥梁地震反应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(6): 104-109.
- [6] SYMANS M D, CHARNEY F A, WHITTAKER A S, et al. Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(1): 3-21.
- [7] 李爽, 谢礼立. 近场问题的研究现状与发展方向[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 102-111.
- [8] 袁伟泽, 陈清军, 曹丽雅. 长周期地震动作用下高层框架结构的损伤分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(3): 320-325.
- [9] 徐龙军, 于海英, 曹文海, 等. 汶川地震远场地震动场地相关性分析方法评价[J]. 地震学报, 2010, 32(2): 175-183.
- [10] 王京哲, 朱晞. 近场地震速度脉冲下的反应谱加速度敏感区[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(6): 27-30.
- [11] STEWART J P, CHIOU S J, BRAY J D, et al. Ground motion evaluation procedures for performance-based design[R]. Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2001.
- [12] MAZZA F, VULCANO A. Effects of near-fault ground motions on the nonlinear dynamic response of base-isolated r. c. framed buildings[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41(2): 211-232.
- [13] OZBULUT O E, HURLEBAUS S. Optimal design of superelastic-friction base isolators for seismic protection of highway bridges against near-field earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2011, 40(3): 273-291.
- [14] 杨迪雄, 李刚, 程耿东. 近断层脉冲型地震动作用下隔震结构地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(2): 119-124.
- [15] 火明譔, 赵亚敏, 陆鸣. 近断层地震作用隔震结构研究现状综述[J]. 世界地震工程, 2012, 28(3): 161-170.
- [16] GAZETAS G. Analysis of machine foundation vibrations: state of the art[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1983, 2(1): 2-41. (编辑 赵丽莹)