

DOI:10.3963/j.issn.1671-4431.2009.14.018

# 近断层地震各因素对基础隔震结构的影响

党育<sup>1,2</sup>, 霍凯成<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 武汉 430070; 2. 兰州理工大学土木学院, 兰州 730050)

**摘要:** 系统地分析了场地土、近断层地震的频谱、加速度峰值、脉冲周期等因素对基础隔震结构的影响。采用不同场地下的实际近断层地震波, 计算了一个多层隔震结构的各项能量响应, 并与远场地震下的情况进行对比, 结果发现, 场地土会影响地震波频谱, 在硬场及中等场地下, 近断层地震包含较多的长周期频谱, 但这一特征在软场情况下并不明显, 因此, 在硬场和中等场地下, 近断层地震较远场地震对隔震结构更为不利, 而在软场下, 远场地震对隔震结构更不利; 近断层地震的加速度峰值不是影响隔震结构位移的主要因素, 隔震结构的最大变形由地震瞬时输入能量决定; 脉冲周期对隔震结构影响不大, 应调整结构的自振周期以改善减震效果。

**关键词:** 近断层; 基础隔震; 能量响应

**中图分类号:** TU 311

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-4431(2009)14-0072-06

## Effect of Characteristics of Near-fault Ground Motions on Isolated Buildings

DANG Yu<sup>1,2</sup>, HUO Kai-cheng<sup>1</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge & Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** A detailed and systematic investigation on the performance of isolated buildings subject to near-fault motions is introduced in this paper. Energy analysis of an actual multi-stories isolated building is calculated under a number of real near-fault motions with various frequency spectra, ground types, peak accelerations and pulse periods. The following conclusions are attained. (1) Ground type have effect on the frequency spectra of near-fault motions. On rigid ground and medium ground, the high frequency is in the majority under near-fault motions, which is not good for isolated buildings, whereas no same happen to the soft ground. (2) The peak acceleration is not responsible for the displacement of isolated buildings. The instantaneous input energy of isolated buildings lead to the maximum displacement of isolated buildings. (3) The effect of pulse period on isolated buildings is not prominent. Therefore, the increase of structural periods will improve performance of isolate buildings.

**Key words:** near-fault motion; isolated building; energy response

最近几次近断层地震, 如美国 Northridge 地震(1994), 日本 Kobe(1995), 台湾集集地震(1999), 土耳其 Koceli 地震(1999), 伊朗 Bam 地震(2003)等, 主要表现为具有长周期大幅值的脉冲型地震波。研究者认为, 基础隔震结构在近断层地震会较远场地震下不利<sup>[1,2]</sup>。那么, 近断层地震的哪些特性会影响隔震结构的响应呢? 文献[3]对非隔震建筑做了分析, 认为结构强度依赖于脉冲持时与结构自振周期之比。文献[4]讨论

收稿日期: 2009-01-01.

作者简介: 党育(1976-), 女, 副教授. E-mail: dangyu@lut.cn

了影响框架结构动力响应的近断层参数, 认为 PGV/PGA、谱速度、输入能等参数的增加会使结构层间位移增加。文献[5]研究了近断层地震地面运动的输入能量, 发现输入能在长周期段(4—6 s)为定值, 且中长周期结构的最大变形由近断层地震的长周期脉冲引起。文献[2]采用一个具体的隔震建筑进行时程分析, 讨论了近断层地震对隔震结构的影响。结果发现, 近断层地震动下隔震层位移远大于远场地震, 但层间位移二者接近, 顶层加速度近断层地震小。以上研究或针对非隔震结构, 或只讨论了近断层地震下的隔震结构的响应特点, 对近断层地震特性对隔震结构响应的影响未做讨论。

该文从能量角度, 采用不同场地的实际近断层地震波, 计算了一个多层隔震结构的各项能量响应, 并与远场地震下的情况进行对比, 系统地分析了场地土、近断层地震的频谱、加速度峰值、脉冲周期等因素对基础隔震结构的影响, 说明了近断层地震影响隔震结构的主要因素, 可帮助设计人员更好地完成隔震结构选型。

## 1 基础隔震结构的运动方程和能量表达式

基础隔震结构的运动方程为

$$MX + CX + U = -ME\ddot{u}_g \tag{1}$$

式中:  $U$  为结构的滞回恢复力, 若各层的恢复力模型用 Bouc-Wen 模型<sup>[1]</sup>,  $\ddot{u}_g$  地震波, 则

$$u_i = \alpha_i k_i x_i + (1 - \alpha_i) k_i D_{yi} v_i$$

$$\dot{v}_i = D_{yi}^{-1} [A_i \dot{x}_i - \beta_i |\dot{x}_i| |v_i|^{n_i-1} v_i - \gamma_i \dot{x}_i |v_i|^{n_i}]$$

其中:  $x_i$  为结构层间相对位移,  $k_i$  为结构的屈服前刚度,  $\alpha_i$  为结构屈服后刚度比,  $D_{yi}$  为屈服位移,  $A_i, \beta_i, n_i, \gamma_i$  均为滞回曲线的参数,  $v$  为滞回位移。

则式(1)可表示为

$$MX + CX + KX + Hv = -ME\ddot{u}_g \tag{2}$$

其中

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ m_2 & m_2 & 0 & 0 \\ \dots & & & \\ m_n & m_n & m_n & m_n \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & -c_2 & & & & 0 \\ & c_2 & -c_3 & & & \\ & & c_3 & -c_4 & & \\ & & & \dots & & \\ & & & & c_{n-1} & -c_n \\ 0 & & & & & c_n \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_1 k_1 & -\alpha_2 k_2 & & & & 0 \\ & \alpha_2 k_2 & -\alpha_3 k_3 & & & \\ & & \alpha_3 k_3 & -\alpha_4 k_4 & & \\ & & & \dots & & \\ & & & & \alpha_{n-1} k_{n-1} & -\alpha_n k_n \\ 0 & & & & & \alpha_n k_n \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} (1 - \alpha_1) k_1 & -(1 - \alpha_2) k_2 & & & & 0 \\ & (1 - \alpha_2) k_2 & -(1 - \alpha_3) k_3 & & & \\ & & (1 - \alpha_3) k_3 & -(1 - \alpha_4) k_4 & & \\ & & & \dots & & \\ & & & & (1 - \alpha_{n-1}) k_{n-1} & -(1 - \alpha_n) k_n \\ 0 & & & & & (1 - \alpha_n) k_n \end{bmatrix}$$

$$E = \{1 \quad 0 \quad \dots \quad 0\}^T$$

对上式 2 侧积分, 可得结构的能量平衡表达式为<sup>[6]</sup>

$$\int_0^x MX dx + \int_0^x CX dx + \int_0^x KX dx + \int_0^x Hvd x = - \int_0^x ME\ddot{u}_g dx \tag{3}$$

其中

$$\begin{aligned}
 E_k(t) &= \int_0^x \mathbf{M}\dot{\mathbf{X}}\mathrm{d}x = \int_0^t \mathbf{X}^T \mathbf{M}\dot{\mathbf{X}}\mathrm{d}t \\
 E_d(t) &= \int_0^x \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}\mathrm{d}x = \int_0^t \mathbf{X}^T \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}\mathrm{d}t \\
 E_s(t) &= \int_0^x \mathbf{K}_s\mathbf{X}\mathrm{d}x = \int_0^t \mathbf{X}^T \mathbf{K}\mathbf{X}\mathrm{d}t \\
 E_u(t) &= \int_0^x \mathbf{H}\mathbf{v}\mathrm{d}x = \int_0^t \mathbf{X}^T \mathbf{H}\mathbf{v}\mathrm{d}t \\
 E_I(t) &= -\int_0^x \mathbf{M}\mathbf{E}\ddot{u}_g\mathrm{d}x = -\int_0^t \mathbf{X}^T \mathbf{M}\mathbf{E}\ddot{u}_g\mathrm{d}t
 \end{aligned}$$

$E_k$ ,  $E_d$ ,  $E_s$ ,  $E_u$ ,  $E_I$ 分别表示结构的动能, 阻尼能, 弹性势能, 滞回能, 地震输入能。

## 2 地震波及隔震结构参数

### 2.1 地震波

使用2组地震波, 一组是近断层地震波<sup>[5]</sup>, 一组是远场地震波<sup>[6,7]</sup>, 如表1所列。以下计算未做特别说明时, 所有地震波的加速度峰值调整为  $300 \text{ cm/s}^2$ 。

表1 典型的近断层地震及远场地震数据

类型	地震波	位置和方向	场地类别	加速度峰值/g	速度峰值/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	脉冲周期/s
近断层	Loma Prieta, 1989	LGPC, $0^\circ$	硬场	0.570	96.3	3.2
	Northridge, 1994	Rinaldi, $228^\circ$	中等场	0.481	81.9	2.0
	Imperial Valley, 1979	Array 6, $140^\circ$	软场	0.339	68.4	4.3
远场	Northridge, 1994	LA Griffith, $90^\circ$	硬场	0.189	17.9	—
	Taft, 1952	Kern country, $21^\circ$	中等场	0.178	17.5	—
	Coalinga, 1983	Parkfield, $0^\circ$	软场	0.182	14.7	—

### 2.2 隔震结构

采用一个6层的隔震结构, 计算参数为<sup>[8]</sup>:

上部结构各层质量  $m_i=5\ 897 \text{ kg}$  ( $i=2, 3, \dots, 6$ ); 上部结构的屈服前刚度  $k_i$  ( $i=2, 3, \dots, 6$ )= $33\ 732, 29\ 093, 28\ 621, 24\ 954, 19\ 059 \text{ kN/m}$ , 屈服位移  $D_{y,i}=2.4, 2.07, 2.04, 1.78, 1.36 \text{ cm}$  ( $i=2, 3, \dots, 6$ ), 屈服后刚度比  $\alpha_i=0.1$  ( $i=2, 3, \dots, 6$ ); 上部各层的阻尼系数  $c_i=67, 58, 57, 50, 38 \text{ kNs/m}$  ( $i=2, 3, \dots, 6$ ); 上部结构滞回曲线的参数  $A_i=1.0, \beta_i=1.0, n_i=12, \gamma_i=1.0$  ( $i=2, 3, \dots, 6$ )。

隔震层参数: 隔震层质量  $m_1=6\ 800 \text{ kg}$ ; 屈服位移  $D_{y,1}=10 \text{ cm}$ , 屈服后刚度比  $\alpha_1=0.6$ ; 隔震层阻尼比  $\zeta_1=10\%$ ; 隔震层滞回曲线的参数  $A_i=1.0, \beta_i=0.5, n_i=3, \gamma_i=0.5$ 。设隔震结构的第一振型为:  $\Phi=\{1, 1, 1, 1, 1\}^T$ , 则对应第一振型的隔震结构广义质量  $m_1^*=\Phi^T \mathbf{M}\Phi=\sum_{i=1}^n m_i$ , 隔震层的屈服前刚度和阻尼为  $k_1=m_1^* 4\pi^2/T_n^2$ ,  $c_1=k_1 T_n \zeta_1/\pi$ 。

## 3 分析和讨论

### 3.1 近断层地震与远场地震的频谱对比

从图1—图3可看出, 近断层地震比远场地震的频谱窄很多, 且卓越周期较长, 对应的功率谱峰值很大, 说明近断层地震的主要特征是包含较多的长周期频谱, 但这一特征在软场情况下并不明显。因此, 近断层地震对中长周期结构不利。

### 3.2 不同场地对隔震结构的影响

设隔震结构基本周期为  $2.5 \text{ s}$ , 则屈服前刚度  $231.5 \text{ kN/m}$ 。分别输入各类场地下近断层地震波和远场地震波, 按式(1)—式(3)计算, 求得结构的地震输入能的时程曲线, 见图4。

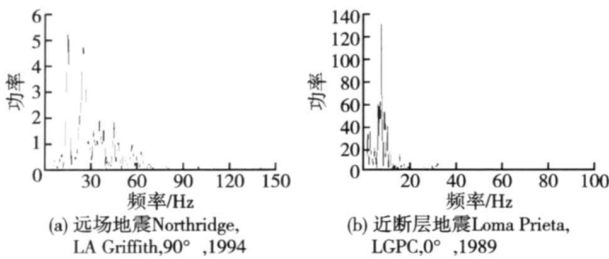


图1 硬场情况下地震波的功率谱

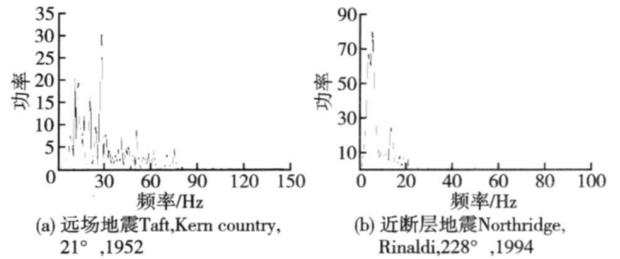


图2 中等场情况下地震波的功率谱

从图 4 可看出, 硬场及中等场地下, 近断层地震下隔震结构的地震输入能远大于远场地震, 因为近断层地震的频谱集中在长周期段。而在软弱场地下, 近断层地震下隔震结构的地震输入能小于远场地震, 因为是在软弱场地下, 远场地震和近断层地震的卓越频率基本接近, 且远场地震的功率谱峰值明显大于近断层地震下的数值。因此, 场地土会影响地震波的频率, 从而影响隔震结构的响应, 在

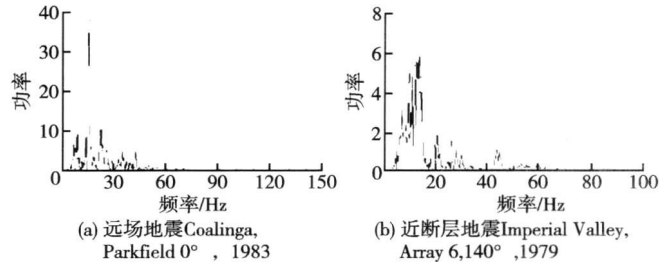


图3 软场情况下地震波的功率谱

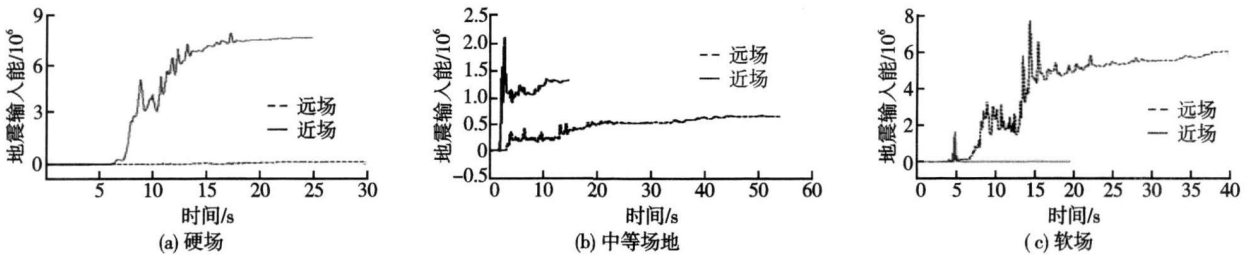


图4 远场地震下与近断层地震下隔震结构的输入能对比

硬场和中等场地下, 近断层地震较远场地震对隔震结构更为不利, 但在软场下, 远场地震反而对隔震结构更不利。

### 3.3 地震加速度峰值对隔震结构的影响

结构的瞬时输入能  $\Delta E = - \int_t^{t+\Delta t} XME\ddot{u}_g dt$ <sup>[9]</sup>, 该值表示输入结构的瞬时能量脉冲。输入 3 条近断层地震, 并调整地震加速度峰值相同, 分析地震波峰值与结构瞬时输入能、结构位移响应之间的关系。

图 5 中左侧图表示地震波时程, 中间图为结构的瞬时输入能量时程, 右侧图表示结构的位移时程。从图 5 可看出, 地震加速度峰值出现时间基本对应结构的瞬时输入能峰值出现时间, 但即使调整地震波加速度峰值相同, 瞬时输入能的峰值并不相同, 对应的隔震结构的最大位移也不相同。说明在近断层地震下, 隔震结构的最大变形是由地震瞬时脉冲输入的能量引起的, 不是地震峰值加速度。而且在中等场和软场中, 瞬时输入能的峰值出现时间与结构最大位移出现时间也基本一致。在硬场地震波下, 瞬时输入能的峰值出现时间与结构最大位移并不完全对应, 这可能是由于硬场的 Loma Prieta, 1989 波含有较多的长周期成分, 使隔震结构偏离振动中心位置过大而造成的。

### 3.4 脉冲周期对隔震结构的影响

输入 3 条近断层地震波, 并取  $T_n/T_p$  从 0.5—2.5 变化, 其中  $T_n$  为隔震结构的基本周期,  $T_p$  为输入地震波的脉冲周期。则隔震层刚度和阻尼按式(4)、式(5)计算。讨论隔震结构各项能量的变化趋势。

从图 6 可看出, 在不同地震波下, 隔震结构的各项能量基本随  $T_n/T_p$  增加而单调下降, 说明隔震结构响应与地震波脉冲周期  $T_p$  关系不大, 关键是隔震结构周期  $T_n$ 。从图 6(b), 图 6(c) 还可看出, 当  $T_n/T_p$  分别大于 1.5 和 0.75 后, 隔震结构各项能量基本保持不变。表明在中等场地和软场下, 当  $T_n$  延长至 3.0 s 后, 对减震效果的影响相对比较小。就各项能量所占比例而言, 随隔震结构的自振周期增加, 动能所占比例逐渐增加, 其余各项能量所占比例逐渐减小, 且阻尼耗能大于滞回耗能, 表明随着隔震结构周期的增加, 大部分地震输入能转化为结构动能, 部分由阻尼所消耗, 而结构塑性变形很小。但在硬场情况下,  $T_n/T_p \approx 0.75$  时, 各项能量均出现峰值, 且  $E_{kmax}/E_{Lmax}$  大于其它能量比, 说明此时隔震结构地震输入能较大, 且结构会有较大

的塑性变形,此时减震效果最差。

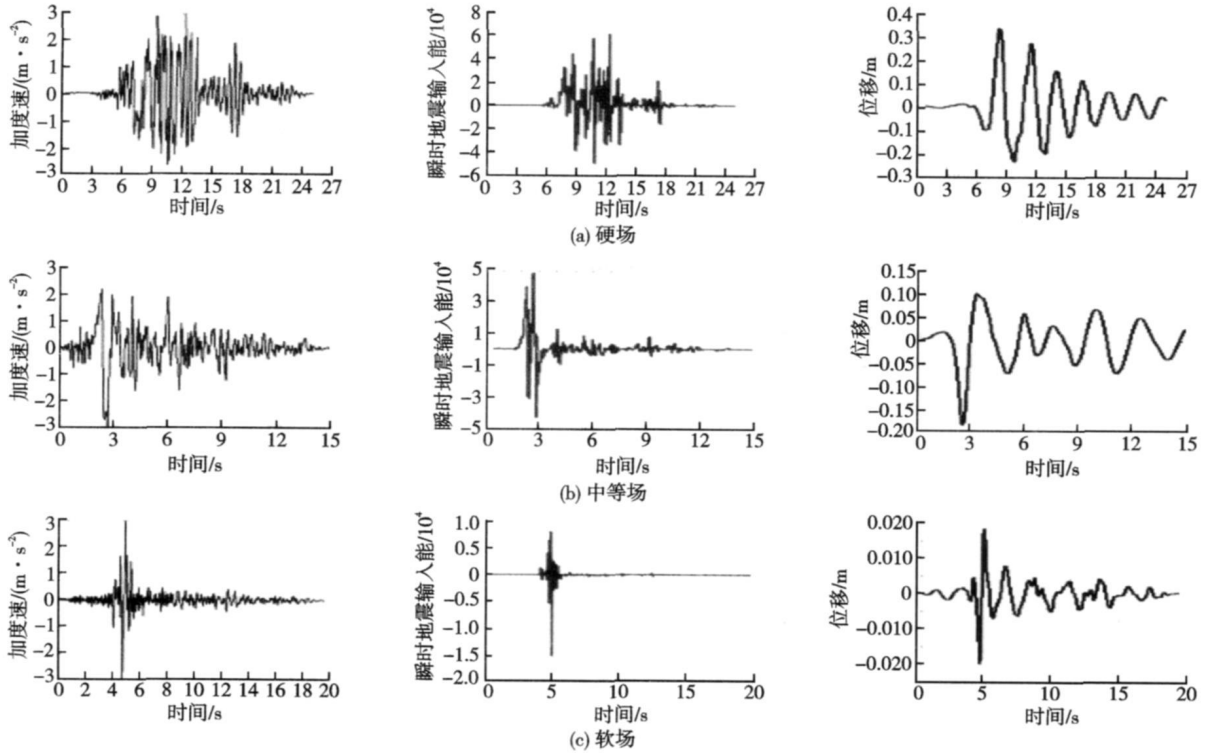


图5 地震加速度、瞬时输入能、结构位移之间的关系

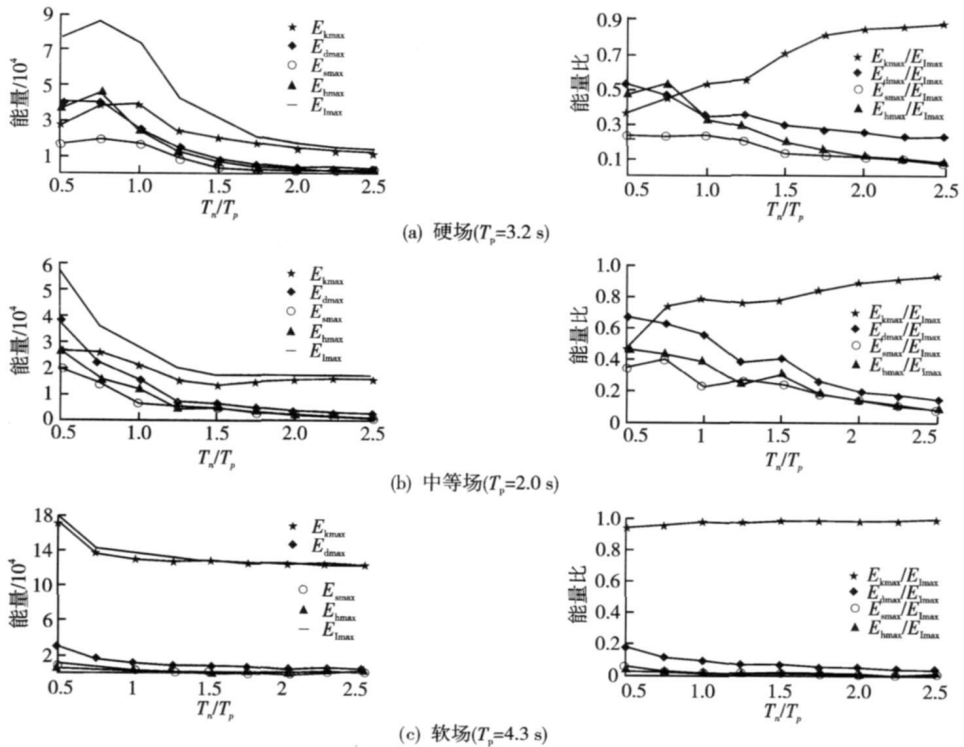


图6 各项能量的最大值与 $T_1/T_p$ 之间的关系

### 4 结论

a. 近断层地震的主要特征是包含较多的长周期频谱,并且该特征在硬场和中等场地非常明显,使得在近断层地震下隔震结构的地震输入能远大于远场地震,这对隔震结构非常不利,但地震输入能会随隔震周期的延长而减小;

b. 场地土会影响地震波的频率,从而影响隔震结构的响应,在硬场和中等场地下,近断层地震较远场地

震对隔震结构更为不利,但在软场下,远场地震反而对隔震结构更不利。

c. 在近断层地震下,最大瞬时输入能基本对应着隔震结构的最大位移,说明在近断层地震下,隔震结构的最大变形由地震长周期脉冲输入的能量引起,而不是地震峰值加速度;

d. 近断层地震的脉冲周期  $T_p$  对隔震结构影响不大,要改善隔震结构的减震效果,应调整结构的自振周期。在硬场情况下,应使  $T_n/T_p > 0.75$  以达到较好的减震效果。

### 参考文献

- [1] Marano G C, Greco R. Efficiency of Base Isolation System in Structural Seismic Protection and Energetic Assessment [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003, 32(11):1505-1531.
- [2] 杨迪雄,赵岩,李刚. 近断层地震运动特征对长周期结构地震响应的影响分析[J]. *防灾减灾学报*, 2007, 27(2): 133-140.
- [3] Anderson J C, Bertero V V. Uncertainties in Establishing Design Earthquake [J]. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 1987, 113(8):1709-1724.
- [4] Liao W I, Loh C H, Wan S. Earthquake Response of RC Moment Frame Subjected to Near-fault Ground Motions [J]. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2001, 10(2):219-229.
- [5] 江辉,朱晞. 近断层地震地面运动的能量与位移延性需求 [J]. *工程抗震与加固改造*, 2005, 27(4):58-63.
- [6] 党育,杜永峰,李慧. 基础隔震结构设计及施工指南 [M]. 中国水利水电出版社及知识产权出版社, 2007.
- [7] Anil K. Chopra, Chatpan Chintanapakadee. Comparing Response of SDF Systems to Near-fault and Far-fault Earthquake Motions in the Context of Spectral Regions [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2001(30):1769-1789.
- [8] Yang Jann N, Agrawal Anil K. Semi-active Hybrid Control Systems for Nonlinear Buildings Against Near-field Earthquakes [J]. *Engineering Structures*, 2002(24):271-280.
- [9] 胡冗冗,王亚勇. 地震动瞬时能量与结构最大位移反应关系研究 [J]. *建筑结构学报*, 2000, 21(1):71-76.

(上接第71页)

### 参考文献

- [1] 郑文忠,王英. 预应力混凝土房屋结构设计统一方法与实例 [M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1998.
- [2] 中国建筑科学研究院. GB 50009—2001 建筑结构荷载规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [3] 中国建筑科学研究院. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.