

杨迪雄, 赵岩. 2010. 近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对隔震建筑结构抗震性能的影响. 地震学报, 32(5): 579-587.

Yang Dixiong, Zhao Yan. 2010. Effects of rupture forward directivity and fling step of near-fault ground motions on seismic performance of base-isolated building structure. *Acta Seismologica Sinica*, 32(5): 579-587.

# 近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对隔震建筑结构抗震性能的影响\*

杨迪雄\* 赵岩

(中国辽宁大连 116023 大连理工大学工程力学系, 工业装备结构分析国家重点实验室)

**摘要** 选择台湾集集地震和美国北岭地震的近断层地震动记录作为输入, 考察了近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应引起的两种不同速度脉冲运动对单自由度体系和长周期橡胶支座隔震建筑结构抗震性能的影响. 反应谱分析表明, 破裂向前方向性与滑冲效应对工程结构地震响应的影响是随结构周期变化的. 在中短周期段, 含破裂向前方向性效应地震动的谱加速度值大于含滑冲效应地震动的谱加速度值; 而在长周期段, 含滑冲效应地震动的谱加速度值大于含破裂向前方向性效应的谱加速度值. 并且, 与无脉冲地震动作用相比, 含破裂向前方向性与滑冲效应脉冲的近断层地震动作用下隔震建筑的地震响应显著增大. 滑冲效应引起的速度脉冲使隔震建筑底部的层间变形和楼层剪力明显增大, 这意味着滑冲效应脉冲比向前方向性效应脉冲对长周期建筑结构的破坏更具危害性.

**关键词** 近断层地震动 破裂向前方向性效应 滑冲效应 速度脉冲 反应谱 隔震建筑动力响应

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2010.05.007 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

## Effects of rupture forward directivity and fling step of near-fault ground motions on seismic performance of base-isolated building structure

Yang Dixiong\* Zhao Yan

(Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, State Key Laboratory for Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian, 116023, China)

**Abstract:** Near-fault ground motion records from two different earthquakes, the 21 September 1999 Jiji (Chi-Chi), Taiwan, earthquake and 17 January 1994 Northridge earthquake, are selected as seismic input, and the influence of velocity pulse of near-fault ground motions with rupture forward directivity and fling step on the seismic performance of single degree of freedom (SDOF) system and base-isolated buildings with lead rubber bearings are examined. The response spectrum ana-

\* 基金项目 国家自然科学基金 (90815023, 50978047) 资助.  
收稿日期 2008-10-23 收到初稿, 2009-11-12 决定采用修改稿.  
† 通讯作者 e-mail: yangdx@dlut.edu.cn

lysis illustrates that the effects of rupture forward directivity and fling step of ground motions on the seismic responses of engineering structure are period-dependent. In the range of short and medium period, the spectral acceleration of ground motions with forward directivity is larger than that with fling step. In the long period range, the spectral acceleration of motions with fling step is generally larger than that with forward directivity. Furthermore, compared with the non-pulse ground motions, the dynamic responses of base-isolated buildings under the ground motions with rupture forward directivity and fling-step pulses are increased significantly. Moreover, the velocity pulses from the effect of fling step remarkably amplify the interstory drift and shear force of base-isolated building at lower stories. This implies that the fling-step pulse causes more severe damage to long-period buildings than the forward directivity pulse does.

**Key words:** near-fault ground motion; rupture forward directivity; fling-step effect; velocity pulse; response spectrum; base-isolated building; dynamic response

## 引言

最近几次近断层大地震,如 1994 年美国北岭地震、1995 年日本神户地震、1999 年我国台湾集集地震、1999 年土耳其 Kocaeli 地震和 2008 年四川汶川地震等独特的运动特征及其对工程结构的严重破坏引起了地震工程学界的密切关注(Somerville *et al*, 1997; 俞言祥, 高孟潭, 2001; Wang *et al*, 2002; Bray, Rodriguez-Marek, 2004; 刘启方等, 2006; 韦韬等, 2006; 田玉基等, 2007; 李爽, 谢礼立, 2007). Somerville 等(1997)的研究表明,断层的破裂向前方向性效应与滑冲效应使近断层地震动具有明显的速度和位移脉冲,从而在振幅、频谱和持时三方面与远场地震动有明显的差别. 一般来说,近断层脉冲型地震动的加速度、速度和位移时程幅值较大;低频分量丰富,特征周期延长;持时较短;断层走向的法向分量和平行分量的地震动特征和强度差别显著(Somerville *et al*, 1997; Wang *et al*, 2002; Bray, Rodriguez-Marek, 2004).

事实上,破裂向前方向性效应引起的速度脉冲主要发生于垂直于断层面的方向,而地面滑冲效应引起的速度脉冲则表现在平行于断层滑动的方向. 因此,对于走滑断裂,向前方向性速度脉冲与滑冲引起的速度脉冲出现在不同的地震动分量上. 其中,向前方向性脉冲主要表现在垂直于断层走向的分量上,滑冲效应引起的速度脉冲表现在平行于断层走向的分量上. 对于倾滑断裂,破裂方向性效应引起的速度脉冲与滑冲位移引起的速度脉冲都发生在垂直于断层走向的分量,因此,两种速度脉冲可以叠加在一起(Somerville *et al*, 1997; 刘启方等, 2006). 而且,近断层地震动的上盘效应和竖向加速度效应也比较显著.

值得注意的是,动态的破裂向前方向性效应和静态的滑冲位移导致近断层地震动产生两种不同的长周期速度脉冲(Somerville *et al*, 1997). 速度脉冲在地震动的初始就给结构输入很高的能量,从而引起结构严重破坏(Hall *et al*, 1995; Malhotra, 1999; Liao *et al*, 2001; Mavroeidis *et al*, 2004; Alavi, Krawinkler, 2004; Akkar *et al*, 2005; 杨迪雄等, 2007). Hall 等(1995)指出,脉冲型近断层地震动作用下结构抗震需求可能远远超过高层

建筑、隔震建筑等柔性结构的抗震能力。Malhotra (1999) 分析了近断层脉冲型地震动的三联弹性反应谱特征, 表明具有高 PGV/PGA (峰值地面速度/峰值地面加速度) 比值的地震动在反应谱上具有宽的加速度敏感段, 这意味着将增大高层建筑的基底剪力、层间变形和延性需求。Liao 等(2001) 讨论了增大钢筋混凝土框架结构动力反应的一些近断层地震动参数, 如 PGV/PGA、谱速度、输入能  $E_i$ 。Mavroeidis 等(2004) 利用他们提出的模拟脉冲型近断层地震动的数学模型研究单自由度体系的弹性、非弹性地震响应, 并且指出速度脉冲周期  $T_p$  是近断层地震动的一个重要参数。

但是, 上述研究都没有区分破裂向前方向性与滑冲效应引起的两种不同速度脉冲运动将对结构动力响应产生何种不同的不利影响。直到最近, Kalkan 和 Kunnath (2006) 分析了这两种不同速度脉冲对 3 座高度分别为 4 层、6 层和 13 层的钢框架建筑结构弹塑性地震响应的影响。结果表明, 向前方向性效应脉冲主要增大高阶振型响应, 从而结构中上部层间变形较大; 滑冲效应脉冲主要激起结构的基本振型响应, 从而结构底部层间变形较大。然而, 这些速度脉冲运动对隔震建筑等长周期工程结构抗震性能的影响还需要更加全面、深入的研究。

本文首先以台湾集集地震和美国北岭地震的近断层地震动记录作为输入, 对地震动破裂向前方向性效应、滑冲效应产生的速度脉冲对双线性单自由度体系加速度谱响应的影响进行分析。其目的是从整体上把握具有破裂向前方向性与滑冲效应的近断层地震动的不同结构效应。然后, 研究近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对橡胶支座隔震建筑地震响应和抗震性能的影响。

## 1 近断层地震动特性参数和加速度反应谱

### 1.1 近断层地震动记录及特性参数

选择来自两次重大地震事件即台湾集集大地震(1999 年 9 月 21 日, 矩震级  $M_w = 7.6$ ) 和美国加州北岭地震(1994 年 1 月 17 日,  $M_w = 6.6$ ) 的近断层地震动记录。这两次地震都属于倾滑断裂。表 1 所示为 3 组近断层地震动记录及其特性参数。其中集集地震记录到了具有滑冲效应的速度脉冲记录, 而北岭地震没有记录到这类速度脉冲记录, 只记录到了具有破裂向前方向性效应的速度脉冲记录。所选记录的 PGV 和 PGA 分别大于 30 cm/s 和 100  $\text{cm/s}^2$ ; 断层距在 20 km 以内。地震动的 PGV/PGA 较大, 表明该记录可能含有速度脉冲, 而无脉冲型地震动记录的 PGV/PGA 比值通常较小。表 1 中也列出了地震动的速度谱卓越周期  $T_{pv}$  和 95% 能量持时  $t_d$ 。比较可见, 脉冲型地震动的卓越周期  $T_{pv}$  较大, 而无脉冲地震动的卓越周期  $T_{pv}$  一般较小。

图 1 所示为含破裂向前方向性脉冲的近断层地震动 RRS-228 台站的速度和位移时程, 可见其明显的速度和位移脉冲, 而且脉冲呈双向往复形式。图 2 表示含滑冲效应脉冲的近断层地震动 TCU052-NS 的速度和位移时程, 可见其含有明显的速度脉冲, 该脉冲主要呈单向运动; 位移时程可见明显的台阶, 它在断层地面表现为很大的位移隆升。

### 1.2 含破裂向前方向性与滑冲效应的近断层地震动加速度反应谱

为了考察近断层地震动的破裂向前方向性与滑冲效应对工程结构的影响, 首先根据地震动运动特征类型, 分别计算了近断层地震动作用下弹性和双线性单自由度体系的动力响应。基于计算结果, 进行分析和讨论如下:

表 1 3 组近断层地震动的特性参数

Table 1 Characteristic parameters of three sets of near-fault ground motions

地震动特征	台站及分量	断层距 /km	场地类型	PGA / $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$	PGV / $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	PGD /cm	PGV/PGA /s	$T_{\text{pv}}$ /s	$t_d$ /s
破裂 向前 方向性 脉冲	TCU051-EW	6.95	D	160	51.53	124.52	0.27	6.6	24.18
	TCU054-EW	4.64	D	146	45.69	121.47	0.32	8.1	23.98
	TCU082-EW	4.47	D	226	51.54	152.35	0.23	7.6	23.28
	TCU102-EW	1.19	D	304	87.16	163.13	0.29	2.6	14.93
	TCU120-EW	9.87	C	228	62.58	107.63	0.28	2.0	32.35
	JEN-022	5.43	D	424	106.22	43.06	0.26	2.8	12.42
	RRS-228	6.50	D	838	166.05	28.78	0.20	1.0	7.03
	SCE-288	5.19	D	493	74.58	28.69	0.15	2.2	7.53
	SCS-052	5.35	D	612	117.45	53.47	0.20	3.0	15.10
	SYL-360	5.30	D	843	129.71	32.68	0.16	2.6	5.32
滑冲 效应 脉冲	TCU052-NS	1.84	D	488	220.64	723.27(676.90)	0.46	7.9	15.92
	TCU052-EW	1.84	D	356	182.96	506.73(-443.10)	0.52	5.6	16.78
	TCU065-EW	2.49	D	789	132.29	194.31(134.20)	0.17	4.4	28.78
	TCU067-EW	1.11	D	499	97.26	186.16(102.95)	0.20	2.3	21.71
	TCU068-NS	3.01	D	365	291.94	867.76(619.30)	0.82	10.0	13.21
	TCU068-EW	3.01	D	505	279.88	709.11(-567.30)	0.57	9.4	12.36
	TCU075-EW	3.38	D	332	116.05	171.07(120.00)	0.36	4.2	26.92
	TCU076-EW	3.17	D	343	69.29	108.55(87.56)	0.21	3.7	29.68
	TCU087-NS	3.42	C	113	45.20	93.09(-81.23)	0.41	4.5	24.10
	TCU128-EW	9.08	C	144	60.58	145.39(118.80)	0.43	7.4	19.20
无速度 脉冲	TCU071-EW	4.88	D	528	69.83	170.60	0.08	1.5	24.56
	TCU072-EW	7.87	D	476	85.51	223.86	0.18	0.8	21.92
	TCU078-EW	8.27	D	442	42.14	98.88	0.10	0.7	25.95
	TCU079-EW	10.95	D	589	64.49	173.20	0.11	0.8	24.24
	TCU089-EW	8.33	C	354	45.43	194.62	0.13	5.7	24.11
	KAT-090	13.42	D	640	37.84	5.09	0.06	0.5	6.57
	PKC-360	7.26	D	433	51.49	7.21	0.12	0.6	9.82
	SPV-360	8.44	D	939	76.60	14.95	0.08	0.9	8.20
	STC-180	12.09	D	477	61.48	22.06	0.13	1.3	10.61
	TAR-360	15.60	D	990	77.62	30.45	0.08	0.7	12.66

注: PGD为峰值地面位移, 括号内数字代表含滑冲效应的近断层地震动的滑冲位移. 台湾集集地震动记录引自Wang等(2002), 美国北岭地震动记录引自太平洋地震工程研究中心(PEER)强震数据库.

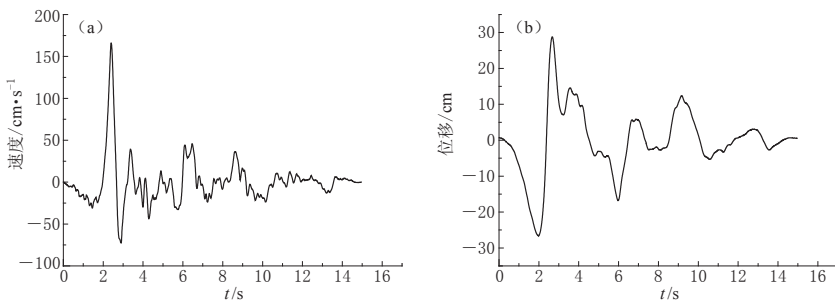


图 1 含破裂向前方向性脉冲的近断层地震动 RRS-228 台站的速度和位移时程  
(a) 速度时程曲线; (b) 位移时程曲线

Fig. 1 Velocity (a) and displacement (b) time histories of near-fault ground motion of RRS-228 with forward directivity pulse

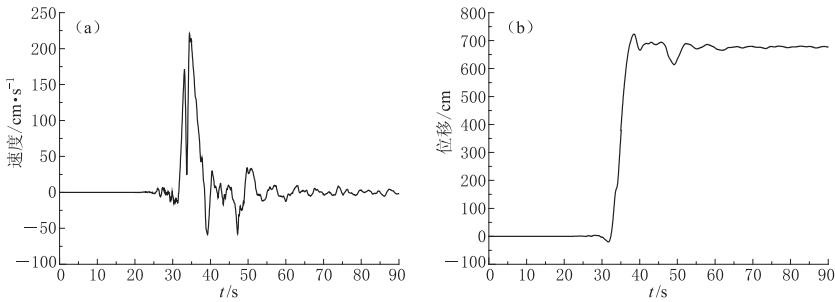
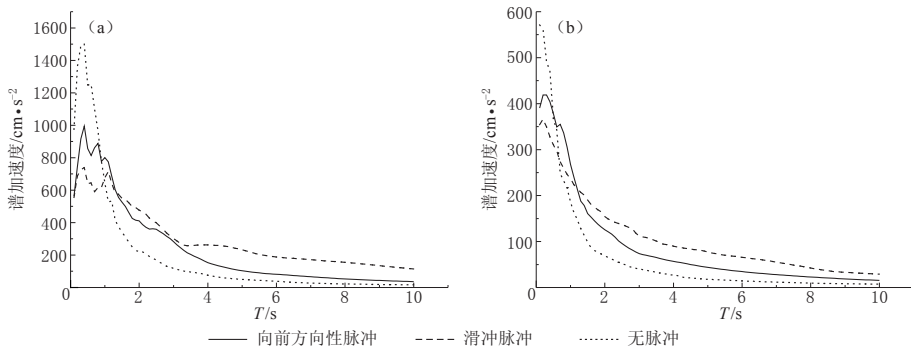


图2 含滑冲效应脉冲的近断层地震动 TCU052-NS 的速度和位移时程

(a) 速度时程曲线; (b) 位移时程曲线

Fig. 2 Velocity (a) and displacement (b) time histories of near-fault ground motion of TCU052-NS with fling-step pulse

1) 图 3a 和图 3b 分别为近断层地震动含破裂向前方向性、滑冲效应和无脉冲运动记录在  $\mu=1$  (弹性) 和  $\mu=4$  (弹塑性) 时的 5% 阻尼比加速度反应谱. 对于处于弹性状态 ( $\mu=1$ ) 的单自由度体系 (图 3a), 当体系周期  $T < 1.0$  s 时, 含滑冲效应脉冲的近断层地震动谱加速度平均值小于向前方向性脉冲与无脉冲地震动的谱加速度平均值; 当体系周期  $T > 1.4$  s 时, 含滑冲效应的近断层地震动谱加速度平均值大于向前方向性脉冲与无脉冲地震动的谱加速度值, 但在  $1.4 \text{ s} < T < 3.1$  s 时接近向前方向性脉冲地震动的谱加速度值, 两者平均相差约  $70 \text{ cm/s}^2$ . 而对于处于弹塑性状态 ( $\mu=4$ ) 的双线性单自由度体系 (屈服刚度和弹性刚度之比为 5%, 图 3b), 当体系周期  $T < 0.6$  s 时, 含滑冲效应脉冲的近断层地震动的谱加速度小于向前方向性脉冲与无脉冲地震动的相应值; 当体系周期  $T > 1.2$  s 时, 含滑冲效应脉冲的近断层地震动的谱加速度大于向前方向性脉冲与无脉冲地震动的相应值. 可见, 近断层地震动的破裂向前方向性与滑冲效应对结构地震响应的影响随结构周期而变化, 对长周期结构破坏更严重, 而滑冲效应脉冲地震动对长周期结构的影响最显著.

图3 含破裂向前方向性、滑冲效应和无脉冲近断层地震动的加速度反应谱. (a)  $\mu=1$ ; (b)  $\mu=4$ Fig. 3 Acceleration spectra of near-fault ground motions with rupture directivity, fling-step and without pulses. (a)  $\mu=1$ ; (b)  $\mu=4$ 

2) 由图 4a 和图 4b 所示含破裂向前方向性与滑冲效应的近断层地震动 5% 阻尼比的标准反应谱 (地震动的 PGA 全部调整到  $100 \text{ cm/s}^2$ ) 看出, 破裂向前方向性与滑冲效应对结构动力响应的影响是随结构周期而变化的. 对于弹性单自由度体系 (图 4a), 当体系周期  $T >$

1.2 s 时, 与无脉冲地震动相比, 含向前方向性脉冲与滑冲效应脉冲的地震动都使体系谱加速度增大, 并且滑冲效应脉冲地震动的谱加速度平均值大于向前方向性脉冲地震动的相应值; 当体系周期  $T < 0.4$  s 时, 无脉冲地震动的体系谱加速度最大. 对于双线性单自由度体系 ( $\mu = 4$ , 屈服刚度和弹性刚度之比为 5%, 图 4b), 当体系周期  $T > 1.0$  s 时, 与无脉冲地震动相比, 向前方向性脉冲与滑冲效应脉冲地震动都使体系谱加速度增大, 并且滑冲效应脉冲地震动的谱加速度平均值大于向前方向性脉冲地震动的相应值.

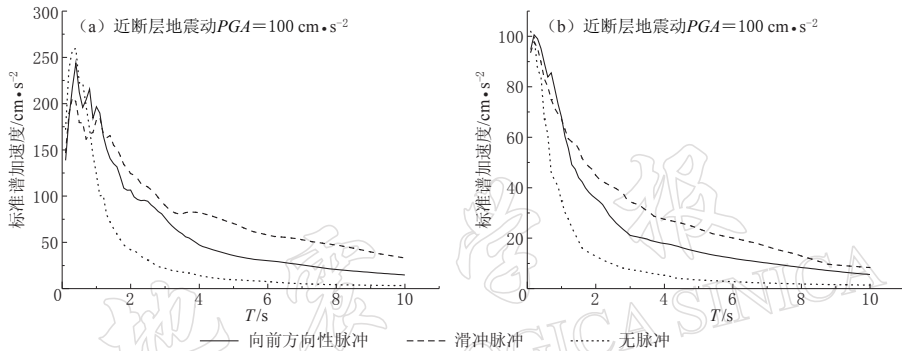


图 4 含破裂向前方向性、滑冲效应和无脉冲近断层地震动的标准加速度反应谱. (a)  $\mu = 1$ ; (b)  $\mu = 4$   
 Fig. 4 Normalized acceleration spectra of near-fault motions with rupture directivity, fling-step and without pulses. (a)  $\mu = 1$ ; (b)  $\mu = 4$

## 2 近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对隔震建筑抗震性能的影响

在具有独特运动特征的近断层地震动作用下, 单自由度体系模型不能分析长周期工程结构高阶振型和非线性效应等引起的结构动力响应的有关细节. 本文选择一座隔震建筑结构作为算例来考察近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对长周期结构抗震性能的影响.

### 2.1 结构模型和时程分析

一幢 6 层钢筋混凝土框架建筑(图 5), 建筑物层高: 第 1 层为 4.0 m, 2—6 层均为 3.6 m. 框架柱截面尺寸为: 1—2 层 0.55 m × 0.55 m, 3—6 层 0.50 m × 0.50 m, 混凝土标号 C25; 楼层主梁截面尺寸为: 0.25 m × 0.65 m, 走道梁截面为 0.25 m × 0.40 m, 混凝土标号 C25. 每个柱底设置一个铅芯橡胶支座(LRB), 共需要 36 个. 隔震层连接件、圈梁按规范

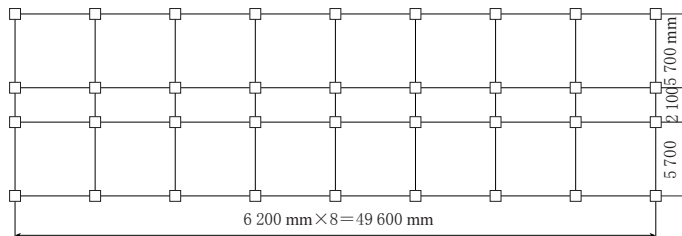


图 5 隔震建筑结构平面图

Fig. 5 Plan of base-isolated building structure

设计. 周围 22 个支座直径 D300 mm, 弹性刚度  $K_1=4240$  kN/m, 屈服刚度  $K_2=530$  kN/m, 屈服系数  $\alpha_s=0.05$ ; 中间 14 个支座直径 D350 mm, 弹性刚度  $K_1=4960$  kN/m, 屈服刚度  $K_2=620$  kN/m, 屈服系数  $\alpha_s=0.05$ ; 两种支座的竖向刚度取  $1.1 \times 10^6$  kN/m. 隔震结构铅芯橡胶支座屈服后的基本周期为 3.61 s.

基于以下两个应用广泛的假定进行隔震建筑结构的动力分析: 上部结构处于弹性范围; 楼板平面内无限刚, 平面外刚度为零. 隔震结构抗震分析采用杆系一层间模型. 铅芯橡胶支座(LRB)的力学特性采用双线性滞回模型模拟, 3 个参数  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $\alpha_s$  (分别为隔震支座的弹性刚度、屈服刚度和屈服系数, 并且,  $\alpha_s=F_y/W$ ,  $F_y$  和  $W$  分别表示 LRB 支座的屈服强度和设计承载力)描述了隔震支座的滞回力学行为, 如图 6 所示. 然后, 利用 Wilson 时程积分法求解式(1)所示的隔震建筑结构动力学方程(杨迪雄等, 2007).

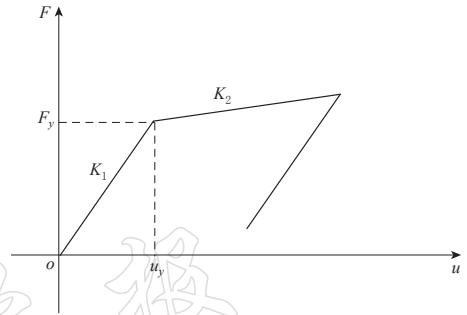


图 6 LRB 支座双线性滞回模型

Fig. 6 Bilinear hysteretic model of lead rubber bearings

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{U}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{U}\} + [\mathbf{K}]\{U\} = -[\mathbf{M}]\{\ddot{U}_g\} \quad (1)$$

式中,  $[\mathbf{M}]$ 、 $[\mathbf{K}]$ 、 $[\mathbf{C}]$  分别为系统的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵;  $\{\dot{U}\}$ 、 $\{U\}$  分别为系统质点相对于地面的速度、位移列阵;  $\{\ddot{U}_g\}$  为地面运动的加速度列阵. 对该隔震建筑沿横向水平输入表 1 的 30 条近断层地震动记录, 地震动加速度峰值全部调整为  $\text{PGA}=400$   $\text{cm/s}^2$ , 它对应于我国建筑抗震设计规范(GB50011-2001)中罕遇地震Ⅷ度设防地震动加速度时程曲线的最大值.

## 2.2 近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应的影响

含破裂向前方向性与滑冲效应脉冲的近断层地震动作用下隔震建筑地震响应平均值的比较如表 2 所示. 图 7 分别表示含破裂向前方向性、滑冲效应脉冲和无脉冲地震动作用下隔震建筑的动力响应平均值沿楼层的分布. 由表 2 和图 7 可见, 与无脉冲地震动作用相比, 含破裂向前方向性与滑冲脉冲的地震动作用下隔震建筑地震响应显著增大, 而且滑冲脉冲对隔震建筑地震响应的影响更大. 破裂向前方向性脉冲地震动作用下隔震建筑的隔震层位移、最大层间位移角、顶层加速度和基底剪力平均值分别是无脉冲地震动作用下的相应值的 3.30, 1.62, 1.46 和 1.85 倍. 而滑冲脉冲地震动作用下隔震建筑的隔震层位移、最大层间位移角、顶层加速度和基底剪力平均值分别是无脉冲地震动作用下的相应值的 4.81, 1.76, 1.36 和 2.16 倍. 滑冲脉冲地震动作用下隔震建筑的隔震层位移平均值达 31.8 cm, 超过 D350 隔震支座的容许位移(20 cm), 表明隔震建筑可能发生侧倾失稳. 此时, 最大层间位移角(0.74%)表明隔震结构已经达到中等破坏状态(其对应的位移角为 0.7%—1.5%之间(Wen, Kang, 2001)). 因此, 近断层脉冲型地震动对长周期隔震结构产生较严重的破坏作用, 主要是隔震层位移和层间变形较大, 可以增设消能支撑和智能阻尼器等进一步控制位移响应.

由图 7a 隔震建筑结构层间位移角的“D”型分布曲线可知, 近断层地震动作用下隔震建筑的最大层间位移角发生在第 2, 3 层, 而隔震结构整体的位移接近平动; 由图 7b 可知,

表 2 含破裂向前方向性和滑冲效应脉冲的近断层地震动作用下隔震建筑地震响应平均值的比较  
Table 2 Comparison of average seismic responses of base-isolated structure under near-fault ground motions with rupture forward directivity and that with fling-step pulses

地震动特征	隔震层位移/cm	最大层间位移角	顶层加速度/cm·s <sup>-2</sup>	基底剪力/kN
破裂向前方向性脉冲	21.8	0.68%	353	13 435
滑冲效应脉冲	31.8	0.74%	329	15 678
无脉冲	6.6	0.42%	242	7 262

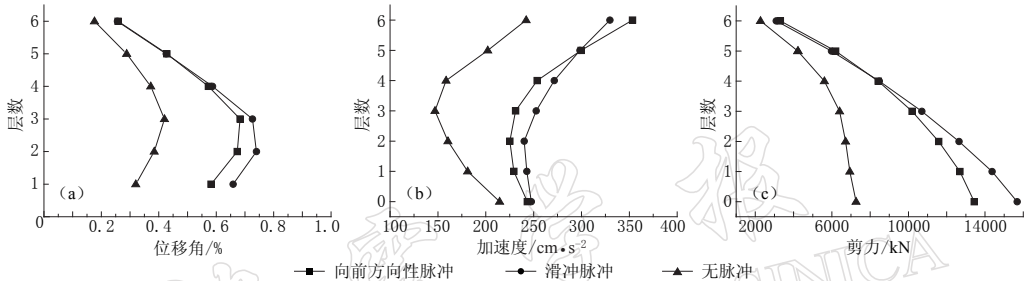


图 7 含破裂向前方向性、滑冲效应脉冲和无脉冲地震动作用下隔震建筑的楼层响应平均值比较  
(a) 隔震建筑层间位移角; (b) 隔震建筑楼层加速度; (c) 隔震建筑楼层剪力

Fig. 7 Comparison of average floor responses of base-isolated building along height under near-fault ground motions with rupture directivity and fling-step effects, and without pulses  
(a) Interstory drift of base-isolated building; (b) top acceleration of base-isolated building; (c) shear force of base-isolated building

楼层加速度分布呈“K”型，顶层加速度值最大，且隔震支座的作用使顶层加速度小于地面地震动输入的加速度峰值；由图 7c 可见，破裂向前方向性、滑冲效应脉冲和无脉冲地震动作用下隔震建筑的基底剪力分别为 13 435, 15 678 和 7 262 kN，基底剪力系数分别为 0.21, 0.24 和 0.11，符合建筑抗震设计规范的剪(力)重(量)比要求。而且，滑冲效应引起的速度脉冲使隔震建筑底部的层间变形和楼层剪力明显增大，并使隔震建筑的上部加速度响应有所增加。这与 Kalkan 和 Kunnath(2006)对于近断层地震动作用下 3 座钢框架建筑结构弹塑性地震响应的分析一致，即：滑冲效应脉冲主要激发中、长周期建筑结构的第一振型响应，使得结构最大层间变形发生在底部，从而导致结构可能发生倒塌破坏失效模式。上述结果表明，滑冲效应脉冲比向前方向性效应脉冲对建筑结构的破坏更具危害性，而无脉冲地震动作用对隔震建筑产生较小的地震响应，此时结构变形处于轻微破坏状态。可见，近断层地震动的工程特性对隔震建筑的抗震性能影响明显。

### 3 结论

选择台湾集集地震和美国北岭地震的近断层地震动记录作为地震动输入，考察了近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应产生的两种不同速度脉冲运动对单自由度体系和长周期隔震建筑结构地震响应的影响。单自由度体系的反应谱分析表明，破裂向前方向性与滑冲效应脉冲对工程结构地震响应的影响是随结构周期而变化的。在中短周期段，破裂向前方向性脉冲地震动的谱加速度值大于滑冲效应脉冲地震动的谱加速度值；而在长周期段，滑冲脉冲地震动的谱加速度值大于破裂向前方向性脉冲地震动的谱加速度值。这表明，近断层脉冲型地震动，特别是滑冲效应脉冲地震动对周期较长的工程结构引起更大的动力反



应,从而显著增大了长周期结构的抗震设计需求。

与无脉冲地震动作用相比,含破裂向前方向性与滑冲脉冲的近断层地震动作用下的隔震建筑地震响应显著增大,而且滑冲脉冲对隔震建筑抗震性能的影响更大。滑冲效应引起的速度脉冲使隔震建筑底部的层间变形和楼层剪力明显增大,并使隔震建筑的上部加速度响应有所增加,这意味着滑冲效应脉冲比向前方向性效应脉冲对建筑结构的破坏更具危害性。最后应该指出,由于当前世界强震地面运动数据库中含滑冲效应的地震动记录有限,这里仅选用了 10 条滑冲脉冲记录。但综合 Kalkan 和 Kunnath(2006)以及本文分析,上述结论具有一定的代表性。以后随着含破裂向前方向性与滑冲效应的近断层脉冲型地震动记录的增多,本文得到的观察和结论需要进一步深入研究。

### 参 考 文 献

- 李爽,谢礼立. 2007. 近场问题的研究现状与发展方向 [J]. 地震学报, **29**(1): 102-111.
- 刘启方,袁一凡,金星,丁海平. 2006. 近断层地震动的基本特征 [J]. 地震工程与工程振动, **26**(1): 1-10.
- 田玉基,杨庆山,卢明奇. 2007. 近断层脉冲型地震动的模拟方法 [J]. 地震学报, **29**(1): 77-84.
- 韦韬,赵凤新,张郁山. 2006. 近断层速度脉冲的地震动特性研究 [J]. 地震学报, **28**(6): 629-637.
- 杨迪雄,赵岩,李刚. 2007. 近断层地震动运动特征对长周期结构动力响应的影响分析 [J]. 防灾减灾工程学报, **27**(2): 133-140.
- 俞言祥,高孟潭. 2001. 台湾集集近场地震动的上盘效应[J]. 地震学报, **23**(6): 615-621.
- Akkar S, Yazgan U, Gulkan P. 2005. Drift estimates in frame building subjected to near-fault motions [J]. *Journal of Structural Engineering*, **131**(7): 1014-1024.
- Alavi B, Krawinkler H. 2004. Behavior of moment resisting frame structures subjected to near-fault ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **33**(4): 687-706.
- Bray J D, Rodriguez-Marek A. 2004. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**(5): 815-828.
- Hall J F, Heaton T H, Halling M W, Wald D J. 1995. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings [J]. *Earthquake Spectra*, **11**(4): 569-605.
- Kalkan E, Kunnath S K. 2006. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings[J]. *Earthquake Spectra*, **22**(2): 367-390.
- Liao W I, Loh C H, Wan S. 2001. Earthquake response of RC moment frames subjected to near-fault ground motions [J]. *The Structural Design of Tall Buildings*, **10**(2): 219-229.
- Malhotra P K. 1999. Response of buildings to near-field pulse-like ground motions [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**(11): 1309-1326.
- Mavroeidis G P, Dong G, Papageorgiou A S. 2004. Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom system [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **33**(9): 1023-1049.
- Somerville P G, Smith N F, Graves R W, Abrahamson N A. 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity [J]. *Seism Res Lett*, **68**(1): 199-222.
- Wang G Q, Zhou X Y, Zhang P Z, Igel H. 2002. Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(1): 73-96.
- Wen Y K, Kang Y J. 2001. Minimum building life-cycle cost design criteria, II: applications [J]. *Journal of Structural Engineering*, **127**(3): 338-346.