

近断层方向性效应地震动双规准组合反应谱

张洪智, 刘秀明, 徐龙军

(哈尔滨工业大学(威海)土木工程系, 264209 山东 威海)

摘要: 为了给近断层设计谱的确定提供新的方法和参考依据,考虑场地条件的影响,分析了53条具有典型近断层方向性效应特征的地震动记录的双规准组合反应谱的特征.相比传统的地震动加速度、速度和位移反应谱,组合反应谱的谱值与地震动的幅值相关性更强;双规准组合谱具有更低的统计变异性.最后,给出了基于双规准组合谱特征的近断层区场地相关设计谱模型.

关键词: 近断层地震动;方向性效应;双规准组合反应谱;抗震设计谱

中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2014)10-0017-06

Bi-normalized combined response spectra of directivity effect ground motions in near-fault region

ZHANG Hongzhi, LIU Xiuming, XU Longjun

(Dept. of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China)

Abstract: Aiming at providing new method and reference for the construction of near-fault design spectra, characteristics of bi-normalized combined spectra of 53 typical near-fault directivity effect ground motions are analyzed by considering the influence of site condition. Results show that the bi-normalized combined spectrum exhibits the highest correlation with the amplitudes of ground motions, and the lowest statistical variability, compared with those of acceleration spectrum, velocity spectrum and displacement spectrum. Finally, site-depended design spectral models for near-fault region are suggested based on features of bi-normalized combined response spectra.

Keywords: near-fault ground motion; directivity effect, bi-normalized combined response spectrum; seismic design spectrum

靠近地震断裂区的地震动受到断层破裂方向和速度的影响有时会产生向前的方向性效应^[1-2].具有向前方向性效应的近断层地震动与普通地震动不同,其速度时程在长周期段具有明显的脉冲特性,往往会对中、长周期的结构造成严重破坏^[3-4].但当前包括中国在内的许多国家或地区的抗震规范尚缺少近断层地震作用的具体规定,因此也就无法保障工程结构遭遇此类地震作用时的抗震安全^[3-5].

传统的抗震设计谱的建立是基于大量地震动反应谱统计分析的结果,而目前典型的具有方向性效应特征的地震动数量还比较有限,因此,基于传统的反应谱分析方法尚难以形成可信和可靠的结论用于近断层设计谱的确定.大量的研究尝试通过分析近断层脉冲的特征与主要地震动参数的衰减关系来探讨其工程应用问题,其中文献[6]认为可以利用随震级增大而增大的窄带脉冲对近断层方向性速度脉冲进行模拟;文献[7]详细分析了不同等效脉冲模型的差异,明确了近断层脉冲型地震动等效过程中需要注意的问题;文献[8-12]提出了近断层设计谱的确定方法并给出了近断层设计谱模型.这些成果都为近断层地震动及其工程应用研究提供了参考和依据.

收稿日期: 2013-07-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51238012,51178152);山东省蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心资助.

作者简介: 张洪智(1990—),男,硕士研究生;
徐龙军(1976—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 徐龙军, xulongjun80@163.com.

近断层脉冲型地震动作为一类较特殊的地震动^[10-13],不仅受场地条件、震级、断层距等因素的影响明显,而且如断层类型、破裂过程等更加剧了其复杂性.文献[14]指出传统的反应谱和设计谱表达难以合理地描述脉冲作用对结构的破坏.因此,近断层设计谱的建立和表达必须充分考虑地震动的要素特征及其综合特性,设计谱确定方法的研究还须进一步深入探讨.鉴于此,本文构建了一种随周期连续变化的等效速度函数 $f(T)$,用于地震动伪速度反应谱纵坐标的规准化,再分别采用由三幅值确定的两个周期(T_{av} 、 T_{vd})分别对规准伪速度反应谱进行双规准化处理,得到了地震动双规准组合反应谱.考虑场地条件的影响,分析了 53 条具有典型近断层方向性效应特征的地震动记录的规准化组合谱和双规准规化组合谱的特性.探讨并给出了基于双规准组合反应谱特征的近断层设计谱模型,以期为近断层设计谱的建立方法及进一步研究工作的开展提供新的参考和依据.

1 近断层地震动数据

本文共收集到 12 次地震中的 53 条具有典型近断层方向性效应特征的地震动记录,它们来源于美国太平洋地震工程研究中心网站(<http://peer.berkeley.edu/>).其中包含有 14 条岩石场地记录,震级范围为 M_w 6.1~7.4,其余 39 条土层场地记录的震级分布为 M_w 6.1~7.6.这些记录均限于浅源活动性构造地震.表 1 给出了所选地震的信

息,有关方向性地震动数据库的更多信息和选取标准可参见文献[4].

表 1 选取的地震信息

地震名称	日期	震中		震级 (M_w)
		经度	纬度	
Parkfield	28/06/1966	120.50W	35.96N	6.19
San Fernando	09/02/1971	118.41W	34.44N	6.61
Imperial Valley	15/10/1979	115.31W	32.64N	6.53
Morgan Hill	24/04/1984	121.70W	37.31N	6.19
Superstition Hills	24/11/1987	115.83W	33.02N	6.54
Loma Prieta	18/10/1989	121.88W	37.04N	6.93
Erzincan, Turkey	13/03/1992	39.71E	39.59N	6.69
Northridge	20/03/1994	118.48W	34.23N	5.28
Kobe	16/01/1995	34.59E	135.01N	6.90
Kocaeli	16/01/1999	29.99E	40.73N	7.51
Chi-Chi	21/09/1999	120.78E	23.87N	7.60
Duzce	12/11/1999	40.77E	31.19N	7.14

2 规准反应谱与组合反应谱

规准反应谱多以地震动的幅值作为规准化参数对反应谱纵坐标值进行规准化处理得到.文中分别计算了不同场地上近断层地震动的规准加速度、规准速度和规准位移反应谱的统计变异系数,如图 1 所示.可以看出,近断层地震动的规准谱变异系数值在大部分周期处超过了 0.5,甚至达到 1 以上,说明近断层地震动的传统规准反应谱存在很大的统计不确定性.

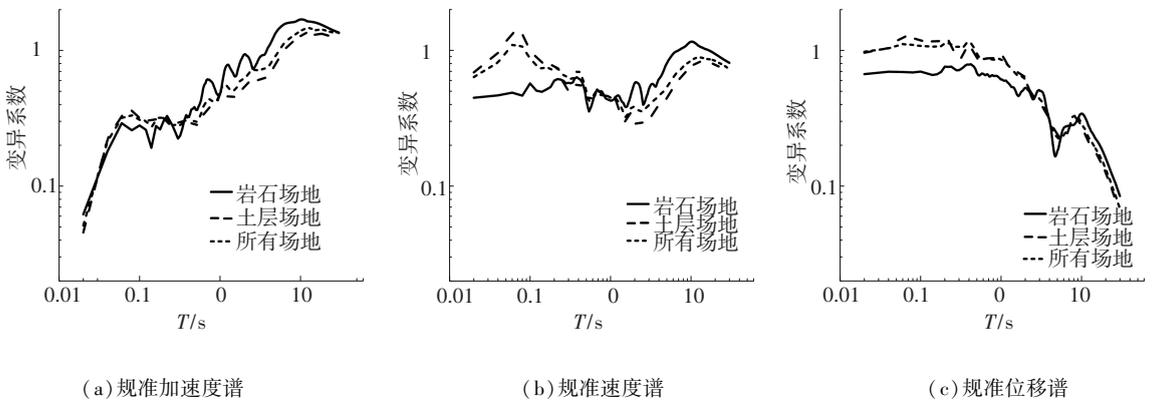
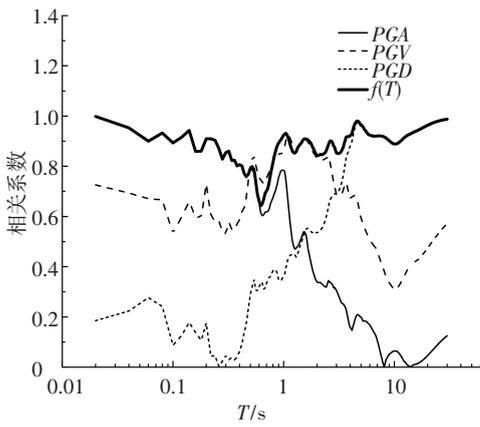


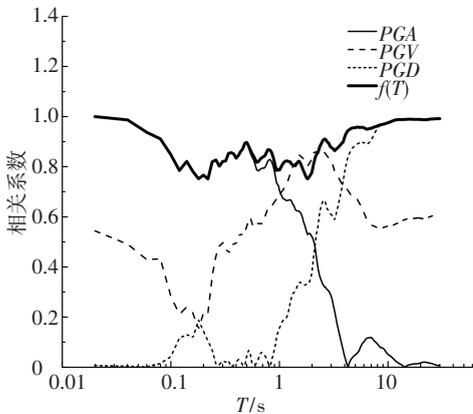
图 1 近断层地震动 3 种规准反应谱的变异系数曲线

按场地类别对近断层地震动进行分类后,分别计算了岩石和土层场地上地震动的幅值与反应谱谱值的相关性.如图 2 所示,地震动反应谱谱值在不同的周期段分别与不同类别的地震动幅值具有较强的相关性,如 PGA 与反应谱谱值在短周期

段的决定系数值可达 0.8 以上,但在其他周期段的相关性很差.由此可见,设计谱的确定仅考虑任何一类反应谱的特征都是不充分的,必须同时考虑地震动加速度、速度和位移反应谱的综合特征,才有望获得满意的结果.



(a) 岩石场地



(b) 土层场地

图 2 反应谱的谱值分别与 PGA, PGV, PGD 和 f(T) 的相关性

为使地震动的幅值在全部周期段都能够与地震动反应谱具有良好的相关性, 本文给出了一种随周期变化的等效速度参量 $f(T)$, 它可以表达为地震动 3 种幅值的连续函数:

$$f(T) = \begin{cases} PGA \cdot \frac{T}{2\pi}, & T \leq T_{av}; \\ PGV, & T_{av} \leq T \leq T_{vd}; \\ PGD \cdot \frac{2\pi}{T}, & T \geq T_{vd}. \end{cases} \quad (1)$$

其中 T_{av} 、 T_{vd} 为两个周期, 分别表示反应谱短周期与中周期、中周期与长周期段的界限周期:

$$T_{av} = 2\pi \frac{PGV}{PGA}, \quad (2)$$

$$T_{vd} = 2\pi \frac{PGD}{PGV}. \quad (3)$$

为了考察 $f(T)$ 与反应谱谱值的相关性, 图 2 一并给出了其与反应谱谱值的相关性决定系数曲线. 可以发现, $f(T)$ 与反应谱的相关性决定系数值在全周期段大都高于 0.8. 因此, 相比于单独采用地震动的 3 个幅值 (PGA、PGV、PGD), 将等效速度 $f(T)$ 作为规范化参数用于反应谱纵坐标谱值的规范化将更有意义.

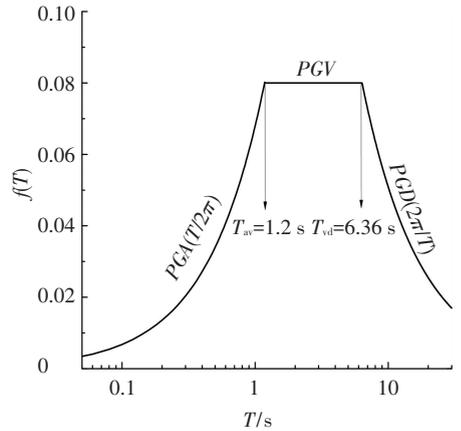
由于伪加速度反应谱、伪速度反应谱和位移反应谱的谱值之间存在如下近似关系:

$$PSa \cdot \frac{T}{2\pi} = PSv = Sd \cdot \frac{2\pi}{T}. \quad (4)$$

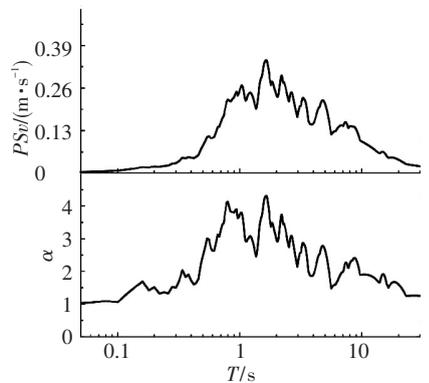
采用 $f(T)$ 对地震动伪速度反应谱进行规范化, 便可以得到规范化的组合反应谱:

$$\alpha = \frac{PSv}{f(T)} = \begin{cases} \frac{PSa}{PGA}, & T \leq T_{av}; \\ \frac{PSv}{PGV}, & T_{av} \leq T \leq T_{vd}; \\ \frac{Sd}{PGD}, & T \geq T_{vd}. \end{cases} \quad (5)$$

图 3(a) 给出了 1940 年 El Centro 地震动的等效速度曲线, 图 3(b) 为该地震动的伪速度谱及其对应的规范组合反应谱. 可以看出, 规范化组合反应谱具有一个明显的特点, 其在高频段、低频段的谱值均趋于 1. 这是传统的规范化加速度、速度和位移反应谱均不具备的特点.



(a) 等效速度



(b) 伪速度谱与规范组合反应谱

图 3 地震动等效速度与规范组合反应谱

考虑场地条件的影响, 计算了近断层地震动的规范化组合反应谱的平均谱与变异系数曲线 (图 4). 可以看出: 1) 在短周期段, 岩石场地的规范组合谱的谱值高于土层场地, 但长周期段土层场地的谱值高于岩石场地; 2) 在全周期段, 规范组合谱的变异系数基本保持在 0.5 以下, 表明规

准化组合反应谱的离散性较小,也说明采用等效周期对地震动伪速度谱进行规准化,所得到的近

断层规准谱具有较好的统一性.

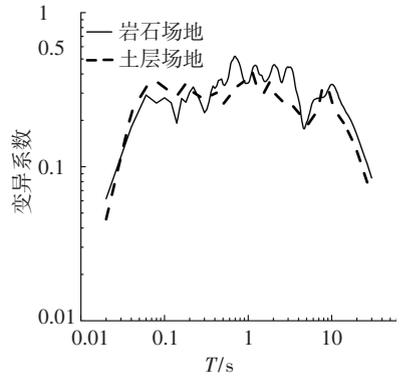
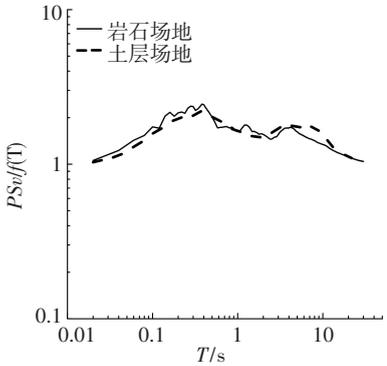


图 4 平均规准组合谱及其变异系数

3 双规准组合反应谱

双规准反应谱的概念是为了探讨地震动的统一性提出的^[16].为了分析组合反应谱的统一性,分别采用两个周期(T_{av} 、 T_{vd})再对组合规准谱的横坐标进行规准化处理,可得双规准化组合反应谱.具体做法是分别将地震动短周期段($0 \sim T_{av}$)、中周期段($T_{av} \sim T_{vd}$)和长周期段($T_{vd} \sim 20$ s)的规准组合反应谱统一进行横坐标的规准化处理,

然后再分别平均并计算其变异系数.图 5 给出了两类场地的平均双规准组合谱及其变异系数.可以看出:1)组合反应谱的双规准化使得两类场地的谱形差别进一步减小;2)双规准组合谱变异系数全部小于 0.5,表明不同地震动的双规准组合谱离散性更小,也即双规准组合谱具有更好的统一性,这为设计谱的确定提供了难得的依据,且可大大提高设计谱的可靠性(或减小其不确定性).

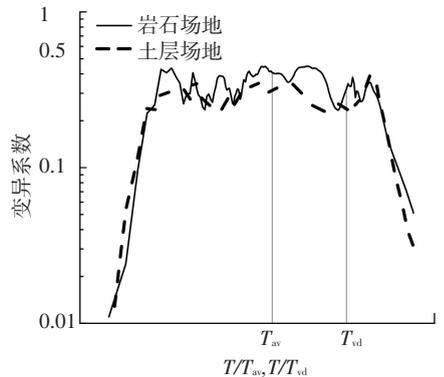
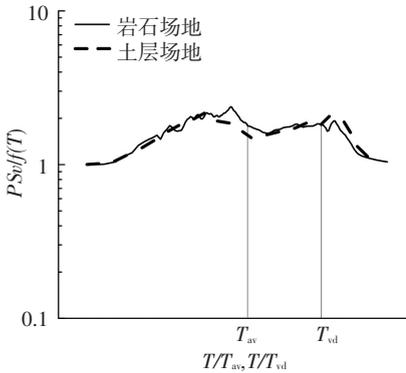


图 5 平均双规准组合谱及其变异系数

4 基于组合规准谱的设计谱

考虑文献[15]提出的三联谱的确定方法,设计谱的建立首先需要明确不同区段设计地震动幅值(PGA 、 PGV 、 PGD)与放大系数(α_A 、 α_V 、 α_D)的取值.为了确定设计地震动的三幅值,以近断层地

震动为数据,统计分析了它们 PGV/PGA 、 PGD/PGV 的分布,由于岩石场地的记录较少,未考虑场地条件的影响.表 2 给出了设计加速度 $PGA = 9.81 \text{ m/s}^2$ 时 PGV 与 PGD 的取值,由设计地震动幅值可以进一步确定设计谱的区段界限周期 $T_{av} = 1.19 \text{ s}$ 、 $T_{vd} = 2.70 \text{ s}$.

表 2 近断层地震动峰值关系与设计地震动幅值

$PGA / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	PGV/PGA	PGD/PGV	$PGV / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	PGD / m	T_{av} / s	T_{vd} / s
9.81	0.19	0.43	1.86	0.80	1.19	2.70

为了给出具有 84.1% 保证概率的近断层设计谱,计算了岩石和土层场地地震动的平均+1 标准差双规准组合反应谱(图 6).对双规准组合谱

不同区段($0.12 \sim 1.19 \text{ s}$ 、 $1.19 \sim 2.70 \text{ s}$ 、 $2.70 \sim 10.00 \text{ s}$)的谱值平均,可得设计谱加速度、速度和位移控制段的放大系数(α_A 、 α_V 、 α_D 的取值见表 3).

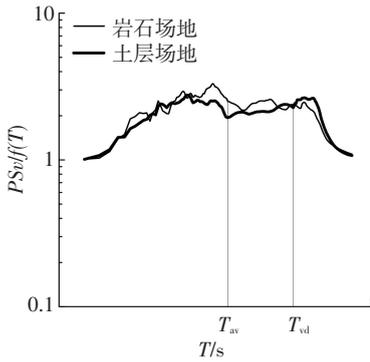


图 6 平均值+标准差组和双规准谱
表 3 设计谱放大系数

场地	α_A	α_V	α_D
土层	2.39	2.21	2.52
岩石	2.79	2.37	2.18

在三联坐标系下,分别将设计地震动幅值与对应的区段放大系数相乘,可得三联设计谱.图 7 给出了考虑方向性效应影响的近断层设计谱 ($PGA = 9.81 \text{ m/s}^2$, 84.1% 保证概率),其关键点坐标的取值见表 4.总的来看,场地条件对近断层设计谱的影响较为明显;在短、中周期段,土层场地的谱值小于岩石场地谱,但长周期段的情况相反.

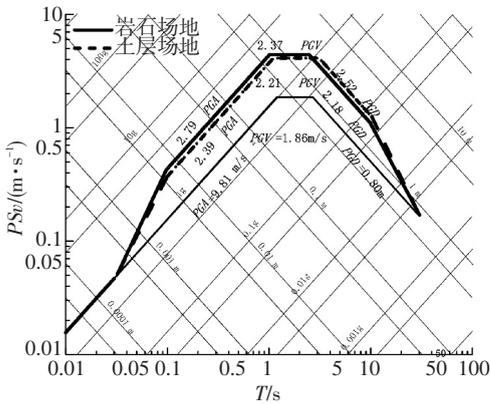


图 7 组合设计谱

表 4 设计谱控制段周期及谱值

关键点	周期 T / s		谱值 $PS_dv / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
	岩石	土层	岩石	土层
T_a	0.01	0.01	0.016	0.016
T_b	0.03	0.03	0.047	0.047
T_c	0.12	0.12	0.522	0.447
T_d	1.02	1.11	4.408	4.111
T_e	2.49	3.11	4.408	4.111
T_f	10.00	10.00	1.096	1.282
T_g	30.00	30.00	0.168	0.168

图 8 给出了建议的岩石和土层场地上的近断层规范化设计谱与中国现行抗震规范 GB50011—

2010 规范化设计谱的比较.总的来看,中国规范设计谱的谱值在大部分区段明显偏低,而规范设计谱更长周期段的谱值稍高于本研究结果的谱值,主要与规范谱长周期段的表达有关.

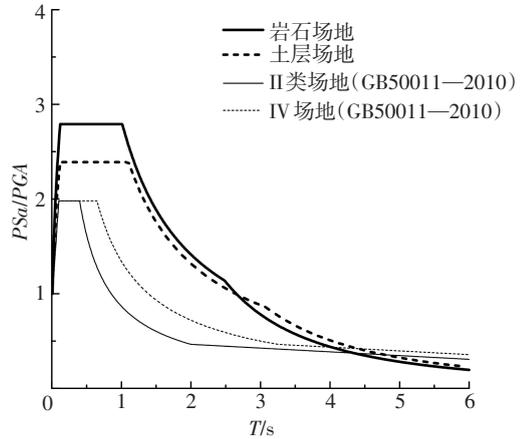


图 8 建议谱与规范谱的比较

5 结 论

给出了地震动双规准组合谱的定义,以 53 条典型近断层方向性效应地震动为数据基础,分析了双规准组合反应谱的特征,借鉴 Newmark 设计谱的确定方法,给出了基于双规准组合谱的近断层设计谱模型.主要研究结果有:

1) 组合反应谱的谱值与等效速度具有良好的相关性;双规准组合谱在短、长周期段的谱值均趋近于 1.这是传统的加速度、速度和位移反应谱所不具备的特征.

2) 在加速度控制段和速度控制段,岩石场地的组合规准谱高于土层场地,而在位移控制段,岩石场地的谱值低于土层场地;但不同场地上双规准组合反应谱的差异减小,双规准组合谱的变异系数值低于 0.5,表明双规准组合谱具有良好的统一性.

3) 场地条件对近断层设计谱的影响较明显,岩石场地设计谱在短、中周期段的谱值高于土层场地,但长周期段的谱值小于土层场地.

4) 中国规范设计谱的谱值在大部分区段低于本研究结果,而规范设计谱更长周期段的谱值稍高于本文的建议谱值,这主要与规范谱长周期段的表达有关.

参考文献

[1] SOMERVILLE P G, SMITH N F, GRAVES R W, et al. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity [J]. Seismological

- Research Letters, 1997, 68(1): 199-222.
- [2] KRAWINKLER H, ALAVI B. Development of improved design procedures for near-fault ground motions [C]//SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data. Oakland: California Strong Motion Instrumentation Program Division of Mines and Geology California Department of Conservation, 1998: 21-41.
- [3] HALL J F, HEATON T H, HALLING M W, et al. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings [J]. Earthquake Spectra, 1995, 11(4): 569-605.
- [4] BRAY J D, RODRIGUEZ-MAREK A. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24: 815-828.
- [5] MAVROEIDIS G P, DONG G, PAPAGEORGIOU A S. Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2004, 33(9): 1023-1049.
- [6] SOMERVILLE P G. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2003, 137(1): 201-212.
- [7] XIE L L, XU L J, RODRIGUEZ-MAREK A. Representation of near-fault pulse-type ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 4(2): 191-199.
- [8] LI X L, ZHU X. Study on near-fault design spectra of seismic design code [C]//3rd International Conference on Earthquake Engineering: New Frontier and Research Transformation. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2004: 147-152.
- [9] XU L J, RODRIGUEZ-MAREK A, XIE L L. Design spectra including effect of rupture-directivity in near-fault region [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 5(2): 159-170.
- [10] 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.
- [11] 刘启方, 袁一凡, 金星, 等. 近断层地震动的基本特征[J]. 地震工程与工程振动, 2006(1): 1-10.
- [12] 徐龙军, 谢礼立. 近断层地震动双规准伪速度谱及其应用[J]. 地震学报, 2007(5): 512-520.
- [13] 徐龙军, 胡进军, 谢礼立. 特殊长周期地震动的参数特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(6): 20-27.
- [14] IWAN W D. Drift spectrum: measure of demand for earthquake ground motions [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(4): 397-404.
- [15] NEMARK N M, HALL W J. Earthquake spectra and design [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
- [16] 徐龙军, 谢礼立. 场地相关双规准化地震动加速度反应谱[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(8): 1061-1064. (编辑 赵丽莹)