

孙译,张建志,戴骜鹏,等.不同频谱特性输入地震动对场地设计地震动反应谱的影响[J].地震工程学报,2018,40(增刊):70-75.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.070

SUN Yi,ZHANG Jianzhi,Dai Aopeng,et al.Influence of Input Ground Motions with Different Spectral Characteristics on the Response Spectra of Design Ground Motion[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(Supp):70-75.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.070

不同频谱特性输入地震动对 场地设计地震动反应谱的影响

孙 译,张建志,戴骜鹏,孙 印,胡中民

(中国地震局地球物理勘探中心,河南 郑州 450002)

摘要: 频谱特性是地震动的三要素之一,具有不同频谱特性的输入地震动对场地设计地震动反应谱会产生不同影响效果。基于一维土层地震反应分析计算方法,选取4条历史地震实测记录[1989年美国加州洛马普列塔(Loma Prieta)6.9级地震、1994年美国加州北岭(Northridge)6.6级地震、2008年汶川8.0级地震和2013年甘肃岷县漳县6.6级地震]和1条典型人工合成地震动(濮阳市人工拟合地震动)进行对比,研究具有高频和低频特性的输入地震动对场地设计地震动反应谱的影响。结果表明,以高频成分为主的历史地震动较以低频为主的人工拟合波对反应谱的影响表现为在短周期阶段具有集中放大的影响效果。这主要表现在两个方面:其一,对峰值平台值具有放大效果,历史地震动结果峰值平台值为2.75~2.80间,人工拟合波结果峰值平台值为2.65;其二,对反应谱特征周期具有缩短效果,历史地震动较人工拟合波减小0.05~0.15 s。产生上述影响效果,其可能与其高频成分地震动对固有周期较短的场地特点具有一定的共振影响有关。该结果可为建筑物抗震设防方面的研究提供参考。

关键词: 频谱特性;输入地震动;地震动反应谱;地震记录;人工拟合波

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)增刊-0070-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.070

Influence of Input Ground Motions with Different Spectral Characteristics on the Response Spectra of Design Ground Motion

SUN Yi, ZHANG Jianzhi, Dai Aopeng, SUN Yin, HU Zhongmin

(Geophysical Exploration Center, CEA, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: Incorporating the one-dimensional seismic response analysis method of site soils, four historic earthquake observation records and one typical artificial fitting wave were selected for

收稿日期:2018-11-30

基金项目:中国地震局地球物理勘探中心青年基金项目(YFGEC2017006)

第一作者简介:孙 译(1985-),男,硕士,工程师,主要从事地震危险性分析及地震工程方面的研究。E-mail:sy47-010@163.com。

analysis, i.e., the Loma Prieta M6.9 earthquake of 1989, the Northridge M6.6 earthquake of 1994, the Wenchuan M8.0 earthquake of 2008, the Moxian M6.6 earthquake of 2013, and the artificial fitting ground motion in Puyang city. The influences of input seismic waves with high and low frequency characteristics on the response spectra of the design ground motions were studied. The results showed that, as compared with the artificial fitting wave consisting mainly of low-frequency components, the input seismic waves consisting mainly of high frequency components had the effect of centralized amplification in a short period. The possible explanation could be that the input seismic waves with high frequency characteristics will cause a certain resonance effect on the sites having a short inherent period. The research results could provide some reference for the study of earthquake resistance building protection.

Keywords: frequency spectrum characteristics; input ground motion; response spectrum of ground motion; seismic records; artificial fitting wave

0 引言

地震动是指由地震波传播所引发的地面运动,其构成的三要素包括:幅值(Magnitude)、频谱(Spectrum)和持时(Duration),均与建筑物结构的地震破坏效应有密切关系^[1]。场地设计地震动反应谱是建筑物抗震设计的重要参考依据^[2-3]。影响场地设计地震动反应谱的因素很多,包括场地条件、输入地震动、输入界面、地震动的衰减关系、土层动力学参数特性等。国内很多专家学者针对场地条件和土层结构对反应谱的影响规律做出了大量研究,如李小军等^[4]和薄景山等^[5]的研究都表明软弱土层对场地地震动反应谱的加速度峰值具有一定的放大效应。盛志强等^[6]研究了河谷地形对反应谱峰值加速度具有的放大效应。

频谱特性是地震动的三要素之一。除了场地条件和地形因素以外,地震动输入的特性也是影响震害程度和地面地震动的重要因素。然而,国内鲜有关于输入地震动的频谱特性对场地设计地震动反应谱的影响效应研究成果。一般情况下,具有高频成分和低频成分输入地震动会对场地地震动反应谱的峰值和特征周期产生放大或减小的影响。兰景岩等^[7]尝试将具有近震和远震特性的人工合成地震动作为输入波,并基于一维土层反应分析原理研究了高频和低频输入地震动对反应谱的影响。

近些年,随着国内外大量实测地震记录资料的获取,地震学者们更关注于实测地震动记录对反应谱的影响。因此本文选取一些具有代表性的国内外具有不同频谱成分的历史强震记录作为输入地震

动,并利用一维土层反应计算模型,与典型人工合成波的计算结果进行对比,研究输入地震动的频谱特性对场地设计地震动反应谱的影响。由于我国现行抗震设计规范没有充分考虑到地震动频谱特性对地震动反应谱的影响,因此本研究成果可为今后的建筑物抗震设计规范的修订和震害防御提供一定的参考。

1 输入地震动选取

本文选取了 4 个历史强震记录[1989 年美国加州洛马普列塔(Loma Prieta)6.9 级地震、1994 年美国加州北岭(Northridge)6.6 级地震、2008 年汶川 8.0 级地震和 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震]以及 1 条典型人工合成地震动(河南省濮阳市 50 年超越概率 10%水准的人工拟合波)分别作为输入地震动进行对比研究。表 1 给出了各输入地震动的主要参数,包括峰值加速度值(PGA)、持时等参数。

通过对各历史强震记录进行数据处理,得到相应的地震动加速度时程曲线图(图 1)。图 1 表明,天然地震加速度时程曲线的峰值平台较尖锐、集中,衰减较快;而典型人工合成波的峰值平台较平稳、宽幅,衰减较缓。濮阳人工拟合波具有平台值较宽、衰减较缓的特点,峰值平台从 10 s 至约 35 s 处,累计持续时间为二十几秒,指数衰减段持续时间在 20 s 左右;2008 年汶川地震天水台记录和 2013 年岷县漳县地震记录则呈现出峰值尖锐。其中汶川地震岷县台记录中峰值段在 60~72 s,而岷县地震记录峰值段在 20~26 s,两者峰值平台分别

持续了约 12 s 和 6 s,且衰减段相对较缓。1989 年

地震峰值尖锐,峰值平台持续了 5~10 s,且峰值段

美国加州洛马普列塔地震和 1994 年美国加州北岭

之后衰减明显。

表 1 输入地震动的主要参数

输入地震名称	记录持时/s	峰值加速度/gal	地震波类型
1989 年美国加州洛马普列塔 6.9 级地震	39.90	367.4	历史地震记录
1994 年美国加州北岭 6.6 级地震	39.80	568.3	
2008 年汶川 8.0 级地震天水台记录	100.00	130.6	
2013 年甘肃岷县 6.6 级地震天水台记录	60.00	219.3	
濮阳市人工拟合波—50 年超越概率 10%	59.28	126.1	人工拟合波

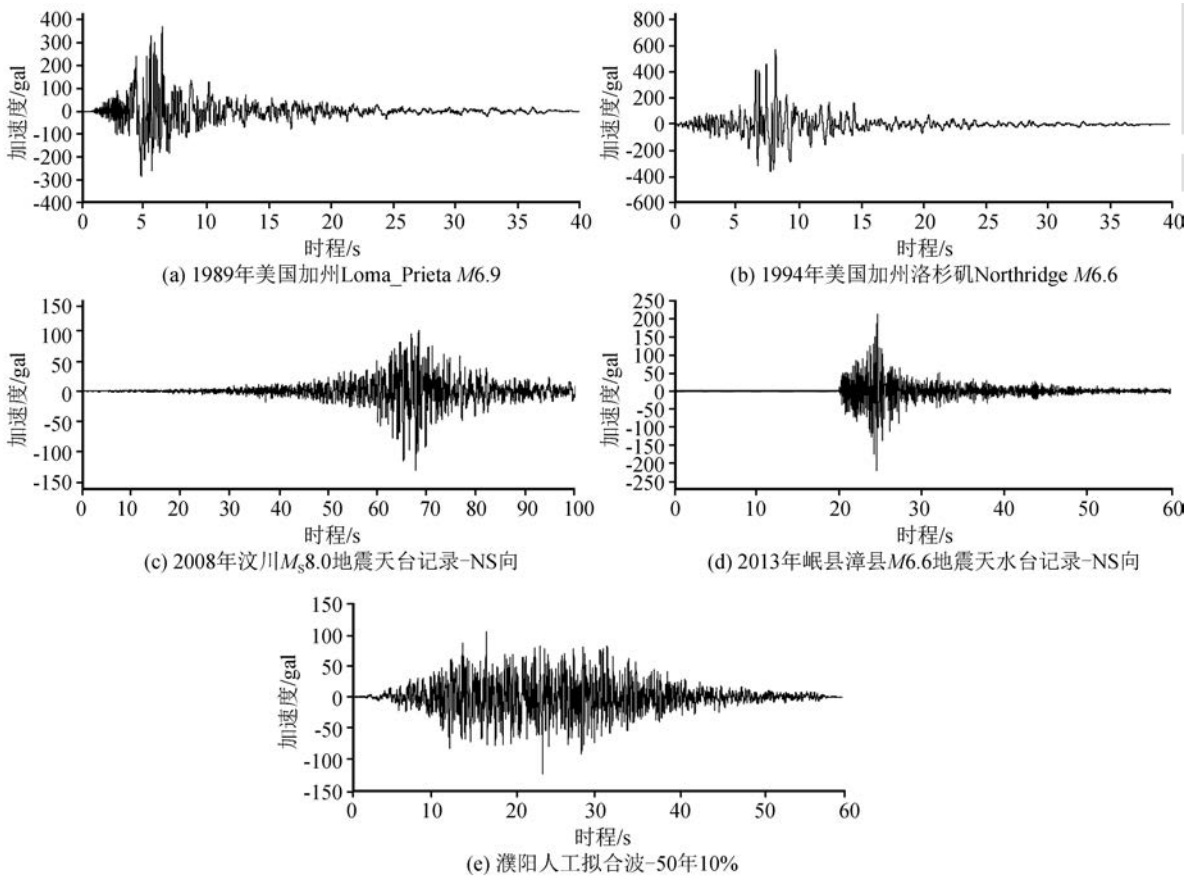


图 1 输入地震动加速度时程曲线

2 输入地震动频谱分析

利用快速傅里叶变换,得到各地震记录和人工合成地震动对应的傅里叶谱,确定各地震动时程的

优势频率范围值。表 1 为经过傅氏频谱变换处理后得到的上述地震记录的频谱分析结果。结果表明,历史地震的卓越频谱范围较小,以低频为主;而人工合成地震动频率范围较广,以高频为主。

表 2 输入地震动卓越频率

输入地震动	卓越频率范围/Hz	地震波类型
1989 年美国加州洛马普列塔 6.9 级地震	4.9~7.4	历史地震记录
1994 年美国加州北岭 6.6 级地震	4.3~6.4	
2008 年汶川 8.0 级地震天水台记录	3.6~4.7	
2013 年甘肃岷县 6.6 级地震天水台记录	4.1~8.9	
濮阳市人工拟合波—50 年超越概率 10%	1.9~3.2	人工拟合波

3 场地计算模型

选取位于华北平原地区的濮阳市某工程场地内的 2 个钻孔资料,建立典型的Ⅱ类场地计算模型(表 3)。该场地覆盖层厚度为 82.0~83.0 m,等效

剪切波速为 213~214 m/s。覆盖层主要由粉质黏土、粉土、细砂和粉砂构成。通过对场地土样进行动三轴试验,表 4 给出了场地计算模型中粉质黏土(1,2,3)、粉土(1,2,3)和细粉砂的土体动力非线性参数。

表 3 场地土层计算模型							
钻孔编号	土层号	土类名称	土类号	层底埋深 /m	土层厚度 /m	密度 /(kg·cm ⁻³)	剪切波速 /(m·s ⁻¹)
1# 钻井	1	粉质黏土 1	2	2.0	2.0	1.94	157
	2	粉土 1	1	7.0	5.0	1.94	177
	3	粉土 1	1	12.1	5.1	1.94	213
	4	粉砂	3	14.3	2.2	1.96	250
	5	细砂	3	18.0	3.7	1.98	282
	6	细砂	3	20.3	2.3	1.98	298
	7	粉土 2	4	25.0	4.7	1.96	317
	8	粉土 2	4	26.4	1.4	1.96	325
	9	细砂	3	29.5	3.1	1.98	325
	10	粉土 2	4	32.7	3.2	1.96	331
	11	细砂	3	38.0	5.3	1.98	338
	12	细砂	3	43.2	5.2	1.98	337
	13	细砂	3	48.6	5.4	1.98	359
	14	粉土 3	5	51.4	2.8	1.98	381
	15	细砂	3	56.5	5.1	2.01	372
	16	细砂	3	61.5	5.0	2.01	385
	17	细砂	3	66.5	5.0	2.01	438
	18	细砂	3	71.5	5.0	2.01	447
	19	细砂	3	76.5	5.0	2.01	454
	20	细砂	3	79.6	3.1	2.01	468
	21	粉质黏土 3	7	83.0	3.4	2.03	476
	22	基岩					526
2# 钻井	1	粉质黏土 1	2	4.1	4.1	1.94	161
	2	粉土 1	1	7.0	2.9	1.94	182
	3	粉土 1	1	10.2	3.2	1.94	214
	4	粉质黏土 1	2	12.4	2.2	1.94	235
	5	粉砂	3	14.1	1.7	1.96	254
	6	细砂	3	18.0	3.9	1.98	273
	7	细砂	3	20.3	2.3	1.98	309
	8	粉土 2	4	22.2	1.9	1.96	319
	9	细砂	3	27.0	4.8	1.98	334
	10	细砂	3	32.0	5.0	1.98	332
	11	细砂	3	37.0	5.0	1.98	332
	12	细砂	3	39.4	2.4	1.98	337
	13	粉土 3	5	42.1	2.7	1.96	350
	14	细砂	3	45.7	3.6	1.98	347
	15	粉质黏土 2	6	50.5	4.8	1.98	368
	16	细砂	3	55.5	5.0	2.01	357
	17	细砂	3	60.5	5.0	2.01	379
	18	细砂	3	65.5	5.0	2.01	423
	19	细砂	3	70.5	5.0	2.01	423
	20	细砂	3	75.5	5.0	2.01	437
	21	细砂	3	80.3	4.8	2.01	463
	22	粉质黏土 3	7	82.0	1.7	2.03	476
	23	基岩					543

表4 各类土在不同剪应变条件下的剪模比 $G/G_{\max}$ 和阻尼比 ζ 的参数值

土类号	土类名称	参数	剪应变							
			5×10^{-6}	1×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-3}	5×10^{-3}	1×10^{-2}
1	粉土1	$G/G_{\max}$	0.988 6	0.975 4	0.949 1	0.932 6	0.860 1	0.741 5	0.141 8	0.095 7
		ζ	0.009 1	0.013 2	0.029 7	0.039 6	0.072 5	0.089 0	0.130 2	0.142 4
2	粉黏土1	$G/G_{\max}$	0.961 2	0.945 7	0.899 6	0.866 7	0.672 3	0.408 7	0.069 4	0.042 4
		ζ	0.031 3	0.033 8	0.045 3	0.055 2	0.104 6	0.136 8	0.173 8	0.180 4
3	粉(细)砂	$G/G_{\max}$	0.980 0	0.965 0	0.885 0	0.805 0	0.560 0	0.448 0	0.220 0	0.174 0
		ζ	0.005 0	0.007 0	0.020 0	0.035 0	0.080 0	0.100 0	0.120 0	0.124 0
4	粉土2	$G/G_{\max}$	0.990 1	0.978 7	0.958 9	0.942 4	0.873 3	0.777 7	0.158 3	0.106 6
		ζ	0.007 5	0.012 4	0.028 9	0.038 8	0.067 6	0.082 4	0.123 6	0.135 9
5	粉土3	$G/G_{\max}$	0.991 4	0.988 6	0.968 8	0.958 9	0.893 2	0.804 1	0.171 5	0.112 2
		ζ	0.006 6	0.011 6	0.027 2	0.037 1	0.063 5	0.079 9	0.121 1	0.133 5
6	粉黏土2	$G/G_{\max}$	0.984 3	0.965 5	0.926 2	0.902 9	0.790 9	0.626 2	0.105 6	0.079 6
		ζ	0.018 2	0.020 6	0.033 8	0.045 3	0.084 1	0.106 3	0.153 2	0.161 5
7	粉黏土3	$G/G_{\max}$	0.986 3	0.968 8	0.932 6	0.912 8	0.820 5	0.672 3	0.118 8	0.084 1
		ζ	0.015 7	0.019 0	0.032 2	0.042 4	0.079 1	0.101 4	0.147 5	0.156 3

4 场地反应谱计算结果

为了对计算结果进行统一对比分析,在进行一维土层反应分析时将各历史强震记录的峰值大小统一调整到以濮阳市 50 年超越概率 10%水准下的人工拟合波为基准值,取峰值加速度 PGA 为 128.3 gal。基于一维土层反应计算原理,将调整后的各输

入地震动进行土层反应分析计算,各场地设计地震动反应谱计算结果如图 2 所示及表 5 所列。

对计算得到的5组反应谱结果进行对比分析,可以得到以高频成分为主的历史地震动[1989 年美国加州洛马普列塔(Loma Prieta)6.9 级地震、1994 年美国加州北岭(Northridge)6.6 级地震、2008 年汶川 8.0 级地震和2013 年甘肃岷县漳县6.6 级地震]。

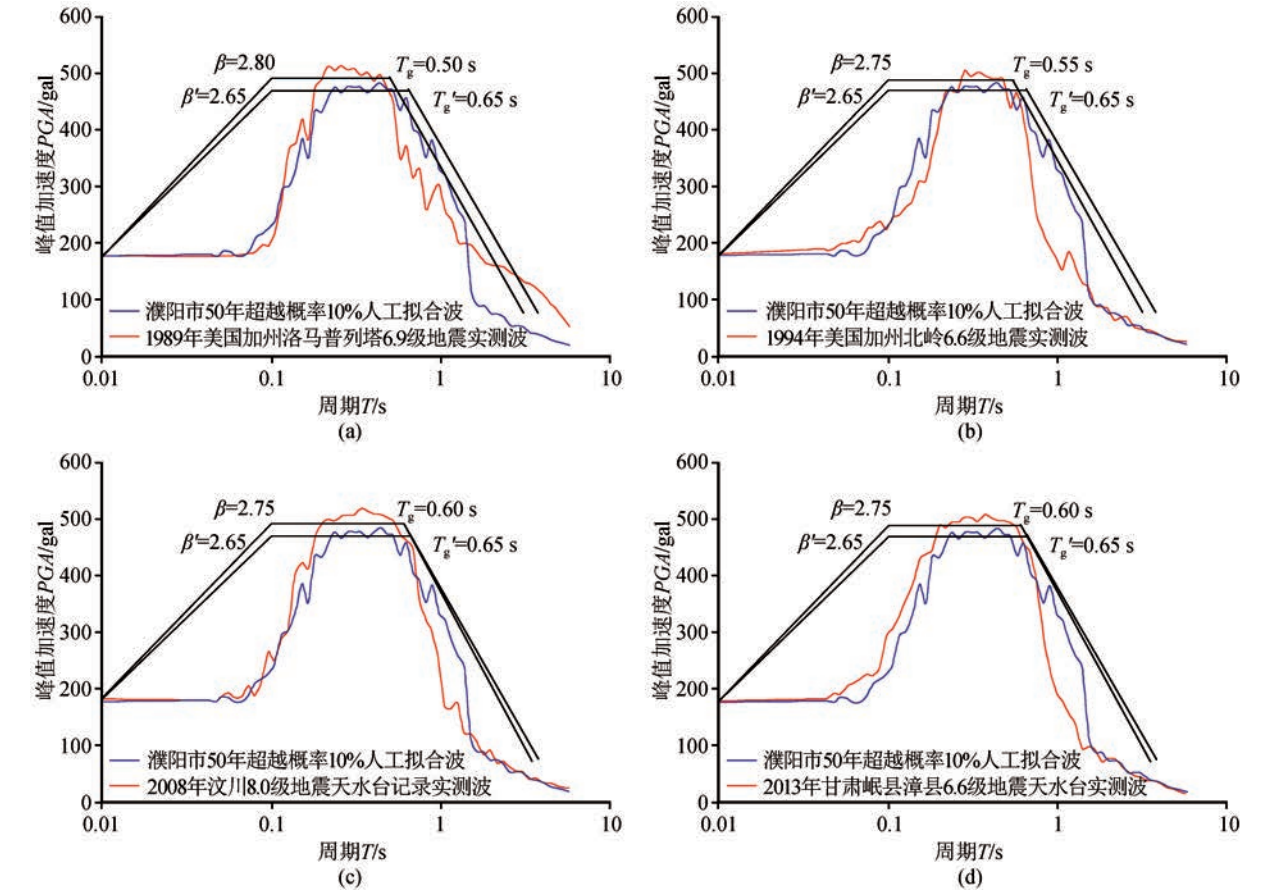


图2 场地地震动反应谱计算结果

表 5 场地反应谱特征参数的结果对比

序号	输入地震动	反应谱峰值平台值 β	反应谱特征周期 T_g	反应谱特性
1	1989 年美国加州洛马普列塔 6.9 级地震	2.80	0.50	峰值段放大
2	1994 年美国加州北岭 6.6 级地震	2.75	0.55	
3	2008 年汶川 8.0 级地震天水台记录	2.75	0.60	
4	2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震天水台记录	2.75	0.60	
5	濮阳市人工拟合波-50 年超越概率 10%	2.65	0.65	特征周期延长

计算得到的反应谱具有的短周期峰值较大,峰值平台值为 2.75~2.80,特征周期较短,为 0.50~0.60 s。而濮阳市人工拟合波计算得到的反应谱结果具有峰值平台较低,峰值平台值为 2.65,特征周期较长,为 0.65 s。

5 结论

频谱特性是地震动的三要素之一,具有不同频谱特性的输入地震动对场地设计地震动反应谱会产生不同影响效果。本文选取 4 条以较高频成分为主的历史地震实测记录[1989 年美国加州洛马普列塔(Loma Prieta)6.9 级地震、1994 年美国加州北岭(Northridge)6.6 级地震、2008 年汶川 8.0 级地震和 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震],其卓越频率范围在 3.6~8.9 Hz;而选取的典型人工合成地震动(河南省濮阳市 50 年超越概率 10%水准的人工拟合波)以较低频成分为主,卓越频率范围在 1.9~3.2 Hz。两者具有不同的频谱成分特征。

通过输入具有不同频谱成分的地震动,对场地反应谱结果具有一定的影响效果。结果表明,以高频成分为主的历史地震动较以低频为主的人工拟合波对反应谱的影响表现为,在短周期阶段具有集中

放大的效应效果。该影响效果主要表现在两个方面:其一,对峰值平台值具有放大效果,历史地震动结果峰值平台值为 2.75~2.80 间,人工拟合波结果峰值平台值为 2.65;其二,对反应谱特征周期产生缩短效果,较常规的人工拟合波减小 0.05~0.15 s。产生上述影响效果,其可能原因与高频成分地震动对固有周期较短的场地特点具有一定的共振效应影响有关。该结果可为建筑物抗震设防方面的研究提供参考。

参考文献

[1] 胡聿贤.地震工程学[M].第二版.北京:地震出版社,2006.
[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
[3] 胡聿贤.地震安全性评价技术教程[M].北京:地震出版社,1999.
[4] 李小军,彭青,刘文忠.设计地震动参数确定中的场地影响考虑[J].世界地震工程,2001,17(4):34-41.
[5] 薄景山,翟庆生,吴兆营,等.三种土层结构反应谱特征周期的统计分析[J].地震工程与工程振动,2004,24(3):124-129.
[6] 盛志强,卢育霞,石玉成,等.河谷地形的地震反应分析[J].地震工程学报,2013,35(1):126-132,202.
[7] 兰景岩,吕悦军,刘红帅.地震动强度及频谱特征对场地地震反应分析结果的影响[J].震灾防御技术,2012,7(1):37-45.