

凌代俭、陈伟、袁建力 2013 用双向反应谱比法估计地形对结构反应的影响 中国地震 29(2) 256 ~ 264。

用双向反应谱比法估计地形 对结构反应的影响

凌代俭 陈伟 袁建力

扬州大学建筑科学与工程学院 江苏省扬州市华扬西路 196 号 225127

摘要 基于汶川地震发生时自贡市西山公园地形影响台阵的加速度记录,利用双向反应谱比法分析了山脊地形对单自由度体系结构反应的放大效应。结果表明:(1)水平向结构反应在结构自振频率小于 1Hz 的低频段放大效应不明显;在 1~10Hz 频段山顶放大效应最大,最大值达 3.25,对应频率为 6.25Hz;在 10~20Hz 频段,各台站放大效应趋于平稳,靠近山顶的 7 号台站放大效应最明显,最大值为 2.3,对应频率为 16.7Hz。(2)结构反应的最大放大系数有随高度的增加而增大的趋势,且在 1~10Hz 频段这种趋势比较明显。(3)与其它场地效应估计方法相比较,该方法能够体现地形效应对结构反应的影响,从而更有利于研究建筑结构震害的分布。

关键词: 双向反应谱比法 地形影响台阵 地形效应 放大系数

[文章编号] 1001-4683(2013)02-0256-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

局部场地条件对地震动有重要影响,其表现为地震动的放大或缩小,继而影响建筑结构震害的分布(Borcherdt,1970;Parolai et al,2004)。美国学者 Wood 对 1906 年美国旧金山大地震的震害做了详细的现场调查分析(欧阳行艳等,2008),发现不同场地条件的建筑物的震害差异十分明显。越来越多的震害资料表明,地震时局部场地效应往往会显著加大地震动强度,加剧建筑结构的破坏(欧阳行艳等,2009;王海云等,2010;杨宇等,2010;唐晖等,2012)。

场地对地震动最主要的效应是地表覆盖土层对地震波的放大或衰减作用,这种作用可能是由地下介质的多样性引起的,也可能是由于不规则地形的几何形状引起的,实际的场地地震动反应是这两者共同作用的结果。随着人们越来越重视对局部场地条件引起的场地地震反应的估计,评估场地条件对地震动影响的方法也越来越丰富。常用的方法有经验的传统谱比法、线性反演法、参考事件法、水平/垂直谱比法和遗传算法,还有理论的解析法和数值法(章文波等,2001a、2001b;朱东生等,2005;欧阳行艳等,2009)。以上方法均是针对场地条件对地震动影响的估计。此前已经做过不少研究,且都可以得到场地卓越频率的可靠估计和反应效果不尽相同的场地效应,但对于地震动所产生的震害进行评估时,人们更为关心的

[收稿日期] 2012-10-07; [修定日期] 2013-01-21。

[项目类别] 国家自然科学基金项目(51078323)。

[作者简介] 凌代俭,男,1960 年生,博士,副教授,主要从事防灾减灾工程研究。Email: yzsljdj@126.com

是位于地表结构的反应(韩建平等,2010; Choung, 2005),研究场地反应最终目的是服务于建筑结构的抗震,虽然场地震动与结构的反应一定程度上成正相关,但并非简单的线性关系。为了解场地条件对场地上结构反应的影响,本文利用基于传统谱比法理论的双向反应谱比法来估计场地条件中的山脊地形对单自由度体系结构反应的放大效应。

1 反应谱比法的基本理论

Borcherdt(1970)首次提出的参考场地方法,又称为传统谱比法,是研究场地反应的最普遍的方法之一。该方法需要选取一个参考场地,通常选取建立在基岩处的台站作为参考台站,该台站所在场地称为参考场地。然后将所要研究的邻近台站与参考台站进行比较,由于理论上理想基岩处的场地反应为常值,不随频率变化,因此场地观测值之间的差异可以解释为由局部场地反应所引起(欧阳行艳等,2008)。

地震动是由震源破裂(震源效应)、地震波在地壳中的传播(路径效应)和场地反应等3个过程组成的一个复杂系统的物理过程,用强震观测记录估计场地反应需要除去震源和路径效应的影响(Borcherdt,1970; Field et al,1995)。

对于地震观测记录中的S波部分,其谱值可写为

$$O_{ij}(f) = S_i(f) G_j(f) P_{ij}(f) \quad (1)$$

其中, $O_{ij}(f)$ 为第*j*个台站记录到的第*i*次地震地面观测谱(加速度谱、速度谱或位移谱); $S_i(f)$ 为第*i*次地震的震源谱; $G_j(f)$ 为第*j*个台站的场地地震动反应; $P_{ij}(f)$ 是第*i*次地震对于从该次地震的震源到第*j*个台站之间的传播路径的影响。

如果选择一个参考台站*r*,那么相邻台站与参考台站记录到的地震动谱比值为

$$\frac{O_{ij}}{O_{ir}} = \frac{S_i(f) G_j(f) P_{ij}(f)}{S_i(f) G_r(f) P_{ir}(f)} \quad (2)$$

如果台站间距远小于震源距,可以忽略传播路径的影响,即 $P_{ij}(f) \approx P_{ir}(f)$,从而

$$\frac{O_{ij}}{O_{ir}} = \frac{G_j(f)}{G_r(f)} \quad (3)$$

因此,对于一次地震,第*j*个台站的场地反应可用下式估计,即

$$G_j(f) = \frac{O_{ij}(f)}{O_{ir}(f)} G_r(f) \quad (4)$$

若地震地面观测谱采用的是反应谱,则根据反应谱的概念,式(4)确切的含义是位于不同台站上单自由度体系结构的反应之比即为对应的反应谱之比,此概念是对传统谱比法的拓展延伸,其中反应谱可以用弹性谱也可以用非弹性谱来分析,反应谱的选择取决于单自由度体系结构的类型。为方便分析对比,以下所涉及到的反应谱均指阻尼比 $\zeta = 5\%$ 时的加速度弹性反应谱,对应的结构指的是阻尼比 $\zeta = 5\%$ 的单自由度体系结构。

2 自贡地形影响台阵与地震动参数记录

自贡地形影响台阵的建成主要是为了观测不规则地形对地表地震动放大在空间分布上的非均匀性影响。台阵位于距汶川地震($M_s 8.0$)震中226.4km的自贡市西山公园,台站布设基本沿着山脊地形的轴线,由一系列北东向背斜和向斜组成(王海云等,2010),图1为各

台站剖面示意图,台站的具体位置与场地条件如表 1 所示。

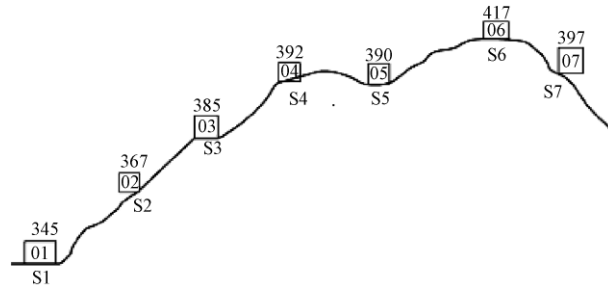


图 1 自贡地形台阵剖面高程(m)示意图

表 1 台站位置与场地条件

台站名称	高程(m)	经度(°E)	纬度(°N)	加速度计型号	岩性
S1	345	104.7452	29.3396	ES-T	基岩
S2	367	104.7450	29.3399	ES-T	基岩
S3	385	104.7440	29.3397	ES-T	基岩
S4	392	104.7436	29.3403	ES-T	基岩
S5	390	104.7426	29.3401	ES-T	基岩
S6	417	104.7422	29.3404	ES-T	基岩
S7	397	104.7419	29.3408	ES-T	基岩

汶川地震时,自贡地形影响台阵的主震加速度记录良好,图 2 是对汶川主震中自贡地形影响台阵中台站 S1 的加速度记录进行基线校准处理和滤波后的结果(江汶乡 2010; 李吉涛等 2010)。由于台站 S1~S7 均位于侏罗系基岩上,据此,可以认为场地地形的变化是影响地震动记录的主要因素,台站 S1 位于山脚下,其它台站位于山坡与山顶的基岩场地上,选择位于山底的台站 S1 作为参考点(王海云等 2010; 杨宇等 2010; 唐晖等 2012)。虽然得到的不是相对自由场的放大系数,但是山坡上的观测点相对于山脚的观测点的放大系数也能反映场地地形的影响。在此未考虑位于土层场地上的 S0 台站是为了便于更直观地观察仅受地形影响时的地震动响应规律。

地震动峰值加速度(PGA)是强震记录中比较容易获得且应用最广的地震动参数,在一定程度上反映了场地附近的整体震动强度(Amiri et al 2005; 王秀英等 2010)。图 3 反映了加速度峰值随高度的变化,图中参考点各方向的 PGA 均为最小,PGA 随高度的增加有较明显的增加,但台站 7 NS 方向的加速度最大,可见 PGA 虽然能在总体上反应地震动强度,但也有一定的片面性。

累积绝对速度 CAV 是将自由场加速度时程中超过 0.025g 的地震动加速度记录的绝对值对每一秒的时间间隔积分得到的(Campbell et al, 2010)。该概念由美国电力研究所(EPRI)提出(Electric Power Research Institute, 1988),研究表明,CAV 是确定地震动破坏阈值的最好参数。CAV 的累积值可表示为

$$CAV = \int_0^{t_{\max}} |a(t)| dt \quad (5)$$

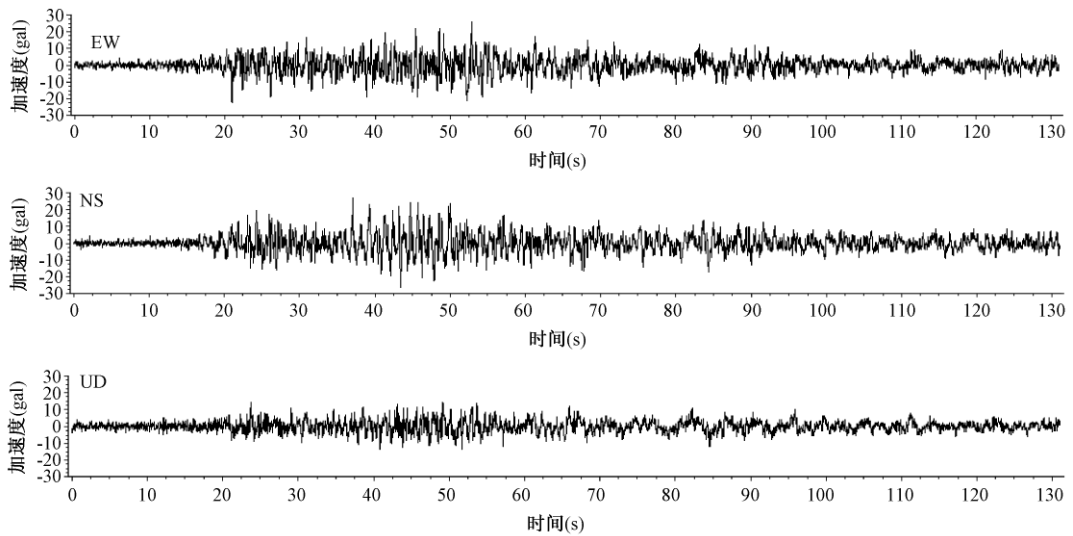


图2 台站1的加速度记录

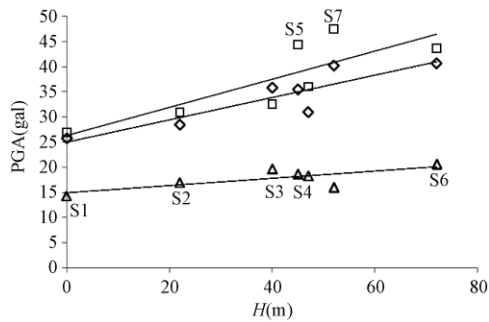


图3 峰值加速度 PGA 与高度的关系

◇EW 向 □NS 向 △UD 向

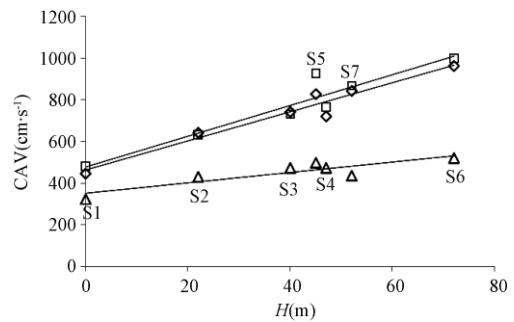


图4 累积绝对速度 CAV 与高度的关系

◇EW 向 □NS 向 △UD 向

而 PGA 只描述了地震动峰值,从中无法得知其波形频率及持续时间长短,相比之下 CAV 更能提供地震动损伤的解析度,该指标是地震时核电设施关闭与否的阈值之一。图 4 给出了累积绝对速度随高度的变化,对比图 3、4 中台站 6 NS 方向的值也可以发现 CAV 更能体现地震动反应随高度增加而变大的趋势。

3 计算结果

传统的双向水平地震作用效应的反应谱组合公式是一种基于随机振动理论的近似公式,是针对地震效应(反应到结构上就是剪力、弯矩、轴力)进行的组合,而双向反应谱比法是直接对水平分量的反应谱进行 SRSS 组合(图 5),因此水平分量的反应谱的 SRSS 组合代表的物理意义就是:单质点体系结构在双向水平地震作用下的最大反应,与单向水平地震作用下的情况相比较,该方法能更准确反映出结构的最大受力情况。

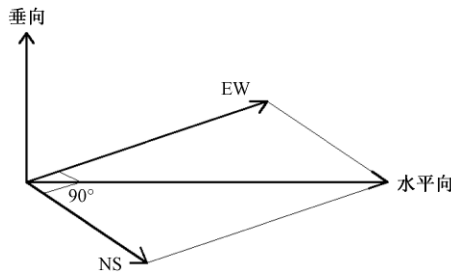


图5 双向(水平向)加速度反应谱示意图

加速度反应谱简称为 A ,用公式表示即

$$A_{\text{水平向}} = \sqrt{A_{\text{EW}}^2 + A_{\text{NS}}^2} \tag{6}$$

台站 1 得到的水平向加速度反应谱如图 6 所示。把台站 1 作为参考台站 ,各台站的水平向反应放大系数即为各台站与参考台站 1 的加速度反应谱之比(图 7)。与传统谱比法不同的是 ,此处的放大系数针对的是假设存在的对应台站是可以简化成单自由度体系的结构 ,而非传统谱比法中的地震动反应 ,故物理意义也不同。以台站 6 的放大系数为例 ,位于台站 6 的自振频率为 6.25Hz、阻尼比为 5% 的单自由度体系结构反应为台站 1 的结构反应的 3.25 倍。

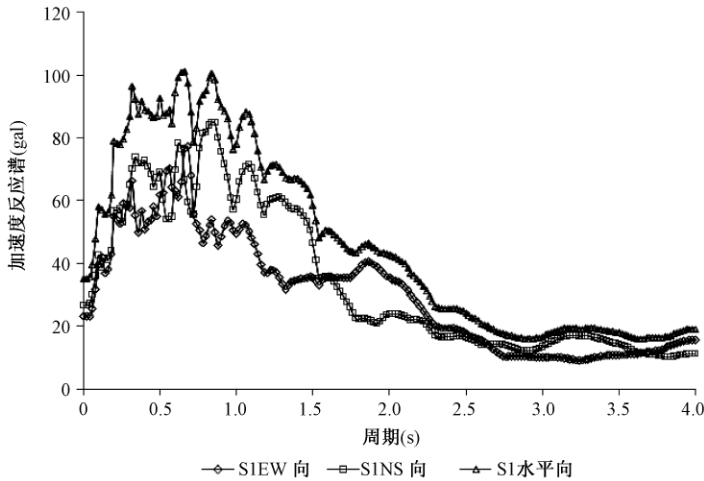


图6 台站 1 单向加速度反应谱与双向(水平向)加速度反应谱

为便于观察低频段放大系数给出图 8。由图 7、8 可以看出: 结构反应在结构自振频率小于 1 Hz 的低频段放大效应不明显; 在 1 ~ 10 Hz 频段的山顶放大效应最显著 ,放大系数达 3.3 ,对应频率为 6.3Hz; 在 10 ~ 20Hz 频段 ,各台站放大效应趋于平稳 ,靠近山顶的 7 号台站放大系数最大 ,最大值为 2.3 ,对应频率为 16.7 Hz。最大放大系数与频率的关系见表 2 ,将表 2 结果与王海云(2010)、杨宇(2010)等的结果(表 3)相比 ,可见在中低频段卓越频率与放大系数都较为接近且放大系数也更为合理 ,但高频段偏差较大 ,由于常见结构自振频率一般都处于 0.25 ~ 10Hz ,故而可以忽略高频段结果的偏差。

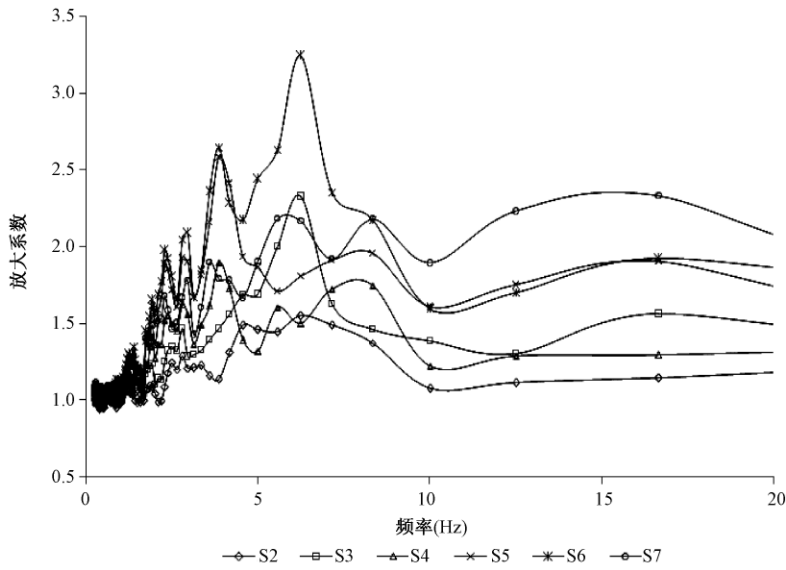


图 7 各台站反应放大系数与频率关系图

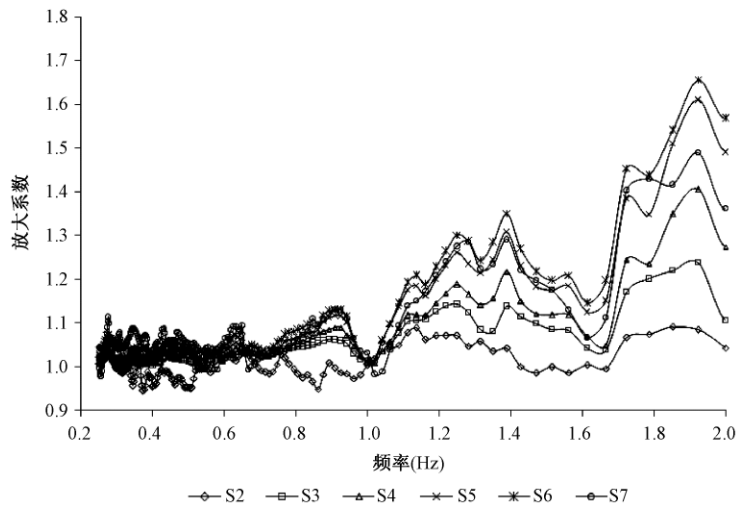


图 8 0.25Hz 至 2Hz 频段各台站反应放大系数与频率关系图

表 2 双向反应谱比法得到的地形场地不同频带结构的最大放大系数及其对应自振频率

台站编号	各频段最大放大系数及其对应频率					
	0.25 ~ 1Hz		1 ~ 10Hz		10 ~ 20Hz	
	AF	f	AF	f	AF	f
2#	1.07	0.28	1.55	6.25	1.15	16.67
3#	1.06	0.89	2.33	6.25	1.57	16.67
4#	1.09	0.91	1.90	3.85	1.29	16.67
5#	1.12	0.91	2.58	3.85	1.91	16.67
6#	1.13	0.93	3.25	6.25	1.93	16.67
7#	1.13	0.91	2.19	5.56	2.33	16.67

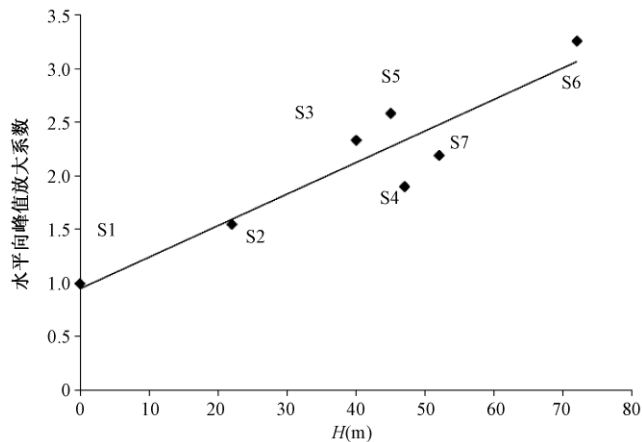
注: AF 表示最大放大系数; f 表示 AF 对应的结构自振频率(单位: Hz)

表3 传统反应谱比法得到的地形场地不同频带结构的最大放大系数及其对应自振频率

台站 编号	各频段最大放大系数及其对应频率											
	0.1 ~ 1Hz				1 ~ 10Hz				10 ~ 20Hz			
	EW		NS		EW		NS		EW		NS	
	AF	f	AF	f	AF	f	AF	f	AF	f	AF	f
2#	1.14	0.96	1.12	0.46	2.09	8.42	1.56	5.43	1.61	10.28	1.89	18.01
3#	1.15	0.98	1.10	0.99	2.85	5.74	2.70	5.47	5.20	19.29	3.92	18.78
4#	1.18	0.98	1.11	0.97	2.21	7.55	2.06	3.98	1.80	12.66	2.41	12.17
5#	1.21	0.98	1.13	0.99	3.07	8.72	3.00	3.95	3.71	19.48	5.56	16.91
6#	1.24	0.98	1.15	0.99	4.15	5.72	3.61	6.46	4.04	18.48	5.31	18.23
7#	1.22	0.98	1.14	0.99	2.51	5.03	3.41	6.80	9.10	16.97	5.22	14.56

注: AF 表示最大放大系数; f 表示 AF 对应的结构自振频率(单位: Hz)

此外,取 0.25 ~ 20Hz 频段上放大效应的最大值得到水平向峰值放大系数 PHA, PHA 总体上与高度成正相关(图 9),对比 PGA、CAV 与水平向峰值放大系数 PHA 随高度 H 的变化趋势,可以发现通过双向反应谱比法得到的 PHA 随 H 的变化趋势与 CAV 曲线(图 4) 更为接近,之所以可以把 PHA 与 PGA、CAV 相比较,是因为 PGA、CAV 分别代表了局部与整体上的地震动强度,从物理概念上讲,地震动强度越大结构反应越大,即放大系数越大,故认为该方法得到的结果是可以接受的。

图9 水平向峰值放大系数 PHA 与高度 H 的关系

4 结论

本文利用双向反应谱比法分析了自贡地形影响台阵的场地放大效应,通过与传统谱比法对比得出如下结果:

(1) 参考场地上地震动的 PGA、CAV 和水平向峰值放大系数 PHA 均为最小,且都有随高度的增加而变大的趋势,其中 PHA 与 CAV 吻合较好,从而说明 PHA 能较好地反应地震动强度和损伤情况。

(2) 在结构的自振频率小于 1 Hz 的低频段,结构的放大效应不明显,在自振频率为 1 ~

10 Hz 频段的山顶放大效应最大,与采用传统谱比法所得到的放大倍数及对应频率(王海云等 2010; 杨宇等 2010) 比较接近;而在 10 ~ 20Hz 频段的结果差异较大,但常见结构的自振频率一般低于 10Hz,故而可以忽略该差异。

(3) 双向反应谱比法沿用了传统谱比法的基础概念,对其物理意义进行了重新定义,其中双向反应谱忽略了两地震动分量的相关性,由于分量的最大值一般不会同时到达,一定程度上高估了各单向地震动分量下结构的反应,但与参考台站值之比平衡了上述所引起的误差。

(4) 通过调整反应谱的延性系数、阻尼比等,可以研究不同类型的单自由度体系结构由于地形效应产生的水平向放大反应,从而更有利于确定不同结构的震害分布。

致谢:感谢国家强震动台网中心提供数据支持。

参考文献

- 江汶乡 2010 近场强震动加速度记录的校正处理方法,硕士学位论文,中国地震局工程力学研究所。
- 李吉涛、杨庆山 2010 地震波基线漂移的处理方法,北京交通大学学报, **34**(1) 95 ~ 99。
- 韩建平、周伟 2010 基于汶川地震记录的地震动强度指标与 SDOF 体系响应的相关性,土木工程学报, **43**(增刊 1) 10 ~ 15。
- 欧阳行艳、章文波 2008 利用强震记录进行场地反应分析研究综述,世界地震工程, **24**(3) 118 ~ 126。
- 欧阳行艳、章文波、张有兵 2009 利用集集地震余震记录分析场地地震动反应,中国科学院研究生院学报, **26**(3) 373 ~ 382。
- 唐晖、李小军、李亚琦 2012 自贡西山公园山脊地形场地效应分析,振动与冲击, **31**(8) 74 ~ 79。
- 王秀英、聂高众、王登伟 2010 汶川地震诱发滑坡与地震动峰值加速度对应关系研究,岩石力学与工程学报, **29**(1) 82 ~ 89。
- 王海云、谢礼立 2010 自贡市西山公园地形对地震动的影响,地球物理学报, **53**(7) 1631 ~ 1638。
- 杨宇、李小军、贺秋梅 2010 自贡西山公园山脊场地地形和土层效应数值模拟,震灾防御技术, **6**(4) 436 ~ 447。
- 章文波、谢礼立、郭明珠 2001a 利用强震记录分析场地的地震反应,地震学报, **23**(6) 604 ~ 614。
- 章文波、周雍年、谢礼立 2001b 场地放大效应的估计,地震工程与工程振动, **21**(4) :1 ~ 9。
- 朱东生、虞庐松、陈兴冲 2005 地震动强度对场地地震反应的影响,世界地震工程, **21**(2) 115 ~ 119。
- Amiri G G, Dana F M, 2005, Introduction of the most suitable parameter for selection of critical earthquake, Computers and Structures, **83** 613 ~ 626.
- Borchardt R D, 1970, Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, Bull Seism Soc Am, **60**(1) 29 ~ 61.
- Campbell K W, Bozorgnia Y, 2010, A ground motion prediction equation for the horizontal component of cumulative absolute velocity (CAV) based on the PEER-HGA strong motion database, Earthquake Spectra, **26**(3) 635 ~ 650.
- Choung-Yeol Seo 2005 Influence of ground motion characteristics and structural parameters on seismic responses of SDOF systems [doctor dissertation], Graduate and Research Committee in Candidacy.
- Electric Power Research Institute, 1988, A criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake, ERPI Report NP-5930, 1 ~ 28.
- Field E H, Jacob K H, 1995, A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent, Bull Seism Soc Am, **85**(1) 1127 ~ 1143.
- Parolai S, Richwalski S M, Milkereit C, et al, 2004, Assessment of the stability of H/V spectral ratios from ambient noise and comparison with earthquake data in the Cologne area (Germany), Tectonophysics, **390** 57 ~ 73.

Evaluation of the seismic amplification of topography on structure with bidirectional response spectra ratio method

Ling Daijian Chen Wei Yuan Jianli

College of Civil Science and Engineering , Yangzhou University , Yangzhou 225127 , Jiangsu , China

Abstract Based on the strong ground motion accelerations recorded by the topographic array in Xishan park of Zigong city for the mainshock of the Wenchuan earthquake , the amplification effects of SDOF system (damping ratio $\zeta = 5\%$) located at the mountain ridge topography were studied with the bidirectional response spectra ratio method , and the results are as follows: (1) The amplification effect of topography on horizontal structure is not obvious when frequency is below 1Hz. In the frequency range from 1Hz to 10Hz , the amplification factor of hilltop is maximal , the maximal amplification factor is 3.25 and the corresponding frequency is 6.25Hz. In the frequency range from 10Hz to 20Hz , amplification effect of each station tends to be steady , the amplification factor of Station No.7 in the vicinity of hilltop is maximal , the maximal amplification factor is 2.3 and the corresponding frequency is 16.7Hz. (2) The maximal amplification factors of structure response tend to increase with the elevation of the hills , and the trend in frequency range from 1Hz to 10Hz is more obvious. (3) Compared with other site-response estimation techniques , this method could reflect the influence of topography on structure , which is a better way to study the seismic damage distribution of structures.

Key words: Bidirectional response spectra ratio Topographic array Topographic effect Amplification factor