

江鹏,郭迅,何福,等.同一场地多次强震记录一致性分析[J].华南地震,2022,42(3):29-35. [JIANG Peng, GUO Xun, HE Fu, et al. Consistency Analysis of Multiple Strong Earthquake Records in the Same Site[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(3):29-35]

同一场地多次强震记录一致性分析

江 鹏¹, 郭 迅², 何 福², 陈 波²

(1.四川省地震局,成都 610041; 2.防灾科技学院 中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室,河北 三河 065201)

摘要:建设场地的地震动一般用峰值、频谱、持时来描述,用既有方法确定的地震动可靠性难以检验。利用长宁地震中一个已知场地遭遇9次地震的记录作验证尝试,通过傅里叶谱、反应谱和谱比分析方法探讨记录所反映出的卓越周期的一致性。分析结果表明:东西向反应谱卓越周期平均值为0.21 s,南北向卓越周期平均值为0.18 s,竖向卓越周期平均值为0.11 s,这三个卓越周期值离散性都很小。场地勘察显示覆盖层厚度19.5 m,等效剪切波速197 m/s,场地特征周期为0.40 s。实际记录反映的卓越周期与勘察方法计算值相差一倍。用地震记录做谱比时,N/V(南北向)卓越周期为0.30~0.37 s,平均值为0.33 s。E/V(东西向)卓越周期为0.18~0.48 s,平均值为0.26 s。分析认为,场地卓越周期与个性化的地震输入密切相关。

关键词:长宁地震;场地;卓越周期;地震记录;一致性

中图分类号:P315.3

文献标识码:A

文章编号:1001-8662(2022)03-0029-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.03.04

Consistency Analysis of Multiple Strong Earthquake Records in the Same Site

JIANG Peng¹, GUO Xun², HE Fu², CHEN Bo²

(1.Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China; 2. Key Laboratory of Building Collapse Mechanism and Defense, China Earthquake Administration, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China)

Abstract: The ground motion of construction site is generally described by peak value, spectrum and duration. The reliability of ground motion determined by existing methods is difficult to test. In this paper, the records of 9 earthquakes in a known site during the Changning earthquake are used to verify the results. The consistency of the predominant period reflected by the records is discussed by means of Fourier spectrum, response spectrum and spectral ratio. The results show that the average value of the predominant period of east-west response spectrum is 0.21 s, the average value of the predominant period of north-south predominant period is 0.18 s, and the average value of vertical predominant period is 0.11 s. The dispersion of these three predominant period values is very small. The site survey shows that the thickness of overburden is 19.5 m, the equivalent shear wave velocity is 197 m/s,

收稿日期:2021-11-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1504302-3、2016YEE0205100)

作者简介:江鹏(1987-),男,工程师,主要从事强震动观测工作。

E-mail: jiangpeng@scdzj.gov.cn

通信作者:郭迅(1967-),男,博士,研究员,主要从事结构抗震和结构健康诊断研究。

E-mail: guoxun@cidp.edu.cn

and the site characteristic period is 0.40 s. The predominant period reflected by actual record is less than half of the calculated value of survey method. When seismic records are used for spectral ratio, the predominant period of N/V spectral ratio ranges from 0.30 s to 0.37 s, with an average of 0.33 s. The E/V predominant period ranges from 0.18 s to 0.48 s, with an average value of 0.26 s, which is also close to the survey results. Overall, the site predominant period is closely related to personalized seismic input.

Keywords: Changing earthquake; Site; Predominant period; Seismic records; Consistency

0 引言

2019年6月17日22时55分,四川省宜宾市长宁县(北纬28.34°,东经104.90°)发生M6.0地震,震源深度16 km。四川、重庆、贵州、云南多地有明显震感。此次地震共造成16.8万人受灾,因灾死亡13人,受伤199人,房屋倒塌3198间,严重损坏47 466间^[1]。记录到的主震东西向加速度峰值为764 gal,南北向地震动加速度峰值为636 gal,竖向地震动加速度峰值为529 gal。根据中国地震台网统计,从2019年6月17日22时到8月13日8时,共记录到5.0~5.9级地震4次,4.0~4.9级地震8次,3.0~3.9级地震61次。长宁地震显现出的特征是加速度大、持时短、余震频繁。到2020年8月底,仍有3.0级以上余震发生。

2019年6月17日主震强震记录由距离震中22 km,位于珙县第一高级中学东北角围墙处的珙县地震台(中国地震台网编号:51GXT)获取。该台址地层较复杂,松散土以第四系全新统人工堆积的杂填土和第四系全新统冲积形成的粉土、粘土、淤泥质粘土、砾石、卵石等构成。

由土层结构决定的场地对强地面运动有很大影响,一般体现在场地特征周期和对基岩表面的地震放大系数等方面^[2],某一场地的土层结构不变,经历多次强震作用,各次强震记录所反映出的特征周期应该相同或接近,2019年6月17日长宁地震中珙县地震台所在场地恰巧记录了多次地震动,这为验证上述假设提供了有利条件。

1 场地条件和场地地质构造背景

1.1 台站基本情况

珙县地震台位于珙县巡场镇中坝村9组境内,

具体位置在珙县第一高级中学校园内东北角围墙处,地理坐标为:东经104°33′49.4″,北纬28°42′50.0″,海拔高程410 m。台址东侧距巡场芙蓉煤矿公路约80 m,北侧距珙县县城巡场镇约1 km。

该台站于2007年3月完成建设并投入使用,配备的强震仪为三分量力平衡式加速度计和GPS授时系统的3通道数字强震仪,采用触发记录方式。图1为该台站所配备的Etna强震仪。

该地区主要断裂构造包括峨眉—烟峰断裂带、荣经—马边—盐津断裂带等。区域内的雷波马湖附近历史上曾发生过7级大震,区内中强地震活动也很频繁。具有代表性的地震有1936年马边6.8级震群型地震、1994年和1995年沐川的两次5级以上地震、1985年的自贡4.8级地震、1994年的年宜宾5.4级地震等。与该区域相邻的云南永善、大关,1974年曾发生过一次7.1级地震。

珙县第一高级中学教学大楼距离台站约50 m,为砖混结构,在地震中破坏严重。如图2所示,花篮梁下的窗间墙出现贯穿的X型裂缝导致结构几近倒塌,昭示地面运动相当强烈。

1.2 台址场地条件

台址所处地貌单元属于岩溶溶蚀洼地内的平坝区中部,东西两翼为低山斜坡地貌,洼地宽380 m,洼地内地形平缓,相对高差不足2 m。台址位于洼地内河流一级阶地后缘,距西侧洼地边缘约150 m,距东侧洼地边缘约230 m,勘测期间台址高出西侧小溪河水位约5 m,台址建设场地内地形平坦。

台址钻孔揭露的地层主要第四系全新统人工堆积(Q₄^{ml})的杂填土和第四系全新统冲积形成的(Q₄^{al})粉土、粘土、淤泥质粘土、砾石、卵石等构成,覆盖土层厚度19.5 m;基底岩层为二叠系下统茅口组(P_{1m})石灰岩。场地内钻孔揭露的地层由上至下大致可分为13层,土层参数列于表1。



图1 该台站所配备的仪器
Fig.1 Strong motion seismometer of Gongxian Station



图2 珙一中教学楼花篮梁下的破坏墙段^[1]
Fig.2 Damage section of wall in the teaching building of Gongxian Middle School^[1]

表 1 场地土层参数
Table 1 Site soil parameters

序号	土层分层特征	土层厚度/m	底层埋深/m	波速值区间/(m·s ⁻¹)
1	杂填土	1.4	1.4	123
2	粉土	1.8	3.2	145
3	圆砾	0.7	3.9	274
4	粘土	1.1	5.0	129~143
5	卵石	0.6	5.6	265
6	粘土	3.4	9.0	129~143
7	淤泥质粘土	0.9	9.9	167
8	圆砾	1.8	11.7	274
9	粘土	2.0	13.7	265
10	圆砾	0.6	14.3	318~325
11	角砾	2.6	16.9	318~325
12	卵石	1.8	18.7	334~345
13	碎石	0.8	19.5	334~345

根据所测土层剪切波速为 123 ~ 345 m/s，确定场地覆盖层厚度为 19.5 m，取中值计算等效剪切波速为 197 m/s，为中硬场地土，属Ⅱ类场地^[3]。根据公式(1)计算卓越周期^[4]：

$$T = 4H/V \tag{1}$$

式(1)中， H ， V 分别表示场地覆盖层厚度和等效剪切波速，计算可得场地卓越周期为 0.40 s。

2 地震记录的选取

本文选取 2019 年 6 月 17 日到 2019 年 7 月 4 日之间珙县台获取的 9 次 4.0 级以上地震的三分量强震动记录。表 2 为 9 条强震记录的基本信息。

表 2 珙县地震台获取的 9 条强震记录基本信息
Table 2 Basic information of 9 strong earthquake records obtained by Gongxian Station

序号	发震时间/年-月-日 h:min	震中位置	震级/ M_s	震源深度/km
1	2019-06-17 22:55	长宁县	6.0	16
2	2019-06-17 23:36	珙县	5.1	16
3	2019-06-18 00:29	长宁县	4.1	10
4	2019-06-18 00:37	珙县	4.2	10
5	2019-06-18 05:03	长宁县	4.5	14
6	2019-06-18 07:34	长宁县	5.3	17
7	2019-06-24 09:23	长宁县	4.1	10
8	2019-07-03 12:26	长宁县	4.8	10
9	2019-07-04 10:17	珙县	5.6	8

选取的9次地震事件中，6次发生在长宁县，3次发生在珙县，包括6月17日长宁 $M6.0$ 级主震记录(图3)和7月4日珙县 $M5.6$ 级主震记录(图4)，震源深度从8 km到17 km不等。

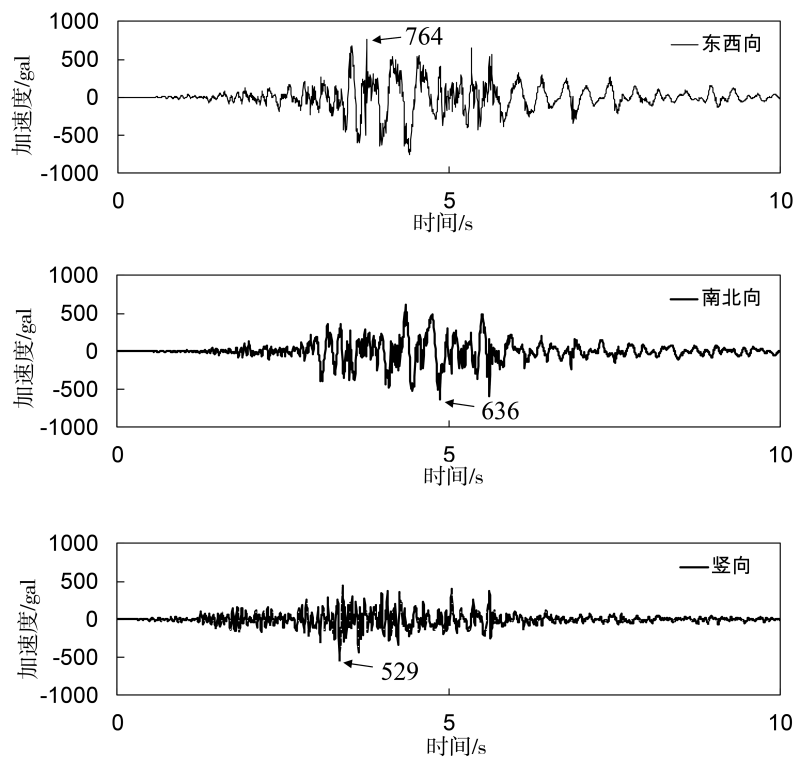


图3 长宁县6.0级主震强震记录
Fig.3 Strong motion record of Changning $M6.0$ main shock

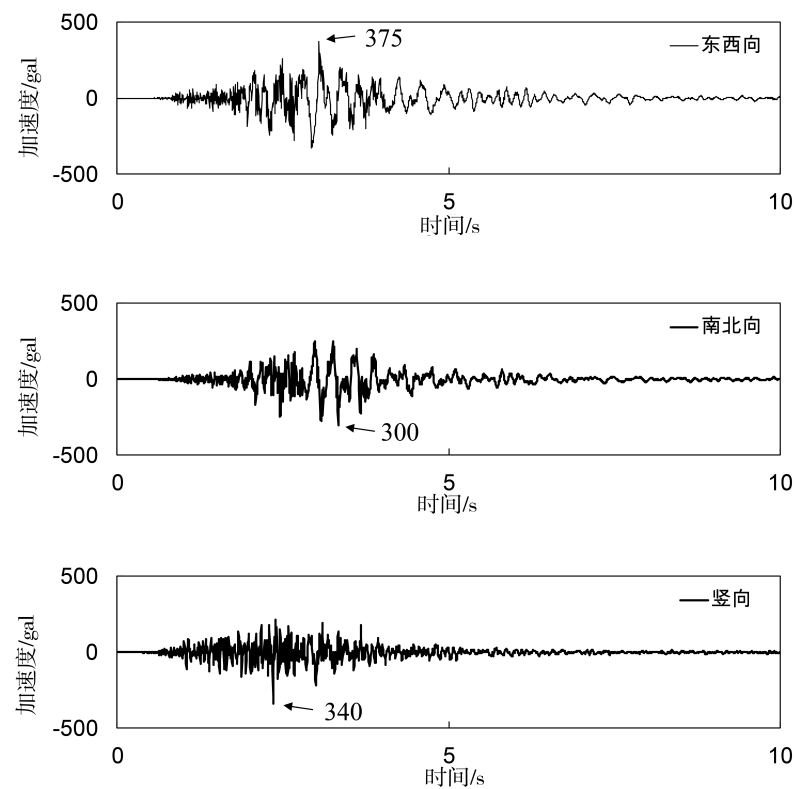


图4 珙县5.6级地震强震记录
Fig.4 Strong motion record of Gongxian $M5.6$ earthquake

3 地震动谱分析

3.1 傅里叶谱分析

珙县台获得的9次地震记录的主要参数见表3。

确定地震动所包含的频率信息常用傅里叶谱、功率谱和反应谱等分析方法^[5]。对选取的9次地震记录分别求其傅里叶谱,得到各次地震动的傅里叶谱卓越频率和卓越周期,各地震动卓越周期与卓越频率也列于表3。

表3 地震动主要参数

Table 3 Main parameters of ground motion

序号	发震时间/年-月-日 h:min	地震动峰值/gal	卓越周期/s	卓越频率/Hz
1	2019-06-17 22:55	764/636/529	0.36/0.20/0.19	2.8/5.1/9.2
2	2019-06-17 23:36	347/428/218	0.17/0.37/0.14	5.8/2.7/7.4
3	2019-06-18 00:29	47/40/24	0.16/0.18/0.07	6.3/5.7/13.6
4	2019-06-18 00:37	12/11/5	0.29/0.32/0.83	3.4/3.1/1.2
5	2019-06-18 05:03	49/50/26	0.17/0.16/0.10	6.0/6.4/10.0
6	2019-06-18 07:34	338/329/104	0.29/0.22/0.15	3.4/4.6/6.5
7	2019-06-24 09:23	61/63/72	0.12/0.13/0.07	8.5/7.5/14.6
8	2019-07-03 12:26	64/64/35	0.29/0.13/0.07	3.4/7.9/13.6
9	2019-07-04 10:17	375/300/340	0.30/0.32/0.08	3.3/3.1/12.4

注:2019年06月17日22:55地震动PGA为764/636/529,分别表示东西向、南北向、竖向加速度峰值为764 gal、636 gal、529 gal。卓越周期与卓越频率同理。

图5给出了2019年6月17日长宁6.0级地震主震记录的傅里叶谱。从图5中可以看出该地震动记录的东西向、南北向、竖向卓越频率为2.8 Hz、5.1 Hz、9.2 Hz。图6给出了7月4日珙县5.6级地震记录的傅里叶谱,其东西向卓越频率为3.3 Hz,南北向卓越频率为3.1 Hz,竖向卓越频率为14.6 Hz。

从表3可以看出,各次地震的三方向卓越频率有一定差异。东西向卓越频率为2.8~8.5 Hz,南北向卓越频率为2.7~7.9 Hz,竖向卓越频率为1.2~14.6 Hz。总体来看,本场地得到的几次地震记录比以往常见地震记录卓越频率要更高(El Centro地震记录的竖向、南北向、东西向卓越频率分别为2.4 Hz、1.5 Hz、2.4 Hz,汶川地震中卧龙地震记录

的竖向、南北向、东西向卓越频率分别为5.9 Hz、3.8 Hz、2.3 Hz)^[6-7]。

3.2 反应谱分析

除了用傅里叶谱作为地震动频谱特性的表述,在工程中被广泛使用的反应谱同样具有表征地震动谱特性的功能,相比于傅里叶谱,反应谱更加一目了然,它既是地震动特性的直观描述,也是结构地震反应分析的重要工具^[5],对选取的9次地震记录做反应谱分析,结构阻尼比取值0.05。图7(a)、(b)、(c)分别为9条地震记录归一化的东西向、南北向、竖向反应谱^[8-10]。

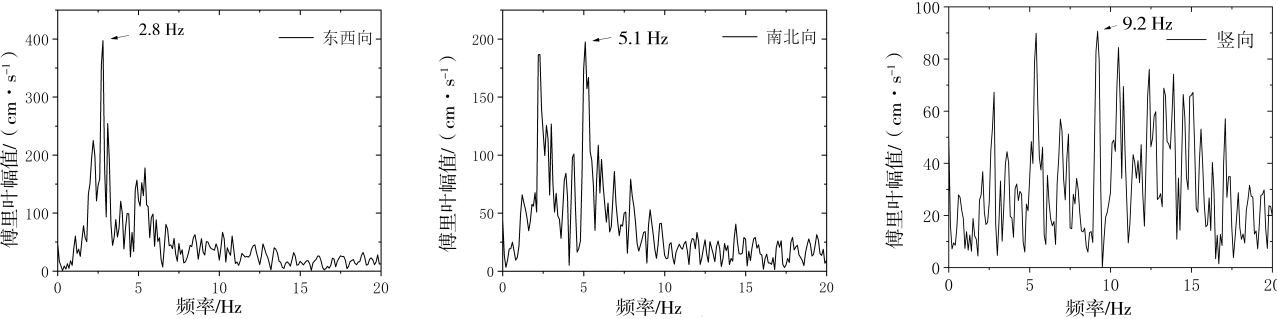


图5 长宁县6.0级主震记录傅里叶谱

Fig.5 Fourier spectra of Changning M6.0 main shock record

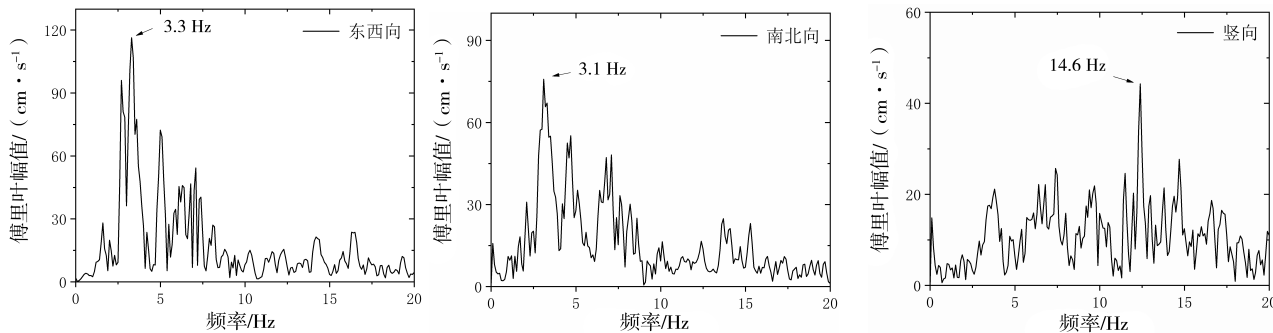


图6 珙县5.6级强震记录傅里叶谱

Fig.6 Fourier spectra of Gongxian *M*5.6 strong earthquake record

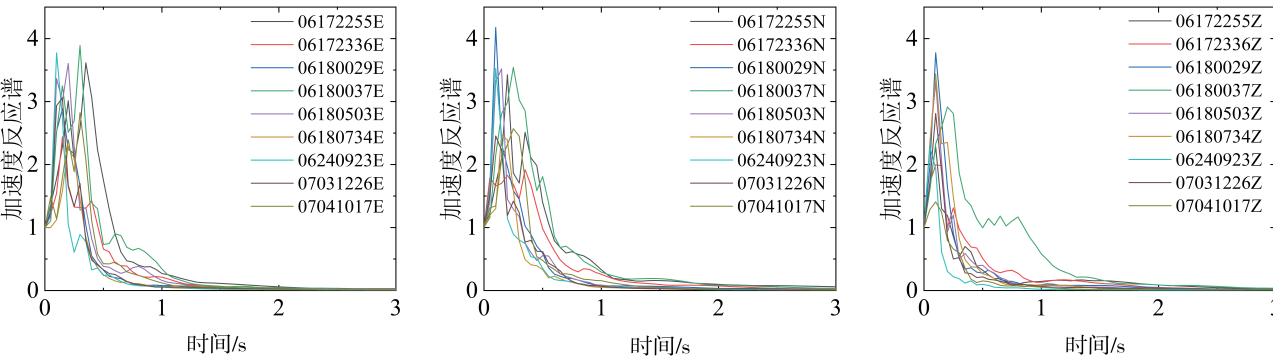


图7 9次地震记录反应谱

Fig.7 Response spectra of 9 seismic records

将9次地震记录三方向反应谱卓越周期归纳到表4，并分别对三向卓越周期求平均值与方差。从表4可以看出，同一方向的卓越周期因不同的输入显示出较大的差异；同一次输入，南北和东西间差异也是显著的，这说明，场地的卓越周期是不稳定的。

3.3 谱比法分析

1989年，日本学者 Nakamura 提出了单点谱比法，就是利用同一测点地震动(或脉动)水平分量与竖向分量的谱比求场地卓越周期和放大倍数，此方法又被称为 Nakamura 法。单点谱比法建立在

表4 反应谱对应的卓越周期(单位: s)

Table 4 Predominant periods corresponding to the response spectrum (unit: s)

序号	地震记录/年-月-日 h:min	东西向	南北向	竖向
1	2019-06-17 22:55	0.35	0.20	0.10
2	2019-06-17 23:36	0.15	0.35	0.15
3	2019-06-18 00:29	0.15	0.10	0.10
4	2019-06-18 00:37	0.30	0.25	0.20
5	2019-06-18 05:03	0.20	0.15	0.10
6	2019-06-18 07:34	0.20	0.15	0.10
7	2019-06-24 09:23	0.10	0.10	0.05
8	2019-07-03 12:26	0.15	0.10	0.10
9	2019-07-04 10:17	0.30	0.25	0.10
	平均值	0.21	0.18	0.11
	方差	0.0070	0.0067	0.0014

两个假设基础之上:①埋伏基岩面脉动的水平分量与竖直分量的谱比为1;②基岩脉动经过覆盖土层向上传播过程中,竖向分量保持不变,只有水平分量被放大,用此谱比值表示该场地的卓越周期和放大倍数^[11-12]。图8为本文选取的9条强震记录的南北向分量傅里叶幅值谱与竖向傅里叶幅值谱比值(N/V),图9为东西向与竖向傅里叶幅值谱比(E/V)。

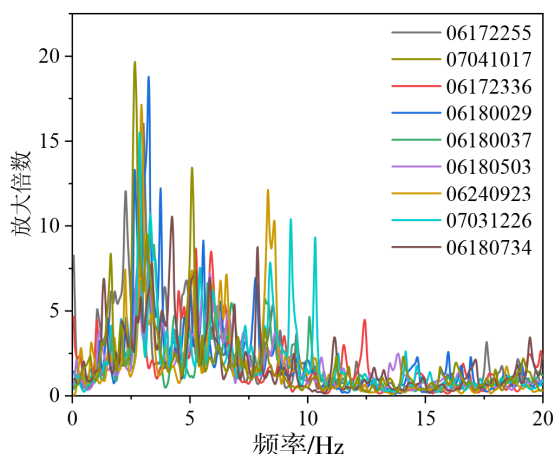


图8 南北向记录与竖向记录傅里叶幅值谱比

Fig.8 Fourier spectral ratio of N/V records and vertical records

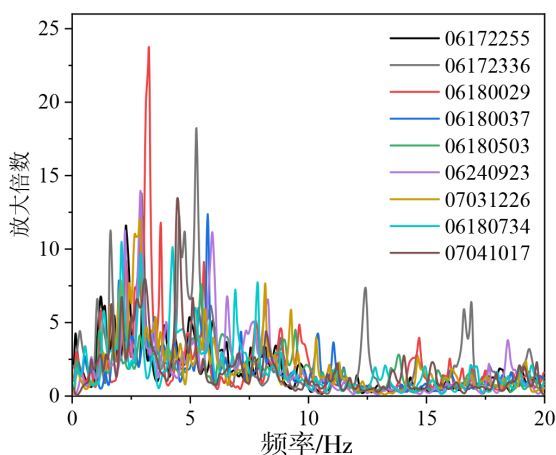


图9 东西向记录与竖向记录傅里叶幅值谱比

Fig.9 Fourier spectral ratio of E/V records and vertical records

N/V 谱比得到的卓越频率范围为2.7~3.3 Hz,平均为3.0 Hz,卓越周期为0.33s; E/V 谱比卓越频率范围为2.1~5.5 Hz,平均值为3.9 Hz,卓越周期为0.26 s。

4 结论

珙县地震台得到了2019年长宁地震主震和余

震记录,选取9次幅值较大的记录进行分析,探讨记录所反映出的卓越周期的一致性。

(1)根据反应谱分析结果,东西向卓越周期范围为0.10~0.35 s,平均值为0.21 s;南北向卓越周期范围为0.10~0.35 s,平均值为0.18 s;竖向卓越周期范围为0.05~0.20 s,平均值为0.11 s。与勘察报告推算的卓越周期(0.40 s)差别较大。

(2)根据谱比法分析结果,N/V(南北向)谱比卓越周期范围为0.30~0.37 s,平均值为0.33 s,E/V(东西向)卓越周期为0.18~0.48 s,平均值为0.26 s。反映出采用谱比法得到的卓越周期既不同于反应谱法得到的卓越周期,而且南北向和东西向之间的差异也是明显的。

(3)同一场地在不同地震输入下,卓越周期不同,同一次地震输入,南北和东西方向的卓越周期也不同,就本案例而言,以卓越周期表征的场地特性并不稳定,与个性化的地震输入密切相关。

参考文献

- [1] 郭迅.从长宁地震反思韧性城乡建设[J].防灾科技学院学报,2019,21(03):1-6.
- [2] 张敏政.地震工程的概念和应用[M].北京:地震出版社,2015:63-64.
- [3] 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,2016.
- [4] 王家全,张信贵,易念平,等.场地土卓越周期变化的试验分析[J].广西大学学报(自然科学版),2010,35(04):684-687+692
- [5] 李宏男.地震工程学[M].北京:机械工业出版社,2013:69.
- [6] El Centro Earthquake. Vibration Data [EB/OL]. (1940-05-18) [2021-11-02]. <http://www.vibrationdata.com/elcentro.htm>
- [7] 闵卫鲸,张炳焜,李磊,等.汶川地震中高架路的抗震响应分析[J].铁道建筑,2010,12:66-69.
- [8] 邱志刚,罗奇峰.地震波的归一化时-频反应谱[J].振动工程学报,2014,27(01):91-95.
- [9] 蔡志恒,童根树.考虑P-Δ效应的弹塑性反应谱归一化[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(06):127-131.
- [10] 中国防震减灾百科全书总编辑委员会.中国防震减灾百科全书地震工程学[M].北京:地震出版社,2014.
- [11] Nakamura Y. A Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J]. QR of RTRI,1989,30(01):125-133.
- [12] Guo Xun, Wong Y L, Yuan Yifan. Estimation of damping ratio of soil sites using microtremor[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2002,1(01):45-49.