

利用宁洱地震强震记录分析场地响应^{*}

王赞赞^{1,2}, 钱进², 崔建文², 黄建华¹

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026; 2. 云南省地震局, 昆明 650224)

摘要:采用 Nakamura 方法, 利用 2007 年 6 月 3 日宁洱地震强震动记录 S 波资料和脉动观测资料, 计算了宁洱震区一些强震动台的场地响应。结果表明, 当台站场地为基岩或覆盖层较薄时, 由脉动数据和 S 波数据分别计算的谱比曲线一致性很好。当覆盖层大于 35 m 的时候, 两者的谱比值有差异, 即用 S 波计算的场地放大响应要明显大于用脉动计算的场地响应。

关键词:强震记录; Nakamura 方法; 场地响应; 脉动; 宁洱地震

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2009)02-0151-04

0 引言

强震动观测为制定、修改地震区划图及抗震设计规范提供基础资料及其在地震动衰减关系、反应谱特征参数统计等地震工程研究领域的应用发挥了重要作用。另一方面, 理论分析和震害调查结果表明, 场地条件对地震动的特性和震害具有重要影响。因此, 利用地震观测资料研究强震动台站所在地的反应谱特征十分必要 (Boore *et al.*, 1993)。

2007 年 6 月 3 日宁洱地震中, 云南强震动台网有 30 个台站获得地震记录。围绕着震中, 有 18 个强震动台获取了完整的主震记录。地震发生后在震区架设的 4 个观测点又获取到主、余震记录共 300 多条 (崔建文等, 2007)。

本文利用此次强震记录用单点谱比法 (Nakamura, 1989) 计算震区 16 个强震动固定台的场地谱比曲线, 结合场地地质条件, 对比分析了不同台站场地条件下场地响应特征。

1 方法

获得场地动力特征的最好方法是钻孔法, 它能获得最可靠的数据, 但是费用高且耗时长。相比之下, 采用地脉动方法不仅方便, 费用也低得多, 更具有优势。目前利用地脉动进行场地动力

特征分析的方法主要有 4 类 (郭明珠, 2003): (1) 地脉动记录的直接傅立叶谱分析法; (2) 测点地脉动记录与参考点记录谱比法; (3) 地脉动水平分量与竖向分量谱比法 (Nakamura 方法); (4) 通过地脉动台阵观测资料反演场地速度构造, 再根据这些速度资料用理论法计算场地传递函数, 进而进行场地特征分析。其中 Nakamura 方法以其较为准确的结果而得到广泛的应用 (Yamazaki, Ansary, 1997; Hiroshi, Kohji, 2004)。

Nakamura 由双站频谱比法推导出单点地脉动谱比法, 即利用同一测点水平分量和竖向分量的谱比表示场地传递函数, 并经验性地证明了单点地脉动谱比值可以表示 S 波的传递函数。利用双站频谱比法估算场址效应, 在水平向可表示为

$$S_E = \frac{H_S}{H_B} \quad (1)$$

其中 H_S 代表土层场地观测资料的水平向傅氏频谱, H_B 代表基岩场地观测资料的水平向傅氏频谱。而脉动源主要在地表附近, 由于受到地表瑞利面波的影响, 土层场地地表垂直向记录通常会大于基岩垂直向记录。所以, 来自震源的垂直向放大效应可表示为

$$A_S = \frac{V_S}{V_B} \quad (2)$$

其中 V_S 代表土层场地观测资料的垂直向傅氏频谱,

* 收稿日期: 2008-10-20.

基金项目: 云南省社会发展专项 (2007CA002)、地震地震行业科研专项 (200808061) 联合资助

V_B 代表基岩场地观测资料的垂直向傅氏频谱。为了去除震源效应 A_S ，将 S_E 除以 A_S ，可得修正值：

$$S_M = \frac{S_E}{A_S} = \frac{\frac{H_S}{H_B}}{\frac{V_S}{V_B}} = \frac{H_S}{H_B} \cdot \frac{V_B}{V_S}.$$

(3)

Nakamura (1989) 利用井下记录数据证实 $\frac{H_B}{V_B} \approx 1$ 。而 Lermo 和 Chavez (1993) 利用基岩为参考点也证实此值近似于 1。因此场址效应可表示为

$$S_M = \frac{H_S}{V_S}.$$

(4)

此即为 Nakamura (1989) 单点谱比法的经验关系。它说明，只需在地表测量 3 个分量就可计算出场地的传递函数。在实际研究中，通常采用单点谱比法 (Nakamura 法) 计算台站的场地响应，谱比值定义如下：

$$H/V = (S_{NS}^2 + S_{EW}^2)^{1/2} / S_{UD}.$$

(5)

式中： S_{UD} 、 S_{NS} 、 S_{EW} 分别为三分向傅氏谱振幅分量。

2 资料选取与处理

在本次宁洱地震中有 30 个强震台（包括流动台）获取到地震记录（图 1）。

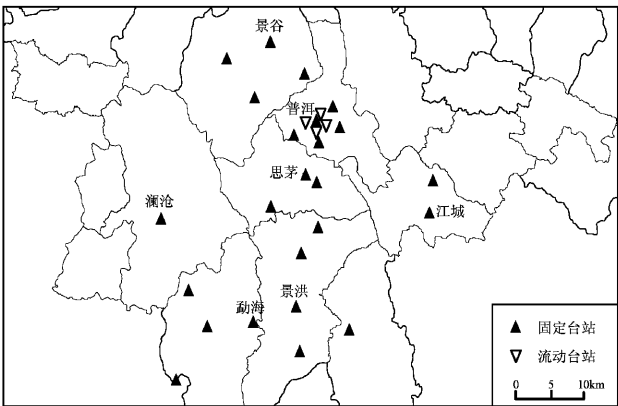


图 1 获取宁洱地震记录的台站分布图
Fig. 1 Ning'er Earthquake was recorded by 30 strong-motion stations in Yunnan

一个理想的地震记录应有完整的波形及部分事前地震噪声信号，但是往往随着震中距的增加，

即 S 波与 P 波到时差的增加，事前记录时间将减少，甚至丢失数据头。没有足够数据的事前记录，将无法计算地脉动的傅立叶幅值。因此，本文选取记录完整的 16 个台站，强震仪采样率为 200，每条记录时间大于 40 s。

数据处理过程：选取 2007 年 6 月 3 日 05 时 34 分 56.8 秒宁洱 6.4 级主震记录完整的 16 条强震记录；截取 S 波数据和事件前的地脉动数据，选取事件前记录长度大于 10 s 的 12 个台站（保证采样点 ≥ 2048 个），分别计算傅氏谱，并进行对比分析（图 2）。表 1 给出了台站的相关参数。

为了避免发生谱比失稳，在计算水平向与竖向傅氏谱谱比前，对各分量的傅立叶幅值采用 0.5 Hz 的平滑窗，即 400 个采样点的平均进行平滑，然后再计算平滑后的傅立叶幅值谱比。

表 1 台站参数表
Tab. 1 Station parameters

序号	名称	震中距 /km	覆盖层 厚度/m	等效剪切 波速/ $m \cdot s^{-1}$	场地地形	场地 类别
1	德化	14.6	12	273	盆地边坡	II
2	勐先	19.4	5.7	300	低山丘陵	II
3	正兴	31.7	22	336	山坡	II
4	曼歇坝	40.7	7	335	盆地边坡	II
5	翠云	54.1	9.6	320	河谷盆地	II
6	益智	57.9	14	270	山坡地带	II
7	普文	60.5	>35	215	河谷盆地	II
8	永平	75.2	>35	260	河谷盆地	II
9	思茅港	80	>35	290	河谷盆地	III
10	江城	100.6	1.4		盆地边坡	II
11	勐养	107.0	>35.6	327	河谷盆地	III
12	富邦	125.4	13	240	山地台阶	I
13	杨武	151.0	7.8	390	山地阶地	II
14	化念	166.6	10.6		盆地边缘	II
15	打洛	179.5	>13.9	390	河谷盆地	II
16	保山	290	>40	200	山凹处	III

注：化念台没有等效剪切波速资料。

3 讨论

图 2 给出了利用宁洱地震的强震记录计算出的 16 个台站的谱比曲线，其中杨武、化念、打洛、保山等 4 个强震动台站记录的事前脉动时间少于 10 s，无法计算地脉动的谱比。其他 12 个台站均给出了地脉动和 S 波谱比曲线的对比。由图可知，除翠云台相似性较差外，覆盖层薄的 7 个台站（德化、勐先、正兴、曼歇坝、益智、江城、富

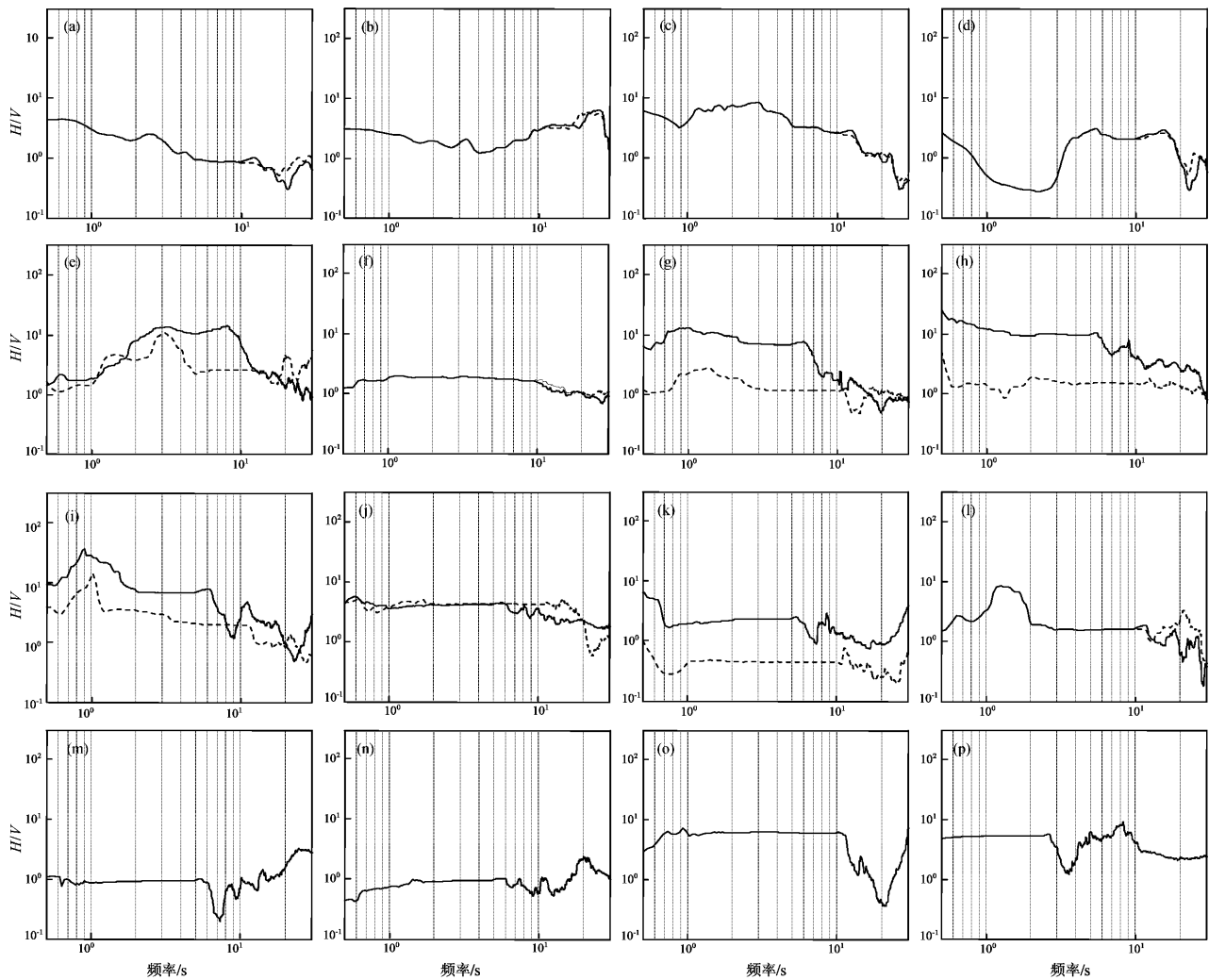


图2 16个台站的谱比曲线（实线为S波谱比；虚线为脉动谱比）

Fig. 2 H/V Spectral Ratio of 16 strong-motion stations (S-Wave—solid; Ground micro-tremor—dashed)

(a) 德化; (b) 勐先; (c) 正兴; (d) 曼歇坝; (e) 翠云; (f) 益智; (g) 普文; (h) 永平; (i) 思茅港;
(j) 江城; (k) 勐养; (l) 富邦; (m) 杨武; (n) 化念; (o) 打洛; (p) 保山

邦)的地脉动和S波谱比曲线基本一致;覆盖层大于35 m的4个台站(普文、永平、思茅港、勐养)地脉动和S波谱比曲线相似性较好,曲线趋向一致,但谱比值有差异,且脉动曲线相对滞后。

结合以上16个台站的场地条件,对比地脉动与S波谱比曲线,可以得出以下结论:

(1) 大多数台站地脉动和S波谱比曲线的一致性较好,在1~10 Hz频段台站的场地响应相对较平坦,大于10 Hz频段的场地响应随频率增高出现了明显的减小。

(2) 基岩或覆盖层较薄的场地曲线相对平稳,地脉动和S波谱比曲线的相似性很好。

(3) 覆盖层大于35 m的场地,地脉动和S波谱比曲线相似性较好,曲线趋向一致,但比值差

异较大。S波的谱比值要大于脉动的比值,即用脉动计算的场地响应要明显小于用地震记录的S波计算得到的场地放大响应。

此外保山台是所列台站中覆盖层最厚的(>40 m),其场地谱比值在低频段(<3 Hz)有突变。

朱荣欢和苏有锦(2007)用H/V谱比法计算了云南区域数字地震台网23个基岩台的S波随频率变化的场地响应,结果表明,在1~10 Hz频段台站的场地响应相对较平坦,但在大于10 Hz的高频段,部分台站有较明显的放大作用。刘丽芳等(2007)用Moya方法(Moya *et al*, 2000)反演计算了其中22个台站的S波场地响应,也存在一个相对平坦变化的频段(大致在1~5 Hz),但当频率大于5 Hz时,大部分台站的场地响应随频率增高

出现了明显的减小。以上研究表明,即使同是布设在基岩上的测震台站,其场地响应值也是有一定差异的。

综上所述,对于基岩或覆盖层较薄的台站,采用地震波到达之前记录的地脉动数据与其后记录到的S波数据计算得到的台站场地谱比曲线具有良好的一致性,主要频段内起伏不大,即都可以用来计算场地响应。对于覆盖层厚(>35 m)的台站,两者相似性较好,曲线趋向一致,但S波的谱比值要大于脉动的比值。因此对于软土地基台站,能够使用脉动资料的谱比曲线反映台站的响应特征,但计算出的场地放大因子偏小。这一结论与Field和Jacob(1995)使用单点谱比法分析加利福尼亚奥克兰城区的动力特征以及Lachet等(1996)在希腊塞萨洛尼基城利用此法得到的结果一致。

需要指出的是,使用地脉动资料应避开近场环境干扰大的时段。

本文的完成得到杨润海、赵云旭、高东等同志的悉心指导与帮助,在此表示衷心感谢。

参考文献:

- 崔建文,李正光,赵云旭.2007年宁洱6.4级地震强震动观测记录[J].地震研究,30(4):384-388.
- 郭明珠,谢礼立,高尔根,等.1999.利用地脉动进行场地反应分析研究综述[J].世界地震工程,15(3):14-19.
- 郭明珠.2003.地脉动波场分析及其在场地动力特征测试中的应用

- [D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 刘丽芳,苏有锦,刘杰,等.2007.利用Moya方法反演云南数字地震台站场地响应[J].地震研究,30(1):39-42.
- 朱荣欢,苏有锦.2007.用H/V谱比法计算云南区域数字地震台站的场地响应[J].地震研究,30(3):248-252.
- Boore D M, Joyner W. B, Fumal T E. 1993. Estimation of response spectra and peak accelerations from Western North American earthquakes: an interim report [R]. U. S. Geol. Surv. Open-File Dept: 93-509.
- Chyi Tyi Lee, Chin Tung Cheng, Chi-Wen Liao, *et al.* 2001. Site Classification of Taiwan Free-Field Strong-Motion Stations [J]. BSSA, 91(5): 1283-1297.
- Field E, Jacob K. 1995. A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent [J]. BSSA, 85, 1127-1143.
- Hiroshi Arai, Kohji Tokimatsu. 2004. S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum [J]. BSSA, 94(1): 53-63.
- Lachet C, Bard P, *et al.* 1996. Site effects and microzonation in the city of thessaloniki (Greece) comparison of different approaches [J]. BSSA, 86: 228-241.
- Lermo J, Chavez-Garcia J. 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station [J]. BSSA, 83: 1574-1594.
- Moya C A, Aguirre J, Irikura K. 2000. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms [J]. BSSA, 90(4): 977-992.
- Nakamura Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface [J]. Q. Rep. Railway Tech. Res. Inst, 30: 25-33.
- Yamazaki, F, Ansary M A. 1997. Horizontal-to-vertical spectrumratio of earthquake ground motion for site characterization [J]. Earthquake Eng. Struct. Dyn, 26: 671, 689.

Analysis on Site Response Based on Strong Motion Records of the Ning'er Earthquake

WANG Yun-yun^{1,2}, QIAN Jin², CUI Jian-wen², HUANG Jian-hua¹

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

(2. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

In this paper, we calculate the strong motion site responses by the Nakamura method based on the pre-seismic microtremor and S wave data recorded during Ning'er earthquake on 3 June 2007. The site response spectra of microtremor and S wave are consistent in general for basement rock site or thin-overburden site. However, for thick-overburden site over 35 meters, both spectral ratio curves have obvious differences, which means that the site response spectra calculated by ground micro-tremor is much bigger than that calculated by S wave.

Key words: records of strong motion; Nakamura method; site response; microtremor; Ning'er earthquake