

昆明烈度速报台网子台场地分类^{*}

王赞赞^{1,2}, 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: 依据昆明烈度速报台网子台场地钻孔资料、等效剪切波速以及地脉动测试结果, 对不同强震动台站的场地划分标准作了对比。结合昆明盆地的地质构造特征, 对昆明强震动烈度台站的场地类别作了判定。同时指出, 对个别判定指标临近划分标准分界线的台站的分类工作还需进一步研究。

关键词: 场地分类; 昆明烈度台; 剪切波速; 卓越频率

中图分类号: P315.73 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2009)03-0264-05

0 前言

场地条件对地震动和震害的影响很早就为人们所认知。早在 1928 年, Wood 在分析 1906 年美国旧金山大地震的震害异常现象时, 就认识到场地条件对震害的重要影响作用(张倩, 2002)。郭明珠等(2000)研究发现, 场地土层特征对于地震波频率的特征和大小有重要影响, 对地震引起的地面运动有很强的放大或缩小作用, 并直接影响到震害的程度及分布。如果建筑物的自振频率刚好接近场地的卓越频率, 就会在地震中受到严重破坏。因此, 在地震多发区域内, 针对具体地点进行场地分类研究非常重要。

根据相同或相似的场地条件划分强震动台站场地的类别, 其目的在于为抗震设计规范提供基础资料。另一方面, 场地条件对地震动的特性和震害具有重要影响, 通过分类分析, 将有助于提高观测数据的应用价值。

2007 年在昆明市区建设完成的 50 个数字强震动观测烈度速报台是“十五”项目“中国数字地震观测网络”子项目“云南省数字强震动台网”的组成部分^①。地震烈度速报系统可在大震发生后迅速、定量地确定地震动影响场和地震动强度的空间分布, 为震害的快速评估和大震应急方案的决策提供科学依据, 使应急对策更及时、更符合实际。要更好地利用台站记录进行地震动特征分析和场地条件研究, 必须了解台站的场地条件,

并进行分类, 以便今后强震动记录的应用。

通过查阅美国、日本及我国台湾等国家和地区的强震动观测记录场地资料(Yamazaki Ansa ry 1997; Lee et al 2001)可以发现, 强震动观测台站场地主要分类标准及方法包括 1997 NEHRP 标准、1997 UBC 标准、RSS 方法和 HVSR 方法等。

1997 NEHRP 标准按顶部 30 m 等效剪切波速单一指标将场地分为 A B C D E 和 F6 类。对于前 5 类场地分别给定了顶部 30 m 等效剪切波速, 即: 大于 1 500 m/s 760 ~ 1 500 m/s 360 ~ 760 m/s 180 ~ 360 m/s 和小于 180 m/s F 类场地则需进行专门研究加以确定; 1997 UBC 标准仍按顶部 30 m 等效剪切波速单一标准将强震观测台站场地分为 A B C D 和 E 5 类。与 1997 NEHRP 标准相比, 该标准少了 F 类场地; RSS 场地划分方法是基于标准加速度反应谱进行场地分类。对于缺乏场地资料但已有地震记录的强震动观测台站, 可以依据其所获记录的 5% 阻尼比的标准加速度反应谱进行场地类型划分(图 1 a)(Seed et al 1976)。该方法根据不同场地上的标准加速度反应谱将场地划分为岩石类、硬土类、非黏性土类和中软黏土(砂土)类。参照这 4 种类型场地的标准反应谱, 一类和四类场地能清楚地识别出来, 而二类和三类场地的标准反应谱较接近, 两者难以严格区分。该方法仅适用于具有地震记录的台站, 对于无地震记录的台站无法进行其场地分类; HVSR 即谱比方法适用于无地震记录的台站, 亦无需场地勘察, 只需台站场地脉动数据即可。该方

* 收稿日期: 2008-10-20.

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

① 崔建文, 2007. 昆明烈度速报台网建设竣工报告.

法主要依据水平向与垂直向谱比卓越周期划分场地类型，分为即 I、II、III、IV 4 类。这 4 类场地的典型谱比曲线如图 1b 所示（Japan Road Association, 1980），曲线所对应的卓越周期范围分别是：小于 0.2 s、0.2~0.4 s、0.4~0.6 s、0.6 s。

与 RSS 方法相比，HVSR 谱比方法受震源、传播途径等因素的影响较小，其所确定的场地类型具有较高的准确性。因此，本文中笔者对台站场地进行地脉动测试，采用单点谱比方法（Nakamura, 1989）计算卓越频率，进而对昆明烈度台网的部分强震动台站进行分类。同时，对照我国现行的场地分类标准，依据场地钻探资料和等效剪切波波速，进一步综合判定台站场地类别。

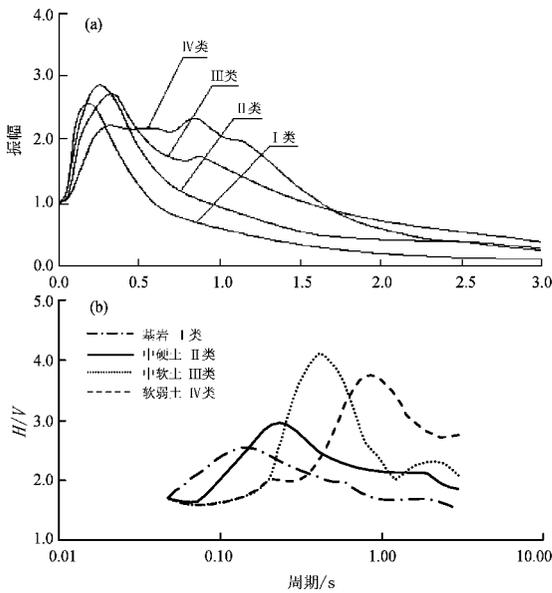


图 1 HVSR 法分类标准

(a) 4 类场地标准加速度反应谱；(b) 4 类场地典型谱比曲线

Fig 1 HVSR classification

(a) standard acceleration response spectra for 4 kinds of sites; (b) typical spectral ratio curves for 4 kinds of sites

1 台站基础资料

昆明盆地是典型的软土湖相沉积盆地（姜朝松等，1999-2003），盆地基岩面形态复杂。昆明盆地形成于晚第三纪，受南北向断裂控制，并有东西向断裂参与，是复式地堑构成的南北向断陷盆地。盆地基岩埋深达 1 200 m，其中新生界地层厚达 1 000 余米。盆地内新生界的总体特征可以概括为厚度变化巨大、相变复杂、新近系成岩差。

盆地四周为中低山地，中间为隆起，西区北部的圆通山、五华山等为中央隆起之延，古老基底埋藏浅，甚至局部出露。受中间隆起和断裂的分割，在昆明市及其周边形成一系列凹陷，如西坝河、九甲、龙头街、普吉等凹陷，在这些凹陷中，晚新生代河湖相沉积厚达 400~800 m，在西坝河，疏松沉积层最大厚度超过 1 000 m。

历史震害的统计资料表明（赵晋明等，1992），历史上几次距离、方位、震级均不同的地震的震害加重区均集中在盘龙江两岸、双桥断裂附近（北京路中段、凉亭、黑土凹、官渡区先锋镇等）以及翠湖公园附近。其中盘龙江两岸由松软地层造成的土层放大效应比较明显。此外，市区以南，即现在的滇池北岸，古滇池松软沉积区也是比较典型的震害加重区。市区中心如圆通山、五华山附近为丘陵低山，由于基岩埋藏浅，对于减轻震害有利，属于轻震害区。

郑定昌等（2006）应用昆明城区 351 个脉动测试点（约每千米 1 个测点）的数据，运用功率谱分析法求出了各测点的场地卓越频率，并绘出等值线图，结果显示：昆明盆地的卓越频率主要集中在 2~3 Hz 之间，场地主要以 II、III 类场地土为主。由卓越频率均值来确定场地土类别：城市东边、西边、北边、西北靠山地带或者山包上多为中硬场地土，极少数地带（圆通山，五华山）为坚硬场地土和岩石；主城区多为中硬场地土、中软场地土，其中以中软场地土为主。靠近滇池的南边周围多为软弱场地土，少数为中软场地土；南部多为中软场地土和软弱场地土。极少数地区为中硬场地土。昆明城区（盆地北部）地脉动卓越频率的分布规律与盆地北部覆盖层的厚度基本对应，卓越频率随着覆盖层厚度的增加而减小。

2 昆明烈度台站分布及场地条件

2007 年底建设完成的 50 个数字强震动观测烈度台，较合理地布设在昆明盆地 163 km² 的自由场地上，涵盖昆明市 4 个城区的不同类别建筑群，涉及到昆明盆地内不同建筑场地类别。其在昆明盆地卓越频率等值线上的分布如图 2 所示。

我们首先进行强震动台站台址初勘，然后通过工程钻探了解台站场地地下土层结构，最后进行现场波速测试了解土层波速结构，为台站场地分类提供基础资料。笔者选取昆明市烈度速报台

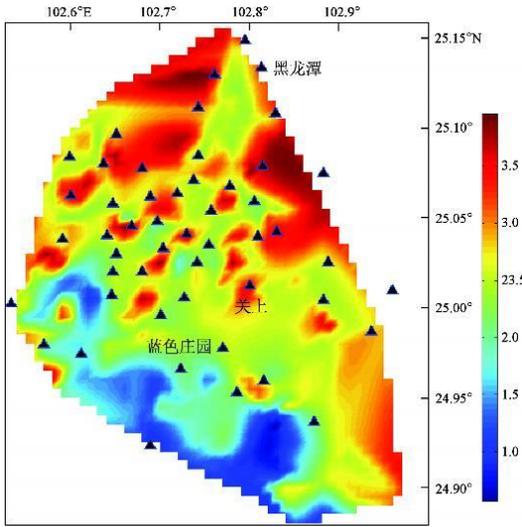


图 2 昆明市烈度速报台网在卓越频率等值线上的分布

Fig 2 Locations of the sub-stations of Kunming Rapid Intensity Report Network on the prominent frequency iso-lines

网 50 个台站中的 28 个台站进行地脉动测试，计算台站场地脉动卓越频率。

此次台站场地剪切波测试采用单孔检层法^①，激震方式为地面重物压木板两端交替敲击，孔中三分量检波器接收仪器采用武汉岩土力学研究所研制的 RSM 工程动测仪测试。资料处理使用 RSM 单孔波速测试程序，它是为 RSM24FD 工程动测仪配备的用以完成单孔法场地土层波速测试的软件。按《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)，覆盖土层的等效剪切波速由下式得到：

$$V_{se} = \frac{H}{\sum_1^n (h_i / V_i)} \quad (1)$$

式中， n 为覆盖土层数， H 为覆盖层厚度和固定值 20 m 二者的较小值， $H = \sum h_i$ ， h_i 为第 i 层土层厚度； V_i 为第 i 层土层剪切波速度。

在进行脉动测试时，采用 BBVS60 型宽频带地震计和 EDAS24 IP 地震数据采集服务器，对每个测点都进行仪器墩和自由场地连续 24 小时观测，以便获取数据来调试程序。后采用新型强震动仪器 K2 选取夜间 5 个时间段，每次记录 20 分钟，

获取脉动数据。采用单点谱比法，计算场地卓越频率，即场址效应 S_M 可表示为

$$S_M = \frac{\sqrt{S_{NS}^2 + S_{EW}^2}}{S_{UD}} \quad (2)$$

式中， S_{NS} 和 S_{EW} 分别为水平方向的两个傅氏谱振幅分量， S_{UD} 为垂直向傅氏谱振幅。

国际上采用单一指标，依据场地脉动卓越频率确定场地类别，我国目前采用的是覆盖层厚度及顶部 20 m 等效剪切波速双指标（《建筑抗震设计规范》2001），即将场地分为 4 类：I、II、III、IV 类（表 1）。如何将两者有机结合起来，国内不少专家学者（刘汉雄，1988；胡钧，杜坚，1997；郑红洁，郭钦华，1997；陶夏新，2001）进行了研究，但划分标准不一。中国科学院武汉岩土力学研究所依据场地脉动卓越频率确定场地土及场地类别的方法列入《RSM 工程动测仪使用手册》（中国科学院武汉岩土力学研究所，2003）；中国地震局工程力学研究所（林林，2005）依据日本 KK-NET 台网场地资料和记录确定了我国 4 类场地所对应的谱比卓越频率范围，提出一种基于 Nakamura 方法的场地分类标准。这两种依据场地脉动卓越频率确定场地土划分场地类别的标准见表 2。

表 3 给出了 28 个台站的场地等效剪切波速值、覆盖层厚度、地脉动卓越频率均值及根据上述 3 种场地分类标准得到的判定结果和综合判定结果。

表 1 各类建筑场地的覆盖层厚度

Tab 1 Thickness of covering layers for 4 construction sites

等效剪切波速 / $m \cdot s^{-1}$	场地类别				土的类型
	I	II	III	IV	
$V_{se} > 500$	0				坚硬土
$250 < V_{se} \leq 500$	$< 5 \text{ m}$	$\geq 5 \text{ m}$			中硬土
$140 < V_{se} \leq 250$	$< 3 \text{ m}$	$3 \sim 50 \text{ m}$	$> 50 \text{ m}$		中软土
$V_{se} \leq 140$	$< 3 \text{ m}$	$3 \sim 15 \text{ m}$	$> 15 \sim 80 \text{ m}$	$> 80 \text{ m}$	软弱土

表 2 脉动卓越频率划分标准对照表

Tab 2 Division criteria for prominent frequency of microseism

场地类别	武汉岩土力学研究所	中国地震局工程力学研究所
I	$\geq 10 \text{ Hz}$	$\geq 6.5 \text{ Hz}$
II	$2.5 \leq f < 10 \text{ Hz}$	$3.5 \leq f < 6.5 \text{ Hz}$
III	$1.25 \leq f < 2.5 \text{ Hz}$	$1.0 \leq f < 3.5 \text{ Hz}$
IV	$< 1.25 \text{ Hz}$	$< 1.0 \text{ Hz}$

① 李正光，杨润海，2005 昆明烈度速报台网子场地剪切波速测试报告

表 3 台站场地等效剪切波速度、地脉动卓越频率均值及场地土类别

Tab 3 Equivalent shear wave velocity mean value of prominent frequency of microseism and type of the site of the substations

序号	台站代码	土层厚度 /m	剪切波速度判定场地类别			脉动卓越频率判定场地类别			综合判定结果
			等效剪切波速度 /m·s ⁻¹	场地地质评价	初判场地类别	卓越频率 /Hz	标准①	标准②	
1 [^]	53BWG	40.1	236	中软土	III	2.6	II	III	III
2	53TYG	39.2	168	中软土	III	2.3	III	III	III
3	53ESC	39.8	169	中软土	III	2.4	III	III	III
4 [^]	53JQD	41.5	213	中软土	III	2.9	II	III	III
5	53LZY	40.2	133	软弱土	IV	1.0	IV	IV	IV
6 [*]	53LJX	39.6	130	软弱土	IV	1.2	IV	III	IV
7	53IWC	39.6	142	中软土	III	1.3	III	III	III
8	53HTG	30.2	252	中硬土	II	3.8	II	II	II
9	53TXT	30.1	199	中软土	III	2.4	III	III	III
10 [*]	53FDC	24.3	252	中硬土	II	3.3	II	III	II
11 [^]	53POL	16.2	226	中软土	III	3.0	II	III	III
12 [*]	53CMX	39.6	268	中硬土	II	3.2	II	III	II
13 [^]	53LGD	27.0	228	中软土	III	2.8	II	III	III
14 [^]	53JGX	14.0	217	中软土	III	2.8	II	III	III
15	53BWL	39.8	154	中软土	III	2.3	III	III	III
16	53SXY	41.2	182	中软土	III	2.1	III	III	III
17 ^{*^}	53GSX	40.2	136	软弱土	IV	2.4	III	III	III
18	53YXY	40.3	178	中软土	III	2.4	III	III	III
19	53TYC	39.1	142	中软土	III	2.4	III	III	III
20	53ELK	39.2	197	中软土	III	2.1	III	III	III
21	53JZX	39.6	193	中软土	III	2.4	III	III	III
22	53JK	39.2	186	中软土	III	2.4	III	III	III
23	53LBL	22.6	157	中软土	III	2.4	III	III	III
24 [*]	53GDS	23.8	273	中硬土	II	3.4	II	III	II
25	53KNX	39.6	199	中软土	III	2.2	III	III	III
26 [^]	53BSH	23.8	211	中软土	III	3.1	II	III	III
27	53HTJ	40.2	175	中软土	III	1.7	III	III	III
28 [^]	53SDX	39.6	220	中软土	III	2.7	II	III	III

注：“^”表示剪切波速与武汉所的划分标准判别不一致；“*”表示剪切波速与工力所的划分标准判别不一致。

由表 3 可知，依据两种卓越频率的判别结果一致而与依据剪切波速的判别结果不一致的只有 17 号台站。除此之外，其它 27 个台站中依据剪切波速与依据武汉所的标准判别结果不一致的有 7 个（1、4、11、13、14、26、28 号）台站，依据剪切波速与依据工力所的标准判别结果不一致的有 4 个（6、10、12、24 号）台站，可见，基于 Nakamura 法的划分标准（工力所标准）与剪切波速划分标准有更好的对应。另从剪切波速值与卓越频率看，所有判别结果不一致的台站，其等效剪切波速度值或卓越频率值均临近划分标准的分界线。由此可知，用剪切波速和脉动卓越频率两种方法判别场地类型，其结果是很接近的。

3 结语

通过对昆明市烈度速报台站场地类型划分的研究，我们认为一般情况下可以通过地脉动测定场地（脉动）卓越频率均值来确定场地土及场地类别。由表 3 可知，对于昆明盆地，用剪切波速判定的场地类别与用地脉动卓越频率判定的场地类别相当一致，而且基于 Nakamura 法的划分标准（工力所标准）与剪切波速划分标准也有更好的对应。

需要指出的是，综合判定结果与工力所的标准不一致的 4 个台站，其判定指标均临近划分标准

的分界线。对这几个台站进行分类时,不能仅使用单一判定指标,还需结合场地其它特征作进一步研究。

参考文献:

- 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. 2000. 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.
- 胡钧, 杜坚. 1997. 上海场地土的脉动特征及剪切波速特征 [J]. 物探与化探, 21 (4): 305-299.
- 姜朝松, 樊友心, 邵德晟. 1999. 昆明市地面沉降 [M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 姜朝松, 周瑞琦, 王绍晋. 2003. 昆明市盆地形成模式及其演化 [J]. 地震研究, 26 (2): 172-175.
- 林淋. 2005. 竖向地震动特征分析 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 刘汉雄. 1988. 昆明市几种地基土的脉动观测研究 [J]. 地震研究, 11 (5): 301-307.
- 陶夏新. 2001. 工程场地条件评定中的地脉动研究 [J]. 地震工程与工程振动, 21 (4): 18-23.
- 张倩. 2002. 场地土层地震反应特征研究 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.

- 赵晋明, 阚荣举, 解丽. 1992. 昆明市区地震震害的不均匀分布特点及其重复性 [J]. 地震研究, 15 (4): 392-399.
- 郑定昌, 解丽, 李正光. 2006. 昆明盆地地脉动特征及卓越频率分布规律 [J]. 地震研究, 29 (增刊): 494-497.
- 郑红洁, 郭钦华. 1997. 中山市城区场地土层剪切波速及脉动特征 [J]. 华南地震, 17 (2): 62-66.
- 中国科学院武汉岩土力学研究所. 2003. RSM工程动测仪使用手册 [K].
- GB50011-2001. 建筑抗震设计规范 [S].
- GB50021-2001. 岩土工程勘察规范 [S].
- Japan Road Association. 1980. Specification for highway bridges Part V Earthquake Resistant Design [K].
- Lee C T, Cheng C T, Liao C W, et al. 2001. Site classification of Taiwan free field strong motion stations [J]. BSSA 91 (5): 1283-1297.
- Seed H B, Ugas C, Lysmer J. 1976. Site dependent spectra for earthquake resistant design [J]. BSSA 66: 221-243.
- Yamazaki F, Ansary M A. 1997. Horizontal to vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization [J]. Earthquake Eng Struct Dyn 26: 671-689.
- 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 (1): 25-33.

Site Classification of Kunming Rapid Intensity Report Stations

WANG Yun-yun^{1,2}, CUI Jian-wei¹, 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

According to the borehole data equivalent shear wave velocity and the measured micro tremor at the site of the sub-stations of Kunming rapid intensity report network, we compare the standards of classification for soil at the sites of the different strong motion stations. Further, we classify the site of the stations of Kunming rapid intensity report network on the basis of the geological structure characteristics of the Kunming basin. The determination indexes of a few sub-stations are close to the dividing line given by the standards, and further classification of these stations is necessary.

Key words: site classification, Kunming Rapid Intensity Report stations, shear wave velocity, predominant frequency