

滇南滇西南强震台网场地特征分析*

李正光¹, 崔建文¹, 赵云旭², 沈 坤³, 刘 飞⁴

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 普洱市地震局, 云南 普洱 665000;
3. 玉溪市防震减灾局, 云南 玉溪 653000; 4. 红河州地震局, 云南 蒙自 661000)

摘要: 简要介绍了滇南、滇西南强震台网, 并对玉溪市、红河州、普洱市、西双版纳州 67 个强震台场地剪切波速进行测试, 并根据测试结果计算等效剪切波速, 来划分台站的场地类别。分析了台站布置的合理性, 为获得强震数据和强震记录的分析处理提供基础资料。

关键词: 强震台网; 剪切波速; 场地特征

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)04-0508-06

0 引言

云南地处印度板块与欧亚板块碰撞带东侧, 新构造和现代构造运动强烈, 活动断裂发育, 地震灾害频繁发生, 云南地震灾害居我国大陆地震之首, 加强其防震减灾能力具有重要的社会和经济意义。滇南周边曾有多次强震发生, 为了增强防震减灾能力, 国家设立“十五”项目“中国数字地震观测网络”子项目《云南数字强震动台网建设》(2003~2007年), 于2007年5月建成滇南强震台网。该台网是云南强震台网的重要组成部分, 其中剪切波速测定是台站建设最基础的工作, 剪切波速测定可以提供台站场地类别和地下介质情况^① (GB5001-2001; GB50021-2001; 李正光, 郑定昌, 2006)。

滇南强震台网建成后, 2007年6月4日宁洱6.4级地震发生时, 在震中周围有15个强震台获取了完整的地震动记录。地震发生后, 又在震区架设了4个观测点, 获取的余震记录达300多条, 最大加速度峰值达431 Gal (宁洱德化台)。在云南, 首次获取完整的破坏性地震观测记录, 这为研究此次地震的震源机制和特征、地震动和震害分布特点奠定了坚实的基础。本文主要介绍实测布置在红河州、玉溪市、普洱市和西双版纳州的63个固定强震台和4个流动台的剪切波速及其相

关资料 (崔建文等, 2007; 施伟华等, 2010)。

1 滇南、滇西南强震台网简介

1.1 玉溪市、红河州 34 个强震台

玉溪市、红河州共有34个强震台, 其中玉溪市有17个台站, 红河州有17个台站。红河州共完成钻孔17个, 计320.75 m, 单孔深度7.200~40.950 m, 勘探场地涉及2市 (个旧、开远市) 4个县 (蒙自、弥勒、建水、石屏县) 的11个乡镇。强震动台布设于乡镇、县城之中, 台点坐标范围 (23°22′2.1″~23°57′50.4″N, 102°24′45″~103°26′53.3″E), 孔口高程1 080 (开远市行政中心)~1 920 m (建水普雄乡政府), 最大高差840 m。其拟建场地地形、地质条件较好, 场地及附近无滑坡、泥石流、崩塌等危及建 (构) 筑物安全的地质灾害及其它不良地质现象, 从地质角度而言, 建台台址属于稳定的建设场地, 建台条件良好。红河州强震台波速测试由红河州地震局完成, 红河州17个强震台地貌特征及场地剪切波速测试评价如表1所示, 各岩层剪切波速与深度间的关系见图1。

玉溪市的17个强震动台分布在1区 (红塔区) 7县 (通海、易门、新平、峨山、澄江、江川、华宁县), 坐标范围为 (23°55′32.7″~24°49′41.3″N, 101°59′04.3″~103°06′17.7″E), 高程

* 收稿日期: 2012-10-20.

基金项目: 地震行业科研专项“宁洱6.4级地震现场综合考察和研究 (200808061)”项目资助。

① 中国科学院武汉岩土力学研究所智能仪器研究室. 2003. RSM 工程动测仪使用手册。

1 099 m（化念镇政府）~1 857 m（雄关中学）。工程地质、水文地质条件较好，17 个台均处于断裂带附近，距铁路线较远，干扰不大，建台条件良好，对接收地震信号敏感。玉溪市强震台波速

测试由玉溪市防震减灾局完成，没有对接地电阻进行检测。玉溪市 17 个强震台地貌特征及场地剪切波速测试评价如表 2 所示，各岩层剪切波速与深度间的关系见图 2。

表 1 红河州 17 个强震台地质地貌特征及场地剪切波速测试评价表
Tab. 1 Evaluation table of geological and geomorphological characteristics and site shear wave velocity tests for 17 strong earthquake stations in Honghe Prefecture

序号	强震台址	测量深度 /m	地面高程 /m	等效剪切波速度 /m · s ⁻¹	场地类别	场地评价	台址类型	地形地貌类型
1	蒙自县、州行政中心	40	1 320	254	Ⅱ	中硬土	土层台	湖积缓丘 2°
2	个旧市、鸡街镇水管站	40	1 300	212	Ⅲ	中软土	土层台	湖积缓丘 2°
3	弥勒县地震局	10	1 410	274	Ⅱ	中硬土	土层台	湖积缓丘 1°
4	弥勒县虹溪镇政府	40	1 480	216	Ⅲ	中软土	土层台	湖积缓丘 3°
5	弥勒县巡检司镇计生所	14	1 090	217	Ⅲ	中软土	土层台	湖积缓丘 5°
6	弥勒县朋普镇同车小学	20	1 090	257	Ⅱ	中硬土	土层台	湖积缓丘 2°
7	建水县甸甸镇政府大院	40	1 350	212	Ⅲ	中软土	土层台	湖沼积缓丘 5°
8	建水县普雄乡政府大院	7	1 920	233	Ⅲ	中软土	土层台	湖沼积缓丘 5°
9	建水县县委大院地震局	40	1 320	253	Ⅱ	中硬土	土层台	湖沼积缓丘 2°
10	建水县南庄镇政府大院	13	1 370	256	Ⅱ	中硬土	土层台	湖沼积缓丘 7°
11	建水县东山乡政府大院	10	1 420	265	Ⅱ	中硬土	土层台	湖沼积缓丘 7°
12	建水县李浩寨中心小学	17	1 670	246	Ⅲ	中软土	土层台	湖沼积缓丘 6°
13	石屏县龙朋镇政府水厂	18	1 760	249	Ⅲ	中软土	土层台	湖沼积山坡 9°
14	石屏县宝秀镇政府院内	40	1 500	322	Ⅱ	中硬土	土层台	湖沼积缓坡 3°
15	石屏县坝心镇武装部内	40	1 430	225	Ⅲ	中软土	土层台	湖沼积缓坡 2°
16	开远市小龙潭第三中学	8	1 200	241	Ⅲ	中软土	土层台	湖沼积缓坡 4°
17	开远市行政中心	8	1 080	216	Ⅲ	中软土	土层台	湖沼积缓丘 2°

表 2 玉溪市 17 个强震台地质地貌特征及场地剪切波速测试评价表
Tab. 2 Evaluation table of geological and geomorphological characteristics and site shear wave velocity tests for 17 strong earthquake stations in Yuxi Municipality

序号	强震台址	测量深度 /m	地面高程 /m	等效剪切波速度 /m · s ⁻¹	场地类别	场地评价	台址类型	地形地貌类型
1	北城工兵团	8	1 742	327	Ⅱ	中硬土	土层台	冲洪积缓坡
2	聂耳公园	40	1 631	215	Ⅲ	中软土	土层台	冲洪积中心平坦
3	大营街中学	40	1 623	224	Ⅲ	中软土	土层台	冲洪积边缘平坦
4	大梨园储备库	32	1 675	275	Ⅱ	中硬土	土层台	残坡积斜坡阶地
5	华宁一中	40	1 638	175	Ⅲ	中软土	土层台	残坡积山顶平坦
6	盘溪二中	11	1 135	254	Ⅱ	中硬土	土层台	冲洪积中心平坦
7	华溪五中	20	1 226	335	Ⅱ	中硬土	土层台	冲洪积边缘平坦
8	青龙七中	18	1 635	237	Ⅲ	中软土	土层台	冲洪积边缘平坦
9	阳宗三中	16	1 805	188	Ⅲ	中软土	土层台	冲洪积边缘平坦
10	江城中学	40	1 729	181	Ⅲ	中软土	土层台	湖积中心平坦
11	江川地震局	40	1 730	241	Ⅲ	中软土	土层台	湖积中部平坦
12	路居小学	30	1 737	255	Ⅱ	中硬土	土层台	湖积边缘平坦
13	雄关中学	40	1 857	195	Ⅲ	中软土	土层台	冲洪积中部平坦
14	河西镇政府	12	1 818	201	Ⅲ	中软土	土层台	湖积边缘平坦
15	杨武中学	10	1 391	253	Ⅱ	中硬土	土层台	残坡积斜坡顶平
16	化念镇政府	12	1 099	252	Ⅱ	中硬土	土层台	冲洪积边缘平坦
17	甸中中学	10	1 604	419	Ⅱ	中硬土	土层台	残坡积斜坡脚平

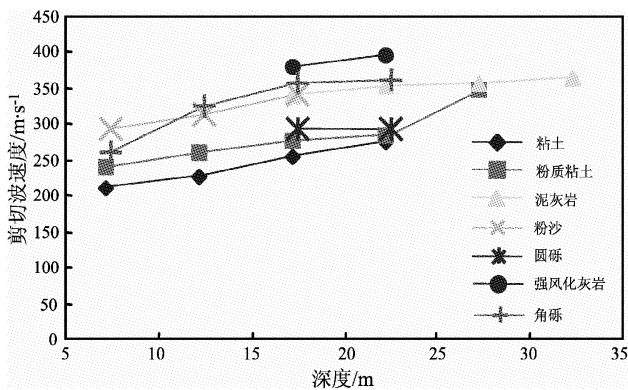


图1 红河州各岩层深度与剪切波速关系图

Fig. 1 Relation between depths of rock layers and shear wave velocities in Honghe Prefecture

1.2 普洱市、西双版纳州 33 个强震台

普洱市、西双版纳州共建有 33 个强震台，普洱市的 20 个强震台站中包括 4 个流动台，西双版纳州有 13 个台。普洱市、西双版纳州强震台波速测试由普洱市地震局、云南省防灾研究所完成。

普洱市 4 县（景谷、普洱、江城、澜沧）1 区（翠云区）共 13 个数字强震动台，坐标范围为（ $22^{\circ} 32.86' \sim 23^{\circ} 25.20' N$ ， $99^{\circ} 48.09' \sim 101^{\circ} 52.69' E$ ），高程 619 ~ 1 923 m。各强震台站的工程地质勘察、钻孔剪切波速测试、接地电阻测试、土建施工同步进行。《宁洱 6.4 级地震现场综合考察和研究项目流动和固定强震台剪切波速测试》课题 2011 年 1 月 9 ~ 15 日完成野外钻探作业，2 月完成测试报告，野外作业坐标范围为（ $22^{\circ} 57.87' \sim 23^{\circ} 09.283' N$ ， $101^{\circ} 01.74' \sim 101^{\circ} 09.71' E$ ），高程 1 237 ~ 1 429 m。宁洱 6.4 级地震时，布设的流动和固定强震台网钻孔等效剪切波速值，但没有对接地电阻进行检测。普洱市 20 个强震台地貌特征及场地剪切波速测试评价如表 3 所示，各岩层剪切波速与深度的关系见图 3（包括宁洱 6.4 级地震 4 个流动、3 个固定强震台的地貌特征及场地剪切波速评价）。

西双版纳州 1 市（景洪市）、2 县（勐海、勐腊）共 13 个数字强震台，坐标范围为（ $21^{\circ} 35.01' \sim 22^{\circ} 30.44' N$ ， $100^{\circ} 03.36' \sim 101^{\circ} 28.02' E$ ），高程 548 ~ 1 380 m。各强震台站的工程地质勘察、钻孔剪切波速测试、接地电阻测试、土建施工同步进行。西双版纳州 13 个强震台地貌特征及场地剪切波速测试评价如表 4 所示，各岩层剪切波速与深度间的关系图见图 4。

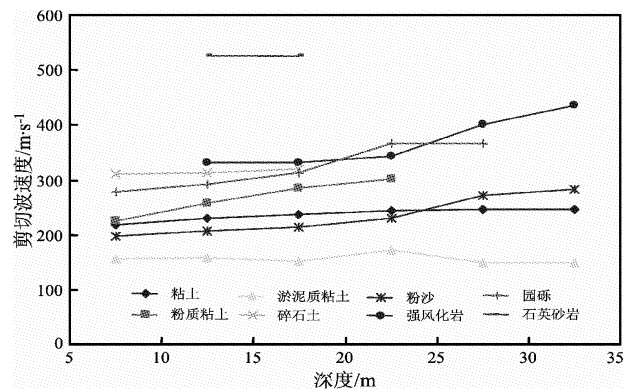


图2 玉溪市各岩层深度与剪切波速关系图

Fig. 2 Relation between depths of rock layers and shear wave velocities in Yuxi Municipality

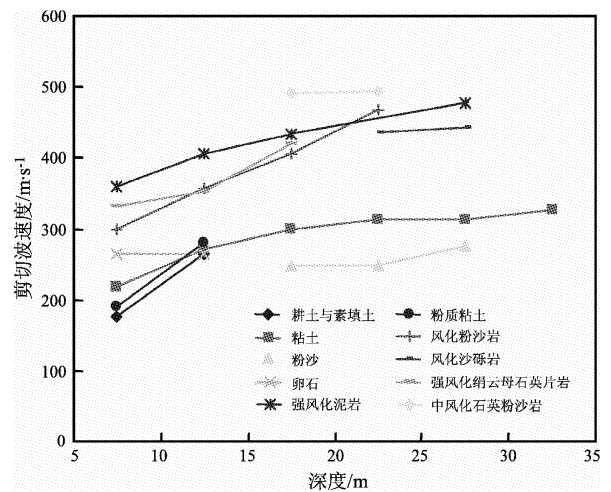


图3 普洱市各岩层深度与剪切波速关系图

Fig. 3 Relation between depths of rock layers and shear wave velocities in Pu'er Municipality

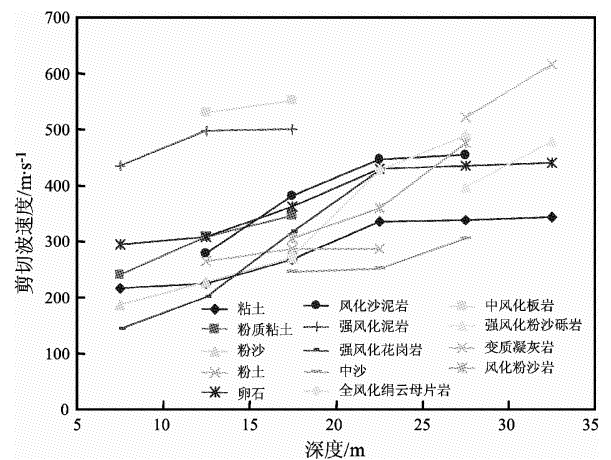


图4 西双版纳州各岩层深度与剪切波速关系图

Fig. 4 Relation between depths of rock layers and shear wave velocities in Xishuangbanna Prefecture

表 3 普洱市 20 个强震台地质地貌特征及场地剪切波速测试评价表
Tab. 3 Evaluation table of geological and geomorphological characteristics and site shear wave velocity tests for 20 strong earthquake stations in Pu'er Municipality

序号	强震台址	测量深度 /m	地面高程 /m	等效剪切波速度 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	场地 类别	场地评价	台址类型	地形地貌类型
1	景谷县永平镇景谷二中	29	1 074	237	Ⅲ	中软土	土层台	宽谷盆地
2	景谷县益智乡中学	12	837	262	Ⅱ	中硬土	土层台	河谷斜坡
3	景谷县正兴乡小学	25	1 101	337	Ⅱ	中硬土	土层台	山斜坡阶地
4	宁洱县德化乡中学	13	1 333	274	Ⅱ	中硬土	土层台	河谷盆地台阶地
5	宁洱县勐先乡中学	19	1 456	308	Ⅱ	中硬土	土层台	山斜坡阶地
6	翠云南屏曼歇坝村公所	16	1 119	335	Ⅱ	中硬土	土层台	河边台阶地
7	翠云区六顺乡中学	11	1 286	251	Ⅱ	中硬土	土层台	山包阶地
8	翠云区思茅港中学	20	619	278	Ⅱ	中硬土	土层台	宽河谷盆地
9	江城县嘉禾乡乡政府	13	1 314	364	Ⅱ	中硬土	土层台	山顶平山地
10	江城县地震局	10	1 138	290	Ⅱ	中硬土	土层台	河谷盆地台阶地
11	江城县康平乡乡政府	23	963	379	Ⅱ	中硬土	土层台	山地斜坡
12	澜沧县富邦乡乡政府	15	1 923	329	Ⅱ	中硬土	土层台	山地台阶地
13	澜沧县地震局	8	1 020	381	Ⅱ	中硬土	土层台	河边坡台阶
14	磨黑中心学校固定台	20	1 237	366	Ⅱ	中硬土	土层台	山脚台阶地
15	大观园农家乐流动台 *	30	1 429	285	Ⅱ	中硬土	土层台	山脚台阶地
16	县委党校流动台 *	17	1 341	375	Ⅱ	中硬土	土层台	山脚台阶地
17	宁洱地震局固定台	31	1 308	220	Ⅲ	中软土	土层台	宽谷盆地
18	县水泥厂流动台 *	26	1 409	261	Ⅱ	中硬土	土层台	斜坡阶地
19	太达村委会流动台 *	10	1 320	573	Ⅱ ^④	中硬土	土层台	山脚台阶地
20	同心邮政所固定台	12	1 318	238	Ⅲ	中软土	土层台	斜坡台阶地

注：* 2007 年 6 月 3 日宁洱 6.4 级地震布设的流动台；④因放置仪器点距钻孔坡下有约 15 m，所以判别场地为Ⅱ类场地。

表 4 西双版纳州 13 个强震台地质地貌特征及场地剪切波速测试评价表
Tab. 4 Evaluation table of geological and geomorphological characteristics and site shear wave velocity tests for 13 strong earthquake stations in Xishuangbanna Prefecture

序号	强震台址	测量深度 /m	地面高程 /m	等效剪切波速度 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	场地 类别	场地评价	台址类型	地形地貌类型
1	景洪市普文镇中学	35	887	253	Ⅱ	中硬土	土层台	宽河谷盆地
2	景洪市大渡岗乡政府	17	1 380	317	Ⅱ	中硬土	土层台	山坡阶地
3	景洪市勐养镇中心小学	35	755	331	Ⅱ	中硬土	土层台	宽河谷盆地
4	景洪市橄榄坝傣族园	19	548	265	Ⅱ	中硬土	土层台	宽河谷盆地
5	景洪市勐龙镇镇政府	31	672	338	Ⅱ	中硬土	土层台	河谷阶地
6	勐腊县易武乡中学	11	1 334	483	Ⅱ	中硬土	土层台	山坡阶地
7	勐腊县勐棒镇镇政府	35	583	295	Ⅱ	中硬土	土层台	宽河谷盆地
8	勐腊县关累镇镇政府	12	614	462	Ⅱ	中硬土	土层台	山间坡地
9	勐腊县勐仑镇镇政府	34	548	336	Ⅱ	中硬土	土层台	宽河谷盆地、阶地
10	勐海县宾房电站	15	1 085	218	Ⅲ	中软土	土层台	切割山原地形
11	勐海打洛镇农业服务中心	31	641	391	Ⅱ	中硬土	土层台	宽河谷盆地
12	勐海县勐遮镇中学	36	1 187	207	Ⅲ	中软土	土层台	宽河谷盆地
13	勐海县勐满镇七分场场部	35	857	316	Ⅱ	中硬土	土层台	河谷盆地边缘

2 台网场地特征及场地剪切波速测试

(1) 红河州的强震台网涉及 2 市 4 县的 11 个乡镇。微地貌主要为湖积盆地、缓丘地形及丘陵、斜坡地形, 17 个台均为土层台, 剪切波速为 212 ~ 322 m/s, 相差不大, 平均剪切波速为 244 m/s, 10 个Ⅲ类场地, 7 个Ⅱ类场地。

(2) 玉溪市的强震台网涉及分布在 1 区(红塔区) 7 县。微地貌主要为第四系冲洪积、湖积中心及边缘的缓丘及丘陵、残坡积斜坡地形, 17 个台均为土层台, 剪切波速为 175 ~ 419 m/s, 相差较大, 平均剪切波速为 249 m/s, 9 个Ⅲ类场地, 8 个Ⅱ类场地。

(3) 普洱市的强震台网涉及 4 县 1 区 15 个乡镇。微地貌主要为盆地、河谷、斜坡阶地、山顶、山地台阶。20 个强震台均为土层台, 剪切波速为 220 ~ 573 m/s, 相差不大, 平均剪切波速为 318 m/s。其中, 17 个Ⅱ类场地, 3 个Ⅲ类场地。

(4) 西双版纳州的强震台网涉及 1 市 2 县 13 个乡镇。微地貌主要为宽河谷盆地、阶地及边缘、山间坡地、切割山原地形。13 个台剪切波速为 207 ~ 483 m/s, 平均剪切波速为 324 m/s。其中, 11 个Ⅱ类场地, 2 个Ⅲ类场地。

3 结论与讨论

(1) 滇南、滇西南强震台网中的 67 个强震台均为土层台, 30 m 深度内, 滇南红河州、玉溪市的岩层简单较少, 为 7 ~ 8 层, 而滇西南普洱市、西双版纳州的岩层较多, 为 10 ~ 12 层。经统计, Ⅱ类场地占总数的 64.18% (即 43 个), Ⅲ类场地占 35.82% (即 24 个)。没有Ⅰ类和Ⅳ类场地土。

(2) 工程地质土类别的剪切波速度与深度的关系。所有土质(淤泥质除外)的波速都随深度而增加, 只是增加的数量不同, 与常士骝(1994), 林宗元(1994)的研究结果相一致。

(3) 滇南的红河州等效剪切波速较均匀, 而玉溪市等效剪切波速相差较大, 但平均剪切波速相近, 分别为 244 m/s 和 249 m/s, 场地类别也很相似, 分别为 10、9 个Ⅲ类场地, 7、8 个Ⅱ类场地。

(4) 滇西南的普洱市和西双版纳州平均剪切

波速为 318 ~ 324 m/s, 相差不大(除去宁洱 6.4 级地震时布设的 4 个流动强震台网的 7 个台)。场地类别也很相似, 分别为 12、11 个Ⅱ类场地, 1、2 个Ⅲ类场地。总体而言, 滇西南的普洱市和西双版纳州比滇南的红河州和玉溪市的等效剪切波速稍高一些。

(5) 滇南的红河州和玉溪市盆地地貌特征均为湖沼积, 冲洪积, 少量残坡积的物质构成。地形多为盆地中心平坦或缓坡, 盆地边缘的阶地、斜坡阶地、个别为斜坡脚、顶。滇西南的普洱市和西双版纳州地貌特征多为宽、河谷盆地及边缘山脚阶地, 少量斜坡阶地、山间阶地, 个别山顶平地。

(6) 宁洱县德化台、景谷县正兴台由于所处特殊的地形条件和场地条件加速度峰值超大异常 431 Gal、289 Gal, 笔者认为震害是由类似于地震的鞭梢效应、山包陡坎和场地的放大效应共同积累所致, 其中正兴、德化台均处在断层的端部, 且为陡峭孤突地形, 实际现场调查建筑物破坏严重。德化中学砖混结构混凝土柱酥裂钢筋外露, 山墙剪裂成为危房。而框架结构三层的新建正兴小学由于柱梁结构损坏成危房已经拆除(不排除有建筑质量问题)(刘洪兵, 朱晞, 1999; 景立平等, 2005; 薄景山等, 2003)。

(7) 现有和今后架设的强震台均应考虑场地条件和地形条件所致的地震放大效应的影响。应避开断层的端部和交汇部, 且计算时加以考虑。

(8) 各地州、市台站选择的台址是合适的, 场地条件也基本一致, 分布较合理。但数量偏少, 在有经济能力的条件下应进一步加密完善, 可与经过升级改造与各地安装的地震预警系统(成都高新技术研究所)的仪器一同构成各地州市烈度台网预警系统。

衷心感谢杨润海正高级工程师, 苗庆文、施伟华高级工程师对本文提出的宝贵修改意见。

参考文献:

- 薄景山, 李秀领, 刘红帅. 2003. 土层结构对地表加速度峰值的影响[J]. 地震工程与工程振动, 23(3): 35 ~ 40.
- 常士骝. 1994. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 崔建文, 李正光, 赵云旭. 2007. 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.
- 景立平, 卓旭扬, 王祥建. 2005. 复杂场地对地震波传播的影响[J].

- 地震工程与工程振动, 25(6): 16–23.
- 李正光, 郑定昌. 2006. 昆明市城区场地土层剪切波速及地脉动的特征[J]. 地震研究, 29(增刊): 498–503.
- 林宗元. 1994. 岩土工程试验监测手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社.
- 刘洪兵, 朱晞. 1999. 地震中地形放大效应的观测和研究进展[J]. 世界地震工程, 25(3): 20–25.
- 施伟华, 李世成, 李正光, 等. 2010. 宁洱 $M_s 6.4$ 地震的强震记录与地震烈度[J]. 地震研究, 33(4): 337–345.
- 中国科学院武汉岩土力学研究所智能仪器研究. 2003. RSM 工程动测仪使用手册[K].
- GB5001–2001, 建筑抗震设计规范[S].
- GB50021–2001, 岩土工程勘察规范[S].

Site Characteristic Analyses for Strong Earthquake Networks in Southern and Southwestern Yunnan

LI Zheng-guang¹, CUI Jian-wen¹, ZHAO Yun-xu², SHEN Kun³, LIU Fei⁴

- (1. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)
(2. *Earthquake Administration of Pu'er Municipality, Pu'er 665000, Yunnan, China*)
(3. *Earthquake Administration of Yuxi Municipality, Yuxi 653000, Yunnan, China*)
(4. *Earthquake Administration of Honghe Prefecture, Mengzi 661000, Yunnan, China*)

Abstract

We briefly introduce the strong earthquake networks in southern and southwestern Yunnan, site tests for shear wave velocities, and station site classification based on the equivalent shear wave velocities calculated from the test results for the 67 strong earthquake stations in municipalities and prefectures of Yuxi, Honghe, Pu'er, and Xishuangbanna. We also analyze the rationality of the station deployment so as to provide basic materials for strong earthquake recording and data processing.

Key words: strong earthquake network; shear wave velocity; site classification