

甘肃地区波速测试中的问题分析¹

董 林 夏 坤 郑 龙

(中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 土的弹性波速度是非常重要的力学参数, 可用于场地类别划分、场地地震反应分析以及判别砂土、粉土、黄土液化、黄土震陷等。准确测得场地波速资料是进行土工设计和预测岩土地震灾害的关键技术环节。本文收集了甘肃地区地震安全性评价和小区化实测原位波速资料, 分类指出了存在的问题, 以反面案例的形式给出了波速数据处理时应注意的问题和分析方法。

关键词: 原位测试 剪切波速 纵波速度 问题分析

引言

土层的剪切波速是反映土体动力特性的重要参数, 被广泛应用在工程实践中。我国现行的《建筑抗震设计规范 (GB 50011—2010)》(中华人民共和国国家标准, 2010)对场地的分类使用的是双指标法, 其中的一个指标就是等效剪切波速; 我国现行的《工程场地地震安全性评价 (GB 17741—2005)》(中华人民共和国国家标准, 2005)中关于地震输入界面的确定和推荐的土层地震反应分析的等效线性化波动方法也规定要利用土层的剪切波速资料(张忠利, 2007); 伴随着现场波速测试技术的快速发展及日益广泛的应用, 在地震安全性评价、小区划等工作中采用波速判别饱和砂土和粉土层地震液化的要求也日益强烈。

纵波结合横波波速可以计算地基土的泊松比、剪切模量、弹性模量等力学参数, 为土工设计提供计算参数(祝根龙等, 1999); 利用水位上下土体纵波速度的显著差异, 还可以确定场地稳定水位。

本文收集了甘肃地区地震安全性评价和小区化实测原位波速资料, 对发现的问题进行了分类说明, 以期引起广大工程人员的重视。

1 剪切波速测试方法

目前, 剪切波速测试方法主要有钻孔法和面波法。根据测试原理的不同, 钻孔法分为单孔法和跨孔法; 面波法分为瞬态面波法和稳态面波法。以上各种方法都得到了广泛的应用, 有多种多样的测试仪器在工程中使用。下面以国内几种典型的波速测试仪为例, 比较各种测

1 基金项目 甘肃省地震局(中国地震局兰州地震研究所)地震科技发展基金(2011Q06), 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项项目(2011IESLZ04)

[收稿日期] 2012-11-24

[作者简介] 董林, 男, 生于1985年。助理工程师。主要从事岩土地震工程研究。E-mail: donglin408@163.com

试方法的差异，如表 1 所示（郭明珠等，2011）。

表 1 剪切波速测试方法比较

Table 1 Comparison of different testing methods of shear wave velocity

测试方法	单孔法	跨孔法	瞬态面波法	稳态面波法
典型仪器	XG-I 悬挂式波速	DJ ₂ -5-70 拾震器、三分量充气贴壁式	SWS 型多功能瞬态面波仪	GR-810 全自动地下勘察机
名称	测井仪	检波器 SC-16 紫外线示波仪		
测试	测试 SH 波在土层中传播时间，	测试 SV 波在土层中传播时间，得出土层剪切波速	通过锤击、落重乃至炸药震源，产生一定频率范围的瑞雷波，测试瑞雷波波长，再转换成剪切波速	通过激振器发射固定频率的瑞雷波，测试瑞雷波波长，得到瑞雷波速度，再转换成剪切波速
原理	得出土层剪切波速			
优点	方法简单，结果精确	深度大、精度高、使用范围广	不需要钻孔、测试方便、快捷	不需要钻孔、可以灵活调节测试深度
缺点	测试深度较小、S 波到时判断困难	需要较多钻孔，成本高、对钻孔的施工要求较高，不允许有较大的倾斜	瞬态激振能量太小，以致频散曲线与理论相差太大，数据处理复杂	准备复杂现场工作时间长，各种体波和面波混在一起，数据整理复杂，有可能导致较大的误差

2 饱和黄土场地剪切波速测试的问题

以往的工程经验显示，同一土层波速一般都是沿着深度而增加，而黄土受饱和度增大会产生土体的软化，波速减小（李启鹄，1990；王兰民等，2003）。而波速测试人员不能认识到这一特征，在数据处理时仍按照波速随深度逐渐增大的经验来分析数据，导致得出错误的结果。图 1—图 3 是 3 个场地的典型钻孔柱状图，水位以下标贯明显减小，而波速结果还是依深度逐渐增大。

3 剪切波速测试结果过大

国内外的试验研究资料表明，剪切波速 V_s 与 $N_{63.5}$ 一样均反映出土的软硬和松紧程度，所以两者之间存在着良好的相关关系。从已有的统计关系可以看出，剪切波速 V_s 与 $N_{63.5}$ 服从指数相关关系，即 $V_s=aN^b$ ，不同地区只是系数不同（王广军等，1986）。

图 4 为兰州市西固区天憬缘小区场地钻孔柱状图，黄土松软，标贯击数不大于 1 击，而波速测试结果却高达 152—239m/s。

图 5—图 7 是天水小区化麦积区花牛镇的波速钻孔柱状图，ZK15 黄土层相对于 ZK16、ZK17 的同一地层，标贯击数相近，而从第一个测点波速 258m/s 就远大于 ZK16 的 142m/s 和 ZK17 的 92m/s。3 个场地的沉积环境相同，地层依次都是黄土、圆砾、泥岩，显然 ZK15 黄土层的波速测试结果过大。

图 8 是天水小区化麦积区甘泉镇的波速钻孔柱状图，ZK26 粉土层 16—20m 标贯击数与上部相差不大，而波速几乎增大 100m/s。相同的情况还有 ZK19 和 ZK21，这里不再赘述。

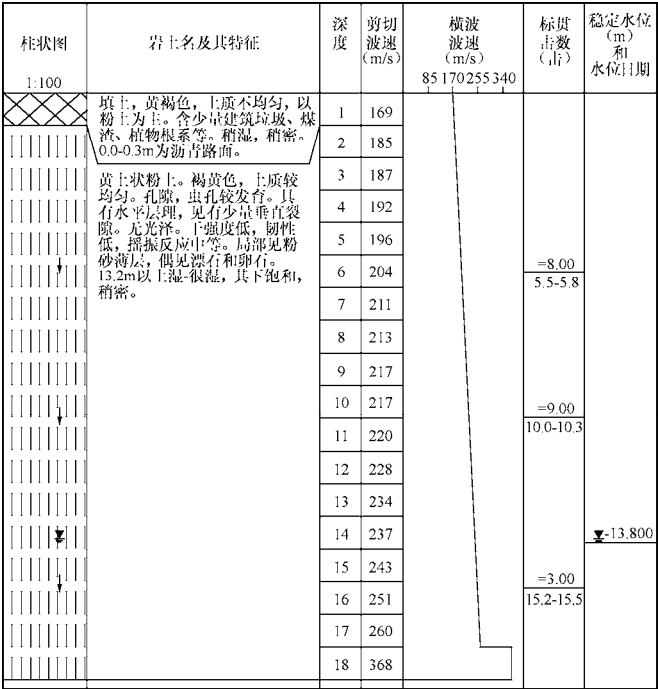


图 1 甘肃新嘉园广场 ZK16

Fig. 1 Bore hole log of ZK16 at Gansu's new garden plaza

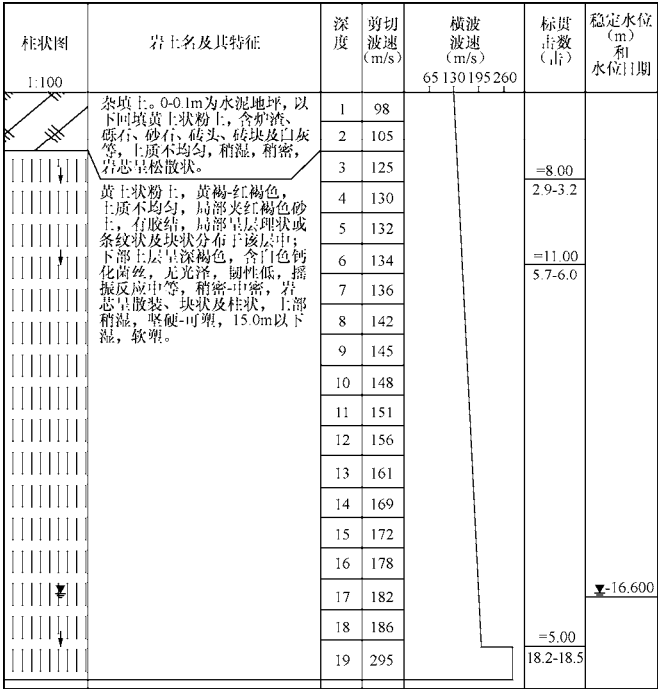


图 2 兰州焦家湾粮库 ZK26

Fig. 2 Bore hole log of ZK26 at Jiao Jia-wan granary

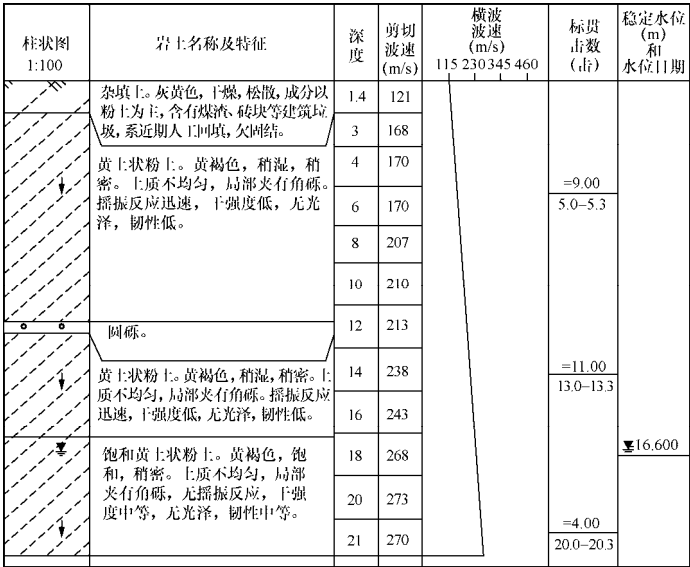


图 3 兰州国资物业第四十佳园 ZK24

Fig. 3 Bore hole log of ZK24 at the 40th Housing area, State-owned property

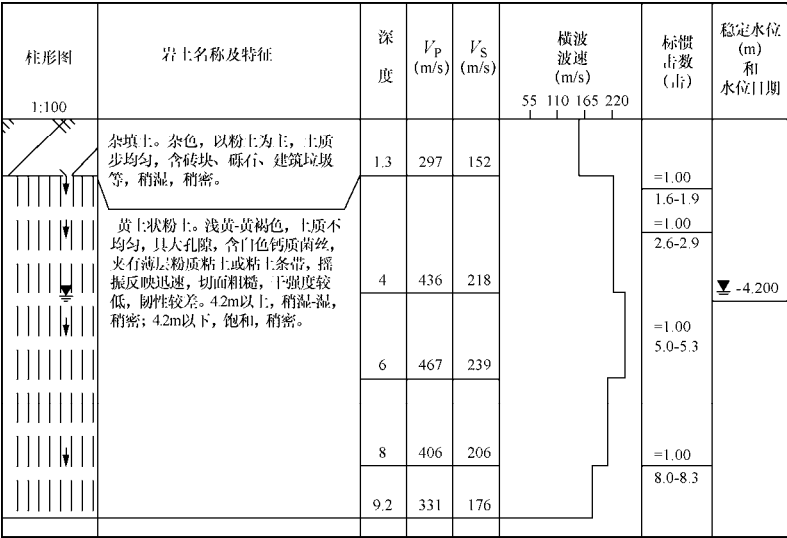


图 4 兰州天憬缘小区 ZK15

Fig. 4 Bore hole log of ZK15 at Tian Jing-yuan housing area

4 饱和场地纵波测试问题

对于饱和土，其孔隙中充满了水。水在封闭的孔隙中承受压缩时，表现了一种不可压缩性，因此可以传播压缩波，水的压缩波波速 ($V_p=1300-1500m/s$) 远大于土的骨架传递的压缩波波速 ($V_p=300m/s$ 左右)。这种现象启示我们，在饱和土中的压缩波波速并不反映土骨架的弹性性质，而是水的性质，并且是一常数 (石林珂等，2003)。

土的渗透性对孔隙水压缩波速度影响很大，在渗透性很好的饱和土层中，孔隙水波速度最大可达到水中波速的 $\sqrt{3}$ 倍；在渗透性极差的饱和土中，可接近或大于水中波速（陈龙珠等，1987）。在《黄土动力学》（王兰民等，2003）第七章的兰州 1 号探井描述中，黄土状土饱和度大于 80%，压缩波速度即可达到 1600m/s，并随着饱和度增大不变。由于渗透性更好，饱和卵石层压缩波速度应大于 1600m/s。

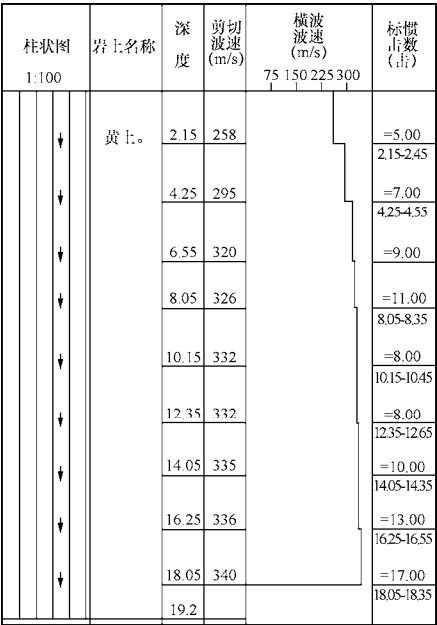


图 5 天水小区化 ZK15

Fig. 5 Bore hole log of ZK15 from seismic micro-zonation of Tianshui city

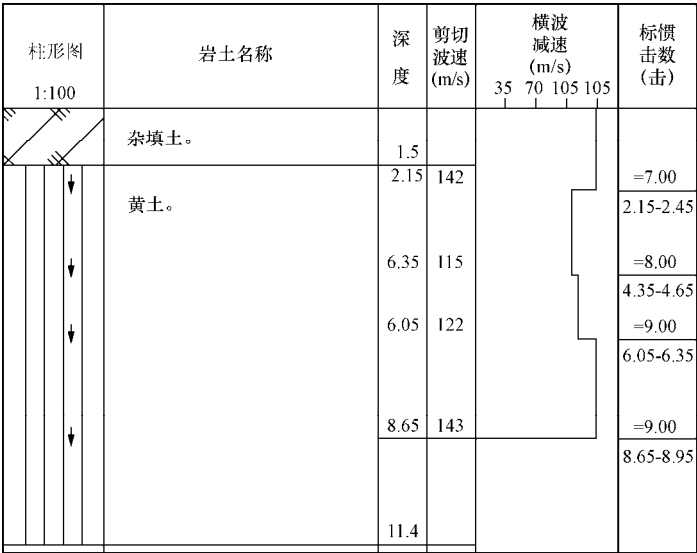


图 6 天水小区化 ZK16

Fig. 6 Bore hole log of ZK16 from seismic micro-zonation of Tianshui city

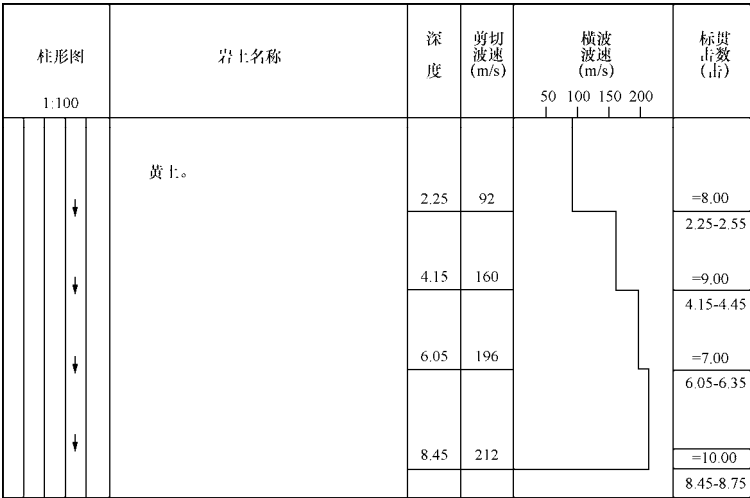


图 7 天水小区化 ZK17

Fig. 7 Bore hole log of ZK17 from seismic micro-zonation of Tianshui city

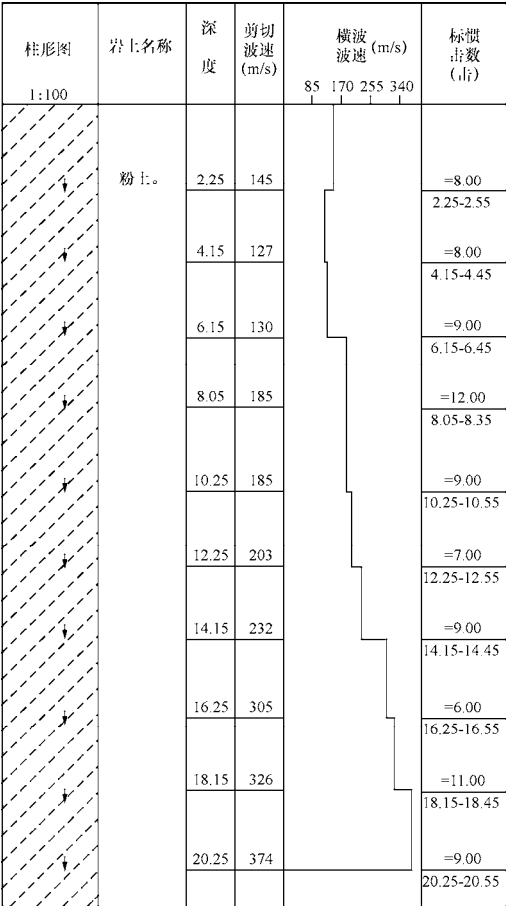


图 8 天水小区化 ZK26

Fig. 8 Bore hole log of ZK26 from seismic micro-zonation of Tianshui city

在纵波的数据处理时，测试人员宁可不考虑实测纵波速度，而用经验泊松比和实测剪切波速计算相应的 V_p ，结果导致波速测试出现很大的误差。如果用实测的纵波数据，那么计算出的压缩模量又非常高。刘旭等（1995）的研究结果给出了饱水砂土骨架波速的分析方法，但是该方法不适合粘性土。

根据 Biot 理论，饱和土中有两种 P 波，即快 P 波和慢 P 波，分别是受孔隙水和土骨架特性控制的 P 波。但是目前这两种 P 波的理论研究还有分歧（王立忠等，1995；陈龙珠等，1997；王立忠，1997），在工程上还没有推广，并且在波形处理上也困难重重。

图 9—图 11 中水位以下的纵波速度都很小，显然是测试人员用 V_s 估算的结果。设计人员进行土工设计时，务必要清楚 V_p 测试的现状，通过正确的途径来获取压缩模量和泊松比等参数。

5 结论

波速测试虽已很普遍，但是误差较大，且不易控制。现有的研究结果证实波速测试带有主观性，且干扰因素多，不同的人、不同的仪器、不同的时间对同一场地进行测试，结果都有可能不同。文中列举的饱和黄土案例是因为测试人员没有掌握黄土饱和和软化的特性，分析波形时带有主观性；剪切波速结果过大的案例，则是现场测试过程中的失误；饱和土纵波测试案例，则主要是想说明饱和土纵波测试现状，提醒设计人员通过正确的途径获取土性力学参数。

总之，要想得到准确的场地波速数据，首先在现场测试环节，要尽量减少和避免在测试过程中的干扰，还有就是多下功夫，仔细研究其他土性参数以及和邻区的资料进行对比，积累理论和实践经验，这样才能为工程设计和岩土地震灾害预测提供准确的参数。

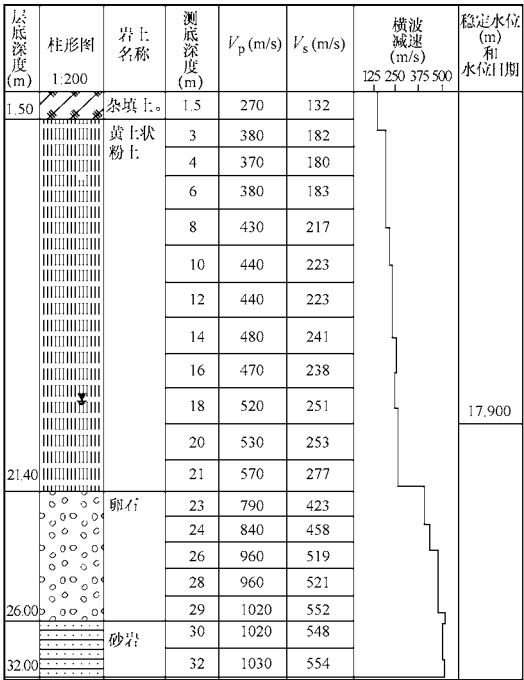


图 9 兰州天憬缘小区 ZK15
Fig. 9 Bore hole log of ZK15 at Tian Jing-yuan housing area

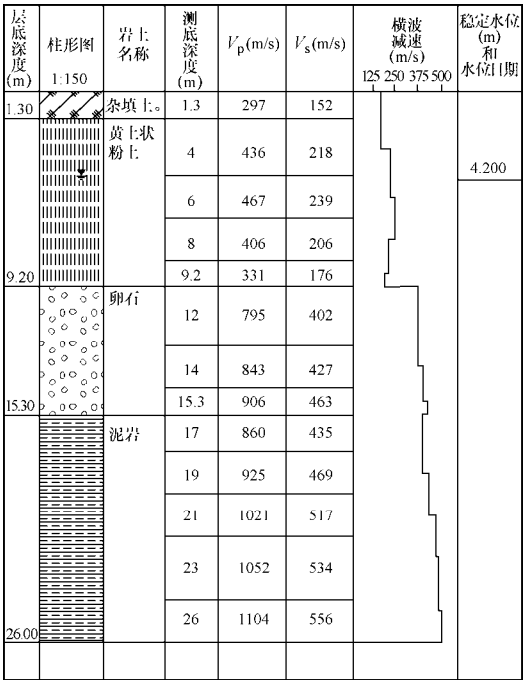


图 10 兰州国资物业第四十佳园 ZK35
Fig. 10 Bore hole log of ZK35 at the 40th Housing area, State-owned property

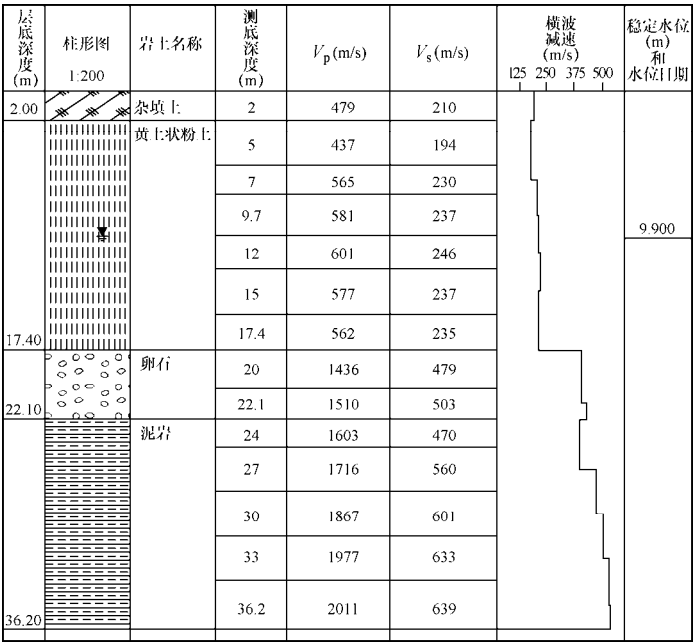


图 11 兰州国资物业第六佳园 ZK6

Fig. 11 Bore hole log of ZK6 at the 6th Housing area, State-owned property

参考文献

陈龙珠, 黄秋菊, 1997. 关于“波在饱和土中传播的若干问题”一文的讨论. 岩土工程学报, **19** (1): 104—106.

陈龙珠, 吴世明, 曾国熙, 1987. 弹性波在饱和土层中的传播. 力学学报, **19** (3): 276—282.

郭明珠, 贾连军, 铁瑞等, 2011. 剪切波速测试方法的现状分析. 西北地震学报, **33** (z1): 21—23.

李启鹏, 1990. 黄土的动三轴和原位波速试验的现状. 见: 汪闻韶编《第三届全国土动力学学术会议文集》. 上海: 同济大学出版社, 111—116.

刘旭, 王建荣, 1995. 水饱和土层中骨架波速的获取与分析. 西北地震学报, **17** (3): 75—79.

石林珂, 孙文怀, 郝小红, 2003. 岩土工程原位测试. 郑州: 郑州大学出版社, P82.

王广军, 苏经宇, 1986. 剪切波速度统计结果及其在场地分类中的应用. 建筑科学, **1**: 69—76.

王兰民, 石玉成, 刘旭等, 2003. 黄土动力学. 北京: 地震出版社.

王立忠, 1997. 关于“波在饱和土中传播的若干问题”一文讨论的答复. 岩土工程学报, **19** (1): 106—108.

王立忠, 吴世明, 1995. 波在饱和土中传播的若干问题. 岩土工程学报, **17** (6): 96—102.

张忠利, 2007. 建设工程场地剪切波速的统计分析. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.

祝根龙, 刘利民, 耿乃兴, 1999. 地基基础测试新技术. 北京: 机械工业出版社.

中华人民共和国国家标准, 2010. 建筑抗震设计规范 (GB 50011-2010). 北京: 中国建筑工业出版社.

中华人民共和国国家标准, 2005. 工程场地地震安全性评价 (GB 17741-2005). 北京: 中国标准出版社.

Discussion of Problem of Wave Velocity Test in Gansu Province

Dong Lin, Xia Kun and Zheng Long

(Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China)

Abstract As very important mechanical parameters of soil, velocities of elastic waves can be used for site classification, seismic response analysis and discrimination of sandy soil and loess liquefaction, and loess vibration subsidence. In geotechnical design and earthquake hazard prediction it is the key to measure wave velocity accurately for construction sites. In this paper we collect the data of in situ wave velocity from seismic safety evaluation and earthquake micro-zoning in Gansu province, and point out the current problems in different categories. Finally, based on some lessons we have learned in the past, we provide some suggestions on the analysis methods for processing wave velocity data.

Key words: In situ test; Shear wave velocity; Pressure wave velocity; Analysis of problem