

四川地区深度小于 30m 钻孔的 $\bar{V}_s(30)$ 估计方法¹

亢川川^{1) 2) 3)} 俞言祥¹⁾ 马超²⁾ 李建亮²⁾ 黄成程³⁾

【摘要】 本文收集了733个四川地区的实测钻孔数据，从中筛选出深度大于30m的268个钻孔剖面资料。分别获得了10m、15m、20m、25m和28m不同深度处的平均剪切波速 $\bar{V}_s(d)$ 与 $\bar{V}_s(30)$ 的对数线性相关关系。同时还与Boore(2004)的结果做了对比分析，比较了采用常数外推法和对数线性外推法得到的不同深度处剪切波速的残差分布。结果表明，不同深度处剪切波速 $\bar{V}_s(d)$ 与 $\bar{V}_s(30)$ 的对数相关关系可能具有一定的区域性特征，本文得到的对数关系更适合四川地区。对数线性外推法与常数外推法相比，前者的系统偏差更小；随着深度的增加，两种方法的外推误差均逐渐减小，但常数外推法普遍低估了 $\bar{V}_s(30)$ 值；当深度较浅时，低估的情况更为明显。本文的研究结果为利用大量的不足30m的钻孔资料估计 $\bar{V}_s(30)$ 值提供了参考。

【关键词】 平均剪切波速； $\bar{V}_s(30)$ ；外推估计

引言

$\bar{V}_s(30)$ （地表至地下30m处的平均剪切波速）作为一个场地效应的关键性变量在震动衰减关系中得到了广泛的运用（Abrahamson等，2008）。在国外许多建筑物的抗震设计规范中均直接将 $\bar{V}_s(30)$ 作为场地分类的指标（Building Seismic Safety Council, 2003; 2004; Eurocode 8, 2004; American Society of Civil Engineers, 2010）。相对于详细的场地特征描述， $\bar{V}_s(30)$ 作为场地分类的简单指标，获取成本相对较低，并且它直接与地震动的场地放大效应相关（Boore, 2004）。Borcherdt(1994)基于 $\bar{V}_s(30)$ 值量化了依赖于幅值和频率的局部场地放大系数，且被广泛应用于震后的地震动强度分布的快速预测中（Wald等，2006; 2007; Allen等，2007; Moratto等，2009; 陈鲲等，2010; 2011a; 2011b; 2012; 2013a; 2013b; 2013c; 董娣等，2005; 李俊等，2012; 吕悦军等，2008; 史大成等，2012）。

然而由于许多原因，如：相关技术的限制、特定环境的影响、经费预算的限制及我国现行规范中场地分类对钻孔深度的要求等，使得许多钻孔剖面并不能达到30m深度。近年来，宏观场地条件划分研究日益成为地震工程界的热点，如何有效利用小于30m深度的钻孔资料，引起了许多专家学者的关注。对于利用深度小于30m的钻孔资料的剪切波速，外推 $\bar{V}_s(30)$ 的最简单方法就是用最底层的波速直接常数外推到地下30m处，但是由于地质和岩土工程的原因，通常剪切波速随着深度的增加而增加，故常数外推可能低估了 $\bar{V}_s(30)$ 值。Boore(2004)通过研究发现，不同深度处的平均剪切波速与 $\bar{V}_s(30)$ 的对数线性相关性很强，提出了对数线性外推 $\bar{V}_s(30)$ 的方法，与常数外推相比可减小估计值的不确定性。同时Boore等(2011)还利用日本、美国加州、土耳其和欧洲的钻孔数据做了进一步的分析，认识到剪切波速与 $\bar{V}_s(30)$ 的对数线性相关性具有区域性特征。

本文从四川地区最新收集到的733个实测钻孔资料中，筛选出了深度大于30m的268个实测钻孔资料，并利用268个钻孔

1 基金项目“十二五”国家科技支撑计划项目专题特大地震地面运动综合评价(2012BAK15B01-09)；四川赛思特科技有限责任公司董事长基金；四川省地震局地震科技专项LY1309资助

【收稿日期】 2014-08-22

【作者简介】 亢川川，男，生于1982年，工程师。中国地震局地球物理研究所在职硕士，主要研究方向：工程地震。E-mail: kangchuan@126.com.

1) 中国地震局地球物理研究所，北京100081

2) 四川省地震局，四川成都 610041

3) 四川赛思特科技有限责任公司，四川成都 610041

资料的剪切波速分析比较了不同外推估计 $V_s(30)$ 方法的不确定性，研究确定了适合四川地区的利用深度达不到30m的钻孔资料估计 $V_s(30)$ 的方法。

1 钻孔数据

本文收集了四川地区的733个钻孔资料，资料中剪切波速的测量方法主要采用下孔法和悬挂式波速测井系统法，其绝大部分钻孔的底层剪切波速 V_s 均大于等于500m/s。从四川地区的钻孔分布（见图1）可以看出，钻孔资料的分布不甚均匀，特别是川西高原较少。这些资料分别来源于重大工程地震安全性评价报告（407个）、四川省数字强震动观测台网台址波速测试报告（135个）、国家地震社会服务工程震害防御服务系统（44个）以及协作单位提供的一般建设工程钻孔数据（147个）。从钻孔的深度分布看，其中只有268个钻孔深度 $d \geq 30\text{m}$ ，占比四成左右。

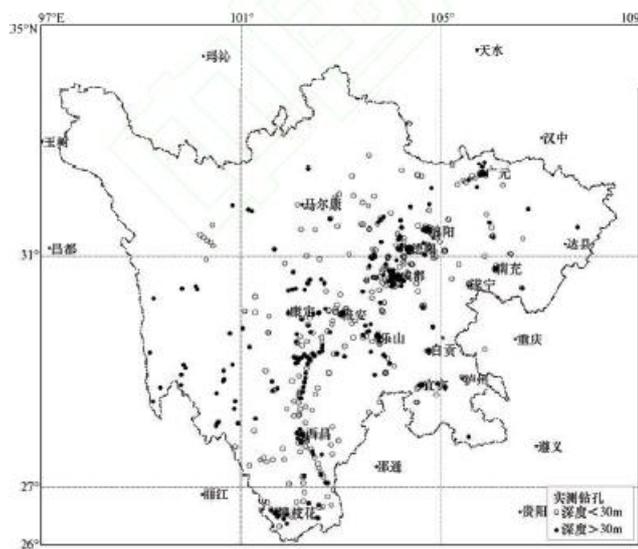


图1 四川地区的钻孔分布图

Fig.1 Spatial distribution of boreholes in Sichuan area

在收集到的钻孔数据中，深度最浅的为7.2m，最深的为150.5m。为了表述方便，对于深度 $d \geq 80\text{m}$ 的钻孔个数，归总到 $d=80\text{m}$ 。其中，深度小于20m的钻孔有112个，占比为15%；深度在20—30m之间的钻孔有353个，较为集中，占比为48%；深度大于30m的钻孔有268个，这就是本文要研究的数据集（见图2）。

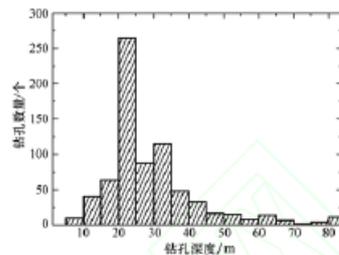


图2 不同深度钻孔数量分布图

Fig.2 Total numbers of boreholes at different depth

2 $V_s(30)$ 的计算方法和外推方法

2.1 $\bar{V}_s(30)$ 实测值计算方法

$\bar{V}_s(30)$ 是地表与地下 30m 处的平均剪切波速测量值，是通过计算剪切波穿过地表至地下 30m 的钻孔剖面的走时而得到的，其计算公式为：

$$\bar{V}_s(30) = 30/t_{30} \quad (1)$$

$$t_{30} = \int_0^{30} \frac{dz}{V_s(z)} \quad (2)$$

式 (1) 中 t_{30} 表示剪切波在地表至 30m 深度之间的传播时间 (单位: s)；式 2 中 dz 是 30m 深度范围内离散到某层的土层厚度 (单位: m)； $V_s(z)$ 是某土层的剪切波速 (单位: m/s)，其他深度的平均剪切波速也可以用类似于上式的方法求得，只需要替换相应的深度值即可。

2.2 外推方法

(1) 剪切波速的常数外推法

当钻孔波速模型的深度小于 30m 时，假设最底层深度至 30m 深度范围内的剪切波速值不变 (均为最底层的剪切波速)，可直接计算地表与地下 30m 处的平均剪切波速，这种方法称为常数外推法。采用常数外推法估计 $\bar{V}_s(30)$ 可表示为：

$$\bar{V}_s(30) = \frac{30}{t(0, z_{\max}) + \frac{30 - z_{\max}}{V_s(z_{\max})}} \quad (3)$$

式中， $\max z$ 为钻孔最底层深度 (单位: m)； $V_s(z_{\max})$ 为最底层剪切波速 (单位: m/s)。

(2) 剪切波速的对数外推法

另一种估计剪切波速的方法是利用实测 $\bar{V}_s(30)$ 与不同深度处的平均剪切波速的对数线性统计关系外推 $\bar{V}_s(30)$ 值，称为对数外推法，其计算公式为：

$$\log \bar{V}_s(30) = a + b \log \bar{V}_s(d) \quad (4)$$

式中， $\bar{V}_s(d)$ 为不同深度处的平均剪切波速 (单位: m/s)； a 、 b 为回归系数。

3 计算结果与分析

根据对数外推法模型，笔者利用本文数据集的波速资料分别计算了深度为 10m、15m、20m、25m 和 28m 的 $\bar{V}_s(d)$ 值，并采用最小二乘法统计回归了 $\bar{V}_s(d)$ 与实测 $\bar{V}_s(30)$ 的相关关系，获得了相应深度处的回归系数，如表 1 所示。同时还分别进行了钻孔深度为 10m、15m、20m、25m 和 28m 时 $\bar{V}_s(d)$ 与 $\bar{V}_s(30)$ 的对数线性拟合，如图 3 所示。

表 1 最小二乘法回归系数表 (方程 $\log \bar{V}_s(30) = a + b \times \log \bar{V}_s(d)$)

Table 1 List of coefficients for least square linear regression (with equation $\log \bar{V}_s(30) = a + b \times \log \bar{V}_s(d)$)

d (m)	本文				Boore (2004)		
	a	b	标准差 σ	相关系数 r	a	b	标准差 σ
10	7.2837E-01	7.4954E-01	6.756E-01	8.4158E-01	4.2062E-02	1.0292E+00	7.1260E-02
15	4.9312E-01	8.3314E-01	4.186E-01	9.0701E-01	1.3795E-02	1.0263E+00	4.5925E-02
20	2.1421E-01	9.3533E-01	1.709E-01	9.6312E-01	2.5439E-02	1.0095E+00	3.0181E-02
25	8.6020E-02	9.7581E-01	5.219E-02	9.9025E-01	1.1483E-02	1.0045E+00	1.4691E-02
28	1.5450E-02	9.9791E-01	9.260E-03	9.9828E-01	7.7322E-04	1.0031E+00	5.5264E-03

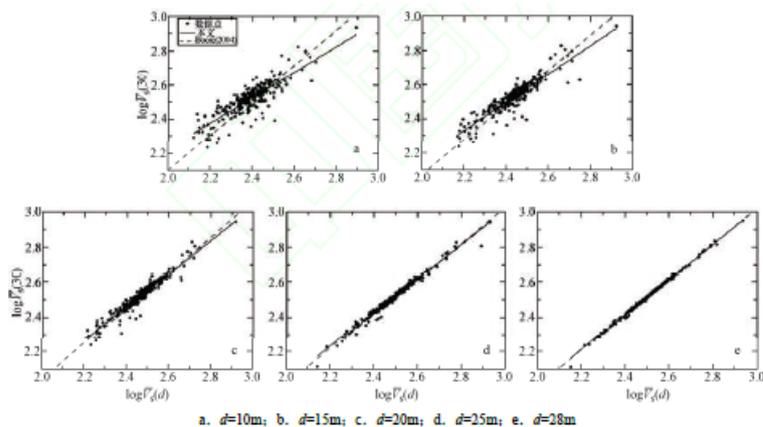


图 3 不同深度处 $\bar{V}_s(d)$ 与 $\bar{V}_s(30)$ 的对数线性拟合图

Fig.3 Log linear fitting of average shear wave velocity and $\bar{V}_s(30)$ at different depth

为了便于比较, 笔者在表1 和图3 中还同时给出了Boore (2004) 的统计结果。从表1可以看出, 本文得出的不同深度处的平均剪切波速 $\bar{V}_s(d)$ 与 $\bar{V}_s(30)$ 的对数线性拟合结果, 随着深度的增加, 相关系数 r 逐渐接近常数1, 标准差 σ 逐渐减小, 对数线性拟合的斜率 b 也逐渐接近常数1。本文的结果与Boore (2004) 的结果相比, 斜率 b 和标准差 σ 的变化大致趋同, 随着深度的增加, 差别也越来越小, 当深度达到25m 和28m 时, 两者逐渐重合。但从本文10m、15m、20m 的对数线性拟合结果与Boore (2004) 的结果相比可以看出, 当 $\bar{V}_s(d)$ 较小时, 本文的外推 $\bar{V}_s(30)$ 值大于Boore (2004) 的结果; 反之, 当 $\bar{V}_s(d)$ 较大时, 本文的外推结果要小。这可能与统计数据区域性有关, Boore (2004) 在统计时使用的数据主要来自美国加州位于城市地区的台站钻孔数据, 而本文收集的数据是广泛分布于四川地区的 II、III 类场地的钻孔数据。因此, 对于利用深度未达到30m 的钻孔数据外推 $\bar{V}_s(30)$ 值时, 本文的统计关系可能更适合于四川地区。

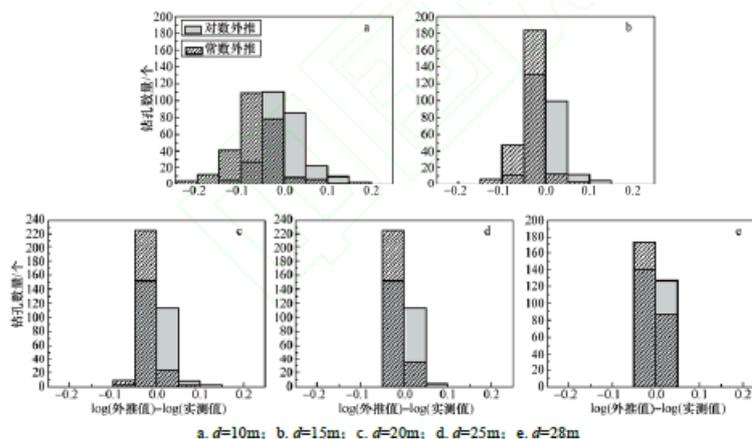


图 4 常数外推法、对数线性外推法 $\bar{V}_s(30)$ 的残差直方对比图

Fig.4 Comparison of percentage of residual for constants and logarithmic extrapolation of $\bar{V}_s(30)$

根据常数外推法和对数线性外推法的模型及得到的统计关系，笔者还利用本文的数据集分别计算了深度为 10m、15m、20m、25m、28m 时的 $\bar{V}_s(30)$ 外推估计值，并对比了两种方法外推值与实测值的残差分布，如图 4 所示。从图中可以看出，随着深度的增加，用两种方法得到的外推值的残差都逐渐减小。其中用常数外推法得到的大部分残差值均小于 0.0，深度越浅该现象越明显，这表明采用常数外推法普遍低估了 $\bar{V}_s(30)$ 值。事实上这与实际情况是相符的，因为在一般情况下钻孔波速模型不同层位的剪切波速随着深度的增加而增加。而用对数线性外推法得到的残差值大致均匀分布在 0.0 左右，其系统偏差明显小于用常数外推法得到的残差值，两者相比，前者更为合理。因此在外推 $\bar{V}_s(30)$ 值时，对数线性外推法优于常数外推法。

4 讨论及结论

(1) 本文统计获得了不同深度处平均剪切波速 $\bar{V}_s(d)$ 与 $\bar{V}_s(30)$ 的对数线性关系，明确给出了不同深度处平均剪切波速 $\bar{V}_s(d)$ 与 $\bar{V}_s(30)$ 对数线性关系的回归系数。由于本文收集的数据是广泛分布于四川地区的 II、III 类场地的钻孔数据，因此，对于利用深度未达到 30m 的钻孔数据外推 $\bar{V}_s(30)$ 值时，本文的统计关系更适合于四川地区。同时这也为其它地区利用大量不足 30m 的钻孔资料估计 $\bar{V}_s(30)$ 值提供了一种参考方法。

(2) 采用对数线性外推法获得的 $\bar{V}_s(30)$ 值优于采用常数外推法获得的 $\bar{V}_s(30)$ 值，两者相比，前者的系统偏差更小。由此可见采用常数外推法通常会低估了某一场地的 $\bar{V}_s(30)$ 值，可能将该场地划分到较软的场地类别中，这样会放大地震动的局部场地效应，加大了量化场地效应的不确定性。

(3) 本文收集的深度超过 30m 的 268 个钻孔的实测 $\bar{V}_s(30)$ 值大部分位于 180—760m/s 范围内，其于美国 NEHRP 规范 (Holzer 等, 2005) 的 C 类和 D 类相对应，因此得到的对数线性外推 $\bar{V}_s(30)$ 的相对关系，更适合于这一范围的应用。

(4) 我国现行的《建筑抗震设计规范 (GB 50011-2010)》(中华人民共和国建设部, 2010) 与欧、美等国的规范相比，所规定的场地条件划分标准并不一致，因此造成了深度达到或超过 30m 的钻孔数量相对较少。通过合理的外推方法可有效地增加利用 $\bar{V}_s(30)$ 的数量，为以后场地类别划分和量化地震动的局部场地效应提供保障。

致谢：衷心感谢笔者的在职硕士研究生导师俞言祥教授的悉心指导！感谢陈鲲副研究员作为笔者的学长兼老师，给予的耐心帮助！感谢周荣军教授为丰富、完善本文提出的宝贵意见！感谢孔军、史丙新、汤才成等人帮助整理了大量的勘察资料！

[参考文献]

陈鲲, 俞言祥, 高孟潭, 2010. 考虑场地效应的 ShakeMap 系统研究. 中国地震, 26 (1): 92—102.

陈鲲, 俞言祥, 高孟潭, 2011a. 2010 年 4 月 14 日青海玉树地震震动图. 中国地震, 27 (1): 99—102.

陈鲲, 俞言祥, 高孟潭, 吕红山, 2011b. 考虑震源破裂过程的青海玉树地震震动图研究. 中国地震, 27 (1):

56—64.

陈鲲, 俞言祥, 高孟潭, 冯静, 2012. 用有限强地震动记录校正等震线的估计研究. 地震学报, 34 (5): 633—645.

陈鲲, 俞言祥, 高孟潭, 2013a. 基于地震记录的震动图校正方法研究. 应用基础与工程科学学报, 21 (4):

679—691.

-
- 陈鲲, 高孟潭, 2013b. “抗大地震”与低超越概率水准地震动关系的讨论. 震灾防御技术, **8** (1): 34—39.
- 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭, 2013c. 强震记录校正的2013年4月月20日四川芦山地震峰值加速度震动图. 地震地质, **35** (3): 1—7.
- 董娣, 周锡元等, 2005. “9·21”台湾集集地震中场地类别对地震动若干特性的影响. 地震研究, **28** (4): 365—372.
- 李俊, 陈剑雄, 陈颐, 2012. 基于地形倾斜值的场地效应校正方法研究. 中国地震, **28** (1): 33—40.
- 吕悦军, 彭艳菊, 兰景岩, 孟小红, 2008. 场地条件对地震动参数影响的关键问题. 震灾防御技术, **3** (2): 126—135.
- 史大成, 温瑞智, 杜春清等, 2012. 区域性场地 \bar{V}_s (30)及峰值加速度放大系数估算方法. 地震工程与工程振动, **32** (4): 40—46.
- 中华人民共和国建设部, 2010. 建筑抗震设计规范 (GB 50011-2010). 北京: 中国建筑工业出版社.
- Abrahamson N. A., Silva W. J., 2008. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations. Earthq. Spectra, **24**: 67—97.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), 2010. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Standards ASCE/SEI 7-10, ISBN 9780784410851, 650pp. also available at <http://www.asce.org/Product.aspx?id=2147487569>.
- Allen T. I., Wald D. J., 2007. Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions \bar{V}_s (30) and Amplification around the Globe: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1357, 69p.
- Borcherdt R. D., 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). Earthquake Spectra, **10**: 617—654.
- Boore D. M., 2004. Estimating \bar{V}_s (30) (or NEHRP Site Classes) from shallow velocity models (depths <30 m). Bulletin of the Seismological Society of America, **94** (2): 591—597.
- Boore D. M., Thompson E. M., Héloïse Cadet, 2011. Regional correlations of \bar{V}_s (30) and velocities averaged over depths less than and greater than 30 meters. Bulletin of the Seismological Society of America, **101** (6): 3046—3059.
- Building Seismic Safety Council, 2003. Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and

Other Structures, Part 1: Provisions. Report No. FEMA-450, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 303pp.

Building Seismic Safety Council, 2004. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (2003 edition). Washington D.C.: Building Seismic Safety Council, FEMA450/451, 19–38.

Eurocode 8, 2004. Design of structures for earthquake resistance, part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1, European Committee for Standardization (CEN), <http://www.cen.eu/cenorm/homepage.htm> (last accessed July 2011).

Holzer T.L., Padovani A.C., Bennett, 2005. Mapping NEHRP **V_s** (**30**) site classes. Earthquake Spectra, (21): 353–370.

Moratto L., Costa G., Suhadolc P., 2009. Real-time generation of ShakeMaps in the Southeastern Alps. Bulletin of the Seismological Society of America, **99** (4): 2489–2501.

Wald D.J., Worden B.C., Quidoriano V., Pankow K.L., 2006. ShakeMap Manual: Technical manual, user's guide, and software guide: U.S. Geological Survey, 156p.

Wald D.J., Allen T.I., 2007. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. Bull. Seism. Soc. Amer., **97** (5): 1379–1395.