

江志杰, 彭艳菊, 方怡, 吕悦军, 修立伟, 黄帅, 2018. 北京平原地区  $V_{S30}$  估算模型适用性研究. 震灾防御技术, 13 (1): 75—86. doi: 10.11899/zfy20180107

# 北京平原地区 $V_{S30}$ 估算模型 适用性研究<sup>1</sup>

江志杰 彭艳菊 方怡 吕悦军 修立伟 黄帅

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

**摘要** 本文使用基于钻孔测井数据的 3 类模型, 即常速度外推模型、速度梯度模型、双深度参数外推模型, 通过对北京地区 460 个深度超过 30m 的钻孔剪切波速资料进行分析, 详细探究了  $V_{S30}$  估算模型在本研究区的适用性。研究结果表明双深度参数外推模型在估算  $V_{S30}$  上准确度很高, 其不需要大量的数据进行回归分析, 且不具有区域独立性, 可以为全球包括北京地区场地类别划分提供依据, 进而在震害快速评估中用于确定场地影响, 是一种值得推广的估算模型。

**关键词:** 等效剪切波速 场地条件  $V_{S30}$  外推模型 北京平原区

## 引言

国内外大量震害经验和强震观测资料表明, 场地条件是影响地震动特征和结构震害的重要因素, 依据场地条件进行场地类别划分并合理地确定地震动参数一直是工程地震研究领域的重要课题之一。自 20 世纪 60 年代以来, 我国的工程地震工作者在场地条件对地震动影响方面开展了大量的研究 (胡聿贤等, 1980; 李小军等, 2001; 薄景山等, 2003a, 2003b; 李小军, 2006)。

研究场地条件的一个简单方法是考虑波的阻抗, 即以浅层地表物质的剪切波速作为场地分类的因子。大量研究表明, 上覆 30m 土层对地震动峰值影响显著, 大于 30m 的土层影响明显减弱 (Borcherdt, 1994; 薄景山等, 2003b)。自 20 世纪 90 年代以来,  $V_{S30}$  成为评价场地条件及确定场地地震影响的一个重要参数 (Wald 等, 2007; 吕悦军等, 2008; 黄雅虹等, 2009; 陈鲲等, 2010)。在实际工作中, 如美国的 NGA 计划 (Next Generation of Ground-Motion Attenuation Models), 在建立地震动衰减关系 (Ground-Motion Prediction Equations, 简称 GMPEs) 时, 参与工作的 5 个小组中有 4 个组的成果中采用了  $V_{S30}$  作为场地条件的参数考虑场地线性或非线性效应 (Campbell 等, 2008; Abrahamson 等, 2008; Chiou 等, 2008; Boore 等, 2008; Idriss, 2008)。 $V_{S30}$  作为场地条件评价指标更为简单、经济。然而, 由于环境的因素和相关技术的限制, 剪切波速度的测量深度无法达到 30m; 另外, 一些早期的研究中浅层速

**1 基金项目** 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (ZD2017-28), 北京市自然科学基金项目 (8174078) 和北京市优秀人才项目 (2015000057592G270) 共同资助

**[收稿日期]** 2017-07-05

**[作者简介]** 江志杰, 女, 生于 1991 年。硕士研究生。主要研究方向: 工程地震。E-mail: m15201530155@163.com

度模型的深度没有达到 30m, 如果要使用这些数据, 也需对其波速外推方法进行研究, 目前国内已经进行了一些  $V_{S30}$  的研究工作 (彭艳菊等, 2009; 喻焜等, 2015; Xie 等, 2016)。

北京地区地质、地震方面的研究相对深入, 近年来进行了大量重大工程的勘察、地震安全性评价、地质灾害评估工作, 积累了大量的钻探资料。本文通过对钻孔资料剪切波速的分析, 讨论了 3 种  $V_{S30}$  估算模型在北京地区的适用性。本文的研究成果可以为北京地区场地类别划分提供依据, 进而为震后震害快速评估中场地影响的确定提供技术支持, 也可作为无钻孔剪切波速地区场地条件判定的外推依据。

## 1 北京平原地区工程地质条件

北京平原是由永定河、潮白河、温榆河、拒马河等几大河流联合作用形成的冲、洪积平原, 沉积物分带特征显著, 类型多样, 冲积物、洪积物、湖积物、坡积物等均有分布, 不同地区沉积厚度存在明显差异。因此选取北京平原地区为研究试点, 既具有丰厚的资料基础, 又具有典型的代表性, 有利于本方法的探索性研究。

### 1.1 北京地区第四系厚度分布

第四纪以来, 北京平原差异运动强烈, 在不同方向断裂的制约下, 形成了该区第四纪沉积层厚度的差异性, 例如沙河、平谷、天竺、怀柔南等地分布着大小不等的第四纪沉积盆地, 盆地中心沉积层厚度一般为 300—400m, 最深可达 600m 以上, 而城区第四纪沉积层厚度为 60—80m 左右, 市区西郊八宝山—公主坟一带只有十多米, 甚至基岩裸露。从总体上看, 第四系底部形成了比较明显的向东南倾斜的特征, 厚度逐渐加大, 在沉积盆地内形成了几个明显的沉积中心, 如孙河—天竺沉积中心、马池口—沙河沉积中心、昆明湖—四季青沉积中心、牛堡屯—王各庄沉积中心、怀柔沉积中心、平谷沉积中心等。

### 1.2 北京地区第四纪沉积物特征

第四纪以来, 由于西部和北部山区相对上升, 平原区相对下沉, 流经山区和平原的永定河、潮白河、北运河、拒马河等河流, 在本区大陆性气候特点下, 在不同地质时期所夹带的各种碎屑物质于山前平原地区逐步堆积。因此, 从地质成因上来看, 北京平原系西部和北部山区相对上升、平原相对下沉的长期内力作用及上升山区遭受侵蚀后产生的碎屑物经河流的携带作用充填于下降的平原的外力作用共同作用的结果, 从而形成广阔的山前洪积、冲积平原。其沉积物分布体现出显著的规律性。

## 2 研究区域资料分析

本文收集了 2000 年以来北京地区 10 余个单位的场地钻探测试成果, 其中终孔深度大于 30m 且波速资料和土层信息完整的钻孔有 460 个, 图 1 为钻孔位置分布图, 图 2 为深度统计分布图。从图 1、图 2 可以看出, 北

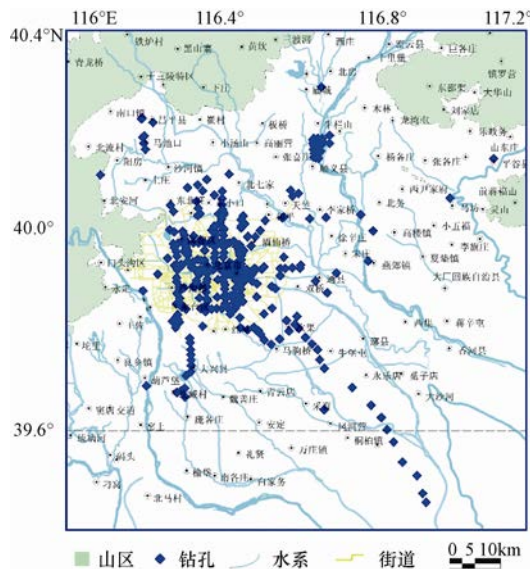


图 1 北京地区钻孔位置分布图

Fig. 1 Spatial distribution of boreholes in the Beijing area

京地区钻孔分布主要分布于城区, 近郊等地, 钻孔深度主要集中于 30—100m, 均大于 30m, 符合要求。

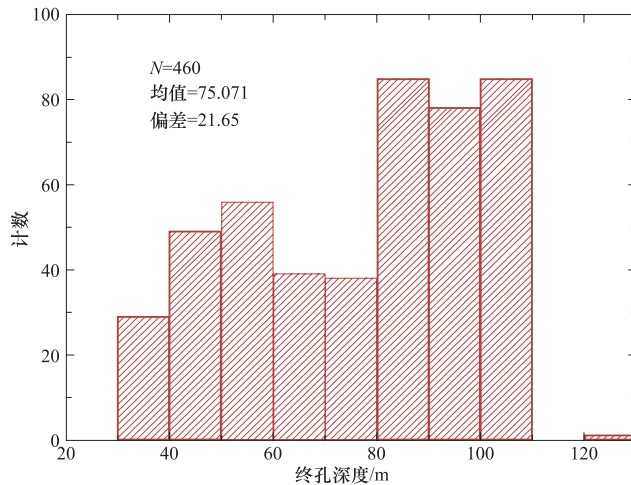


图 2 不同深度终孔分布图

Fig. 2 Total numbers of boreholes at different depth

对钻孔剪切波速数据进行处理后, 分别计算 20m 和 30m 深度内的等效剪切波速, 分析  $V_{S30}$  与  $V_{S20}$  之间的相关性。图 3 显示二者之间存在较好的相关性, 关系式为  $y=1.097x+2.562$ , 相关系数  $r=0.982$ ,  $V_{S30}$  基本上比  $V_{S20}$  大 10% 左右。

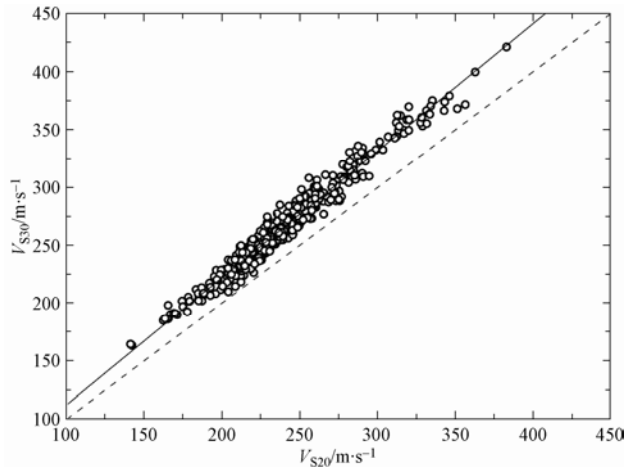


图 3  $V_{S20}$  和  $V_{S30}$  的对应关系 (虚线代表 1:1 分割线)

Fig. 3 Relation of  $V_{S20}$  and  $V_{S30}$  (The dashed lines represent the 1:1 curve)

目前我国现行的抗震设计规范中等效剪切波速的计算深度取 20m 与覆盖层二者的小者, 有代表性的是《建筑抗震设计规范 (GB50011—2010)》(中华人民共和国住房和城乡建设部等, 2010); 而国外场地划分以表层 30m 范围内等效剪切波速 ( $V_{S30}$ ) 作为主要指标, 有代表性的是美国 FEMA 发布的 NEHRP 推荐的新建筑抗震法规。目前  $V_{S30}$  在很多建筑规范中广泛使用 (Building Seismic Safety Council, 2003; European Committee of Standardization, 2004;

American Society of Civil Engineering (ASCE), 2010)。我国的建筑填土层一般在地表以下 20m 内所占比重较大, 由于等效剪切波速对填土层的依赖强, 当场地上填土层分布变化时, 其不确定性增大; 而且对于滨海地区, 计算深度取 20m 可能无法考虑回填土层下的海泥和沉积土形成的软弱层的影响, 进而影响场地判定结果。随着我国经济的发展, 建筑结构类型变化很大, 超高层建筑、大跨度桥梁日益增多, 这些结构占地大、自振周期长, 所涉及的场地条件很可能有较大的差别。在抗震设防时, 仅用 20m 以内的等效剪切波速对场地进行分类, 并确定设计地震动反应谱, 存在较大的不确定性。为充分利用现有的钻孔波速测试资料, 也为了与国际研究现状接轨, 开展  $V_{S30}$  估算模型研究更具有实用性。

### 3 $V_{S30}$ 估算模型

当钻孔测井深度小于 30m 时如何获得  $V_{S30}$  的信息, 针对这个问题国内外众多学者进行了研究, 并尝试给出多种不同的估算模型。比较有代表性的有常速度外推模型、基于速度梯度的相关系数外推模型以及双深度参数外推模型。

#### 3.1 常速度外推模型 (BCV)

地表到深度  $d$  的平均剪切波速  $V_{sd}$  的计算公式为:

$$V_{sd} = d/t(d) \quad (1)$$

其中, 到深度  $d$  处的走时  $t(d)$  为:

$$t(d) = \int_0^d \frac{dz}{V_s(z)} \quad (2)$$

式中,  $d$  通常是指速度模型底部的深度,  $V_s(z)$  是指某土层的剪切波速度。

如果钻探测井深度仅达到了  $d$  (小于 30m), 30m 等效剪切波速估算值  $V_{SE30}$  可以通过以下公式进行推算:

$$V_{SE30} = 30/(t(d) + (30-d)/V_{eff}) \quad (3)$$

式中,  $V_{eff}$  为深度  $d$  到 30m 的等效速度。为了计算方便, 将钻孔最底层的波速直接按常数外推到 30m 处, 用速度模型底部速度值代替等效速度 (Kuo 等, 2011), 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, 因此该方法容易低估  $V_{eff}$ , 进而低估  $V_{S30}$ 。

#### 3.2 速度梯度外推模型

在地层结构和地层面起伏变化较小的地区, 从地表至地下层位, 土层速度梯度的变化是相对一致的, 那么,  $V_{S30}$  与不同深度的等效波速之间存在经验统计关系。通过研究发现, 不同深度处的平均剪切波速与外推  $V_{S30}$  的对数呈现较强的线性相关性。Boore (2004) 利用 (4) 式所示的某一深度处的平均剪切波速  $V_{SZ}$  和  $V_{S30}$  之间的对数线性统计关系模型建立了加州地区剪切波速经验关系:

$$\log(V_{S30}) = a_0 + a_1 \log(V_{SZ}) \quad (4)$$

式中,  $V_{SZ}$  为不同深度处的平均剪切波速;  $a_0$  及  $a_1$  为回归系数。

Boore 等 (2011) 发现, 对于一个给定深度的  $V_{SZ}$ , 由日本 KiK-net 钻孔数据得出的  $V_{S30}$  总是系统地高于加州、土耳其、欧洲等地区, 说明场地速度梯度变化是有区域差异性的, 因此用公式 (5) 中的二次回归分析获得日本地区的剪切波速经验关系:

$$\log(V_{S30}) = b_0 + b_1 \log(V_{SZ}) + b_2 (\log V_{SZ})^2 \quad (5)$$

式中;  $b_0$ 、 $b_1$  及  $b_2$  为回归系数。

本研究基于北京地区速度剖面深度至少达到 30m 的 460 个钻孔数据, 利用公式 (4) 和公式 (5) 回归分析得到深度从 5—29m 的等效波速推算  $V_{S30}$  的模型参数。

### 3.3 双深度参数模型

由于以上模型建立的局限性在于需要从大量的土层场地资料中进行回归分析, 进而得到相关系数, 这些经验模型往往可能呈现出区域独立性。所以 Wang 等 (2015) 用两个不同深度  $z_1$  和  $z_2$  的等效剪切波速为参数, 提出了一个估算  $V_{S30}$  的新方法。首先假定到深度  $z$  的剪切波速计算公式为:

$$\log V_{SZ} = \log a + b \log z \quad (6)$$

在该公式中,  $a$  和  $b$  都是回归系数, 已知在两个不同深度的平均剪切波速  $V_{SZ1}$  和  $V_{SZ2}$ ,  $z_1 < z_2$ , 带入上式,  $\log a$  和  $b$  的计算公式为:

$$\log a = \frac{\log z_2 \log V_{SZ1} - \log z_1 \log V_{SZ2}}{\log z_2 - \log z_1} \quad (7)$$

$$b = \frac{\log V_{SZ2} - \log V_{SZ1}}{\log z_2 - \log z_1} \quad (8)$$

将  $\log a$ 、 $b$  表达式带入, 则  $V_{SZ}$  的计算公式为:

$$\log V_{SZ} = \log V_{SZ2} + \frac{\log z - \log z_2}{\log z_2 - \log z_1} [\log V_{SZ2} - \log V_{SZ1}] \quad (9)$$

令  $z=30$ ,  $V_{SE30}$  可由 (9) 式算出。

经过以上 3 种估算方法得出的  $V_{SE30}$  和测量值  $V_{S30}$  之间的皮尔森相关系数  $r$  及二者的残差标准差  $\sigma_{RES}$  可由公式 (10)、(11) 计算得出:

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_i x_i \sum_i y_i}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_i x_i)^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N y_i^2 - (\sum_i y_i)^2}} \quad (10)$$

$$\sigma_{RES} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N [\log x_i - \log y_i]^2} \quad (11)$$

其中  $x_i$ 、 $y_i$  分别为估算值  $V_{SE30}$  和测量值  $V_{S30}$ 。

## 4 分析与讨论

### 4.1 常速度外推模型 (BCV)

通过 BCV 法计算北京地区的钻孔剪切速度波速, 得到 30m 深度处的等效剪切波速的估算值  $V_{SE30}$ , 将其和真实值进行比较, 绘出散点图, 并得到二者的相关系数和残差标准差, 见表 1。图 4 给出几个代表性深度的结果对比。

表 1 BCV 法  $V_{SE30}$  与  $V_{S30}$  的相关系数及残差标准差

Table 1 List of parameters (and defective standard deviation  $r$  and  $\sigma_{RES}$ ) of  $V_{SE30}$  and  $V_{S30}$  for BCV

深度/m	$r$	$\sigma_{RES}$	深度/m	$r$	$\sigma_{RES}$
6	0.830	0.104	18	0.963	0.022
7	0.860	0.089	19	0.972	0.020

续表

深度/m	$r$	$\sigma_{RES}$	深度/m	$r$	$\sigma_{RES}$
8	0.877	0.080	20	0.978	0.018
9	0.901	0.069	21	0.982	0.016
10	0.903	0.064	22	0.986	0.014
11	0.920	0.053	23	0.991	0.011
12	0.917	0.046	24	0.994	0.009
13	0.924	0.039	25	0.996	0.006
14	0.931	0.035	26	0.998	0.005
15	0.945	0.029	27	0.999	0.003
16	0.950	0.027	28	1.000	0.002
17	0.957	0.025	29	1.000	0.001

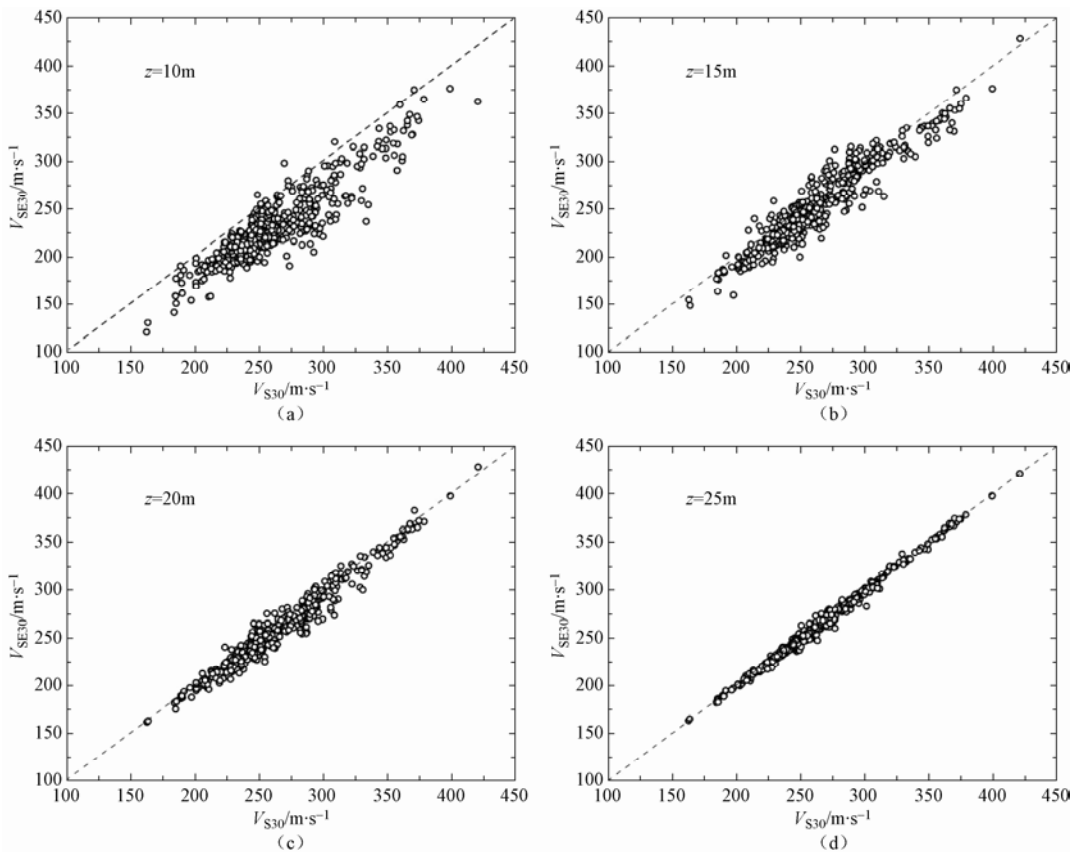
图 4 不同深度下常速度模型 (BCV) 剪切波速估算值  $V_{SE30}$  和实测值  $V_{S30}$  对比图Fig. 4 Comparison between the estimate  $V_{SE30}$  and the measured  $V_{S30}$  in BCV model at different depths

图 4 (a)、(b)、(c)、(d) 代表不同深度下常速度模型 (BCV) 剪切波速估算值  $V_{SE30}$  和实测值对比, 我们可以很容易地看出随着深度的增加,  $V_{SE30}$  和  $V_{S30}$  的相关性也在逐步提高, 且其残差明显降低, 从散点图中也可以发现数据的主体部分位于 1:1 直线的下方, 说明此模

型容易低估  $V_{S30}$ , 且测试深度  $d$  越小, 偏差越大。

#### 4.2 速度梯度外推模型

利用北京地区深度至少达到 30m 的 460 个钻孔数据, 用公式 (4) 线性回归得到从 5—29m 深度的等效波速推算  $V_{S30}$  的模型参数, 注意在使用数据进行统计回归时, 本研究将剪切波速  $V_{SZ}$  取以 10 为底的对数, 回归系数见表 2。

表 2 基于公式 (4) 的线性回归模型的回归系数

Table 2 List of coefficients  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $r$  and  $\sigma_{RES}$  of equation (4) based on Linear Regression Model

深度/m	$a_0$	$a_1$	$r$	$\sigma_{RES}$	深度/m	$a_0$	$a_1$	$r$	$\sigma_{RES}$
5	0.847	0.696	0.728	0.045	18	0.100	0.981	0.973	0.015
6	0.680	0.766	0.776	0.041	19	0.089	0.983	0.977	0.014
7	0.562	0.814	0.812	0.038	20	0.074	0.988	0.982	0.012
8	0.478	0.847	0.840	0.035	21	0.060	0.991	0.985	0.011
9	0.399	0.878	0.867	0.033	22	0.050	0.994	0.988	0.010
10	0.340	0.901	0.886	0.030	23	0.042	0.995	0.991	0.009
11	0.290	0.919	0.904	0.028	24	0.034	0.997	0.993	0.008
12	0.242	0.937	0.919	0.026	25	0.028	0.998	0.995	0.006
13	0.196	0.954	0.931	0.024	26	0.023	0.998	0.997	0.005
14	0.161	0.966	0.943	0.022	27	0.017	0.998	0.998	0.004
15	0.133	0.975	0.953	0.020	28	0.011	0.999	0.999	0.003
16	0.118	0.978	0.960	0.018	29	0.005	1.000	1.000	0.001
17	0.108	0.980	0.967	0.017					

从表 2 可以看出随着深度的增加,  $V_{S30}$  估算值和测量值的相关性系数有所提高, 当深度大于 10m 时尤为明显。和 BCV 方法得出的结果 (表 1) 相比, 在 10m 深度内二者相关性和残差都偏大, 但是在 10m 以后, 速度梯度外推模型的  $r$  值比 BCV 得到的值要大, 且其残差明显降低。

为了进一步提高皮尔森相关系数  $r$ , 降低残差值, 我们对北京地区钻孔剪切波速带入公式 (5), 进行了二次回归分析, 得出回归参数, 见表 3。

表 3 基于公式 (5) 的二次回归模型的回归系数

Table 3 List of coefficients  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $r$  and  $\sigma_{RES}$  of equation (5) based on Quadratic Regression Model

深度/m	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$r$	$\sigma_{RES}$	深度/m	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$r$	$\sigma_{RES}$
5	3.487	-1.672	0.530	0.734	0.044	12	2.403	-0.926	0.401	0.920	0.026
6	4.280	-2.442	0.714	0.783	0.041	13	2.079	-0.663	0.347	0.932	0.024
7	4.603	-2.763	0.791	0.820	0.037	14	1.868	-0.496	0.312	0.943	0.022
8	4.344	-2.553	0.747	0.846	0.035	15	1.768	-0.420	0.297	0.953	0.020
9	3.876	-2.162	0.664	0.871	0.032	16	1.682	-0.352	0.283	0.961	0.018
10	3.357	-1.724	0.570	0.890	0.030	17	1.567	-0.258	0.262	0.967	0.017
11	2.850	-1.297	0.479	0.906	0.028	18	1.451	-0.162	0.241	0.973	0.015

续表

深度/m	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$r$	$\sigma_{RES}$	深度/m	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$r$	$\sigma_{RES}$
19	1.246	0.007	0.206	0.978	0.014	25	0.081	0.953	0.009	0.995	0.006
20	0.949	0.251	0.155	0.982	0.012	26	-0.013	1.027	-0.006	0.997	0.005
21	0.670	0.480	0.107	0.985	0.011	27	-0.031	1.038	-0.008	0.998	0.004
22	0.477	0.636	0.075	0.988	0.010	28	-0.032	1.035	-0.007	0.999	0.003
23	0.338	0.747	0.052	0.991	0.009	29	-0.003	1.006	-0.001	1.000	0.001
24	0.191	0.866	0.027	0.993	0.008						

和线性回归模型相比,其相关性系数  $r$  值在深度 10m 内有了比较明显的提高,在 10m 以后的改善则不明显,且残差的变化也不明显,这一结果表明二次回归分析在速度模型的浅部对  $V_{S30}$  的估算情况做出了改善,在 10m 以后基本上和线性回归分析无差别。

为了进一步直观地显示回归效果,绘制深度为 10m、15m、20m、25m 的  $V_{SZ}$  和  $V_{S30}$  的对数散点图,见图 5。

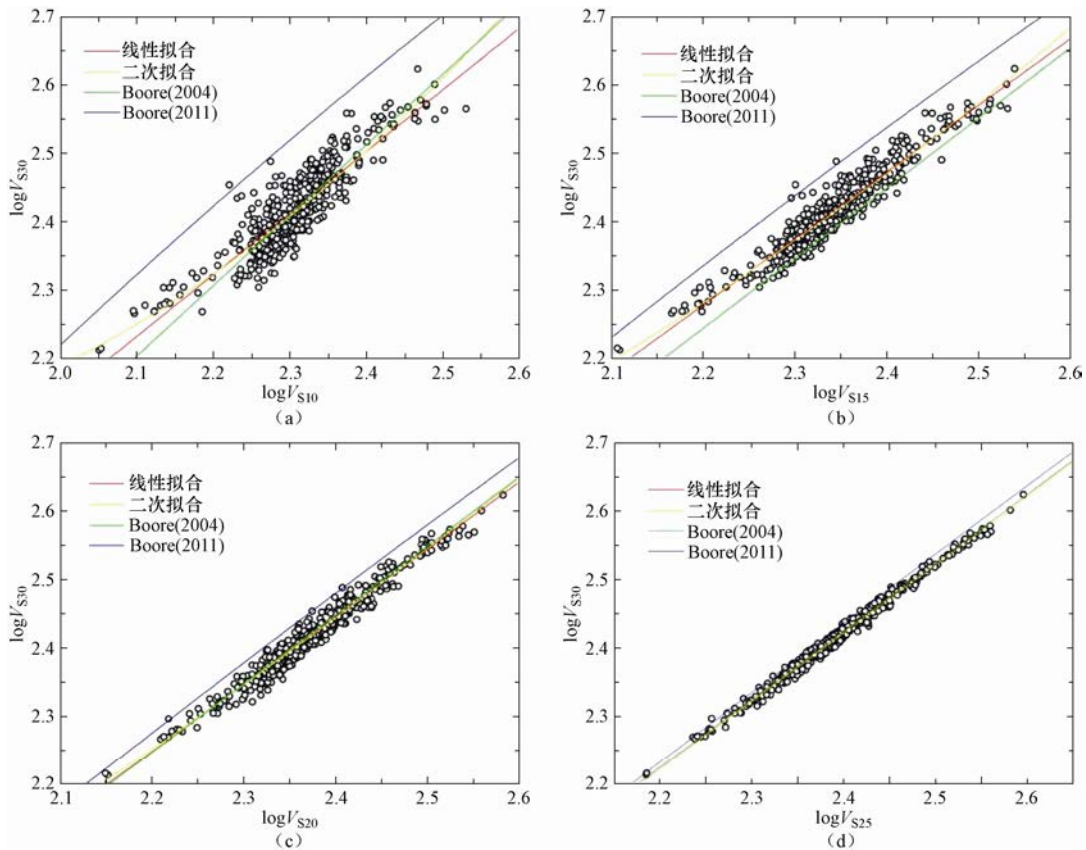


图 5 不同深度下北京平原及 Boore (2004) 加州和 Boore 等 (2011) 日本地区数据回归分析图

Fig. 5 Regression analysis based on the data of Beijing plain area, California (Boore, 2004) and Japan (Boore et al., 2011) at different depths



图 5 (a)、(b)、(c)、(d) 分别代表不同深度的北京平原地区数据回归分析 (线性 and 二次) 及 Boore (2004) 得出的加州地区和 Boore 等 (2011) 得出的日本地区回归参数情况。Boore (2004) 加州地区的经验公式除了在某些地区低估北京地区的实际  $V_{S30}$  值, 其总体上与北京地区的回归情况较为符合, 而 Boore 等 (2011) 在日本地区得到的经验公式总是系统性地高于北京地区, 说明其会高估北京地区的  $V_{S30}$  值, 推测这一结果的出现与数据点所在位置的地质条件关系密切, 日本 KiK-net 台站一般位于基岩和类基岩场地上, 而北京平原区的钻探场地一般位于下覆沉积层的人口聚集区。

### 4.3 双深度参数模型

由 Wang 等 (2015) 提出的双深度参数模型可知当深度  $z$  为 30m, 其剪切波速  $V_{S30}$  的计算公式为:

$$\log V_{S30} = \log V_{SZ2} + \frac{\log z - \log z_2}{\log z_2 - \log z_1} [\log V_{SZ2} - \log V_{SZ1}] \quad (12)$$

分档计算北京地区的钻孔剪切波速, 分为 5m、10m、15m、20m、25m 中两两不同的 10 个深度组合, 用公式 (12) 进行计算, 然后分析  $V_{SE30}$  和  $V_{S30}$  的相关性, 结果见表 4。图 6 给出几个代表性深度的结果。

表 4 Wang 等 (2015) 计算的  $V_{SE30}$  和  $V_{S30}$  相关性及其残差标准差

Table 4 List of coefficients and defective standard deviation  $r$  and  $\sigma_{RES}$  of  $V_{SE30}$  and  $V_{S30}$  from Wang et al. (2015)

$(z_1, z_2)$	$r$	$\sigma_{RES}$	$(z_1, z_2)$	$r$	$\sigma_{RES}$
(5, 10)	0.876	0.052	(10, 20)	0.977	0.016
(5, 15)	0.947	0.03	(10, 25)	0.995	0.008
(5, 20)	0.978	0.018	(15, 20)	0.975	0.016
(5, 25)	0.995	0.009	(15, 25)	0.995	0.007
(10, 15)	0.943	0.025	(20, 25)	0.994	0.008

由图 6 左图及中间图可知, 当常速度梯度外推模型的深度取值与双深度参数模型的深度  $z_1$  和  $z_2$  的平均值相同时, 后者相关性高于前者, 且残差标准差更小, 说明后者的拟合效果更好。

由图 6 中间图及右图, 可以发现对于双深度参数模型拟合效果来说: 随着深度参数 ( $z_1, z_2$ ) 中的一个或者两个增加时, 皮尔森相关系数  $r$  增加, 残差减少; 当深度参数 ( $z_1, z_2$ ) 中的一个或者两个接近 30m 时, 皮尔森系数增加最快, 残差明显减少。

## 5 结论

本文利用北京地区的钻孔测井资料, 通过常速度模型、速度梯度模型和双深度参数模型方法建立了北京地区钻孔  $V_{S30}$  外推模型, 并将模型结果进行了分析对比。结果显示:

(1) 利用相关性统计的方法综合考虑了研究区域内速度梯度的变化, 此模型是对研究区大量的钻孔测井资料进行回归分析得到的, 体现了研究区剪切波速度随深度的变化规律性, 得到的  $V_{S30}$  估算结果明显优于常速度外推模型。

(2) 利用 Wang 等 (2015) 提出的新方法, 随着深度参数 ( $z_1, z_2$ ) 中的一个或者两个接

近 30m, 皮尔森系数增加, 且当  $z_2$  与速度梯度模型中的  $z$  取相同值时, 该方法的皮尔森系数高于速度梯度模型, 这证实了该方法的可靠性, 说明用两个深度档的剪切波速估算  $V_{S30}$  比单一深度值对模型的约束更好。该方法的优势还体现在模型无区域性差异, 且不需要数据集拟合模型参数, 仅根据单个钻孔两个不同深度的等效剪切波速, 即可推算出  $V_{S30}$ , 方法简便, 可操作性更强。

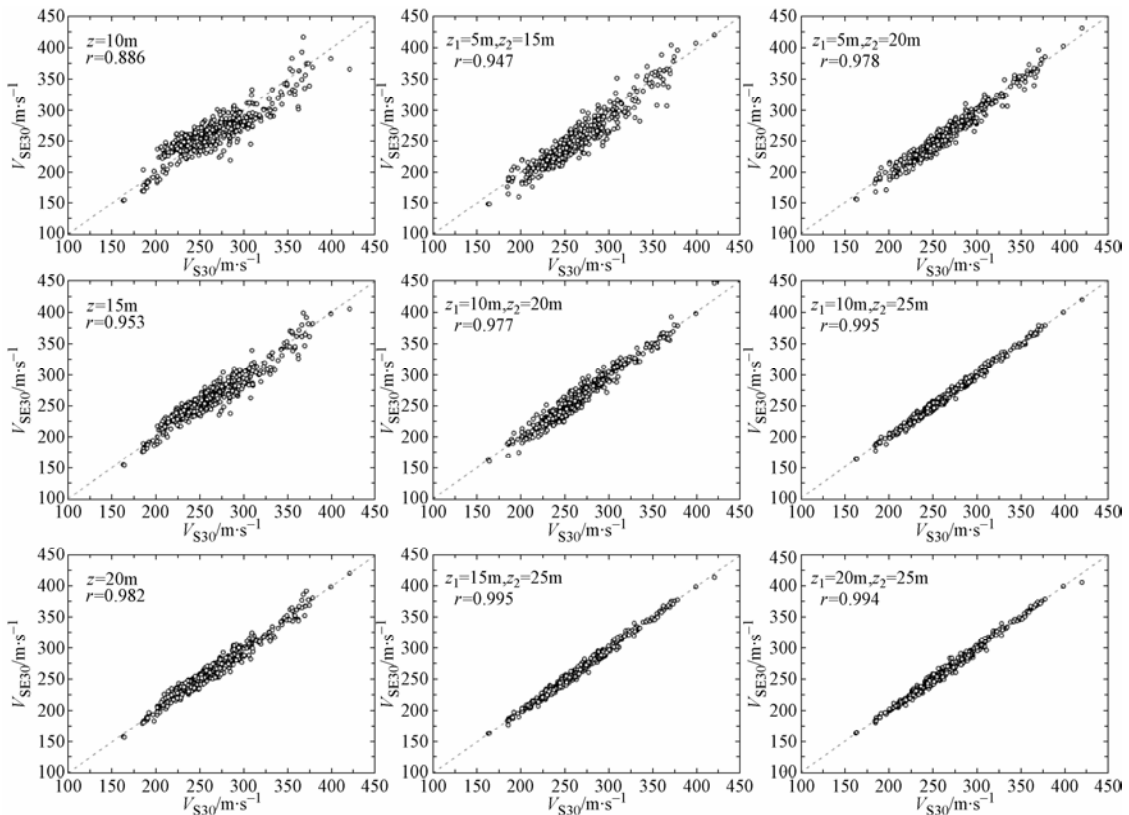


图 6 速度梯度模型线性回归分析 (左图) 及 Wang 等 (2015) 模型 (中及右图) 得出的  $V_{S30}$  和  $V_{SE30}$  对比图

Fig. 6 Correlations between  $V_{S30}$  and  $V_{SE30}$  using method of velocity gradient linear regression model (left column) and Wang et al. (2015) method (middle and right column), respectively

(3) 从上述几个  $V_{S30}$  外推模型的分析结果来看, 常速度外推模型方法简单, 但因为没考虑速度梯度变化的趋势, 所以其计算结果偏低, 结果偏于保守; 采用速度梯度的外推模型, 由于不同地区的土层结构存在差异, 即速度梯度变化不同, 使得模型具有区域性, 从大量钻孔数据得出的北京地区经验关系模型的拟合效果很好, Boore (2004) 所得加州模型与北京地区相近, Boore 等 (2011) 得出的日本地区的经验关系总是系统性地高于北京地区, 说明等效剪切波速的分布具有区域性差异。Wang 等 (2015) 提出的新方法本质上是两个深度之间基于直线斜率的对数域里的线性外推函数, 不需要通过大量实测场点数据获得经验关系, 不具有区域性差异, 而且其估算结果的精确性有了很大的提高, 此方法

具有推广价值。

## 参考文献

- 薄景山, 李秀领, 李山有, 2003a. 场地条件对地震动影响研究的若干进展. 世界地震工程, **19** (2): 11—15.
- 薄景山, 李秀领, 刘德东等, 2003b. 土层结构对反应谱特征周期的影响. 地震工程与工程振动, **23** (5): 42—45.
- 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.
- 胡聿贤, 孙平善, 章在墉等, 1980. 场地条件对震害和地震动的影响. 地震工程与工程振动, (试刊): 34—41.
- 黄雅虹, 吕悦军, 彭艳菊, 2009. 国内外不同抗震设计规范中场地分类方法的内在关系研究. 震灾防御技术, **4** (1): 80—90.
- 李小军, 彭青, 2001. 不同类别场地地震动参数的计算分析. 地震工程与工程振动, **21** (1): 29—36.
- 李小军, 2006. 工程场地地震安全性评价工作及相关技术问题. 震灾防御技术, **1** (1): 15—24.
- 吕悦军, 彭艳菊, 兰景岩等, 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.
- 彭艳菊, 吕悦军, 黄雅虹等, 2009. 工程地震中的场地分类方法及适用性评述. 地震地质, **31** (2): 349—362.
- 喻焜, 李小军, 2015. 四川、甘肃地区  $V_{S30}$  经验估计研究. 地震工程学报, **37** (2): 525—533.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010. GB50011—2010 建筑抗震设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社.
- Abrahamson N., Silva W., 2008. Summary of the abrahamson & silva NGA ground-motion relations. Earthquake Spectra, **24**(1): 67—98.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), 2010. Standards ASCE/SEI 7—10 Minimum design loads for buildings and other structures. Reston, Virginia: ASCE, 650.
- Boore D. M., 2004. Estimating  $\bar{V}_s$  (30) (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (Depth < 30 m). Bulletin of the Seismological Society of America, **94**(2): 591—597.
- Boore D. M., Atkinson G. M., 2008. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. Earthquake Spectra, **24**(1): 99—138.
- Boore D. M., Thompson E. M., Cadet H., 2011. Regional correlations of  $V_{S30}$  and Velocities averaged over depths less than and greater than 30 meters. Bulletin of the Seismological Society of America, **101**(6): 3046—3059.
- Borcherdt R. D., 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). Earthquake Spectra, **10**(4): 617—653.
- 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.
- Campbell K. W., Bozorgnia Y., 2008. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. Earthquake Spectra, **24**(1): 139—171.
- Chiou B. S. J., Youngs R. R., 2008. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion

- and response spectra. *Earthquake Spectra*, **24**(1): 173—215.
- 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).
- Idriss I. M., 2008. An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, **24**(1): 217—242.
- Kuo C. H., Wen K. L., Hsieh H. H., et al., 2011. Evaluating empirical regression equations for VS and estimating VS30 in northeastern Taiwan. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(3): 431—439.
- Wald D. J., Allen T. I., 2007. Topographic Slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**(5): 1379—1395.
- Wang H. Y., Wang S. Y., 2015. A new method for estimating  $V_S(30)$  from a shallow shear-wave velocity profile (depth < 30 m). *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105**(3): 1359—1370.
- Xie J. J., Zimmaro P., Li X. J., et al., 2016.  $V_{S30}$  empirical prediction relationships based on a new soil-profile database for the Beijing plain area, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **106**(6): 2843—2854.

## Applicability of $V_{S30}$ Estimation Models for the Beijing Plain Area

Jiang Zhijie, Peng Yanju, Fang Yi, Lv Yuejun, Xiu Liwei and Huang Shuai

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

**Abstract** Using three models *i.e.* bottom-layer constant velocity model, velocity gradient model and the extrapolation model with the travel-time averaged shear-wave velocities at two different depths, we investigated the data from 460 boreholes in Beijing plain area in which the shear-wave velocity profile reaches over 30m. Through the detailed research, we found that the last method can estimate  $V_{S30}$  with high accuracy, which does not need any regression analysis to derive empirical relations from a large number of data. Meanwhile, this method is not regionally dependent, and has a remarkable improvement in the accuracy. Therefore, it is potentially useful for many parts of the world including Beijing. It provides a basis for site classification, and then can extend the application to evaluation of site effect in a rapid assessment of earthquake damage, thus being worth to be extensively applied.

**Key words:** Equivalent shear wave velocity; Site condition; Extrapolation models of  $V_{S30}$ ; Beijing plain area