

四川、甘肃地区 V_{S30} 经验估计研究^①

喻 焯¹, 李小军²

(1.中国地震局地壳应力研究所,北京 100085; 2.中国地震局地球物理研究所,北京 100081)

摘要:目前我国建筑工程抗震设计规范中对于工程场地条件的判断依据主要是地表以下 20 m 深度范围内土层的等效剪切波速,简称 V_{S20} 。相比之下,国外应用较广的是地表以下 30 m 深度范围内的等效剪切波速,简称 V_{S30} 。这种差别导致国内科研工作者在应用国外的地震工程、工程抗震模型时经常遇到对场地条件描述不准确的困难。为了解决这个问题,本文根据 147 个四川、甘肃地区国家强震动台站 20 m 左右深度的钻孔剪切波速数据,利用延拓方法、场地分类统计方法以及基于地形特征的 V_{S30} 估计方法研究各台站 V_{S30} 与 V_{S20} 的经验关系,对比发现基于速度梯度延拓的结果最为可取。参考国际上通用的 Geomatrix Classification 场地分类标准,最终得到四川、甘肃地区各类场地的平均 V_{S30} ,此结果可以为缺乏钻孔数据的工程场地的 V_{S30} 估计提供参考。

关键词: 场地反应; 场地分类; V_{S30} 估计

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0525-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0525

Empirical Estimation of V_{S30} in the Sichuan and Gansu Provinces

YU Tian¹, LI Xiao-jun²

(1.*Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China;*

2.*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

Abstract: At present, Chinese seismic design codes for engineering projects classify site conditions primarily by their equivalent shear wave velocity at a depth of 20 m below the surface, which is referred to as V_{S20} . However, the parameter widely used abroad in seismic design codes is the equivalent shear wave velocity at a depth of 30 m below the surface, V_{S30} . This non-standardized parameter has led to inaccurate site condition descriptions when foreign models for earthquake engineering or seismic resistance are applied to Chinese engineering projects. Several methods have been used in an attempt to estimate V_{S30} from site profiles with 20 m-deep boreholes for strong motion stations located in the Sichuan and Gansu Provinces. These estimation methods include: extrapolation (constant and gradient), Geomatrix site classification correlation via shear-wave velocity, and remote sensing (terrain and topography). In this study, gradient extrapolation was the preferred estimation method for sites with shear-wave velocity profile data. When combined with Geomatrix site classification, the average V_{S30} for each site was derived from 147 estimated V_{S30} . Thus, gradient extrapolation followed by Geomatrix site classification can be used to assign a V_{S30} to a site without 30 m-deep borehole data, unifying global engineering design codes.

Key words: site response; site classification; estimation of V_{S30}

① 收稿日期: 2015-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308509, 51278469); 中国地震局地壳应力研究所基本科研业务费专项资金项目(ZDJ2013-04)

作者简介: 喻焯(1983-), 男, 助理研究员, 主要从事岩土工程及地震工程等方面的科研. E-mail: yutian0721@yeah.net

0 引言

我国建筑抗震设计规范^[1]中场地分类判别标准主要依靠两个参数:一是覆盖层厚度,普遍取地面至剪切波速大于 500 m/s 且其下卧土层剪切波速均不小于 500 m/s 的土层顶面的距离;二是覆盖层厚度和 20 m 两者较小值深度范围内的等效剪切波速。因此,我国许多工程场址工程勘察钻孔深度均在 20 m 以下,等效剪切波速一般取 V_{s20} 。相比之下,美国、欧洲、新西兰等国家和地区^[2-3]的抗震设计规范以及地震工程专业普遍用 30 m 深度的等效剪切波速(V_{s30})判断工程场地的类别。这种差别导致我国地震工程以及工程抗震等专业的科研人员在应用国外抗震设计规范和地震动估计模型时极不方便。例如:我国建筑抗震设计规范依据 V_{s20} 分为四类,而美国建筑抗震设计规范依据 V_{s30} 分为五类;我国地震动估计一般只分基岩和土层两种场地类型^[4-5],而美国地震动估计的模型全部采用 V_{s30} 。因此,如何将 V_{s20} 转换成 V_{s30} 是一个亟待解决的问题。

目前,国内主要是基于大量剪切波速与深度的数据,建立数学模型以统计的手段获取剪切波速与

钻孔深度的经验关系^[6-7]。基于浅钻孔数据估计大于钻孔深度的等效剪切波速成果较少。本文为研究 V_{s20} 与 V_{s30} 的经验关系,收集四川和甘肃地区土层场地强震动台站的钻孔数据。2008 年我国强震动台网正式运行以来,四川和甘肃地区建设了数百个强震动观测台站获取数字强震动记录^[8-9],其中有 147 个为土层场地强震动台站,图 1 展示了这 147 个台站的位置。参考我国建筑抗震规范要求,大部分土层场地强震动台站的钻孔深度均小于 20 m,小部分台站由于覆盖土层很薄,钻孔深度甚至小于 10 m。本文拟基于这些强震动台站的钻孔数据,利用延拓方法、场地分类统计方法以及基于地形特征 V_{s30} 估计方法研究 V_{s20} 与 V_{s30} 的经验关系。通过各种方法的结果对比分析发现速度梯度延拓方法的结果最为可取,依据该方法的结果统计得到了四川、甘肃地区基于 Geomatrix Classification 场地分类标准的各类场地的平均 V_{s30} 。对于没有钻孔数据的场地,可以依据场地的地形地貌条件判断其 Geomatrix Classification 类别,进而估计其 V_{s30} 。

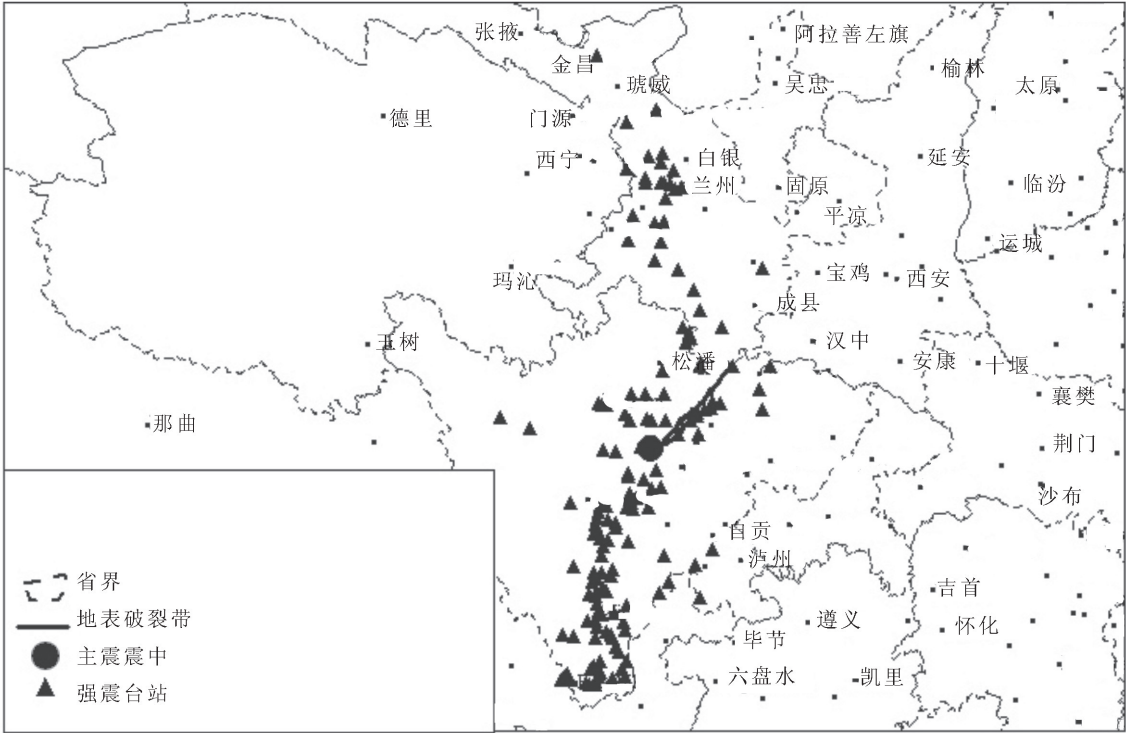


图 1 本文所用强震台站分布图

Fig.1 Distribution of strong-motion stations used in the study

1 延拓方法

延拓方法是根据钻孔剪切波速数据,基于一些

经验的假定或模型,得到经验的剪切波速剖面以计算等效剪切波速值的方法。主要有两种:一是简单

延拓,另一种是速度梯度延拓。

1.1 简单延拓

简单延拓假定:从钻孔的底部至 30 m 深度的介质与孔底一致,即从底部至 30 m 的剪切波速等于孔底层的剪切波速,从而构造经验的剪切波速剖面,计算 V_{S30} 。这里定义基于简单延拓方法得到的 V_{S30} 为 $V_{S30Profile}$ 。

$$V_{S30profile} = 30/tt(30)$$

(1)

$$tt(30) = \int_0^{30} \frac{dZ}{V_s(Z)}$$

(2)

其中, $V_s(Z)$ 为 Z m 深处的土层剪切波速。

一般情况下,深度越大的土层剪切波速应该呈递增的趋势。而简单延拓的假定较小地估计了孔底至 30 m 深度范围土层的剪切波速,因此简单延拓是一种保守的估计, $V_{S30Profile}$ 会小于真实的 V_{S30} 。但当钻孔深度大于或接近 20 m 时,这种估计的误差很小;而当钻孔深度小于 20 m 时,误差会很大。

由于简单延拓是基于真实钻孔数据获取等效剪切波速,以 $V_{S30Profile}$ 为估计的参考值,而将其他方法得到的结果与之对比来粗略估计方法的精度。

1.2 速度梯度延拓

速度梯度延拓假定:在某地区或地质构造相似的国家 and 地区, V_{S30} 与某一深度的等效剪切波速存在经验关系,这种经验关系可以是线性的或者高次的。它首先由 Boore 提出^[10]。为了估计美国加州 142 个钻孔深度小于 30 m 的台站的 V_{S30} , 基于 135 个钻孔深度大于或等于 30 m 的台站的钻孔数据, Boore 得到了加州地区 V_{S30} 基于速度梯度延拓的线性模型。

$$\lg(V_{S30}) = a + b\lg(V_s(d))$$

(3)

其中 $V_s(d)$ 为地表至深度为 d 的土层等效剪切波速。

Boore 的模型^[10]很好地拟合了 135 个台站真实的 V_{S30} , 因此认为其模型可以可靠地估计其他 142 个钻孔深不到 30 m 台站的 V_{S30} 。表 1 给出了 Boore 的线性模型系数及统计参数。

应用 Boore 的线性模型^[10], 对 147 个强震台站

剪切波速剖面进行线性速度梯度延拓,估计台站场地的 V_{S30} , 定义为 $V_{S30Boore}^{cal}$ 。上标 cal 的意思是基于 California 数据的线性模型。

将 $V_{S30Boore}^{cal}$ 与 $V_{S30Profile}$ 对比(见附录),发现对于钻孔深度大于 20 m 的台站, $V_{S30Boore}^{cal}$ 相对于 $V_{S30Profile}$ 低估了 0.006。但是对于钻孔深度小于 20 m 的台站, $V_{S30Boore}^{cal}$ 相对于 $V_{S30Profile}$ 低估了 14%。由于 $V_{S30Profile}$ 是对 V_{S30} 的一种保守估计。而 $V_{S30Boore}^{cal}$ 比 $V_{S30Profile}$ 更小。因此,我们认为 Boore 基于加州钻孔数据获取的线性模型不适用于我国四川、甘肃地区。

表 1 Boore 的线性模型系数及统计参数^[10]

Table 1 Coefficients and statistical parameters of Boore's linear model

d/m	a	b	σ_{in}
10	0.042 1	1.029 2	0.071 3
11	0.022 1	1.034 1	0.064 7
12	0.012 6	1.035 2	0.059 4
13	0.014 2	1.031 8	0.054 8
14	0.012 3	1.029 7	0.050 1
15	0.013 8	1.026 3	0.045 9
16	0.013 9	1.023 7	0.042 2
17	0.019 6	1.019 0	0.039 4
18	0.024 9	1.014 4	0.036 4
19	0.025 6	1.011 7	0.033 2
20	0.025 4	1.009 5	0.030 2
21	0.025 3	1.007 2	0.027 0
22	0.026 9	1.004 4	0.024 1
23	0.022 2	1.004 2	0.020 8
24	0.016 9	1.004 3	0.017 7
25	0.011 5	1.004 5	0.014 7
26	0.006 6	1.004 5	0.011 5
27	0.002 5	1.004 3	0.008 4
28	0.000 8	1.003 1	0.005 5
29	0.000 4	1.001 5	0.002 7

为了获取更好的估计结果,本文尝试性地选择了 74 个钻孔深度均超过 30 m 的日本 Kik-net 台站钻孔数据。这些台站按照 Geomatrix Classification 分类标准(见表 2)被分为 60 个基岩台站(Geomatrix Classification A 和 B)以及 13 个土层台站(Geomatrix Classification C 和 D)。

表 2 NGA 台站场地分类标准

Table 2 NGA Geomatrix classification criterion

A	岩石	仪器安装于剪切波速 $V_s > 600$ m/s 岩石 或岩石上覆盖土层厚度小于 5 m 的场地上。
B	浅(硬)土	仪器安装于岩石上覆盖土层厚度不大于 20 m 的场地上或土层内。
C	深厚窄带土	仪器安装于位于宽度不到数公里的峡谷或山谷中岩石上覆盖土层厚度不小于 20 m 的场地上或土层内。
D	深厚宽带土	仪器安装于位于宽阔山谷中岩石上覆盖土层厚度不小于 20 m 的场地上或土层内。
E	深厚软弱土	仪器安装于平均剪切波速 $V_s < 150$ m/s 的深厚土层场地上或土层内。

为了更好地拟合数据,本文做了 2 个改进:一是将线性模型改进为三次模型;二是对基岩台站和土层台站分别拟合,得到不同场地类型的模型。三次模型如下:

$$\lg(V_{S30})=C_0+C_1\lg(V_s(d))+C_2\lg^2(V_s(d))+C_3\lg^3(V_s(d))\tag{4}$$

表 3 给出了 73 个 Kik-net 台站钻孔数据基于线性模型以及三次模型拟合的系数以及统计参数。

表 3 73 个 Kik-net 台站的线性拟合和三次拟合的系数

Table 3 Coefficients of linear fitting and cubic fitting from 73 Kik-net stations

深度/m	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>C</i> ₀	<i>C</i> ₁	<i>C</i> ₂	<i>C</i> ₃	<i>σ</i> _{linear}	<i>σ</i> _{cubic}
5	1.341 2	0.562 6	1.032 0	1.392 4	−0.511 7	0.090 6	0.117 4	0.115 8
6	1.249 8	0.597 5	−1.216 8	3.837 8	−1.392 2	0.195 5	0.112 0	0.111 0
7	1.165 0	0.628 8	−1.135 1	3.607 4	−1.264 0	0.175 6	0.106 2	0.105 5
8	1.107 1	0.649 2	0.097 8	2.122 2	−0.684 6	0.102 2	0.101 8	0.101 2
9	1.000 9	0.687 8	−2.00 70	4.339 4	−1.462 1	0.192 8	0.095 6	0.095 2
10	0.905 6	0.722 3	−3.294 3	5.629 4	−1.893 5	0.241 0	0.089 6	0.089 4
11	0.811 1	0.755 9	−4.033 4	6.287 4	−2.085 9	0.259 5	0.083 7	0.083 5
12	0.730 7	0.784 0	−4.087 6	6.202 0	−2.011 6	0.246 4	0.078 4	0.078 2
13	0.646 5	0.813 2	−4.698 1	6.720 7	−2.155 0	0.259 2	0.073 2	0.072 9
14	0.570 9	0.838 9	−4.926 6	6.829 9	−2.153 2	0.255 0	0.068 1	0.067 7
15	0.501 8	0.861 7	−5.386 1	7.207 5	−2.254 7	0.263 8	0.062 7	0.062 2
16	0.440 1	0.881 6	−5.556 8	7.278 1	−2.248 0	0.260 0	0.057 9	0.057 3
17	0.382 4	0.899 9	−5.697 9	7.327 9	−2.238 1	0.256 3	0.053 3	0.052 5
18	0.331 5	0.915 6	−5.604 3	7.136 6	−2.146 0	0.243 3	0.048 9	0.048 0
19	0.284 8	0.929 6	−4.880 7	6.274 4	−1.817 7	0.202 8	0.044 5	0.043 6
20	0.244 0	0.941 5	−4.026 6	5.289 2	−1.451 1	0.158 3	0.040 4	0.039 5
21	0.205 5	0.952 5	−2.998 9	4.126 4	−1.024 3	0.107 1	0.036 2	0.035 3
22	0.172 4	0.961 6	−1.867 1	2.869 2	−0.569 6	0.053 2	0.032 3	0.031 5
23	0.142 4	0.969 5	−1.124 0	2.048 9	−0.276 8	0.019 1	0.028 8	0.028 0
24	0.115 5	0.976 3	−0.516 9	1.389 0	−0.045 8	−0.007 3	0.025 5	0.024 8
25	0.088 3	0.983 2	−0.118 4	0.958 5	0.101 7	−0.023 6	0.022 3	0.021 7
26	0.062 2	0.989 7	0.260 4	0.555 1	0.237 7	−0.038 3	0.019 4	0.018 9
27	0.041 3	0.994 3	0.278 8	0.551 7	0.227 5	−0.035 5	0.016 3	0.015 8
28	0.021 6	0.998 5	0.280 9	0.569 4	0.208 7	−0.031 5	0.013 6	0.013 3
29	0.003 3	1.002 3	0.422 7	0.443 4	0.239 1	−0.033 1	0.011 7	0.011 5

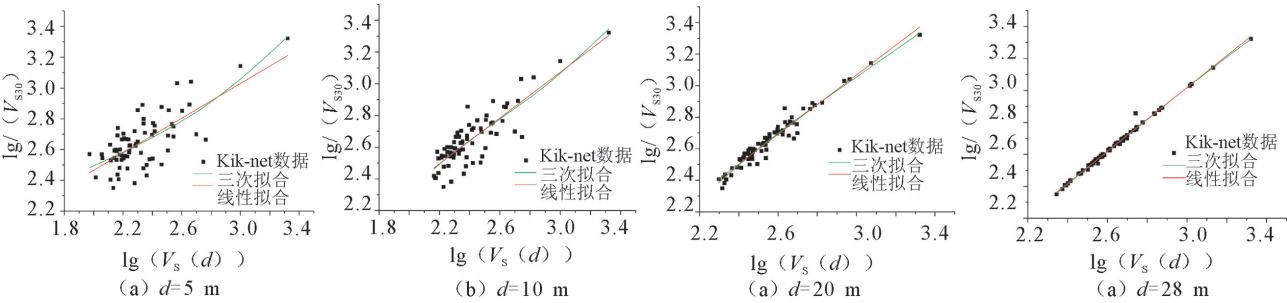


图 2 深度和速度梯度延拓模型的线性拟合和三次拟合对比

Fig.2 Comparison of linear fitting and cubic fitting of contiuation model at different depths and velocity gradients

表 4 给出了对 73 个台站进行场地分类后,分别基于一次模型和三次模型延拓结果的对比。可以看出,误差随着深度减小;三次模型相对于一次模型改

图 2 展示了 73 个 Kik-net 台站钻孔数据 5、10、20、28 m 深度的线性拟合和三次拟合的对比。由图 2 可以看出,除了 5 m 深度外,其他深度线性拟合和三次拟合基本一致。而且 5 m 深度也只有在 $V_s(d)$ 小于 150 m/s 或者大于 1 000 m/s 时拟合结果略好。因此三次拟合相对于线性拟合并不能显著地提高精度。相比于更麻烦的三次模型,本文认为线性模型更好。

善有限,并且基于场地分类的拟合方法要比无场地分类的拟合方法结果好,但改善的程度很小。本文认为不需要进行台站场地分类的线性拟合结果可

行,原因有二:一是简单、可行;二是线性拟合的结果即使是基于 10 m 深度的钻孔估计 V_{S30} ,整体误差为 0.51%,方差为 20% 左右。这种估计可以满足工程应用的精度要求。

表 4 73 个 Kik-net 台站钻孔数据的基于各类场地的线性拟合以及三次拟合结果相对于真实 V_{S30} 的对比

Table 4 Comparison of results of linear fitting and cubic fitting of varians sites at 73 Kik-net stations relative to the actual V_{S30}

深度/m	简单延拓		线性拟合		场地分类线性拟合		三次拟合		场地分类三次拟合	
	平均误差	方差	平均误差	方差	平均误差	方差	平均误差	方差	平均误差	方差
5	0.494 5	0.313 7	0.007 4	0.260 3	0.004 9	0.242 8	0.006 8	0.257 0	0.002 8	0.239 5
10	0.167 0	0.151 8	0.005 1	0.199 8	0.003 6	0.185 9	0.006 8	0.199 0	0.004 5	0.185 5
15	0.066 4	0.079 0	0.002 6	0.141 6	0.001 4	0.134 2	0.002 8	0.141 1	0.001 4	0.132 6
20	0.024 0	0.043 8	0.001 5	0.091 2	0.000 7	0.086 8	0.002 6	0.089 6	−0.000 7	0.082 7
28	0.002 9	0.024 9	0.000 5	0.031 0	0.000 3	0.030 1	0.000 4	0.030 3	0.002 1	0.029 1

注: + 表示低估, − 表示高估。

利用基于 73 个 Kin-net 强震台站钻孔数据得到的线性模型,估计我国 147 个强震台站的 V_{S30} ,定义为 $V_{S30}^{S_{kiknet}_{30Boore}}$,结果见附录。

2 基于 Geomatrix Classification 场地分类的场地平均 V_{S30} 估计

PEER 的 NGA 数据库^[11]有全球范围内 561 个强震动台站的钻孔数据。根据钻孔数据以及地形信息,按照 Geomatrix Classification 分类标准(见表 2)^[11],561 个强震动台站被分为 74 个 A 类、97 个 B 类、44 个 C 类、306 个 D 类以及 40 个 E 类台站。对每类场地的所有台站取对数平均,统计各类场地的平均 V_{S30} 。表 5 给出了 5 类场地的平均 V_{S30} 以及统计参数。

表 5 NGA 数据库强震台站基于 Geomatrix Classification 场地分类标准的各类场地的平均 V_{S30} 以及统计参数

Table 5 Mean V_{S30} and statistical parameters of various sites of strong-motion stations in NGA database based on Geomatrix Classification criterion

Geomatrix Classification	平均 V_{S30} /($m \cdot s^{-1}$)	σ /($m \cdot s^{-1}$)	N
A	660	324	74
B	424	211	97
C	338	70	44
D	274	110	306
E	191	61	40

我国 147 个台站按照 Geomatrix Classification 标准被分为 9 个 A 类、52 个 B 类、83 个 C 类以及 3 个 D 类场地。图 3 显示了 147 个台站的各类场地平均剪切波速剖面与 NGA 数据库同类场地平均剪切波速剖面的对比。从图中可以看出,四川、甘肃地区地表土层非常软,平均剪切波速为 150 m/s 左右。当深度大于 5 m 时,除了 B 类场地稍大外,四川、甘肃地区的其他类型场地的平均剪切波速与 NGA 数

据库的同类型场地的平均剪切波速非常接近。因此,根据台站的 Geomatrix Classification,判定 NGA 数据库同类场地的平均 V_{S30} 即为四川、甘肃台站的 V_{S30} 是可取的,定义为 V_{S30}^{Geo} 。这种方法的好处是即使台站没有钻孔数据,也可以根据台站的局部地形以及地质条件估计该场地的 V_{S30} 。

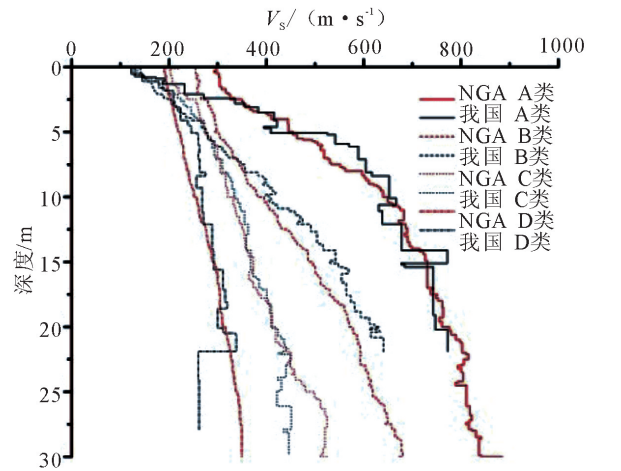


图 3 我国四川、甘肃地区与 NGA 数据库的各类场地平均剪切波速剖面对比

Fig.3 Comparison of average shear-wave velocities under various site conditions between Sichuan,Gansu provinces and NGA database

3 基于地形特征的场地分类方法

基于地形特征的场地分类方法主要是基于地形的卫星数据或实测数据进行分析。主要有两种,一种是根据地区的地形和地质相似性,对地区的 V_{S30} 做一阶近似^[12]。这种方法认为地区的地形梯度与地区的 V_{S30} 有相关性。因为岩石层厚的地区的地形梯度要大而陡,而盆地或者沉积区相对来说地形梯度要小而平。美国的 USGS 根据加州的地形模型构造了全球的 V_{S30} 与地形的经验模型,简单实用并

且可以网络操作。进入网址 http://earthquake.usgs.gov/hazard/app_s/vs30/custom.php, 选取目标区域划分网格, 即可得到网格点的 V_{S30} 。选取网格点离 147 个台站的距离小于 0.6 km, 该网格点的 V_{S30} 近似为该台站 V_{S30} , 定义为 V_{S30W} 。另一种为 Young^[13] 提出的基于 1 km 分辨率的加州地形弧度模型, 构造了 V_{S30} 与地形的经验关系。根据 Young 的模型给出 147 个台站的 V_{S30} , 定义为 V_{S30arc} 。同时 Young 考虑加州地区与我国四川、甘肃地区地形的差异, 进行了调整, 得到了新的 V_{S30} 的估计, 定义为 V_{S30R} 。

4 对比与讨论

针对我国四川、甘肃地区 147 个强震动台站, 获得 6 种 V_{S30} 的估计方法, 分别是 $V_{S30Profile}$, $V_{S_{S30R}^{KiknetBoore}}$, V_{S30geo} , V_{S30arc} , V_{S30R} 和 V_{S30W} , 结果见附录。要比较这些方法的优劣, 最好的方法是与真实的 V_{S30} 对比。由于钻孔深度的限制, 理论上无法获得真实的 V_{S30} 。因此, 本文以真实剪切波速剖面保守估计的 $V_{S30Profile}$ 以及基于我国建筑抗震设计规范场地分类标准的场地等效剪切波速 V_{Se} 为参考值, 比较这些方法的误差。表 6 给了相对于 $V_{S30Profile}$ 的平均误差和均方差 5 种其他方法估计值。从表 6 可以看出, 基于地形特征的两种 V_{S30} 估计的平均误差很大, 达到 40% 左右, 说明四川、甘肃地区与美国加州地区的地形梯度差别很大, 这种地形模型不适用四川、甘肃地区。基于 NGA 数据库 Geomatrix Classification 场地分类的统计方法估计值 V_{S30geo} , 平均误差很小, 表明 Geomatrix Classification 是一种很不错的场地分类方法, 能整体反映各类场地的平均 V_{S30} , 但是该方法的统计均方差达到 20%。因此对于少数没有钻孔资料的台站, 可以估计其 V_{S30} , 但不能对所有台站进行统一估计。

表 6 相对于 $V_{S30Profile}$, 五种其他方法 V_{S30} 估计值的平均误差以及均方差

Table 6 The mean error and mean square deviation of the five V_{S30} estimations relative to $V_{S30Profile}$

	$V_{S_{KiknetBoore}^{Kiknet}}$	V_{S30geo}	V_{S30arc}	V_{S30R}	V_{S30W}
<i>bias</i>	-0.070 4	-0.065 6	-0.318 9	-0.345 1	-0.443 4
σ	0.079 6	0.200 3	0.276 9	0.244 4	0.406 2

$V_{S_{KiknetBoore}^{Kiknet}}$ 相对于 $V_{S30Profile}$ 平均误差为 -0.07, 能适当地修正 $V_{S30Profile}$ 对 V_{S30} 保守的估计。对于钻孔深度 20 m 以下的台站, $V_{S_{KiknetBoore}^{Kiknet}}$ 估计的平均为 -0.09。这极大地改善了基于 Boore 线性模型估计的效果,

表明日本 Kik-net 强震动台站的地质条件比美国加州地区强震动台站更接近于我国四川、甘肃地区。同时估计的均方差很小, 表明对 147 个台站的估计整体上都比较接近。表 7 给出了 3 种 V_{S30} 估计方法结果相对于我国建筑抗震设计规范场地分类标准的场地等效剪切波速 V_{Se} 的平均误差和均方差。从表 7 可以看出, V_{Se} 与 V_{S30} 的估计值相差较大, 平均误差约 30%。

表 7 相对于 V_{Se} , 3 种 V_{S30} 估计值的平均误差及均方差
Table 7 The mean error and mean square deviation of the three V_{S30} estimations relative to V_{Se}

	$V_{S30Profile}$	$V_{S_{KiknetBoore}^{Kiknet}}$	V_{S30geo}
<i>bias</i>	-0.214 9	-0.298 2	-0.317 0
σ	0.286 9	0.336 8	0.440 8

根据 $V_{S_{KiknetBoore}^{Kiknet}}$ 的结果, 本文统计了基于 Geomatrix Classification 场地分类标准的各类场地的平均 V_{S30} , 见表 8。

表 8 我国四川、甘肃地区基于 Geomatrix Classification 各类场地的平均 V_{S30}

Table 8 Average V_{S30} at various sites of sichuan and Gansu provinces based on Geomatrix Classification

Geomatrix Classification	平均 V_{S30} / (m · s ⁻¹)	σ	<i>N</i>
A	553	79.23	9
B	412	69.23	52
C	353	63.72	83
D	296	72.54	3

5 总结

本文采用多种方法经验地估计了四川、甘肃地区 147 个钻孔深度小于 20 m 的强震动台站的 V_{S30} 。通过对各种方法的结果对比分析认为: 对于钻孔深度小于 20 m 的台站, 应用本文基于 73 个 Kik-net 强震动台站数据得到的速度梯度线性模型延拓估计四川、甘肃地区强震动台站的 V_{S30} 是比较可靠的, 该方法可以应用到四川、甘肃地区其他工程场地。而且, 对于没有钻孔数据的工程场地, 可以根据局部场地地形地貌条件或者利用 Google Earth 得出该场地的 Geomatrix Classification 场地类别, 进而用各类场地的平均 V_{S30} 值估计。本文模型如需拓展到我国其他地区的 V_{S30} 估计, 需要用目标地区的钻孔数据进行试验, 以判别目标地区与四川、甘肃地区土层结构的差异性对模型的影响。

参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国建设部.(GB50011-2010)建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Construction of People's Republic of China.(GB50011-2010),Code for Seismic Design of Buildings[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2010.(in Chines)
- [2] European Committee of Standardization.EN 1998 Euro code 8; Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1;General Rules,Seismic actions and Rules for Buildings[S].Landon: Taylor and Francis,1998.
- [3] Building Seismic Safety Council (BSSC).Edition NEHRP Recommended Provision for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. FEMA368/369[R].Washington D C,2001
- [4] 唐丽华,李锰,王海涛,伽师—巴楚地区中强地震加速度衰减关系[J].西北地震学报,2007,29(4):377-379.
TANG Li-hua,LI Meng,WANG Hai-tao.Research on the Acceleration Attenuation Relationship of Moderate Strong Earthquake in Jiashi—Bachu Region[J].Northwestern Seismological Journal,2007,29(4):377-379.(in Chines)
- [5] 姚凯,孙崇绍,朱珊珊,等.2008 年汶川地震后的三次强余震地表峰值加速度衰减场研究[J].西北地震学报,2012,34(1):99-104.
YAO Kai,SUN Chong-shao,ZHU Shan-shan,et al.Study on PGA Attenuation of Three Strong Aftershocks of 2008 Wenchuan Earthquake[J].Northwestern Seismological Journal,2012,34(1):99-104.(in Chines)
- [6] 李帅,赵纯青,葛鸣,喀什场地土剪切波速与土层深度经验关系[J].地震工程学报,2013,35(3):702-707.
LI Shuai,ZHAO Chun-qin,GE Ming.Empirical Relationship Between Shear-wave Velocities and Soil Depths in Kashi City [J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):702-707.(in Chines)
- [7] 薛锋,王庆良,胡亚轩,等.西安市岩土体剪切波速与土层深度关系的研究[J].地震工程学报,2014,36(2):249-255.
XUE Feng,WANG Qin-liang,HU Ya-xuan,et al.Study on the Relationship Between Soil Depth and Shear Wave Velocity of Rock and Soil Mass in Xian City[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(2):249-255.(in Chines)
- [8] 卢寿德,李小军.汶川 8.0 级地震未校正加速度记录[M].地震出版社,北京,2008.
LU Shou-de,LI Xiao-jun.Uncorrected Acceleration Records of Wenchuan 8.0 Earthquake[M].Beijing:Seismological Press,2008.(in Chines)
- [9] 李小军.汶川 8.0 级地震余震流动台站观测未校正加速度记录[M].北京:地震出版社,2009.
LI Xiao-jun.Uncorrected Acceleration Records of Wenchuan Aftershocks from Mobile Observation Stations[M].Beijing:Seismological Press,2009.(in Chines)
- [10] Boore D M.Estimating V_{S30} (or NEHRP Site Classes) from Shallow Velocity Models (Depth<30 m) [J].Bull Seism Soc Am,2004,94:591-597.
- [11] Chiou B,R Darragh,N Gregor,et al.NGA Project Strong-Motion Database[J].Earthquake Spectra,2008,24:23-44.
- [12] Wald D J,Trevor I,Allen.Review Article:Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site Conditions and Amplification[J].Bull Seism Soc Am,2007,97:1379-1395.
- [13] Yong A,Hough S E,Braverman A,et al.A Terrain-based V_{S30} Estimation Map of the Contiguous United States[J].Seismological Research Letters,2010,81(2):294.

附录 (Appendix)

台站名	钻孔深度/m	底层土层剪切波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	钻孔是否到达基岩	Geomatrix Classification	V_{se}	$V_{S30\text{Profile}}$	$V_{S30\text{geo}}$	$V_{S30\text{Boore}}^{\text{cal}}$	$V_{S30\text{Boore}}^{\text{Kiknet}}$	$V_{S30\text{arc}}$	$V_{S30\text{R}}$	$V_{S30\text{W}}$
51AXD	11.80	878	Yes	B	221	405	424	280	383	-	-	374
51AXT	12.80	510	Yes	B	225	331	424	281	376	388	547	362
51AXY	22.00	475	No	C	331	368	338	371	404	-	-	595
51BTD	22.20	436	No	C	300	334	338	-	368	547	547	540
51BTT	22.30	403	No	C	235	273	338	268	296	519	519	525
51BXY	19.80	618	Yes	B	255	318	424	288	332	519	519	760
51BXZ	18.20	658	Yes	B	297	379	424	341	394	519	519	760
51CXQ	4.90	321	Yes	A	321	321	660	-	564	402	402	360
51DCN	22.10	504	No	C	233	284	338	267	295	547	547	572
51DJA	22.00	453	No	C	242	287	338	276	304	-	-	332
51DXY	22.00	431	No	C	310	342	338	347	379	374	374	398
51DYB	15.20	539	Yes	B	288	374	424	345	418	388	388	355
51GYS	12.20	517	Yes	B	232	345	424	290	385	519	519	557
51GYZ	20.10	1207	Yes	B	290	388	424	326	366	519	519	465
51GZT	22.00	350	No	C	212	244	338	240	266	519	519	415
51GZX	22.00	325	No	C	343	337	338	373	406	402	519	431
51HDD	9.00	639	Yes	A	335	502	660	-	547	-	-	602
51HDQ	13.00	689	Yes	B	272	414	424	336	423	-	-	747
51HDX	14.50	651	Yes	B	245	362	424	297	376	-	-	719
51HLB	12.00	659	Yes	B	223	370	424	278	373	-	-	760
51HLD	9.00	579	Yes	B	270	431	424	-	471	-	-	760
51HLF	21.50	311	No	C	280	290	338	311	346	-	-	760
51HLW	12.00	564	Yes	B	282	403	424	355	449	-	-	760
51HLY	13.50	802	Yes	B	262	417	424	324	411	-	-	479
51HSD	21.00	496	No	C	294	340	338	331	367	519	519	760
51HSL	21.00	227	No	C	290	266	338	316	351	519	402	760
51HYJ	22.30	515	No	C	422	449	338	470	507	547	519	497
51HYQ	22.40	392	No	C	295	322	338	331	362	519	519	760
51HYU	20.30	677	Yes	A	376	441	660	424	469	-	-	271
51HYW	22.50	521	No	C	360	401	338	407	442	519	519	760
51HYY	19.40	515	Yes	B	374	414	424	426	475	519	519	760
51JLN	22.00	547	No	C	370	415	338	416	451	519	519	583
51JLT	15.30	520	Yes	B	225	311	424	267	337	547	547	760
51JYC	15.00	1070	Yes	B	298	466	424	357	430	497	388	311
51JYD	10.20	603	Yes	A	283	435	660	367	475	328	388	184
51JYH	22.00	633	Yes	B	257	320	424	296	326	547	547	760
51JYW	20.00	887	Yes	B	370	459	424	415	459	-	-	376
51JZB	22.00	465	No	C	286	328	338	323	354	519	519	760
51JZG	22.00	451	No	C	261	304	338	296	326	519	519	760
51JZW	22.00	607	No	C	373	428	338	422	457	519	519	760
51JZY	22.00	485	No	C	275	321	338	312	342	519	519	760
51KDG	22.00	330	No	C	246	269	338	275	303	519	519	536
51LBD	13.20	503	Yes	B	247	345	424	304	391	519	519	484
51LBH	13.20	503	Yes	B	247	345	424	304	391	519	519	559
51LDD	22.00	400	No	C	311	336	338	346	378	519	519	760
51LDJ	22.00	450	Yes	C	278	313	338	308	338	519	519	760
51LDL	22.00	365	No	C	286	308	338	318	349	519	519	760
51LDS	22.00	360	No	C	347	352	338	380	414	519	519	760
51LHT	20.50	375	No	C	307	327	338	346	387	519	519	732
51LSF	9.80	1130	Yes	B	309	605	424	-	517	547	388	760
51LSH	9.80	1660	Yes	B	430	858	424	-	649	328	547	682
51LSJ	10.70	876	Yes	A	380	598	660	498	587	374	393	363
51LXM	21.00	359	No	C	261	287	338	292	326	519	519	760
51LXS	20.20	452	No	C	269	311	338	302	341	519	519	760
51LXT	21.00	424	No	C	281	317	338	316	351	519	519	760
51LXY	20.20	257	No	C	275	269	338	308	347	-	-	760
51MCL	20.50	1050	Yes	B	359	460	424	409	453	519	519	568
51MED	16.00	941	Yes	B	344	489	424	408	475	519	519	760
51MES	12.00	482	Yes	B	302	389	424	380	473	-	-	760
51MEZ	20.10	474	Yes	B	324	363	424	364	406	519	519	760
51MNA	22.00	529	No	C	475	492	338	525	563	519	519	760
51MNC	22.00	516	No	C	409	438	338	453	490	519	547	760
51MNH	22.00	527	No	C	299	349	338	339	371	547	547	404
51MNJ	22.00	410	No	C	378	388	338	415	450	388	547	448
51MNL	22.00	500	No	C	275	323	338	312	343	519	388	419
51MNM	22.00	456	No	C	304	342	338	342	374	547	547	496
51MNZ	22.00	526	No	C	327	374	338	370	403	519	519	760
51MXD	21.00	358	No	C	238	268	338	267	299	519	519	760
51MYL	22.00	375	No	C	286	310	338	319	349	-	-	324
51MYS	22.00	415	Yes	B	263	300	424	297	327	388	547	474
51NNH	22.00	432	No	C	225	267	338	256	283	-	-	760
51MXN	21.00	494	No	C	349	387	338	391	430	519	519	760
51NNL	22.00	369	No	C	278	302	338	309	339	519	519	760

续												
51NNS	22.00	280	No	C	261	267	338	287	316	519	519	760
51PGD	22.00	380	No	C	230	265	338	260	287	-	-	688
51PGL	22.00	413	No	C	301	331	338	337	368	519	519	760
51PGQ	22.00	557	No	C	228	284	338	263	290	519	519	760
51PJD	22.00	433	No	C	319	350	338	357	389	402	497	267
51PJW	22.00	440	No	C	272	312	338	308	338	363	374	216
51PWM	25.00	753	Yes	B	323	373	424	357	376	519	519	589
51PZF	22.00	700	Yes	A	525	573	660	588	628	-	-	760
51PZT	22.00	750	Yes	A	373	448	660	427	463	-	-	760
51PZW	22.00	800	Yes	B	331	411	424	381	415	-	-	453
51QCD	20.00	893	Yes	B	308	394	424	345	386	-	-	611
51QLY	22.00	747	Yes	B	414	486	424	472	508	547	519	527
51SFB	20.00	548	Yes	B	302	355	424	338	379	519	519	476
51SMC	22.00	340	No	C	295	309	338	326	357	519	519	760
51SMK	22.00	405	No	C	346	363	338	382	416	519	519	760
51SML	22.00	395	Yes	C	313	336	338	348	380	519	519	760
51SMM	22.00	320	No	C	263	279	338	291	320	519	519	760
51SMW	22.00	405	No	C	244	281	338	276	305	519	519	760
51SMX	22.00	400	No	C	278	310	338	312	343	519	519	760
51SPA	21.00	473	Yes	C	301	342	338	338	374	519	519	527
51TQL	22.00	1066	Yes	B	427	529	424	489	526	519	519	760
51WCW	20.10	485	Yes	C	315	357	338	353	395	-	-	760
51XCC	22.00	351	No	D	251	277	274	280	309	363	388	224
51XCH	22.00	522	No	C	341	386	338	385	418	547	547	518
51XCL	22.00	504	No	C	275	324	338	313	343	547	547	348
51XCT	22.00	510	Yes	B	347	389	424	390	424	-	-	449
51XCY	21.00	358	Yes	C	217	249	338	243	274	547	547	606
51XDG	22.00	507	No	C	307	353	338	347	379	519	519	573
51XDM	22.00	700	No	C	335	405	338	384	417	519	547	760
51XJB	21.00	430	No	C	293	327	338	328	364	-	-	760
51XJD	21.00	498	No	C	297	343	338	334	370	519	519	760
51XXC	22.00	431	No	D	304	336	274	340	372	459	459	726
51YAD	22.00	721	Yes	B	185	245	424	216	240	-	-	253
51YAL	22.00	1168	Yes	B	429	544	424	497	535	519	519	372
51YAM	22.00	877	Yes	A	493	577	660	561	600	547	388	760
51YAS	22.00	694	Yes	B	352	422	424	403	437	519	547	760
51YBA	22.00	760	Yes	B	400	475	424	456	493	-	-	589
51YBG	15.10	1302	Yes	A	518	739	660	631	693	-	-	516
51YBH	22.00	566	Yes	B	303	358	424	345	377	-	-	376
51YXX	22.00	364	No	C	282	304	338	313	343	547	547	630
51YXZ	22.00	444	No	C	314	348	338	352	385	547	547	757
51YYJ	22.00	555	Yes	B	332	384	424	376	410	-	-	760
51YYM	22.00	550	No	C	293	347	338	334	365	388	547	282
51YYW	22.50	420	No	C	206	248	338	238	264	388	459	430
51ZJJ	22.30	523	Yes	B	305	354	424	348	380	519	519	760
51ZJQ	20.80	520	Yes	B	297	346	424	338	379	519	547	524
62ANY	30.00	562	No	C	384	425	338	425	425	-	-	519
62BAS	23.00	530	Yes	C	254	307	338	293	318	519	519	687
62DAT	13.50	532	Yes	B	352	432	424	438	522	388	388	348
62ERT	13.00	528	Yes	B	267	371	424	330	417	246	519	333
62GLA	30.00	523	Yes	C	190	229	338	229	229	402	402	368
62GXT	24.00	510	Yes	C	206	256	338	243	262	402	519	403
62HEP	30.00	290	No	C	222	238	338	238	238	547	519	605
62HEZ	20.00	540	Yes	B	284	338	424	318	358	-	-	589
62HJI	28.00	506	Yes	C	329	372	338	373	381	-	-	563
62JAI	30.00	540	No	C	234	282	338	282	282	388	519	269
62JCH	22.00	550	No	C	448	477	338	498	535	-	-	306
62KLE	16.00	562	Yes	B	264	351	424	311	376	519	519	339
62LJB	25.00	540	No	C	307	358	338	354	373	328	547	304
62MXT	22.00	638	Yes	C	238	301	338	275	303	402	547	378
62PAN	30.00	530	Yes	C	293	343	338	343	343	519	388	548
62PJY	30.00	284	No	C	237	249	338	249	249	-	-	320
62QCH	28.00	510	No	C	321	362	338	362	370	374	345	322
62SHW	22.00	510	No	C	342	384	338	385	419	519	519	760
62TCH	16.00	790	Yes	B	281	402	424	332	397	519	519	698
62TSH	22.00	540	Yes	C	363	408	338	409	443	547	547	574
62WUD	28.00	262	No	D	205	221	274	223	228	519	519	522
62XGU	24.00	548	Yes	C	243	298	338	285	306	519	547	325
62XHS	26.00	530	Yes	B	289	341	424	337	351	-	-	642
62XIC	30.00	506	No	C	246	284	338	284	284	388	374	356
62YGX	20.00	525	Yes	B	258	311	424	288	327	-	-	544
62YLG	12.00	810	Yes	B	335	517	424	423	513	-	-	666
62ZNI	9.00	730	Yes	B	185	387	424	-	363	519	402	760
62ZPU	20.00	516	Yes	B	367	406	424	411	456	547	519	475