

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202003008

基于BCV模型与我国规范对中美场地类别的研究*

聂利英, 帅娇娇, 林浩然, 王康, 汪基伟

(河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098)

摘要: 场地类别是重要的工程参数, 由于中国与欧美国家的场地类别划分存在很大不同, 但中美场地类别对应关系又有一定的交叉现象。通过对比中美规范, 提出我国场地类别换算 V_{s30} 的核心是需要“我国规范定义的计算深度到 30 m 之间沿深度的土层剪切波速分布模型”。然后根据目前已有钻孔深度小于 30 m 的 V_{s30} 换算公式, 选择 BCV 模型为需要模型, 并依据我国场地类别定义及参考实际工程钻孔资料, 确定模型参数取值。最后, 利用 BCV 模型得到更广义的与我国各场地类别相应的 V_{s30} 以及美国场地类别的对应关系。研究表明, 我国各场地类别与相邻场地类别之间, 其 V_{s30} 范围均出现严重的交叉、重叠现象。“在我国规范定义的计算深度到 30 m, 剪切波速大于 500 m/s 的岩层不参与我国场地类别定义, 但参与 V_{s30} 计算”与“等效剪切波速小且薄的覆盖土层会对 V_{s30} 范围造成大的影响”的双重影响, 导致我国与以美国为代表的欧美国家关于场地类别的对应关系极为薄弱。

关键词: 场地类别; V_{s30} ; BCV 模型; 剪切波速; 等效剪切波速; 覆盖土层

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0294-10

Study on the Site Classifications Between Chinese and American Codes based on the BCV Model and the Definition of Chinese Codes

NIE Liying, SHUAI Jiaojiao, LIN Haoran, WANG Kang, WANG Jiwei

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Site classification is an important engineering parameter. There are obvious differences in defined site classification between Chinese and western countries' codes. Some scholars in China have studied the corresponding relationship of site classifications between Chinese and American codes, showing a certain overlapped phenomenon, but have not clearly demonstrated it. These studies are mainly based on limited numbers of drilling data, so the results tend to rely on the quantity and the site localization of the data. In this paper, the key point for site classification in China, which is the shear wave velocity distribution of soil along the calculation depth defined in the Chinese codes to 30m, is proposed firstly by comparing the Chinese and American codes. Secondly, according to the research on the formula of VS30 by using drilling data with drilling depth less than 30m, the BCV model is selected as the key model. The model parameters are determined according to the definition of site classification of Chinese codes and the field drilling data. Finally, a more generalized VS30 corresponding

* 收稿日期:2020-03-05;修回日期:2020-07-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401807)、国家重点研发计划项目(2016YFC0402003)资助

作者简介:聂利英(1972—),女,副教授,博士。主要从事桥梁抗震和渡槽减隔震方面的研究。E-mail: nly1972@hhu.edu.cn

通讯作者:汪基伟(1962—),男,教授,博士。主要从事钢筋混凝土结构限裂配筋以及结构静动力分析研究。

E-mail: wjw2903918@126.com

to Chinese site classification and the relationships between Chinese and American site classifications are investigated and illustrated by using BCV model. The results show that there are serious overlaps of VS30 among different site classifications in Chinese codes. This demonstrates that the corresponding relationship of site classifications between Chinese and American codes is very weak. The main reasons are attributed to the contents of ‘the rock layer from the calculation depth to 30m with a shear wave velocity greater than 500m/s does not contribute to the definition of site classification in Chinese codes, but is involved in the calculation of VS30’ and ‘the lower mean shear wave velocity within the thin overlying soil obviously changes the range of VS30’.

Keywords: site classification; VS30; BCV model; shear wave velocity; the mean shear wave velocity; overlying soil

引言

局部场地条件对地震动具有显著影响,是确定抗震设计地震动时需考虑的重要因素。为了体现软硬程度不同的场地地震动特征的差异,各个国家的抗震规范均采用了宽泛的场地分类方法^[1]。J.G. Anderson等^[2]认为地表下30 m深度内的地层对所产生的地面运动的性质有相当大的影响,并且更能反映出场地的软硬程度和岩性变化情况。与其它能够详细描述场地特征参数相比较,地表下30 m深度内岩土层的平均剪切波速 V_{s30} 是一个简单的度量标准,且其获取较为方便,成本也较低^[1,3]。因此美国、欧洲和中国台湾等地区以 V_{s30} 为主要参数划分场地类别。

我国的场地类别划分与欧美国家有很大不同。《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)^[4]的场地类别划分涉及到3个参数:剪切波速为500 m/s的岩石定义界限、土层等效剪切波速 V_{se} 、场地覆盖土层厚度 d 。当所有岩层剪切波速 V_s 均大于500 m/s时,认为没有覆盖土层,为 I_0 、 I_1 类场地;当有剪切波速小于500 m/s的土层,则定义为覆盖土层,场地类别由计算深度范围内的土层等效剪切波速 V_{se} 和覆盖土层厚度 d 确定。(我国各规范相关定义不尽相同,《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010(2016版)^[5]与之完全相同;《城市轨道交通结构抗震设计规范》GB 50909—2014^[6]与《水电工程水工建筑物抗震设计规范》NB 35047—2015^[7]则略有差异)。

场地类别是地震反应谱、地震动衰减关系等研究与工程应用工程重要的参数。我国规范和欧美等国家抗震规范中场地类别划分标准的差异,影响和阻碍了我国与欧美等国家既有研究成果的

交流与借鉴。因此,我国学者对中国与以美国为代表的欧美抗震规范场地类别转换进行了一定的研究,并提出 V_{s30} 与我国场地类别近似对应的关系。周锡元等^[8]采用剪切波速为500 m/s硬岩层埋置深度分别为50 m、80 m代表II—III、III—IV分界线的平均剪切波速模型,得出 V_{s30} 与我国规范的对应关系;吕红山等^[9]利用美国几十个台站场地勘探资料,分别使用我国与美国的设计规范计算 V_{s20} (我国规范定义的最大计算深度为20 m土层平均剪切波速)和 V_{s30} ,以 V_{s20} 和 V_{s30} 作为纵横坐标分析二者分布趋势,提出 V_{s30} 与我国场地类别近似的对应关系;郭峰等^[10]以美国等国家和中国台湾地区的235个台站场地勘探资料,采用类似吕红山等^[9]研究方法,也提出 V_{s30} 与我国场地类别近似的对应关系。基于以上各研究的数据整理,对应关系见表1。从表1可见中美场地类别对应存在交叉重叠的现象。此外,李敏^[11]基于我国各地区1 130个实测钻孔数据,也对我国与美国的场地划分关系进行探讨,但是没有形成对应关系。

表1 我国学者得出的 V_{s30} 与我国场地类别的对应关系
Table 1 Corresponding relationship between VS30 and Chinese site classification summarized by Chinese scholars
单位:m/s

场地类别	I_0	I_1	II	III	IV
V_{s30} (周锡元)	—	>500	260~500	150~260	<150
V_{s30} (吕红山)	—	>510	260~510	150~260	<150
V_{s30} (郭峰)	—	>550	265~550	165~265	<165

吕红山等^[9]、郭峰等^[10]的研究是建立在一定钻孔数据之上。此类研究由于所选数据量有限且受到场地自身局域性的影响,往往会导致研究结论出现一定的偏态。对比我国规范与美国规范会发现,

我国场地类别换算成 V_{S30} 的核心问题是,如何建立“我国规范定义的计算深度(取场地覆盖层厚度和 20 m 两者的较小值)到 30 m 之间沿深度的土层剪切波速或平均剪切波速分布模型”。周锡元等^[8]曾建立了类似的平均剪切波速模型,但该模型的参数设置过于简略。

已有研究^[8-10]显示,中美场地类别对应关系存在有一定的交叉现象,但是没有深入、清晰地展现出中美场地类别对应关系的特点。本文从我国场地类别定义的角度出发,选择恰当的土层剪切波速分布模型并合理设定模型参数,分析我国场地类别的

定义与 V_{S30} 之间的关系,则可不受以往学者利用钻孔数据研究的数量局限性以及场地局域性限制,加深对我国与美国场地类别更加全面、清晰的认识。

1 中国与美国规范场地划分标准

《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)^[4]在场地类别划分时综合考虑岩石剪切波速 V_s 、土层等效剪切波速 V_{se} 和场地覆盖土层厚度 d ,并将场地划分为 I、II、III、IV 共 4 类,其中 I 类又分 I_0 、 I_1 两个亚类,见表 2。

表 2 《中国地震动参数区划图》中场地划分标准

Table 2 Site classification in seismic ground motion parameters zonation map of China

场地覆盖土层等效剪切波速 V_{se} (或岩石剪切波速 V_s)/(m·s ⁻¹)	场地覆盖土层厚度 d /m						
	$d=0$	$0<d<3$	$3\leq d<5$	$5\leq d<15$	$15\leq d<50$	$50\leq d<80$	$d\geq 80$
$V_s>800$	I_0				—		
$800\geq V_s>500$	I_1				—		
$500\geq V_{se}>250$	—		I_1			II	
$250\geq V_{se}>150$	—	I_1		II			III
$V_{se}\leq 150$	—	I_1		II		III	IV

美国抗震规范^[18]以地表以下 30 m 深度范围内土层的平均剪切波速 V_{S30} 作为场地类别划分依据,将其场地分为 A、B、C、D、E 共 5 类,见表 3。

表 3 美国规范(NEHRP)场地类别划分和参数范围

Table 3 Site classification and parameter range in NEHRP

场地类别	土层描述	V_{S30} /(m·s ⁻¹)
A	硬基岩	$V_{S30}>1\ 500$
B	岩石	$1\ 500\geq V_{S30}>760$
C	硬或非常坚硬土,大多为砾石,标准的软岩石	$760\geq V_{S30}>360$
D	硬土(砂、黏土及砾石)	$360\geq V_{S30}\geq 180$
E	土层剖面中含厚度 H 软黏土	$V_{S30}<180$

表 2 中, V_s 为岩石剪切波速,我国规范规定剪切波速大于 500 m/s 的土层为岩石层; d 为场地覆盖土层厚度,一般情况下为地面至剪切波速大于 500 m/s 的岩石层的距离,且要求此岩石层下卧各层岩石的剪切波速均不应小于 500 m/s。

土层等效剪切波速 V_{se} 与土层平均剪切波速 V_{S30} 意义一样,均代表土层平均剪切波速,主要区别

在于两者土层计算深度不同,因此可用同一公式表示:

$$\bar{V} = d_0/t \quad (1)$$

$$t = \sum_{i=1}^n (d_{(i)}/V_{s(i)}) \quad (2)$$

式中, d_0 为土层计算深度(m),当 d_0 取场地覆盖土层厚度和 20 m 两者的较小值时,即为表 2 中等效剪切波速 V_{se} ;当 d_0 取 30 m 时,即为表 3 中平均剪切波速 V_{S30} ; t 为地面至计算深度之间土层的剪切波传播时间(s); $d_{(i)}$ 和 $V_{s(i)}$ 分别为计算深度范围内第 i 土层的厚度(m)和土层剪切波速(m/s); n 为计算深度范围内土层的分层数。

由公式(1)、(2)可以看出土层平均剪切波速(或等效剪切波速)的定义,结合表 2 和表 3 场地类别的定义可以发现:若建立“我国规范定义的计算深度 d_0 到 30 m 之间沿深度的土层剪切波速分布模型”,可直接从定义角度研究我国场地类别定义与 V_{S30} 的对应关系。例如,以 I_1 类场地的定义之一“场地覆盖土层厚度 $0<d<3$ m,土层等效剪切波速 $V_{se}\leq 150$ m/s”为例分析。此定义直接提供了两个信息:其一,场地覆盖土层厚度最大为 3 m,则 3~30 m 为剪切波速大于 500 m/s 的岩石层;其二, $0<d<$

3 m 的土层等效剪切波速范围为 $V_{se} \leq 150$ m/s。如果可以合理地设定 3~30 m 岩层剪切波速沿深度分布图,则可以通过公式(1)、(2)直接计算出 V_{S30} 范围,从而建立起我国规范场地类别定义与 V_{S30} 之间清晰的对应关系,进而可以观察与美国为代表的欧美国家的场地划分关系。

2 剪切波速分布模型选取及参数设置

由于钻探年代久远、受技术限制、环境限制、预算限制或超过预先规定的速度阈值等原因^[3],在日本、美国等国家同样有大量实测钻孔深度小于 30 m 的情况。各国学者均对深度小于 30 m 钻孔资料与 V_{S30} 的换算进行相关的研究,并提出了各种公式。主要分为两大类:第一类,以深度超过 30 m 的钻孔资料统计回归 V_{S30} 预测模型,代表性的研究如 D.M. Boore 等^[3]、D.M.Boore 等^[12]、M.W.Huang 等^[13]、Z.J. Dai 等^[14]、J.J.Xie 等^[15],此类研究是基于某个国家或地区的区域性实测数据进行统计分析得来,导致此类预测模型通常具有很强的场地相关性;第二类,采用土层剪切波速 $V_{s(z)}$ 或等效剪切波速 V_{se} 沿钻孔深度呈线性分布的假定,建立 V_{S30} 预测模型,代表性的研究如公式 Ch.H.Kuo 等^[16]、H.Y.Wang 等^[17]。李敏^[11]以以上模型为研究对象,利用北京和郑州的实测钻孔资料对 5 种 V_{S30} 预测模型的准确性进行分析,发现这 5 种模型对我国不同地区有一定的适用性,但适用程度不同,所反映的精度也不相同。本文从我国场地类别定义的角度出发,分析我国场地类别的定义与 V_{S30} 之间的关系,由于我国场地类别划分涉及到剪切波速为 500 m/s 的岩石定义界限、土层等效剪切波速 V_{se} 、场地覆盖土层厚度 d ,所以采用第二类 V_{S30} 预测模型更合适本文的研究目标,因此采用 BCV 模型对中美场地类别对应关系进行展现。

BCV (Bottom constant velocity) 模型最早由 D.M.Boore^[12] 在 2004 年提出,2011 年由 Ch.H.Kuo 等^[16] 进一步对其可靠性进行分析研究后,BCV 模型开始被学者们所接受和使用。BCV 也称为常速度模型,即认为钻孔底部以下的土层剪切波速沿深度方向为常数,应用于 V_{S30} 计算,则模型如图 1 所示,即从钻孔的终孔深度 z 至 30 m 的土层剪切波速 V_s 均等于 z 处的土层剪切波速 $V_{s(z)}$ 。此时 V_{S30} 的计算

公式如下:

$$V_{S30} = \frac{30}{\Delta t_z + \frac{30-z}{V_{s(z)}}} \quad (3)$$

式中, z 为钻孔最大深度,即停孔深度; Δt_z 为剪切波从土层深度 z 处到达地表所用的时间; $V_{s(z)}$ 为土层深度 z 处的土层剪切波速。由于 z 至 30 m 的土层剪切波速为常数,所以 $V_{s(z)}$ 同时也是土层平均剪切波速。

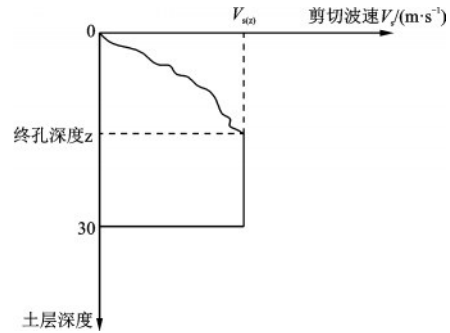


图1 BCV 模型示意

Fig.1 Schematic diagram of BCV model

对于我国以覆盖土层厚度及其等效剪切波速定义场地类别,应用 BCV 模型求 V_{S30} ,其计算模型如图 2 所示,相应的计算公式则变为:

$$V_{S30} = \frac{30}{\frac{d_0}{V_{s1}} + \frac{30-d_0}{V_{s2}}} \quad (4)$$

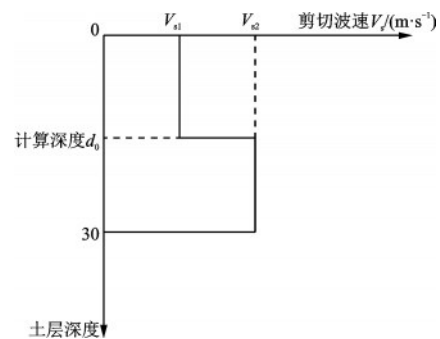


图2 根据我国规范建立的 BCV 模型示意

Fig.2 Schematic diagram of BCV model established according to Chinese codes

式中, d_0 为我国场地分类定义用的计算深度单位:m,取场地覆盖土层厚度和 20 m 的较小值; V_{s1} 为地表至计算深度 d_0 范围内的土层剪切波速(m/s); V_{s2} 为计算深度 d_0 至 30 m 范围内的土层剪切波速(m/s)。由图 2 可以看出, V_{s1} 、 V_{s2} 在 $0 \sim d_0$ 、 $d_0 \sim 30$ m

内为常数,因此同时也是土层平均剪切波速。

由于我国规范规定计算深度 d_0 取场地覆盖土层厚度与20 m的较小者,则根据我国场地类别定义,图2中土层剪切波速 V_{s1} 、 V_{s2} 取值分为以下3大类:

(1)当场地覆盖土层厚度 d 小于最大计算深度20 m时,则图2中计算深度 d_0 等于场地覆盖土层厚度 d , V_{s1} 为规范定义的土层平均剪切波速边界值; V_{s2} 则必须大于等于500 m/s。

V_{s1} 的取值:表2中(i)土层等效剪切波速为500 m/s $\geq V_{se}$ >250 m/s时, V_{s1} 分别取两个边界值500 m/s和250 m/s;(ii)土层等效剪切波速为250 m/s $\geq V_{se}$ >150 m/s时, V_{s1} 分别取两个边界值250 m/s和150 m/s;(iii)土层等效剪切波速 $V_{se}\leq 150$ m/s时, V_{s1} 取最大边界值150m/s,由《工程地质手册(第四版)》^[19]得知土层剪切波速最小的土层为软黏土、回填土以及表土,其土层剪切波速最小值为90 m/s,所以 V_{s1} 的最小边界近似取90 m/s。

V_{s2} 的取值:由场地覆盖土层厚度的定义可知,此时 V_{s2} 必须大于等于500 m/s。因此, V_{s2} 需覆盖常规情况下岩石的剪切波速范围。基岩层的剪切波速 V_{s2} 参数范围设定参考滇中引水工程实测场地的钻孔资料^[20]。滇中引水工程实测场地的钻孔资料共40例,其中有21例的场地由于土层剪切波速大于500 m/s,钻孔深度小于30 m正常停孔,因此以其为参考取值。这21例终孔剪切波速统计:8例为500~700 m/s,6例为700~900 m/s,3例为900~1 100 m/s,4例为1 100~1 300 m/s。根据我国规范对场地覆盖土层厚度的定义,图2模型中 V_{s2} 岩层剪切波速取500、800、1 000、1 200、1 500 m/s五个不同的等级。

例如土层等效剪切波速为 $V_{se}\leq 150$ m/s、场地覆盖土层厚度为 $0<d<3$ m的 I_1 类场地。在图2模型中对应的计算深度 $d_0=3$ m,0~3 m的土层剪切波速 V_{s1} 取最大值为150 m/s、最小值为90 m/s,3~30 m岩层剪切波速 V_{s2} 取500、800、1 000、1 200、1 500 m/s五个不同的等级。具体参数设置示例见表4中 V_{s1} 取最大值150 m/s时的情况。

(2)当场地覆盖土层厚度 d 大于30 m时,根据我国规范对场地覆盖土层厚度的定义可知,场地覆盖土层厚度内的土层剪切波速均小于500 m/s。我国土层的等效剪切波速计算深度 d_0 最大为20 m,因此图2模型中对应的计算深度 d_0 为20 m, V_{s1} 为我国

规范规定的土层等效剪切波速,同(1)中 V_{s1} 取值方式; V_{s2} 最大取值500 m/s, V_{s2} 需在 $V_{s1}\sim 500$ m/s内均匀取值。

例如土层等效剪切波速 $V_{se}\leq 150$ m/s、场地覆盖土层厚度为 $d>80$ m的IV类场地。在图2模型中对应的计算深度 $d_0=20$ m,0~20 m的土层剪切波速 V_{s1} 取最大值为150 m/s,最小值为90 m/s;20~30 m的土层剪切波速 V_{s2} 在 $V_{s1}\sim 500$ m/s内均匀取值,分别取150、200、300、400、500 m/s五个不同的等级。具体参数设置示例见表4中 V_{s1} 取最大值150 m/s的情况。

(3)当场地覆盖土层厚度 d 介于20 m和30 m之间时。在这种情况下可简化,即分别取场地覆盖土层厚度 $d=20$ m、 $d=30$ m,分别对应 V_{s30} 计算得到最大范围、最小范围。

例如土层等效剪切波速 $V_{se}\leq 150$ m/s、场地覆盖土层厚度 $15<d<80$ m中 $20<d<30$ m的III类场地。当场地覆盖土层厚度 $d=20$ m,图2模型中对应的计算深度 $d_0=20$ m,0~20 m的土层剪切波速 V_{s1} 取最大值为150 m/s,最小值为90 m/s;20~30 m为岩土层,岩层剪切波速 V_{s2} 取500、800、1 000、1 200、1 500 m/s五个不同的等级,此时计算出的 V_{s30} 为最大范围情况。当场地覆盖土层厚度 $d=30$ m,图2模型中对应的计算深度 $d_0=20$ m,0~20 m的土层剪切波速 V_{s1} 取最大值为150 m/s,最小值为90 m/s;20~30 m的土层剪切波速不超过500 m/s,所以土层剪切波速 V_{s2} 分别取150、200、300、400、500 m/s五个不同的等级,此时计算出的 V_{s30} 为最小范围情况。从而得到场地覆盖土层厚度 $20<d<30$ m时的 V_{s30} 范围。具体参数设置示例见表4中 V_{s1} 取最大值150 m/s时的情况。

此外对于岩石剪切波速范围为 $V_s>800$ m/s的 I_0 场地与 800 m/s $\geq V_s>500$ m/s的 I_1 场地,此时的场地覆盖土层厚度 d 为0 m,则图2模型中计算深度 d_0 为0 m,土层剪切波速仅有 V_{s2} 。对于 I_0 场地,由于地表岩层及以下岩层可为剪切波速大于800 m/s岩层,因此 V_{s2} 可取大于800 m/s的所有岩层剪切波速值,由此可知 $V_{s30}\geq 800$ m/s;对于 I_1 场地,地表为剪切波速 800 m/s $\geq V_s>500$ m/s的岩层,地表下岩层可为剪切波速大于500 m/s岩层,由此可知 $V_{s30}\geq 500$ m/s。

虽然BCV模型被认为会低估 V_{s30} 的结果^[11, 15],对于本文的研究,如上所示, V_{s2} 根据场地定义取合

表4 $V_{se} \leq 150 \text{ m/s}$ 时 V_{s1} 取最大值 150 m/s 的 BCV 模型参数设置

Table 4 Parameter setting of BCV model with a maximum value of $150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for V_{s1} when $V_{se} \leq 150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

我国场地类别			BCV 模型参数设置				
场地类别	场地覆盖土层厚度 d 的范围/m	场地覆盖土层厚度 d /m	计算深度 d_0 /m	$V_{s1}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{s2}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{s30}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
I ₁	$0 < d < 3$	1	1	150		$464 \leq V_{s30} \leq 1154$	
		3	3	150	500	$405 \leq V_{s30} \leq 789$	
II	$3 < d < 15$	3	3	150	800	$405 \leq V_{s30} \leq 789$	
		15	15	150	1 000	$231 \leq V_{s30} \leq 273$	
III	$15 < d < 80$	$15 < d < 20$	15	15	150	1 200	$231 \leq V_{s30} \leq 273$
		20	20	20	150	1 500	$196 \leq V_{s30} \leq 214$
		$20 < d < 30$	20	20	150		$196 \leq V_{s30} \leq 214$
		30	30	20	150		$150 \leq V_{s30} \leq 196$
		$30 < d < 80$	>30	20	150	150、200、300、400、500	$150 \leq V_{s30} \leq 196$
IV	$d > 80$	>30	20	150		$150 \leq V_{s30} \leq 196$	

理参数范围,在建立与 V_{s30} 关系时,则不受此弱点的限制。

3 中美规范场地类别关系分析

按照我国规范场地类别划分定义,在常规可见的土层剪切波速范围内,根据BCV模型计算得到相应的 V_{s30} 以及对应的美国规范场地类别,见表5。

由表5可以看出:

(1)依据BCV模型在常规土层剪切波速范围内,我国规范定义的各类场地换算出的 V_{s30} 的范围比较广、重叠现象严重,与美国场地类别对应的交叉性也比较强,如图3所示。其中,我国II类场地最为典型,其 V_{s30} 范围是 $150 \text{ m/s} \leq V_{s30} \leq 1125 \text{ m/s}$,对应美国B、C、D、E四个类型场地。

(2)我国规范中同一场地类别下不同的定义方式也存在 V_{s30} 范围重叠、与美国场地类别对应交叉的现象。以典型的II类场地为例,如图4所示。

如图3~4所示,我国各场地类别与相邻场地类别之间,其 V_{s30} 范围均出现严重的交叉、重叠现象。对于我国的每一个场地类别 V_{s30} 范围,美国规范各场地类别与其重叠的程度不同。以美国各场地类别的 V_{s30} 范围占我国场地类别对应的 V_{s30} 范围的比重反应这种重叠的程度。由于我国 I_0 与 I_1 类场地对应的 V_{s30} 范围分别为 $V_{s30} \geq 800 \text{ m/s}$ 和 $V_{s30} \geq 344 \text{ m/s}$,其上限值不确定,因此,本文仅II、III、IV类场地做重叠程度展示,具体结果见表6。

(3)我国场地类别定义中,等效剪切波速小且

薄的覆盖土层,也会对 V_{s30} 范围造成大的影响。例如,对比同为 I_1 场地的两个定义:在 $800 \text{ m/s} \geq V_s > 500 \text{ m/s}$ 、覆盖土层厚度为零的定义下, V_{s30} 最小值为 500 m/s ;在 $V_{se} \leq 150 \text{ m/s}$ 且覆盖土层厚度 3 m 的定义下, V_{s30} 最小值为 344 m/s 。对比两个定义下的 V_{s30} 最小值,仅 3 m 厚的场地覆盖土层,使 V_{s30} 最小值范围减小约 30% 。这是由于等效剪切波速的定义导致,见公式(1)、(2):土层越软,土层剪切波速 $V_{s(t)}$ 越小,对 t 的贡献越大,则对土层等效剪切波速 V_{se} 的影响也越大。

对比表1、表5可以看出:

(1)基于我国规范定义以及常规土层剪切波速范围,利用BCV模型得到我国各个场地类别对应的 V_{s30} 范围,与以前的研究结论^[9-10]相比均有拓宽。产生这一现象的原因是,以前学者的研究是一定数量的钻孔数据,易受到场地局域性以及数据量有限的影响。因此从定义角度,根据我国场地类别的定义,引入土层剪切波速竖向分布模式,突破以往研究样本数量^[9-10]的局限性以及场地局域性。也因此揭示出,我国场地类别与以 V_{s30} 为场地划分标准的美国场地类别之间的对应性比较弱,尤其是我国II类场地。

(2)我国 I_0 与 I_1 类场地无覆盖土层厚度的情况,以地表表层岩层剪切波速 V_s 定义场地类别。此定义方式意味着表面层到 30 m 岩层的剪切波速不参与场地类别的定义。这会导致从 V_{s30} 角度,无法界定我国的 I_0 、 I_1 类场地的情况出现。例如,假设表层 $1 \sim 3 \text{ m}$ 岩石剪切波速分别为 600 m/s 与 900 m/s ,

表5 基于BCV模型和我国规范计算相应的 V_{S30} 并确定其美国场地类别

Table 5 Corresponding V_{S30} and the American site classification determined by the BCV model and Chinese codes

土层等效剪切波速 $V_{sc}/$ ($m \cdot s^{-1}$)	我国场地类别	场地覆盖土层厚度/m	BCV模型计算得到 V_{S30} 范围/($m \cdot s^{-1}$)	对应美国规范场地类别
$V_s > 800$	I ₀	$d=0$	$V_{S30} \geq 800$	A、B
$800 \geq V_s > 500$	I ₁	$d=0$	$V_{S30} \geq 500$	A、B、C
$500 \geq V_{sc} > 250$	I ₁	$0 < d < 5$	$429 \leq V_{S30} \leq 1\ 406$	B、C
		$5 \leq d < 20$	$300 \leq V_{S30} \leq 1\ 125$	B、C、D
	II	$20 \leq d < 30$	$250 \leq V_{S30} \leq 643$	C、D
		$d \geq 30$	$250 \leq V_{S30} \leq 500$	C、D
$250 \geq V_{sc} > 150$	I ₁	$0 < d < 3$	$405 \leq V_{S30} \leq 1\ 286$	B、C
		$3 \leq d < 20$	$196 \leq V_{S30} \leq 1\ 000$	B、C、D
	II	$20 \leq d < 30$	$150 \leq V_{S30} \leq 346$	D、E
		$30 \leq d < 50$	$150 \leq V_{S30} \leq 300$	D、E
	III	$d \geq 50$	$150 \leq V_{S30} \leq 300$	D、E
$V_{sc} \leq 150$	I ₁	$0 < d < 3$	$344 \leq V_{S30} \leq 1\ 154$	B、C、D
	II	$3 \leq d < 15$	$153 \leq V_{S30} \leq 789$	B、C、D、E
		$15 \leq d < 20$	$124 \leq V_{S30} \leq 273$	D、E
	III	$20 \leq d < 30$	$90 \leq V_{S30} \leq 214$	D、E
		$30 \leq d < 80$	$90 \leq V_{S30} \leq 196$	D、E
	IV	$d \geq 80$	$90 \leq V_{S30} \leq 196$	D、E

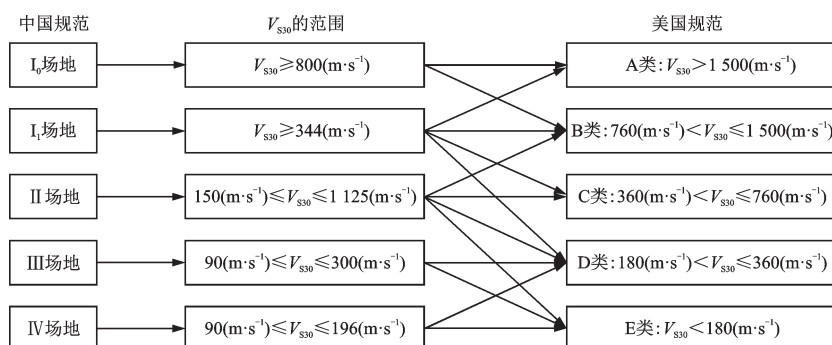


图3 基于BCV模型我国场地类别对应的 V_{S30} 范围和美国场地类别

Fig.3 V_{S30} according to Chinese site classification and corresponding American site classification obtained using BCV model

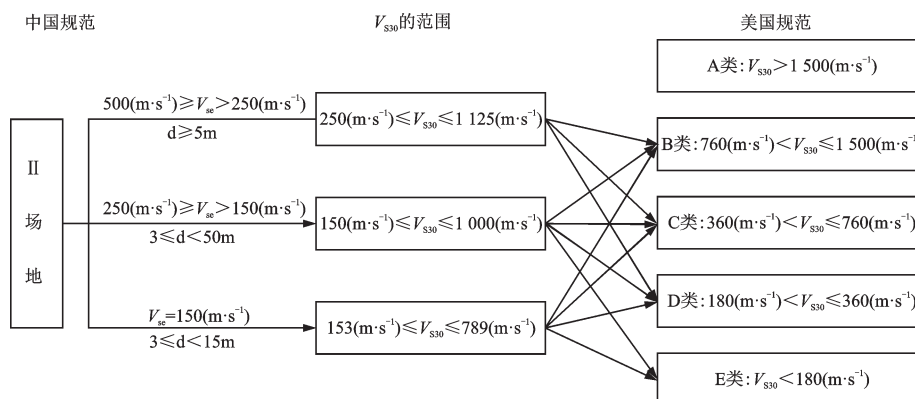


图4 我国II类场地对应的 V_{S30} 范围以及美国场地类别

Fig.4 V_{S30} of site class II in Chinese classification and corresponding American site classification

表6 我国场地类别 V_{s30} 范围在美国场地类别相对分布比例Table 6 The contribution ratio of V_{s30} range based on Chinese classification in American site category

单位:m/s

我国场地类别	V_{s30} 的范围	美国场地类别	重叠程度/%
II	$150 \leq V_{s30} \leq 1\ 125$	B类: $760 \leq V_{s30} \leq 1\ 500$	37.4
		C类: $360 \leq V_{s30} \leq 760$	41.0
		D类: $180 \leq V_{s30} \leq 360$	18.5
		E类: $V_{s30} \leq 180$	3.1
III	$90 \leq V_{s30} \leq 300$	D类: $180 \leq V_{s30} \leq 360$	57.1
		E类: $V_{s30} \leq 180$	42.9
IV	$90 \leq V_{s30} \leq 196$	D类: $180 \leq V_{s30} \leq 360$	15.1
		E类: $V_{s30} \leq 180$	84.9

3~30 m 岩石剪切波速随土层深度递增快慢不同,假设分别为 600~2 500 m/s、900~1 500 m/s 均匀变化,则 V_{s30} 分别为 1 186、1 140 m/s,此时以我国标准划分明确属于 I_1 与 I_0 两个场地,但是其 V_{s30} 数值十分接近,无法区分。

(3)我国 I_1 类场地(有场地覆盖土层的情况)与 II 类场地, V_{s30} 范围下限与其他学者研究^[9, 10]相比虽然较低,但是比较接近,这是由于下限值是由场地类别定义中最软的覆盖土层等效剪切波速决定;其上限值远高于其他学者,例如,当 BCV 模型中 V_{s2} 取 1 500 m/s 时,II 类场地 V_{s30} 范围上限达到 1 125 m/s,是其他学者研究结果的两倍,而此上限事实上还可以更大。这是由于覆盖土层厚度至 30 m 范围内的岩石层剪切波速不参与我国场地类别划分,但参与 V_{s30} 计算。而且 V_{s2} 的合理范围可涵盖所有岩石可能出现的剪切波速范围,甚至大于本文所取的岩石剪切波速上限值 1 500 m/s。

(4)III、IV 类场地基于我国规范定义与 BCV 模型得到的 V_{s30} 范围较窄,略宽于前人研究,与前人^[9-10]以及美国场地类别划分的对应性较好。这是因为我国的 III、IV 场地覆盖土层厚度大,绝大多数情况下超过 30 m。

在工程抗震中,反应谱的场地特征周期等相关参数均与场地类别划分关系密切。我国的地震衰减关系研究、反应谱研究都大量参考欧美研究成果,所用的地震波也大量借鉴美国的数据库^[21]。作为基础参数设置的场地类别,我国与美国为代表的欧美国家关于场地类别的对应关系极为薄弱、表层至 30m 范围内岩层不参与场地类别定义,从 V_{s30} 角度无法界定我国的 I_0 、 I_1 类场地。目前的这种状况,很不利于我国研究对欧美研究成果的借鉴,也不利

于形成与欧美等国研究成果之间的类比关系。

此外,我国的这种场地类别划分,导致在实际工程中,大量存在钻孔深度小于 30 m 时,由于土层剪切波速大于 500 m/s 而正常停孔的情况。此时,以我国的场地资料无法直接换算 V_{s30} ,由于我国与美国为代表的欧美国家关于场地划分的对应关系极为薄弱,也无法直接估算近似的 V_{s30} 范围。此时比较可靠的方法是借鉴已有的公式进行外推^[3, 12-17],但是需要先进行已有公式适用性的研究。

4 结 论

通过比较中美规范场地划分标准,发现根据我国规范中场地类别定义建立与美国规范场地类别定义的主要参数 V_{s30} 对应关系的核心问题是“从我国规范定义的计算深度 d_0 到 30 m 之间沿深度的土层剪切波速分布模型”。依据当前研究,选择 BCV 模型并参考实际工程参数范围,确定我国场地类别各定义下 BCV 模型参数合理取值,得出从我国场地类别定义出发的 V_{s30} 范围,并进行观察与原因探讨。主要结论如下:

(1)引入 BCV 模型,从我国场地类别的定义出发,得出我国各场地类别对应 V_{s30} 范围,此研究方法突破了以往研究样本数量的局限性以及场地局域性,因而可以观察到本文得到的 V_{s30} 范围与以前研究相比上限、下限均有拓宽,尤其是 I_1 、II 类场地的上限。

(2)从我国场地类别的定义出发得到的我国各个场地类别对应的 V_{s30} 范围,各场地类别与相邻的场地类别之间、以及同一场地类别各定义方式之间,其 V_{s30} 范围均出现严重的交叉、重叠现象;我国

的一个场地类别对应着美国的多个场地类别,以II类场地最为突出,对应着美国规范中B—E四个场地类别。

(3)以地表表层岩层剪切波速 V_s 定义我国 I_0 与 I_1 (无场地覆盖土层厚度)场地类别,“表层至30 m范围内岩层不参与我国场地类别定义,但参与 V_{s30} 计算”会导致从 V_{s30} 角度无法界定我国的 I_0 、 I_1 类场地的情况出现。类似的,“在覆盖土层厚度处到30 m范围内,剪切波速大于500 m/s岩层不参与我国场地类别定义,但参与 V_{s30} 计算”会导致 I_1 (有覆盖土层厚度)场地类别对应的 V_{s30} 范围上限值大的情况。受此因素与“等效剪切波速小且薄的覆盖土层,也会对 V_{s30} 范围造成大的影响”的双重影响,II类场地则对应 V_{s30} 范围很广,为 $150\text{ m/s} \leq V_{s30} \leq 1\ 125\text{ m/s}$,覆盖美国规范中B—E四个场地类别的情况。

(4)III、IV类场地基于我国规范定义与BCV模型得到的 V_{s30} 范围较窄,略宽于前人研究,与前人以及美国场地类别的对应性较好。这是因为我国的III、IV类场地覆盖土层厚度大,绝大多数情况下超过30 m。

以往学者对中美场地类别的对应关系进行研究,结果表明中美场地对应关系薄弱,存在交叉重叠的现象,但是没有深入、清晰的展现出中美场地类别的对应关系,也没有对中美场地差异产生的原因进行分析。本文从我国场地类别定义的角度出发,采用BCV土层剪切波速分布模型,全面深入的展示了二者之间存在的交叉性、重叠性,并分析了产生这些现象的原因。

参考文献:

[1] 姜治军. 强震动台站的场地 V_{s30} 估计及场地放大系数模型研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2017.
Jiang Zh J. Study on estimation of site V_{s30} for ground motion stations and site amplification model[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2017. (in Chinese)

[2] Anderson J G, Lee Y J, Zeng Y H, et al. Control of strong motion by the upper 30 meters[J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 1996, 86(6): 1749-1759.

[3] Boore D M, Thompson E M, Cadet H. Regional correlations of V_{s30} and velocities averaged over depths less

than and greater than 30 meters[J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 2011, 101(6): 3046-3059.

[4] 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Seismic ground motion parameters zonation map of China: GB 18306—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)

[5] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)

[6] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Code for seismic design of urban rail transit structures: GB 50909—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)

[7] 水电工程水工建筑物抗震设计规范: NB 35047—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
Code for seismic design of hydraulic structures of hydro-power project: NB 35047—2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015. (in Chinese)

[8] 周锡元, 王国权, 杨润林, 等. 1999年9月21日台湾集集地震中不同场地上峰值加速度的衰减特征[C]//大型复杂结构的关键科学问题及设计理论研究论文集. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 406-413.
Zhou X Y, Wang G Q, Yang R L, et al. The peak acceleration attenuation law at different kinds of sites in 1999 taiwan chi-chi earthquake [C]//Research Papers on Key Scientific Issues and Design Theories of Large and Complex Structures. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002: 406-413. (in Chinese)

[9] 吕红山, 赵凤新. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 67-76.
Lyu H Sh, Zhao F X. Site coefficients suitable to China site category[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 67-76. (in Chinese)

[10] 郭锋, 吴东明, 许国富, 等. 中外抗震设计规范场地分类对应关系[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(2): 63-66.
Guo F, Wu D M, Xu G F, et al. Site classification corresponding relationship between Chinese and the overseas seismic design codes[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(2): 63-66. (in Chinese)

[11] 李敏. 考虑场地地震动影响的场地分类方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局地球物理研究所, 2015.

- Li M. Study on the site classification method based on seismic site effects[D]. Harbin: Institute of Geophysics China Earthquake Administration, 2015. (in Chinese)
- [12] Boore D M. Estimating V_{s30} (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths<30m)[J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 2004, 94(2): 591-597.
- [13] Huang M W, Wang J H, Ma K F, et al. Frequency-dependent site amplifications with $f \geq 0.01$ Hz evaluated from velocity and density models in central Taiwan [J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 2007, 97(2):624-637.
- [14] Dai Z J, Li X J, Hou C L. A shear-wave velocity model for V_{s30} estimation based on a conditional independence property [J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 2013, 103(6): 3354-3361.
- [15] Xie J J, Zimmaro P, Li X J, et al. V_{s30} empirical prediction relationships based on a new soil-profile database for the Beijing plain area, China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 2016, 106(6): 2843-2854.
- [16] Kuo Ch H, Wen K L, Hsieh H H, et al. Evaluating empirical regression equations for V_s and estimating V_{s30} in northeastern Taiwan [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering. 2011, 31(3): 431-439.
- [17] Wang H Y, Wang S Y. A new method for estimating V_{s30} from a shallow shear-wave velocity profile (depth < 30m) [J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 2015, 105(3): 1359-1370.
- [18] The 2003 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures: Part I (Provisions) and Part II (Commentary) [S]. FEMA 450, Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2004.
- [19] 常士骝,张苏民,项勃,等. 工程地质手册(第四版) [M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007:278-280.
Chang Sh B, Zhang S M, Xiang B, et al. Engineering geology manual(4th edition)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 278-280. (in Chinese)
- [20] 云南省地震工程勘察院. 滇中引水工程水源及总干渠线路重点工程场地地震安全性评价报告[R]. 昆明:云南省地震工程勘察院,2015:676-916.
Yunnan Earthquake Engineering Investigation Institute. Report on seismic safety evaluation of water source and main canal line of central. Yunnan water diversion project [R]. Kunming: Yunnan Earthquake Engineering Investigation Institute, 2015: 676-916. (in Chinese)
- [21] 高孟潭,李小军,徐锡伟,等. GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京:中国标准出版社,2015:170-198.
Gao M T, Li X J, Xu X W, et al. GB 18306—2015 Teaching material for seismic ground motion parameters zonation map of China [M]. Beijing: China Standards Press, 2015:170-198. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)