

江志杰,彭艳菊,吕悦军,等.工程地震中 v_{S30} 估算模型及其应用研究进展[J].地震工程学报,2018,40(增刊):76-82.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.076

JIANG Zhijie, PENG Yanju, LÜ Yuejun, et al. v_{S30} Estimation Model and Its Application in Earthquake Engineering[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(Supp): 76-82. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.076

工程地震中 v_{S30} 估算模型及其应用研究进展

江志杰¹, 彭艳菊², 吕悦军², 黄 帅², 黄雅虹², 修立伟²

(1. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要: 在工程地震场地条件评价中, 地表以下 30 m 深度范围内的等效剪切波速(v_{S30})是一个重要的分类参数, 但由于客观条件的制约, 在很多实例中等效剪切波速度的计算深度未达到 30 m, 因此如何更好地估算 v_{S30} 就变得尤为重要。详细阐述 v_{S30} 估算模型的演化发展: 首先介绍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; 然后详述基于地质、地形坡度和地貌等替代指标的 v_{S30} 估算模型, 以及基于 HVSR 的反应谱比的估算模型。文章分析各模型的特点和适用性, 同时在此基础上简述了 v_{S30} 在现今工程地震领域的应用。

关键词: 剪切波速; 场地分类; 地震动放大效应; 地貌; 地形坡度

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)增刊-0076-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.076

v_{S30} Estimation Model and Its Application in Earthquake Engineering

JIANG Zhijie¹, PENG Yanju², LÜ Yuejun², HUANG Shuai², HUANG Yahong², XIU Liwei²

(1. Earthquake Agency of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Agency, Beijing 100085, China)

Abstract: In earthquake engineering, the equivalent shear-wave velocity to a depth of 30 m below ground surface (v_{S30}) is a significant parameter in evaluating site conditions. In many cases, however, because of the restrictions of objective conditions, shallow shear-wave velocity profiles do not extend to a depth of 30 m; therefore, it is important to find a better way to estimate v_{S30} . The development of v_{S30} estimation model is comprehensively introduced in this paper. First, three models (bottom-layer constant velocity model, velocity gradient model, and the extrapolation model with the travel-time averaged shear-wave velocities at two different depths) based on logging data are discussed, and then a v_{S30} estimation model based on some proxies and an estimation model based on horizontal-to-vertical spectral ratio response are described. Considering the characteristics and applicability of the involved estimation models, the use of v_{S30} model in modern earthquake engineering is simply described.

Keywords: shear wave velocity; site classification; ground motion amplification effect; geomor-

收稿日期: 2017-11-07

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); 北京市优秀人才项目(2015000057592G270)

第一作者简介: 江志杰(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事工程地震中场地条件评价方面的研究。E-mail: m15201530155@163.com。

通信作者: 彭艳菊(1976-), 女, 研究员, 主要从事地震活动性研究。E-mail: pengyj408@126.com。

phology; terrain slope

0 引言

在工程场地的安全性评价中,场地条件的影响越来越引起国内外学者的重视。大量的震害现象表明:建筑物的震害与其所在土层场地条件密切相关,自振周期较长的柔性结构在软土场地和深厚土层场地上的震害较重,自振周期较短的刚性结构在基岩场地和浅薄土层场地上震害较重^[1-2]。同时土层结构对反应谱特征周期的影响十分明显,在相同地震动输入的影响下,反应谱的特征周期随覆盖层厚度的增大而增加;软弱土层的存在也使反应谱的特征周期增大^[3-4]。因此研究场地条件对地震动的影响乃至震害评估意义重大。

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。Joyner等^[5]建议采用感兴趣的波的1/4波长深度内平均波速作为场地条件评价因子;Fumal等^[6]采用取周期为1s的剪切波的1/4波长深度内的平均速度和土层厚度作为场地分类指标,但因1/4波长法较复杂未得到广泛应用。Borcherdt^[7]的研究显示地面运动放大系数和地表30m深度内土层平均剪切波速具有较好的相关性;紧接着Borcherdt^[8]的研究进一步表明 v_{S30} 和场地响应之间的一致性,并提出以 v_{S30} 作为表征场地条件的基本参数,同时参考标贯击数、不排水剪强度等指标,将场地类别划分为6类。Seed等^[9]、Idriss^[10]一系列的研究也支持将 v_{S30} 作为场地条件评价指标。UBC^[11]根据 v_{S30} 将场地条件划分为5类,Euro-Code8^[12]也采用这种场地类别划分方法。我国1989版的《建筑抗震设计规范》^[13]即采用近地表15m内土层的平均剪切波速和覆盖土层厚度作为场地类别划分的指标,2001版^[14]将计算深度增加到20m。纵观国外现行的抗震规范,虽然其场地划分的方法和指标不尽相同,欧美等国家一般考虑表层30m内岩土层的等效剪切波速 v_{S30} ,其原因在于其场地工程勘察钻孔一般深度为30m或更深,而我国勘察钻孔深度一般为15m,因此在剪切波速计算深度上存在差异,但研究表明,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。自20世纪90年代以来, v_{S30} 成为评价场地条件及场地地震影响的一个重要参数。

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,比如速度测量值超过阈值等因素,剪切波速度的测量无法达到30m;一些早期的研究中浅层速度模型的计算没有达到30m,如果要使用这些数据,也需对波速外推方法进行研究。另外,对于范围较大的区域,仅需粗略评价其场地条件时,进行现场剪切波速测量是不经济的,为此,需要寻找场地剪切波速与其他参数之间的关系,以更快速更经济的方式对区域性的场地条件进行评价。本文拟从基于钻孔测试的 v_{S30} 估算模型,基于地质、地形坡度、地貌条件的 v_{S30} 估算模型以及基于地震或环境噪声的反应谱的 v_{S30} 估算模型三个方面综合回顾 v_{S30} 估算模型的研究进展,对其各自的适用性进行评价,并分析其在场地类别判定、震害快速评估及地震应急预警等方面的应用。

1 基于钻孔测井的 v_{S30} 估算模型

国内外众多学者对如何获得钻孔测井深度小于30m时 v_{S30} 的信息进行了研究,尝试给出了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。

1.1 常速度外推模型

如果钻探测井深度仅达到了 d (小于30m),可以通过下式进行推算:

$$v_{S30} = 30 / [tt(d) + (30 - d) / v_{eff}] \quad (1)$$

式中: d 为钻孔深度,单位为m; $tt(d)$ 为剪切波速走时,单位为s; 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的值代替等效速度,但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,该方法容易低估 v_{eff} ,进而导致低估模型底部速度平均值。测试深度 d 越小,偏差越大。

1.2 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,因此提出了对数线性 v_{S30} 外推方法。Boore^[15]建立了

式(2)所示 v_{S30} 和 v_{SZ} 之间的对数线性关系模型:

$$\lg(v_{S30}) = a_0 + a_1 \lg(v_{SZ}) \quad (2)$$

利用加州地区速度深度至少达到 30 m 的 135 个钻孔数据回归得到 10~29 m 深度的等效波速推算 v_{S30} 的模型参数。

之后 Boore^[16] 发现, 对于一个给定深度的 v_{SZ} , 由 KiK-net 钻孔数据得出的 v_{S30} 总是高于加州、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, 基于此, 提出了一个适用于日本地区的经验公式:

$$\lg(v_{S30}) = b_0 + b_1 \lg(v_{SZ}) + b_2 (\lg v_{SZ})^2 \quad (3)$$

式中: v_{SZ} 为深度为 z 处的等效剪切波速。与常速度外推模型相比, 速度梯度模型可减小估计值的不确定性。Boore 证明使用 v_{S30} 和浅层速度模型的相关性的方法比常速度外推模型得到的结果偏差明显降低。

1.3 双深度参数模型

Wang 等^[17] 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:

$$\lg v_{SZ} = \lg v_{SZ2} + \frac{\lg Z_2 - \lg Z_1}{\lg Z_2 - \lg Z_1} [\lg v_{SZ2} - \lg v_{SZ1}] \quad (4)$$

设 Z 为 30, 则 v_{S30} 可以用下式得出:

$$\lg v_{S30} = \lg v_{SZ2} + \frac{\lg 30 - \lg Z_2}{\lg Z_2 - \lg Z_1} [\lg v_{SZ2} - \lg v_{SZ1}] \quad (5)$$

文献^[17] 利用 594 个日本 KiK-net 钻孔数据和 135 个加州的钻孔数据对该方法进行验证, 用皮尔森相关系数来衡量结果的可靠性。结果表明, 随着深度参数 (Z_1, Z_2) 中的一个或者两个接近 30, 皮尔森系数增加, 且当 Z_2 与 Boore 两种拟合方法中的 Z 取相同值时, 该方法的皮尔森系数高于 Boore 模型, 证实了其可靠性, 即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。该方法的优点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} 。该方法简便, 可操作性更强。

从上述几个 v_{S30} 外推模型来看, 常速度外推模型方法简单, 因为没有考虑速度梯度变化的趋势, 计算结果偏低; 采用速度梯度的外推模型, Boore^[15-16] 从大量钻孔数据得出的经验关系模型拟合效果很好, 但是 Boore^[15] 的经验关系适用于加州、土耳其和欧洲, 对日本 KiK-net 的台站不太适用, Boore^[16] 将

经验公式进行了修改使其适合于日本 KiK-net 台网场地, 说明等效剪切波速的分布具有区域性差异。Wang 等^[17] 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。

2 Proxy-based 的 v_{S30} 估算模型

基于钻孔测井数据的 v_{S30} 估算模型适用于少量或单个场地条件的评价, 若进行大区域的场地 v_{S30} 估算, 用此类模型既昂贵又耗时, 无法满足区域性场地条件评价的需求。相对而言, 地质图和全球数字模型高程图的数据资源丰富且容易获得, 地表地质特征、地形、地貌等以不同形式体现了场地特征, 所以建立 v_{S30} 和地表地质、地形坡度、地貌等地学要素之间的相关性就变成了一个值得探究的问题。

试图用场地地质特征的差异解释地面运动差异的研究已进行了 30 余年。Funmal 等^[6] 利用 v_{S30} 与地表地质、土层物质的年龄、颗粒大小及深度的关系将平均剪切波速指定给研究区域内相应的地质单元, 进而根据地表地质情况外推各个地质单元的剪切波速值, 最终得到场地条件分类图。Petersen 等^[18] 通过将地质图进行三大岩类划分, 给每个类型指定剪切波速度, 以此来得到场地的放大效应。Park 等^[19] 根据地质体的时代进行场地分类, 发现第四纪、古近纪与新近纪、中生代地层的剪切波速可以区分开, 据此划分为沉积层、软岩、硬岩 3 类场地, 并建立了剪切波速数据库, 给出相应场地的 v_{S30} 。Wills 等^[20] 利用加州地区 1 200 多个钻孔的 v_{S30} 和 1:250 000 的地质图, 经过统计学分析得出地质分区与 v_{S30} 之间的对应关系: 根据地层年代和物理特性 (如颗粒度、硬度、裂隙分布) 等因素, 对没有钻孔波速的地区采用地质类比原则, 以剪切波速为主要指标划分出 7 类场地, 采用地质特征和 v_{S30} 描述场地类别。Edward 等^[21-22] 发现所划分的各类场地上有非常显著的地面运动差异, 这也用实例证明了场地划分的合理性。为了确定强震台场地类型, Wills 等^[23] 对钻孔和强震台站附近的地质边界采用大比例尺的地质图校核, 同时对地质分类进行修订, 根据地质特征和剪切波速进行分区, 划分出 19 类场地, 并将各类别的地质特征和 v_{S30} 赋予所在的台站。但基于地质图的方法存在一些问题, 如受编图精度的

影响,一些小规模的风化层可能被忽略,但这类局部场地对地震动的影响较大。

地形起伏变化是近地表地层岩性的某种表现形式,陡峭的山地预示着岩石的存在,平坦的盆地表明松散土层分布,地形变化可以用地形坡度来描述,可以建立起土层剪切波速与地形坡度之间的量化关系,由地形坡度推算 v_{S30} 。Wald 等^[24] 通过统计分析美国、意大利等地区钻孔的 v_{S30} 和 30" DEM 数据所得地形坡度之间的相关性,提出了利用地形坡度计算 v_{S30} 的方法,给出了构造活跃区和稳定大陆地区坡度与 v_{S30} 的对应关系,编制了 v_{S30} 分布图,并将此应用到 ShakeMap、PAGER(the Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response)等项目的场地效应评价中。其后 Allen 等^[25] 研究用精度更高的地形数据提高 v_{S30} 的精度,结果发现,高精度的地形数据与地质特征或地貌的相关性更高,但对于 v_{S30} 的结果影响不大。

Matsuoka 等^[26] 利用日本近 2 000 个工程钻孔的剪切波速资料和数字化的工程地貌分类图,统计回归得到 19 种地貌类别的 v_{S30} 与地形高程、坡度角等场地地貌特征间的经验关系式,编制了日本地区的 v_{S30} 分布图。Yong 等^[27] 由 30" 的 SRTM 数据,根据地形坡度、局部凸度、地表粗糙度自动进行地貌类别划分,然后用基于仿真的统计方法分析地貌类别与实测钻孔的 v_{S30} 之间的相关性,给出基于地貌类别的 v_{S30} 图,并通过比较分析证明,基于地貌特征的方法优于诸如单一依据地质、地形坡度的方法,这是因为地貌特征包含了地质和地形的信息。Wills 等^[28] 基于地质图 v_{S30} ,在年轻的冲积区引入地形坡度和离开基岩的距离来提高结果的精度。Stewart 等^[29] 研究了希腊地区的地貌类型、地表地质特征和地形坡度与 v_{S30} 的相关性,结果表明地貌和地质相结合的 v_{S30} 估算模型更适合本地区的场地。

上述基于地形坡度、地质特征、地貌特征的 v_{S30} 模型,其原始数据均来自于实测的 v_{S30} ,但在 v_{S30} 成果图中却没有考虑实测钻孔点位的数据。史大成等^[30] 基于工程钻孔资料对 v_{S30} 进行了修正,提高了地形坡度模型 v_{S30} 的估算精度。Tompson 等^[31] 用地理统计方法中的克里金插值方法约束实测点的结果,利用加州的实测钻孔 v_{S30} 和不同精度的地质图、地形数据和地貌特征等新编了 v_{S30} 分布图,并应用到 Shakemap 中,结果显示新图与地面运动的相关性更高。克里金插值法充分利用了有限的实测资

料,随着实测数据的增加编图精度会逐渐提高。

3 基于反应谱的 v_{S30} 估算模型

Hayashi 等^[32] 根据日本的强震记录建立了反应谱形状(RSS,即 Response Spectral Shape)与场地条件的关系,给出了 3 种类型场地的特征反应谱(岩石、硬土、极松软土);Newmark 等^[33]、Kuribayashi 等^[34] 也验证了场地条件对反应谱形状的影响。RSS 方法可以清晰地确定场地的卓越周期,尤其是基岩场地,谱形非常稳定,但不能排除震源和传播路径的影响。

由 Nogoshi 等^[35-36] 提出的环境噪声信号的 HVSR 方法(即水平向和垂向强震记录速度反应谱比值,一般简称为 HVSR),采用单台的记录信息,避免了震源和传播路径的影响。该方法有两个基本假设:(1) 基岩处地震动水平振动分量与垂直振动分量的比值近似为 1;(2) 场地覆盖土层对水平向振动有显著影响,而对竖向振动在工程感兴趣的频段范围内几乎没有影响。频域 HVSR 就代表了地表水平分量对于基岩水平分量的传递函数,不需要参考场地,即利用单台记录就可获得场地特性。该方法经由 Nakamura^[37-38] 推广,在欧美广泛用于场地效应评估和地震小区划研究中。其所用资料不限于地脉动,已应用到强震记录、微震记录。欧洲的 SESAME 项目(Site Effects assessment using Ambient Excitations)即利用环境噪声源的 HVSR 研究场地效应,证实了 HVSR 估计场地卓越周期时的合理性。陈棋福等^[39] 利用地脉动研究了北京城区的场地地震效应,得到高分辨率的场地卓越周期和放大倍数以及沉积层厚度分布。Ghofrani 等^[40] 检验了 HVSR 方法评价场地响应的有效性,建立了 v_{S30} 与 HVSR 峰值频率、峰值振幅之间的关系。

4 v_{S30} 的应用

虽然 v_{S30} 不能反映场地土层的与场地地震放大效应有关的所有物理属性,在去除由 v_{S30} 估计的场地效应以后,场地地面运动仍存在许多无法解释的特征,许多研究都意识到了这一问题^[41-42]。但从目前的研究来看, v_{S30} 还将会作为一个评价场地条件的重要参数广泛应用在各类地质工程技术和地震学领域,如用于建筑规范中的场地类别划分、地面运动衰减关系以及地震灾害快速评估和地震小区划等。

目前国际上大部分国家和地区的建筑规范是以

场地 30 m 深度内土层的等效剪切波速为指标进行场地类别划分的,如 2003 版抗震建筑安全规范、2010 版美国建筑规范以及欧洲的 EUROCODE 8 等均采用 v_{S30} 为主要指标,结合标贯击数、不排水抗剪强度等进行场地分类,来考虑地震的场地效应^[12,43-44]。中国的建筑抗震设计规范采用 v_{S20} ,但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实现链接,开展 v_{S30} 估算模型研究更具有实用性。

地震动预测中直接或间接地考虑了场地条件的影响,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,5 个工作成果中采用了 v_{S30} 作为场地条件的参数来考虑场地线性或非线形效应^[10,45-48]。新的 NGA-West2 的 5 组 GMPEs 均用 v_{S30} 作为场地条件参数。Soghrat 等^[49]在 GMPE 中直接用场地的 v_{S30} 与参考基岩场地 $v_s=760$ m/s 的比值作为场地参数。Stewart 等^[50]研究了全球 GMPEs 中场地效应参数的表达形式,结果表明绝大部分 GMPE 都直接或间接的采用 v_{S30} 作为场地参数,直接采用者即用 v_{S30} 数值,间接者为用 v_{S30} 划分场地类别,在 GMPE 中以场地类别的形式出现。

实时地震预警系统(如 PAGER)和震害快速评估系统(如 ShakeMap)都以 v_{S30} 的形式考虑地震场地效应。这两个项目采用的是与地形坡度相关的 v_{S30} 估算模型,以地表地质状况与地形坡度的相似性为原则,将数字高程模型经过坡度计算后,利用坡度与 v_{S30} 的相关关系得到各场点近似的 v_{S30} 值,再用 v_{S30} 量化地震动的场地放大系数。

5 分析讨论

基于钻孔测井的 3 类 v_{S30} 估算模型中,常速度外推模型结果偏于保守,但较简单实用;速度梯度外推模型需要对研究区的钻探测井数据进行统计分析,拟合得到模型系数,由于不同地区的土层结构存在差异,即速度梯度变化不同,使得这种模型具有区域性;双深度参数模型不需要进行实测数据的统计分析,用两个深度的波速参数对速度梯度进行约束,模型不具有区域依赖性,是目前较好进行 v_{S30} 估算的方法。

基于地质、地形坡度、地貌等的 v_{S30} 估算模型,

各有其优势,最好的应用是综合使用地质、地形坡度、地貌几个因素,并将钻孔测井所得 v_{S30} 作为控制点,采用克里金插值法编制 v_{S30} 分布图。

基于背景噪声的 HVSR 方法不需要震源,采用单台地震仪的记录即可得到场地不同频段的地震响应,是研究场地地震效应比较经济实用的方法,目前在欧美等国得到广泛的推广,这种场地测试方法拥有钻探测井法所无法匹及的优势。 v_{S30} 作为工程地震中评价场地物理力学性质的一个指标,应用到许多国家和地区的建筑规范的场地类别划分、地震地面运动衰减关系研究和地震灾害快速评估和地震预警等领域,成为目前最通用的场地评价指标。笔者认为,基于背景噪声的 HVSR 能获得全频段的地场地地震响应信息,且体现了更深土层的场地属性,但囿于 v_{S30} 应用的广泛性,HVSR 成为评价场地响应主要指标的应用有待进一步推广。

参考文献

- [1] 李小军,彭青.不同类别场地地震动参数的计算分析[J].地震工程与工程振动,2001,21(1):29-36.
- [2] 彭艳菊,吕悦军,黄雅虹,等.工程地震中的场地分类方法及适用性评述[J].地震地质,2009,31(2):349-362.
- [3] 薄景山,李秀领,李山有.场地条件对地震动影响研究的若干进展[J].世界地震工程,2003,19(2):11-15.
- [4] 薄景山,李秀领,刘德东,等.土层结构对反应谱特征周期的影响[J].地震工程与工程振动,2003,23(5):42-45.
- [5] JOYNER W B, WARRICK R E, FUMAL T E. The Effect of Quaternary Alluvium on Strong Ground Motion in the Coyote Lake, California, Earthquake of 1979[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, 71(4): 1333-1349.
- [6] FUMAL T E, TINSLEY J C. Mapping Shear-wave Velocities of Near-surface Geological Materials[J]. Predicting Aerial Limits of Earthquake Induced Lands Liding: U.S. Geologic Survey Professional Paper, 1985, 1360: 101-126.
- [7] BORCHERDT R D. On the Observation, Characterisation, and Predictive GIS Mapping of Strong Ground Shaking for Seismic Zonation[J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1991, 24: 287-305.
- [8] BORCHERDT R D. Estimates of Site-dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification)[J]. Earthquake Spectra, 1994, 10(4): 617-653.
- [9] SEED H B, MURARKA R, LYSMER J, et al. Relationships between Maximum Acceleration, Maximum Velocity, Distance from Source and Local Site Conditions for Moderately Strong Earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976, 66(4): 1323-1342.
- [10] IDRIS I M. An NGA Empirical Model for Estimating the

- Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes[J].Earthquake Spectra,2008,24(1):217-242.
- [11] The International Conference of Building Officials, The Uniform Building Code-1997 (UBC-1997)[S].1997.
- [12] European Committee of Standardization. EN 1998 Eurocode 8; Design of Structures for Earthquake Resistance Part I: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings[S]. Taylor and Francis, London, 2004.
- [13] 国家技术监督局, 中华人民共和国建设部. 建筑抗震设计规范 (GBJ 11-89)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [14] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫局. 建筑抗震设计规范 (GB50011-2001)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [15] BOORE D M. Estimating v_{S30} (or NEHRP Site Classes) from Shallow Velocity Models (Depth < 30 m) [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(2): 591-597.
- [16] BOORE D M, THOMPSON E M, CADET H. Regional Correlations of v_{S30} and Velocities Averaged over Depths Less than and Greater than 30 m [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(6): 3046-3059.
- [17] WANG H Y, WANG S Y. A New Method for Estimating v_{S30} from a Shallow Shear-wave Velocity Profile (Depth < 30 m) [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105: 1359-1370.
- [18] PETERSEN M, BRYANT W, CRAMER C, et al. Seismic Ground-motion Hazard Mapping in Incorporating Site Effects for Los Angeles, Orange, and Ventura counties, California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(1): 249-255.
- [19] PARK S, ELRICK S. Predictions of Shear-wave Velocities in Southern California Using Surface Geology [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998, 88(3): 677-685.
- [20] WILLS C J, PETERSEN M D, BRYANT W A, et al. A Site Condition Map For California Based on Geology and Shear-wave Velocity [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(6b): S187-S208.
- [21] EDWARD H F, PETERSEN M D. A Test of Various Site-Effect Parameterizations in Probabilistic Seismic Hazard Analyses of Southern California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(6b): S222-S244.
- [22] EDWARD H F. A Modified Ground-motion Attenuation Relationship for Southern California That Accounts for Detailed Site Classification and a Basin-depth Effect [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(6b): S209-S221.
- [23] WILLS C J, CLAHAN K B. Developing a Map of Geologically Defined Site-condition Categories for California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(4A): 1483-1501.
- [24] WALD D J, ALLEN T I. Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site Conditions and Amplification [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1379-1395.
- [25] ALLEN T I, WALD D J. On the Use of High-resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Conditions (v_{S30}) [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(2A): 935-943.
- [26] MATSUOKA M, WAKAMATSU K, FUJIMOTO F, et al. Average Shear-wave Velocity Mapping Using Japan Engineering Geomorphologic Classification Map [J]. Structural Engineering and Earthquake Engineering, 2006, 23(1): 57s-68s.
- [27] YONG A, HOUGH S E, IWAHASHI J, et al. A Terrain-Based Site-conditions Map of California with Implications for the Contiguous United States [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, 102(1): 114-128.
- [28] WILLS C J, GUTIERREZ C I, PEREZ F G, et al. A Next Generation v_{S30} Map for California Based on Geology and Topography [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105(6): 3083-3091.
- [29] STEWART J P, KLIMIS N, SAVVAIDIS A, et al. Compilation of a Local v_S Profile Database and Its Application for Inference of v_{S30} from Geologic and Terrain-based Proxies [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(6): 2827-2841.
- [30] 史大成, 温瑞智, 杜春清. 区域性场地 v_{S30} 及峰值加速度放大系数估算方法 [J]. 地震工程与工程震动, 2012, 32(4): 40-46.
- [31] THOMPSON E M, WALD D J, WORDEN C B. A v_{S30} Map for California with Geologic and Topographic Constraints [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(5): 2313-2321.
- [32] HAYASHI S H, TSUCHIDA H, KURATA E. Average Response Spectra for Various Subsoil Conditions [C]//Proceedings of Third Joint Meeting, U.S. Japan Panel on Wind and Seismic Effects. UJNR, Tokyo, 1971.
- [33] NEWMARK N M, BLUME J A, KAPUR K. Design Response Spectra for Nuclear Power Plants [R]. Structural Engineers ASCE Conference, San Francisco, CA, 1973.
- [34] KURIBAYASHI E, IWASAKI T, IIDA Y, et al. Effects of Seismic and Subsoil Conditions on Earthquake Response Spectra [C]//Papers of International Conferences. 1972: 499-512.
- [35] NOGOSHI M, IGARASHI T. On the Propagation Characteristics of Microtremor [J]. Journal of the Seismological Society of Japan, 1970, 23: 264-280.
- [36] NOGOSHI M, IGARASHI T. On the Amplitude Characteristics of Microtremor (Part 2) [J]. Journal of the Seismological Society of Japan, 1971, 24: 26-40.
- [37] NAKAMURA Y. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface [C]//Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute, 1989, 30: 25-30.
- [38] NAKAMURA Y. Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications [C]//Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineer-

- ing.New Zealand,2000.
- [39] 陈棋福,刘澜波,王伟君,等.利用地脉动探测北京城区的地震动场地响应[J].科学通报,2008,53(18):2229-2235.
- [40] GHOFRANI H, ATKINSON G M.Site Condition Evaluation Using Horizontal-to-Vertical Response Spectral Ratios of Earthquakes in the NGA-west 2 and Japanese Databases[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2014,67:30-43.
- [41] BOORE D M.Can Site Response be Predicted? [J].Journal of Earthquake Engineering,2004,8(Special Issue 1):1-41.
- [42] LEE V W, TRIFUNAC M D.Should Average Shear-wave Velocity in the Top 30 m of Soil be Used to Describe Seismic Amplification? [J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2010,30(11):1250-1258.
- [43] Building Seismic Safety Council.Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1:Provisions[R].Report No FEMA-450,Federal Emergency Management Agency,Washington D C,2003.
- [44] American Society of Civil Engineers (ASCE).Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: Standards ASCE/SEI 7-10[S].2010.
- [45] CAMPBELL K W, BOZORGNIA Y.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[J].Earthquake Spectra,2008,24(1):139-171.
- [46] ABRAHAMSON N, SILVA W.Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-motion Relations[J].Earthquake Spectra,2008,24(1):67-97.
- [47] CHIOU S J, YOUNGS R R.An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra[J].Earthquake Spectra,2008,24(1):173-215.
- [48] BOORE D M, ATKINSON G M.Earthquake Spectra-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[J].Earthquake Spectra, 2008,24(1):99-138.
- [49] SOGHRAT M R, ZIYAEIFAR M.Ground Motion Prediction Equations for Horizontal and Vertical Components of Acceleration in Northern Iran[J].Journal of Seismology,2017,21(1):99-125.
- [50] STEWART J P, SEYHAN E, BOORE D M, et al.Site Effects in Parametric Ground Motion Models for the GEM-PEER Global GMPEs Project[C]//Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering.Lisbon,2012.