

DOI: 10.11779/CJGE201804017

苏州第四纪深厚地层剪切波速空间变化特征及其应用

朱 娇^{1, 2}, 陈国兴^{*1, 2}, 许汉刚^{3, 2}, 刘薛宁^{1, 2}

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏南京 210009; 2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏南京 210009; 3. 江苏省地震局, 江苏南京 210014)

摘要: 土体剪切波速是工程场地地震效应评价的重要参数之一。基于苏州城区的大量剪切波速实测资料和工程地质特征, 探讨了第四纪深厚沉积层剪切波速结构空间变化特征, 给出了不同工程地质分区的土层剪切波速随深度变化的经验公式; 基于不同深度范围内土层平均剪切波速间存在的显著相关性, 建立了基于浅层剪切波速外推深层剪切波速的逐步外推法, 验证结果表明: ①苏州城区等效剪切波速 v_{s20} 和 v_{s30} 的空间展布具有显著的分区特征, 覆盖层厚度 $d>80$ m 的III类和IV类场地的等效剪切波速分界值 v_{s30} 可以取为 170 m/s; ②平原区土层剪切波速随深度的变化呈幂律函数关系; 丘陵区细化为 3 个子的区域后, 各分区土层剪切波速随深度的变化呈二次多项式关系; ③逐步外推法具有很好的适用性, 但当外推深度处的土层剪切波速存在剧烈变化时, 剪切波速的逐步外推法失效; ④基于剪切波速逐步外推法, 可给出剪切波速不小于 500 m/s 和 700 m/s 的任意假想基岩面埋深 H_{rock} 及相应的微震动场地卓越周期 T_g , 发现 T_g 值和 H_{rock} 值的空间展布基本一致; 选取剪切波速不小于 700 m/s 的土层顶面为地震基岩面时, 各工程地质分区的 T_g 值和 H_{rock} 值空间展布的差异性显著增大。

关键词: 剪切波速结构; 空间变化特征; 场地分类; 逐步外推法; 工程基岩面埋深; 场地卓越周期

中图分类号: TU431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)04-0726-10

作者简介: 朱 娇(1990-), 女, 博士研究生, 主要从事场地地震效应研究的工作。E-mail: zhujiao90@163.com。

Spatial variation characteristics of shear wave velocity structure and its application to quaternary deep sediment layers in Suzhou region

ZHU Jiao^{1, 2}, CHEN Guo-xing^{1, 2}, XU Han-gang^{3, 2}, LIU Xue-ning^{1, 2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Civil Engineering & Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China; 3. Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

Abstract: The shear wave velocity of soils is one of the most important parameters to evaluate the seismic effects of engineering sites. Based on large numbers of borehole shear wave velocity measurements and the engineering geological characteristics in Suzhou region, the spatial variation characteristics of shear wave velocity structure for the quaternary deep sediment layers are analyzed, and the empirical equations of shear wave velocities with depth in different engineering geological zones are given respectively. Moreover, based on the significant correlation between the average shear wave velocities to different depths, the gradual extrapolation method for estimating the values of deep shear wave velocity from a shallow shear wave velocity profile is established. The validated results show that: (1) The spatial variations of equivalent shear wave velocities for v_{s20} and v_{s30} in Suzhou City exhibit obvious regional dependency. It will be more appropriate to use $v_{s30}=170$ m/s as the threshold value for the site class III and IV with overburden thickness $d>80$ m. (2) The variations of shear wave velocities with depth in the western and eastern plain zones can be fitted by power-law functions. After subdividing hill zones, the variations of shear wave velocities with depth in the three subdivided hill zones can be fitted by quadratic polynomial functions. (3) The gradual extrapolation method has a good applicability for deep shear wave velocity, but when the shear wave velocities of soils under extrapolation initial depth have dramatic changes, the extrapolation method is inapplicable. (4) The depths (H_{rock}) of seismic bedrock surfaces with shear velocity not less than 500 m/s or 700 m/s and the corresponding predominant periods (T_g) under microseism can be obtained by the gradual extrapolation method. It is found that the spatial variations for both T_g and H_{rock} are similar. By choosing the interface of soils with shear velocity not less than 700 m/s as the seismic bedrock surface, the differences of T_g and H_{rock} among different engineering geological zones significantly increase.

Key words: shear wave velocity structure; spatial variation

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378258, 51438004)

收稿日期: 2016-12-30

*通讯作者 (E-mail: gxchen@njtech.edu.cn)

characteristic; site classification; gradual extrapolation method; seismic bedrock surface depth; site predominant period

0 引言

土体剪切波速是土动力学区别于土静力学的一个主要物理量, 可反映场地传播地震波的能力, 是表征场地土体动力特性的重要参数。土体剪切波速是目前大多数建筑抗震设计规范中场地类别划分的主要标准, 同时在判别饱和砂土和粉土液化、场地微震卓越周期计算及场地地震效应分析等方面都有十分重要的应用^[1-3]。

当前国际上通常将地表下 30 m 深度范围内土层等效剪切波速 v_{s30} 用作为地面运动预测方程中解释场地效应的变量和建筑设计规范中划分场地类别的标准。为此, 国外学者针对 v_{s30} 的预测作了大量研究: 基于加利福尼亚的钻孔资料, Boore^[4]对 v_{s30} 与深度 H 以浅的等效剪切波速 v_{sH} ($H < 30$ m) 进行了回归分析, 给出该区域由 v_{sH} 线性外推 v_{s30} 的公式。Boore 等^[5]采用上述公式研究了日本 KiK-net、加利福尼亚、欧洲和土耳其场地的 v_{s30} 与 v_{sH} ($H=5, 10, 15, 20$ m) 间的相关性, 发现相较于日本 KiK-net 场地, 该公式更适用于其它 3 个区域, 同时重新给出适用于 KiK-net 场地外推 v_{s30} 的二次多项式公式。其他学者也进行了类似的相关性研究^[6-7], 这些研究的最终目的都是为了更准确地估计出场地的 v_{s30} 值。但 Anderson 等^[8]在研究 1989 年 Loma Prieta 地震中两个强震台站地震动记录时, 发现这两个台站的震中距和断层距相近, 台站下覆土层的 v_{s30} 也基本一致, 而记录的地震动却有显著差异, 这表明 30 m 深度以下的土体对地表地震动特性也有显著影响。而以往中国土体剪切波速测试深度多不超过 30 m, 因此, 实现对有限测试深度以深的土层剪切波速的有效预测是一项具有重要意义的工作。

通常土层深度越深, 固结越充分, 土体越密实, 相应的标准贯入锤击数和剪切波速也越大。剪切波速的预测都是从土性参数出发, 对波速实测资料进行统计分析, 给出土层剪切波速的经验预测公式。刘红帅等^[9]依据中国地震安评工作中大量的钻孔剪切波速实测数据, 建立了区分和不区分场地类别时的常规土类剪切波速随土层深度变化的回归公式。Hasancebi 等^[10]对土耳其地区的 97 组土层剪切波速和标准贯入锤击数进行回归分析, 给出了考虑和不考虑土体分类时的土层剪切波速与锤击数的回归公式, 并认为土体分类的影响不大。此外, Kuo 等^[11]采用同时考虑深度和锤击数的多元回归分析来预测台湾地区的土层剪切波速, 发现多元回归分析可提高预测公式的准确性, 但

建立多元回归分析所需参数较多, 获取不易, 不便于应用。

根据苏州城区 453 个钻孔的剪切波速测试资料, 结合工程地质特征, 探讨了苏州第四纪地层等效剪切波速的空间变化特征, 并分别依据中国和美国抗震规范的场地分类方法绘制出场地类别分区图; 通过回归分析, 给出各工程地质分区的土层剪切波速随深度的最优回归公式。基于不同深度范围内土层平均剪切波速之间存在的显著相关性, 建立了剪切波速随深度变化的逐步外推法, 并采用该方法推测出各钻孔剪切波速不小于 700 m/s 的基岩面埋深和卓越周期值, 可供实际工程参考使用。

1 场地工程地质特征及剪切波速资料

苏州地处长江三角洲前缘、太湖的东北岸, 地势总体呈西南高而东北低展布, 第四纪松散沉积物较厚且空间分布复杂。苏州西部为低山残丘与山间洼地相间, 低山残丘由构造剥蚀形成, 山间洼地由冲洪积与冲湖积物组成; 东部为广阔的冲积平原, 多湖群、河塘分布。因此, 苏州按工程地质特征大体上可分为构造剥蚀低山丘陵、西部冲积平原、东部湖沼积洼地平原和太湖滩地工程地质区, 如图1所示。因受多次海侵影响及河、湖、海相交替沉积, 苏州第四纪沉积物为一套层序清楚的黏性土和砂层相互叠置的沉积物, 总体上地层呈多沉积韵律特征。第四纪沉积物厚度受基底构造古地貌形态控制, 呈现出由西向东、由南向北增厚的特点。

图1显示了剪切波速测试钻孔位置及其在苏州各工程地质区内的分布概况, 其中剪切波速的测试均采用单孔检层法, 测试仪器为悬挂式波速测井仪, 该仪器为井下自激自收式, 精度高, 避免了地表激发可能产生的干扰和误差。测井系统工作时, 由地面控制系统控制井下震源(电磁锤)激发振动信号, 并由井下两组水平分量拾波器接收振动信号, 根据信号到达这两组拾波器的时差即可计算出拾波器间的剪切波速。由图可知, 东部湖沼积洼地平原和西部冲积平原占地面较大, 是波速测试钻孔主要分布区域, 分别分布了 149 个和 234 个钻孔; 而构造剥蚀低山丘陵和太湖滩地占地面较小, 其上分布的波速测试钻孔也较少, 分别为 60 个和 10 个。

2 场地土层剪切波速分布特征

2.1 土层剪切波速空间变化特征

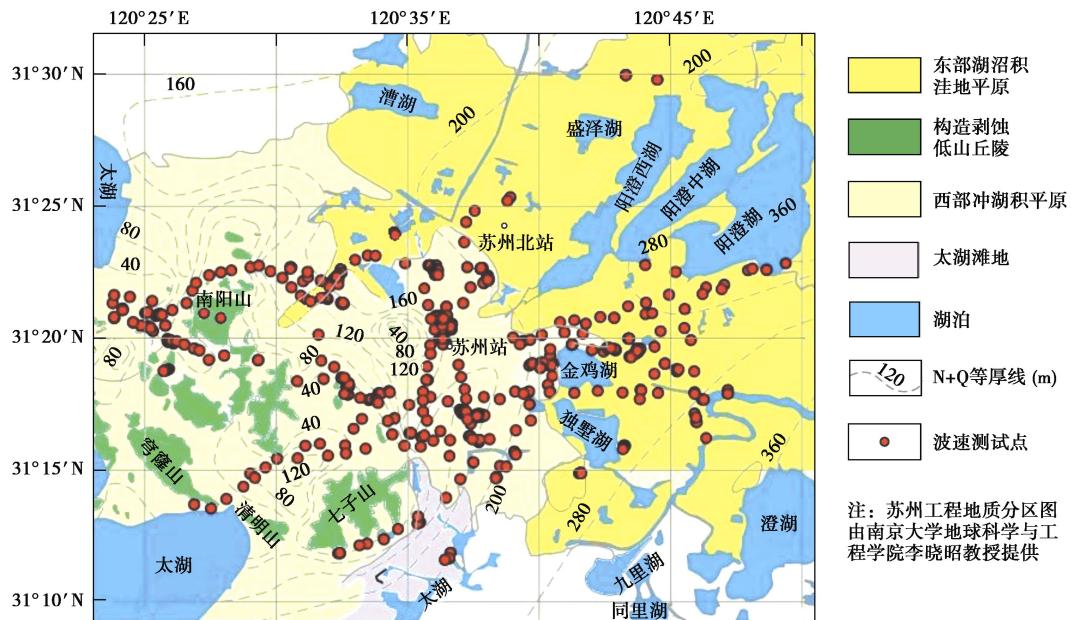


图 1 苏州工程地质分区及波速测试孔分布图

Fig. 1 Engineering geological zones and locations of borehole shear wave velocity measurements of Suzhou city

无论是岩土工程勘察、地质灾害危险性评估还是地震安全性评价工作, 均需涉及场地类别的划分问题。在划分场地类别时, 中国《建筑抗震设计规范》GB50011—2010采用等效剪切波速 v_{s20} 和覆盖层厚度两个判定标准, 国际上则通常采用等效剪切波速 v_{s30} 为主要判定标准, 如美国NEHRP推荐的抗震设计标准FEMA P-750^[12]。随着中国经济实力的提升, 高层、超高层建筑和地下建筑不断涌现, 大量工程的基础埋深已超过20 m, 许多研究者建议中国等效剪切波速的计算深度应借鉴国际标准进行改进。为了直观地了解苏州城区剪切波速结构空间变化特征, 基于剪切波速实测资料, 计算出各波速测试钻孔的 v_{s20} 和 v_{s30} 值, 并分别依据中国和美国抗震规范的场地分类方法, 绘制了苏州城区等效剪切波速空间变化及场地类别分区图, 如图2所示, 进而从整体上了解苏州城区浅层土体动力特性。其次, 通过探讨苏州城区场地等效剪切波速的计算深度由地表以下20 m增加至30 m的差异性及其对场地类别划分的影响, 给出中国现行场地分类的等效剪切波速界限值的调整建议值。深度 H 以浅的土层等效剪切波速 v_{sH} 计算如下:

$$v_{sH} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n (d_i / v_{s,i})} \quad (1)$$

式中 d_i 和 $v_{s,i}$ 分别为第 i 层土层厚度及其剪切波速, $H = \sum d_i$; n 为深度 H 范围内土层的分层数。当取 $H=20$ m 时, 即可得出等效剪切波速 v_{s20} 。当取 $H=30$ m 时, 即可得出等效剪切波速 v_{s30} 。

从图2可以看出, 等效剪切波速 v_{s20} 和 v_{s30} 空间分布规律相似, 都与场地工程地质分区密切相关。苏州城区大部分区域 v_{s20} 为 160~180 m/s, v_{s30} 为 180~200 m/s, 这些区域隶属于东部湖沼积洼地平原和西部冲湖积平原; 西南部局部构造剥蚀低山丘陵处的 $v_{s20}>180$ m/s, $v_{s30}>200$ m/s, 甚至分别可达到 245 m/s 和 295 m/s。出现 $v_{s20}<160$ m/s 和 $v_{s30}<180$ m/s 的区域几乎都位于湖群、河塘附近。 v_{s20} 和 v_{s30} 的空间分布都揭示了土层剪切波速具有区域相关性, 沉积环境相同的区域, 其剪切波速值变化范围不大, 具有一定的统计规律; 而对工程地质特征差异明显的区域, 土层剪切波速特征也显著不同, 这在 Kanlı 等^[13]对土耳其 Dinar 区域剪切波速分布特征的研究中也得到了验证。依据中国抗震规范, 苏州城区基本都属于III类场地, 仅丘陵处存在II类场地及湖泊附近存在IV类场地; 依据美国NEHRP 规范, 苏州城区大多数属于D类场地, 仅湖泊附近存在E类场地, 且D类场地基本涵盖中国抗震规范给出的II类、III类场地, E类场地不仅完全涵盖中国抗震规范给出的IV类场地, 还涵盖局部的III类场地。

图3为计算深度由 20 m 增至 30 m 时, 苏州城区不同类别场地等效剪切波速的变化。可以发现, v_{s30} 普遍大于 v_{s20} , 增大量为 8~45 m/s, 平均增大约 25 m/s。图4为中国抗震规范中的等效剪切波速取为 v_{s30} 对苏州城区场地类别划分的影响。从图3, 4 可知, 苏州城区II类场地的 v_{s20} 为 155~235 m/s; III类场地绝大部分钻孔的 v_{s20} 为 150~195 m/s, 仅 3 个钻孔的 $v_{s20}<$

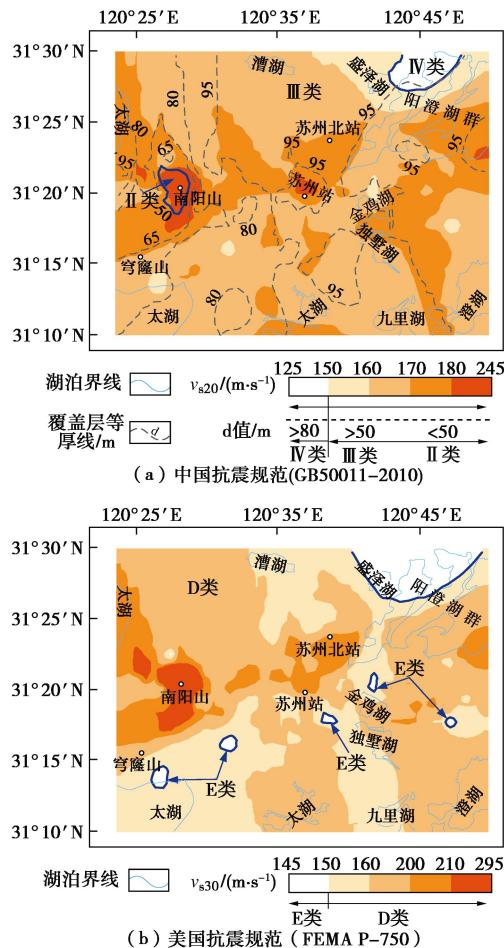


图 2 苏州城区等效剪切波速空间变化及场地类别分区图

Fig. 2 Spatial variations of equivalent shear wave velocities and site classifications of Suzhou city

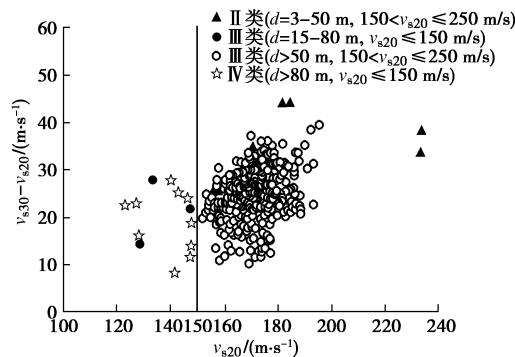


图 3 苏州城区场地等效剪切波速计算深度取值差异比较

Fig. 3 Differences of equivalent shear wave velocities calculated with soil depth of 20 and 30 m in Suzhou city

150 m/s; IV类场地的 v_{s20} 为 120~150 m/s, 即覆盖层厚度 $d > 80$ m 时, III类和IV类场地的分界值取为 150 m/s 是合适的。若将等效剪切波速的计算深度取为 30 m, II类场地的 v_{s30} 为 180~275 m/s; III类场地绝大部分钻孔的 v_{s30} 为 170~235 m/s, 仅 3 个钻孔的 v_{s30} 分别为 143, 161 和 169 m/s; IV类场地的 v_{s30} 为 144~169 m/s, 此时将III类和IV类场地 ($d > 80$ m) 的等效剪

切波速分界值可取为 170 m/s, 其场地类别划分的结果将与计算深度取为 20 m 时的场地类别划分结果基本一致。但如果直接沿用美国规范的等效剪切波速场地分类界限值 180 m/s, 原有的部分 III类场地则被划分为 IV类场地, 相当于提高中国场地类别的划分标准。

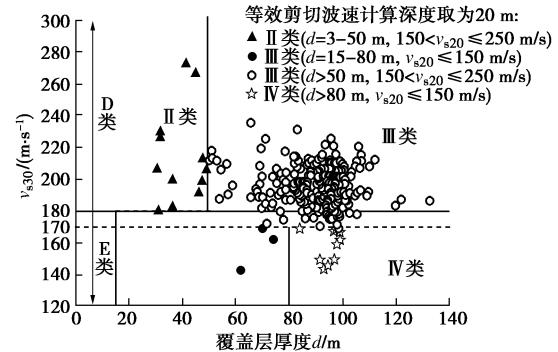
图 4 GB50011—2010 中等效剪切波速取为 v_{s30} 时, 苏州城区场地类别的划分

Fig. 4 Site classifications of Suzhou City according to code GB50011—2010 with selecting v_{s30} as equivalent shear wave velocity

2.2 剪切波速与土层深度的关系

目前, 预测土层剪切波速随深度的变化关系可区分为直接法和间接法^[14]。直接法是基于对波速实测资料的统计分析, 直接给出土层剪切波速随深度的回归方程。间接法则是建立波传递时间随深度的变化关系, 然后根据传递时间来计算剪切波速。通常剪切波速实测值为相邻深度间土层的平均波速, 不是实际的波速。当相邻深度间土层厚度较小时, 实测值可视为实际波速, 此时可采用直接法。当所取的厚度较大时, 实测值只能表示平均波速。本文采用的钻孔波速资料, 其剪切波速测试系统中两组拾波器相距仅 1 m, 实测波速值可视为实际波速。土层剪切波速随深度变化的常用经验方程有线性、二次多项式和幂律函数模型^[9], 采用判定系数 R^2 来度量拟合方程的总体拟合优度, 当 R^2 越接近于 1, 其拟合效果越佳。

鉴于场地工程地质特征对土层剪切波速的显著影响, 按不同工程地质分区对波速实测资料进行整理, 其中太湖滩地的钻孔仅 10 个, 不具备统计意义, 故仅对东部湖沼洼地平原、西部冲湖积平原和构造剥蚀低山丘陵区内的土层剪切波速和深度关系进行回归分析。图 5 为各工程地质分区内地层剪切波速随深度变化的最优回归幂律模型曲线。由图 5 可知, 随着深度的增大, 东、西部平原区土层剪切波速的变化趋势相似, 未见波速突变现象, 其离散程度与深度没有相关性。浅层 15 m 深度范围内, 两个平原区土层剪切波速的离散程度相差不大, 同一深度的最大、最小波速

的极差 Δv_s 约 100 m/s; 深度超过 15 m 时, 东、西部平原区的极差 Δv_s 分别约 200, 300 m/s。而丘陵区土层剪切波速随深度的变化趋势在不同区域的差异很大, 局部区域的钻孔在一定深度会出现波速突变的现象, 土层剪切波速随深度的变化极为离散, 极差 Δv_s 可达 700 m/s。从苏州城区 3 个工程地质区的土层剪切波速与深度关系的幂律模型总体拟合优度来看, 东、西部两个平原区的拟合效果均较为理想, 判定系数 R^2 分别达到 0.9187 和 0.882; 而丘陵区的拟合效果不佳, 判定系数 R^2 仅为 0.6185。

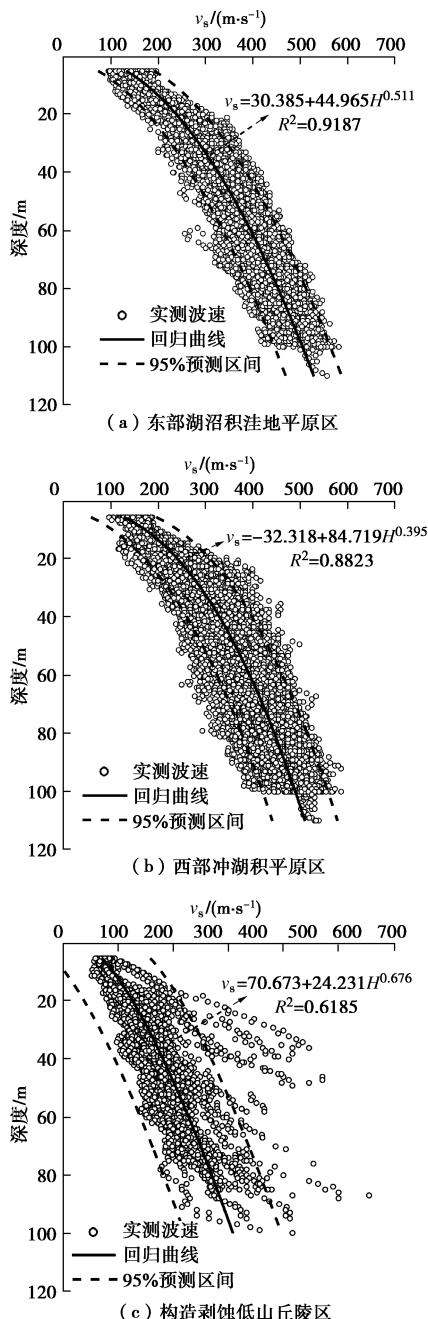


图 5 苏州城区不同工程地质分区的剪切波速随深度变化的幂律函数拟合曲线

Fig. 5 Power-law fitting curves of shear wave velocities with depth in different engineering geological zones of Suzhou city

分析丘陵区土层剪切波速随深度的变化规律, 发现可以进一步细分为3个区域: 区①、区②和区③。图6给出了3个分区的土层剪切波速随深度变化的二次多项式模型曲线。由图可知, 各分区内土层剪切波速随深度变化的离散性明显变小, 区①、区②和区③的二次多项式拟合的判定系数 R^2 分别为 0.746, 0.867 和 0.808, 较之未细分区时的判定系数都有明显提高。这表明对丘陵区进行更细致的分区来研究土层剪切波速随深度的变化关系是必要的。其次, 3个分区的钻孔遍布于分散的丘陵地带, 即各丘陵区土层剪切波速基本都呈现出这3种变化规律, 这可能是由于丘陵区的基岩面起伏, 不同钻孔位置的基岩面埋深存在显著差异, 基岩面浅的钻孔位置处土层剪切波速随深度的增大较快, 故对丘陵区的分区取决于基岩面上覆土层的厚度。最终, 各工程地质分区的土层剪切波速 v_s 随深度 H 变化的经验公式分别为

东部平原区

$$v_s = 30.385 + 44.965H^{0.511} \quad , \quad (2)$$

西部平原区

$$v_s = -32.318 + 84.719H^{0.395} \quad , \quad (3)$$

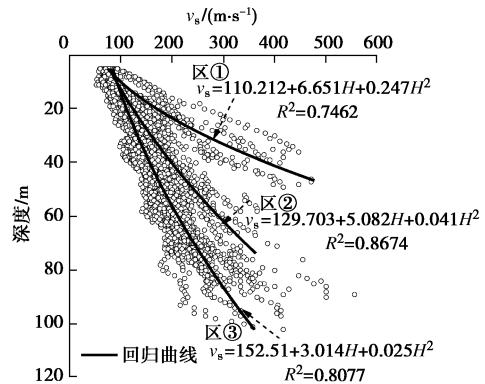


图 6 苏州城区 3 个丘陵分区的剪切波速随深度变化的二次多项式函数拟合曲线

Fig. 6 Quadratic polynomial fitting curves of shear wave velocities with depth in three hill zones of Suzhou city

丘陵区①

$$v_s = 110.212 + 6.651H + 0.247H^2 \quad , \quad (4)$$

丘陵区②

$$v_s = 129.703 + 5.082H + 0.041H^2 \quad , \quad (5)$$

丘陵区③

$$v_s = 152.510 + 3.014H + 0.025H^2 \quad . \quad (6)$$

依据式(2)~(6), 可对苏州各工程地质区内的土层剪切波速进行预测。综上, 同一工程地质区内的土层剪切波速随深度的变化规律相似, 但各钻孔的波速随深度的变化幅度存在差异, 具有一定的空间变异性, 基于上述公式的剪切波速预测法仅取决于土层

深度, 仅能给出同一工程地质分区的剪切波速随深度变化的平均曲线, 不能给出某一钻孔处的土层剪切波速随深度的实际变化情况。其次, 对丘陵区进行更为细致的分区, 可得到剪切波速随深度更为准确的变化关系, 进一步证明了该剪切波速预测法具有显著的区域空间相关性, 但过于细小的分区必然会使经验公式的应用范围太窄。

3 剪切波速随深度变化的逐步外推法

Boore等^[5]研究了日本KiK-net、加利福尼亚、欧洲和土耳其4个地区的剪切波速资料, 发现随深度 H 的增大, v_{s30} 与深度 H 以浅的等效剪切波速 v_{sH} ($H < 30$ m) 之间的相关性变强, 区域差异性减小。由此推测, 当深度增量 d 足够小时, v_{sH} 与深度 $H+d$ 以浅的等效剪切波速 $v_{s(H+d)}$ 存在很强的相关性, 由 v_{sH} 估计 $v_{s(H+d)}$ 是足够精确的。深度 H 到 $H+d$ 之间的土层平均剪切波速可视为深度 $H+d/2$ 处土层的实际剪切波速 $v_s^{H+d/2}$, 可按下式计

算:

$$v_s^{H+d/2} = \frac{d}{H+d} - \frac{H}{v_{sH}} \quad (7)$$

将深度 H 以增量 d 逐步增大, 可得到基于深度 H 的一系列延伸深度处的土层剪切波速, 从而实现剪切波速随土层深度变化的外推, 这里将该方法称之为逐步外推法。为了估计 v_{sH} 和 $v_{s(H+d)}$ 之间存在的相关性, 基于苏州城区剪切波速实测资料, 计算了19个计算深度10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95和100 m以浅的土层等效剪切波速, 按深度由浅至深并以深度增量 d (本文取为5 m) 逐步进行回归分析。图7为苏州城区不同深度范围内土层等效剪切波速 v_{sH} 与 $v_{s(H+5)}$ ($H=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ m) 之间的相关性分析结果。可以发现, 随土层深度的增大, v_{sH} 与 $v_{s(H+5)}$ 的线性相关性明显提高; 其次, 不同工程地质分区的 v_{sH} 与 $v_{s(H+5)}$

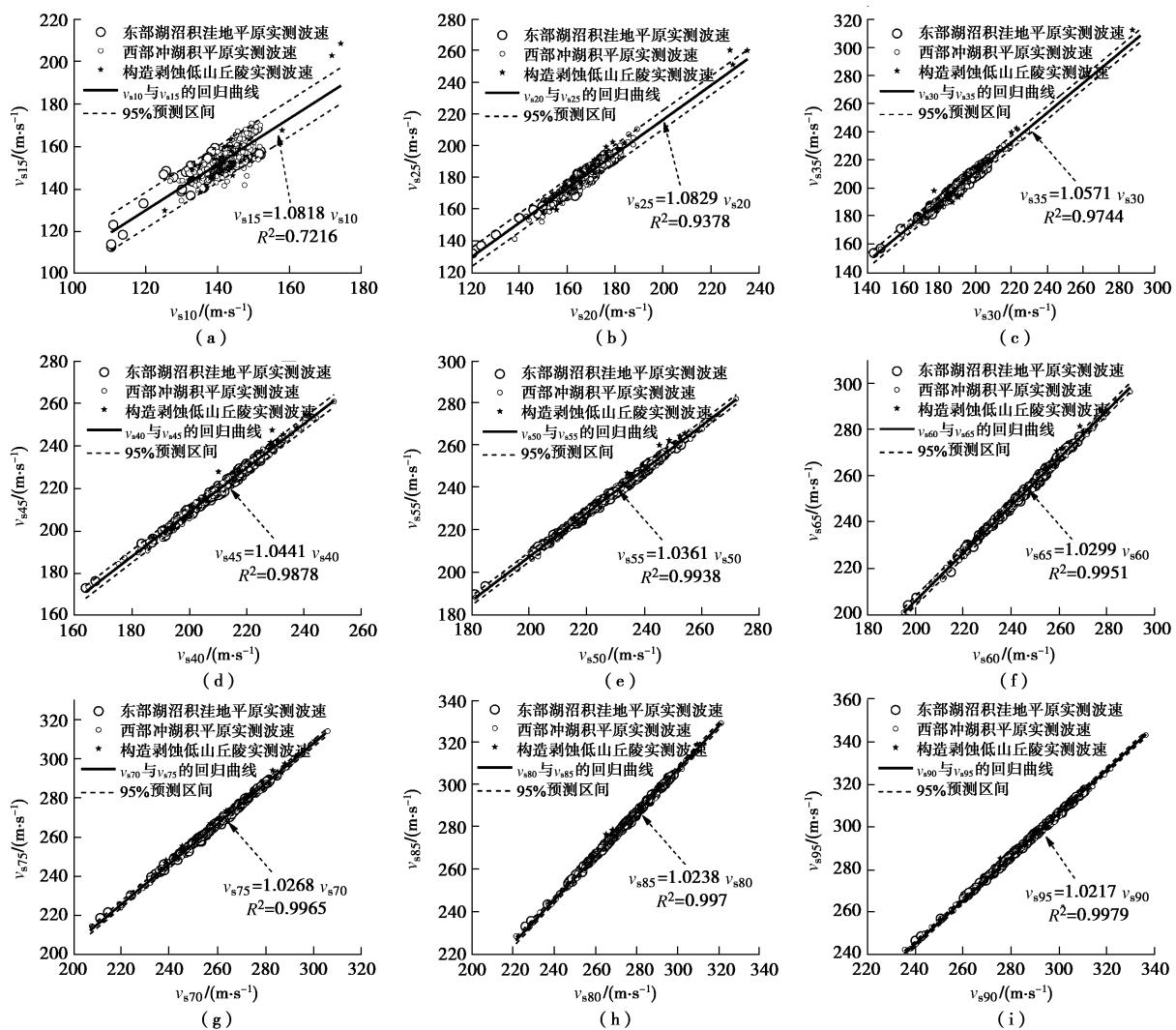


图7 苏州城区土层剪切波速 v_{sH} 与 $v_{s(H+5)}$ 的关系

Fig. 7 Dependency of both shear-wave velocity and depth characterized as v_{sH} and $v_{s(H+5)}$ in Suzhou city

的线性相关性是一致的,均可采用式(8)的线性函数进行拟合:

$$v_{s(H+5)} = k \cdot v_{sH} \quad (8)$$

式中, k 为拟合参数,也称为 v_{sH} 与 $v_{s(H+5)}$ 线性关系的斜率。

图 8 为 18 组 v_{sH} 与 $v_{s(H+5)}$ 线性关系的斜率 k 和判定系数 R^2 。由图可知,随深度的增大, v_{sH} 与 $v_{s(H+5)}$ 线性关系的判定系数 R^2 呈先快速增大后缓慢增大直至几乎不变的趋势。当 $H < 20$ m 时,判定系数 R^2 小于 0.9,当 $20 \leq H \leq 45$ m 时,判定系数 R^2 达到 0.9 以上,当 $H > 45$ m 时,判定系数 R^2 则达到 0.99 以上,即 20 m 以浅时, v_{sH} 与 $v_{s(H+5)}$ 的相关性明显较低,因此采取逐步外推法预测土层剪切波速时,应给出钻孔 20 m 深度范围内的实测剪切波速;20 m 以深时, v_{sH} 与 $v_{s(H+5)}$ 的相关性则显著较强。这可能是因为较之浅层土,深层土的沉积年代更久,固结更充分,土体的动力特性相对更稳定。尤其对于 45 m 以深土层, v_{sH} 与 $v_{s(H+5)}$ 的相关性普遍较高。其次, v_{sH} 与 $v_{s(H+5)}$ 线性关系的斜率 k 随土层深度 H 的增大而减小;当 $H \geq 20$ m 时,斜率 k 随 H 呈规律性变化,可用经验公式表示如下:

$$k = \frac{1.00147H}{-1.85824+H} \quad (9)$$

其对应的判定系数 R_k^2 可达到 0.9992。结合式(7)~(9),即可预测一系列深度 $H+5/2$ 处的土层剪切波速,从而实现剪切波速随深度变化的逐步外推。

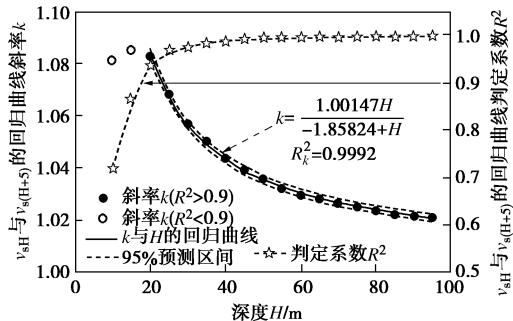


图 8 v_{sH} 与 $v_{s(H+5)}$ 的回归曲线斜率 k 和判定系数 R^2

Fig. 8 Slopes (k) and coefficients of determination (R^2) of regression curves between v_{sH} and $v_{s(H+5)}$

4 逐步外推法的验证及应用

为了验证逐步外推法的适用性,选取位于东部湖沼积洼地平原、西部冲湖积平原和构造剥蚀低山丘陵区的 3 个典型钻孔 DP64、XP89 和 QL27,其中钻孔 DP64 的土层剪切波速沿深度方向有轻微起伏,钻孔 XP89 的土层剪切波速沿深度的变化趋势类似于钻孔 DP64,但起伏的幅度较为显著,尤其是深度 20~80 m 处。而位于丘陵区③的钻孔 QL27 则明显不同于上述

两个平原区的钻孔,其土层剪切波速在深度 97 m 处开始急剧增大。假设 3 个钻孔剪切波速测试深度仅为 50 m,采用逐步外推法得出 50 m 以深的土层剪切波速,并与实测波速和依据各工程地质区内土层剪切波速随深度的最优回归曲线外推出的波速进行对比,如图 9 所示。基于区域剪切波速回归曲线的外推值仅取决于土层深度,该外推法给出的同一工程地质区内各钻孔在同一深度处的土层剪切波速都是一样的。逐步外推法得出的剪切波速取决于每个钻孔已知的实测波速,外推给出的各钻孔土层剪切波速是不一样的。当钻孔的土层剪切波速随深度剧烈起伏时,逐步外推法可能会失效,如在计算钻孔 XP89 和 QL27 的剪切波速时,逐步外推法就无法准确预测钻孔 XP89 在深度 55~80 m 处和钻孔 QL27 在 97 m 以深的土层剪切波速。本文建立逐步外推法的剪切波速数据库的绝大部分是波速测试深度约 100 m 的钻孔资料。为了验证其对 100 m 以深土层剪切波速预测的适用性,选取了 2 个深达 200 m 的钻孔 K1 和 K2,分别从深度 50, 100 和 150 m 处采用逐步外推法得出各深度下的土层剪切波速,如图 10 所示。随着外推起始深度的增大,剪切波速的预测值更接近于实测值,基于外推起始深度 100 m 和 150 m 预测的剪切波速基本一致,都比基于外推起始深度 50 m 预测的剪切波速值更接近于实测值。其次,相比于钻孔 K1,钻孔 K2 由深度 50 m 处外推得到的剪切波速偏离于实测值较大,这是由于钻孔 K2 在深度 45~100 m 范围内是剪切波速随深度变化明显偏小的软弱层,逐步外推法无法反映这类异常的剪切波速变化趋势。当外推起始深度大于剪切波速有显著异常变化的深度时,即钻孔 K2 由深度 100 和 150 m 处外推得到的剪切波速与实测波速相差不大,这表明采取逐步外推法预测土层剪切波速时,只要外推深度处的土层剪切波速随深度变化没有突变,外推值的可信度都较高。

地震基岩面的合理选取对深厚场地地表设计地震动参数的估计十分重要。在场地地震效应分析中,通常依据 GB17741—2005《工程场地地震安全性评价》,选取剪切波速不小于 500 m/s 的土层顶面为地震基岩面;对于深厚场地,选取剪切波速不小于 700 m/s 的土层顶面为地震基岩面是更为适宜的^[15]。现有的苏州城区 453 个剪切波速钻孔资料中,413 个钻孔深度终止于剪切波速不小于 500 m/s 的假想基岩面,25 个钻孔深度终止于剪切波速不小于 700 m/s 的假想基岩面。微震动场地卓越周期 T_g 可由土层剪切波速和土层厚度近似确定:

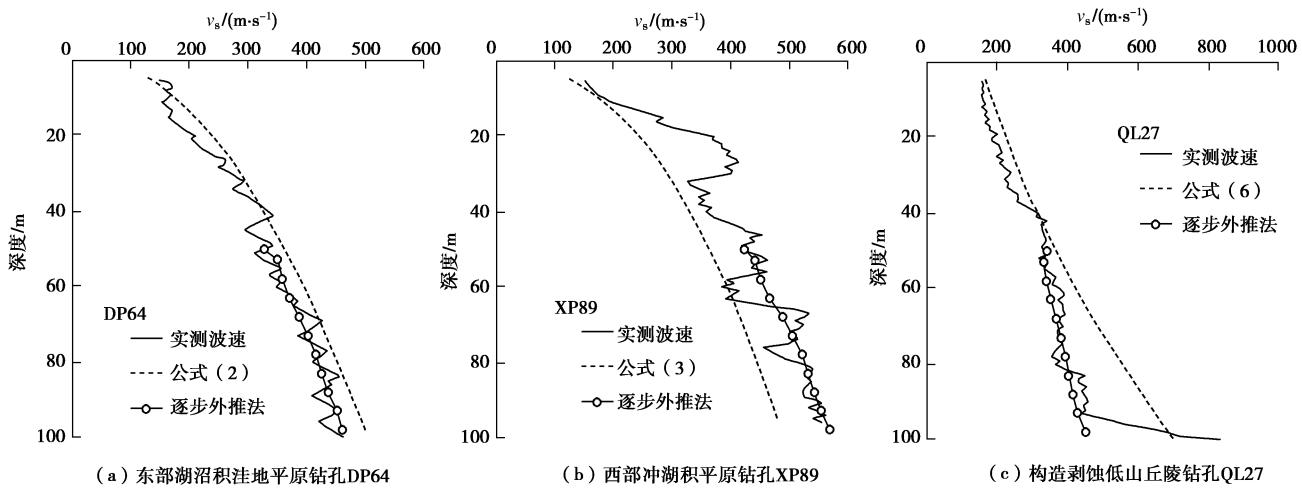


图9 不同预测方法给出的典型钻孔剪切波速随深度的变化

Fig. 9 Typical shear wave velocity profiles obtained by different prediction methods

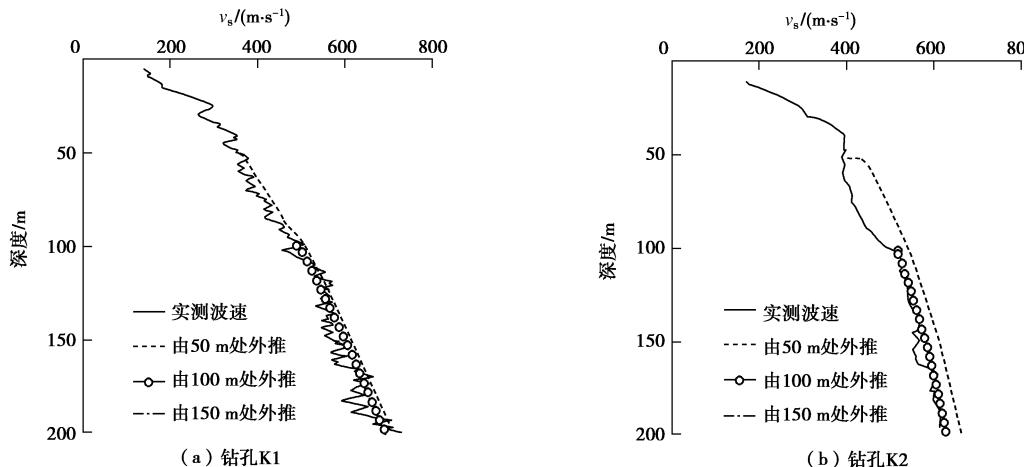


图10 不同起始外推深度给出的典型钻孔剪切波速随深度的变化

Fig. 10 Typical shear wave velocity profiles obtained from different initial extrapolations

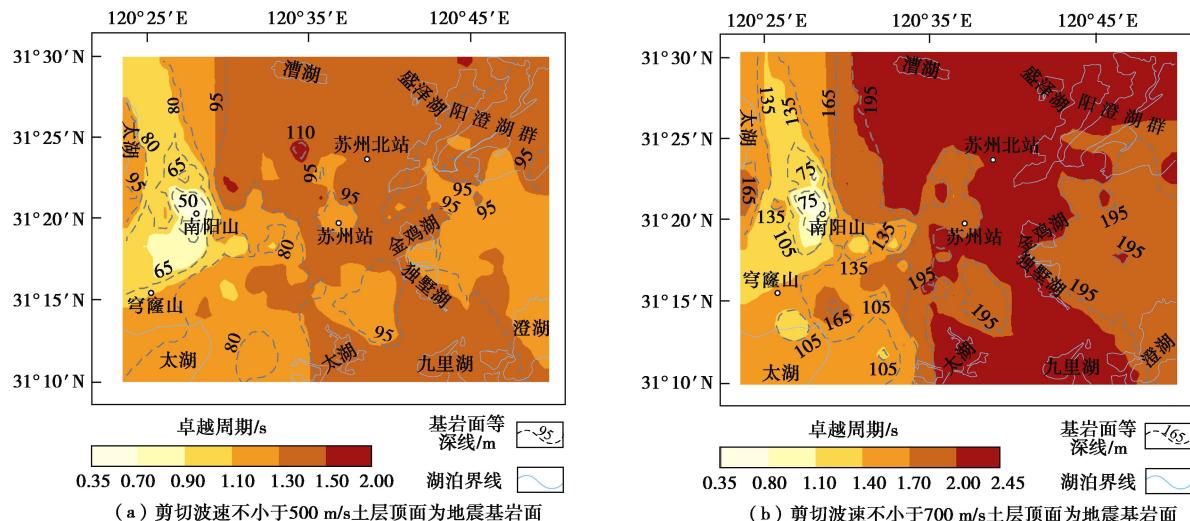


图11 苏州城区的微震动场地卓越周期及基岩面埋深等值线的空间展布

Fig. 11 Spatial variations of predominant periods under microseism and contour maps of bedrock surface depths of Suzhou city

$$T_g = 4 \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{s,i}} \quad (10)$$

式中, d_i 和 $v_{s,i}$ 分别为第 i 层土层厚度及其剪切波速。图 11(a) 和图 11(b) 分别给出了选取剪切波速不小于 500 m/s 和 700 m/s 的土层顶面为假想地震基岩面时苏州城区的微震动场地卓越周期 T_g 值及基岩面埋深 H_{rock} 等值线的空间展布。可以发现, H_{rock} 等值线与场地工程地质特征密切相关, 丘陵区域的 H_{rock} 值最小、平原区域 H_{rock} 值居中、湖群、河塘区域的 H_{rock} 值最大。与选取剪切波速不小于 500 m/s 的土层顶面为地震基岩面时的 H_{rock} 值空间展布特征相比, 选取剪切波速不小于 700 m/s 的土层顶面为地震基岩面时的 H_{rock} 值空间展布特征基本一致, 但各工程地质分区间 H_{rock} 值的差异性则显著增大, 更好地揭示了苏州城区较为陡峭的基岩面埋深的走势。对于苏州深厚第四纪地层, 选取剪切波速不小于 700 m/s 的土层顶面为地震基岩面应是更适宜的。其次, 苏州城区的 T_g 值和 H_{rock} 值的空间展布基本一致, T_g 值随 H_{rock} 值的增大而增大。以剪切波速不小于 500 m/s 的土层顶面深度为 H_{rock} 值时, 大部分区域的 T_g 值介于 1.1~1.5 s 之间, 而以剪切波速不小于 700 m/s 的土层顶面深度为 H_{rock} 值时, 大部分区域的 T_g 值介于 1.4~2.45 s 之间。

5 结论与建议

针对苏州城区剪切波速实测资料, 探讨了第四纪深厚地层剪切波速空间变化特征及其应用, 结论如下:

(1) 苏州城区等效剪切波速 v_{s20} 和 v_{s30} 空间分布规律相似, 都与场地工程地质分区密切相关; 当等效剪切波速计算深度取为 30 m 时, 苏州城区覆盖层厚度 $d > 80$ m 的 III 类和 IV 类场地的等效剪切波速分界值可取为 170 m/s; $d = 15 \sim 50$ m 的 II 类和 III 类场地的等效剪切波速分界值可取为 180 m/s。

(2) 东、西部平原区土层剪切波速随深度的变化趋势相似, 未见波速突变现象, 其离散程度与深度没有相关性; 西南部丘陵区土层剪切波速随深度的变化趋势在不同区域差异显著, 局部区域的钻孔在一定深度会出现波速突变的现象, 土层剪切波速随深度的变化极为离散。

(3) 从拟合优度来看, 东、西部平原区采用幂律模型建立剪切波速随深度的变化关系较为理想, 而丘陵区则需进一步细致分区才能显著改善拟合效果; 基于土层剪切波速随深度变化的经验公式的剪切波速预测法具有显著的区域相关性, 该预测法仅能给出同一工程地质分区的剪切波速随深度变化的平均曲线。

(4) 土层剪切波速逐步外推法的建立是基于 v_{sH}

和 $v_{s(H+d)}$ 之间存在的相关性, 且该相关性随土层深度 H 的增大而显著提高; 逐步外推法具有很好的适用性, 但当外推深度处的土层剪切波速存在剧烈变化时, 逐步外推法会失效。

(5) 基岩面埋深 H_{rock} 等值线不仅与场地工程地质特征有关, 与地震基岩面的选取也密切相关, 选取剪切波速不小于 500 m/s 和 700 m/s 的土层顶面为地震基岩面时, H_{rock} 值空间展布特征基本一致, 但后者的各工程地质分区间 H_{rock} 值的差异性显著增大; 苏州城区的 T_g 值和 H_{rock} 值的空间展布基本一致, T_g 值随 H_{rock} 值的增大而增大。

参 考 文 献:

- [1] 孔梦云, 陈国兴, 李小军, 等. 以剪切波速与地表峰值加速度为依据的地震液化确定性及概率判别法[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1239~1252. (KONG Meng-yun, CHEN Guo-xing, LI Xiao-jun, et al. Shear wave velocity and peak ground acceleration based deterministic and probabilistic assessment of seismic soil liquefaction potential[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1239~1252. (in Chinese))
- [2] SUN C G. Determination of mean shear wave velocity to 30m depth for site classification using shallow depth shear wave velocity profile in Korea[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 73: 17~28.
- [3] GÉLIS C, BONILLA L F. Influence of a sedimentary basin infilling description on the 2D P-SV wave propagation using linear and nonlinear constitutive models[J]. Geophysical Journal International, 2014, 198(3): 1684~1700.
- [4] BOORE D M. Estimating $V_s(30)$ (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths < 30 m)[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(2): 591~597.
- [5] BOORE D M, THOMPSON E M, CADET H. Regional correlations of VS30 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.
- [6] CADET H, DUVAL A M. A shear wave velocity study based on the KiK-net borehole data: a short note[J]. Seismological Research Letters, 2009, 80(3): 440~445.
- [7] STEWART J P, KLIMIS N, SAVVAIDIS A, et al. Compilation of a local VS profile database and its application for inference of VS30 from geologic and terrain-based

- proxies[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, **104**(6): 2827 – 2841.
- [8] ANDERSON J G, LEE Y, ZENG Y, et al. Control of strong motion by the upper 30 meters[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, **86**(6):1749 – 1759.
- [9] 刘红帅, 郑 桐, 齐文浩, 等. 常规土类剪切波速与埋深的关系分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(7): 1142 – 1149. (LIU Hong-shuai, ZHENG Tong, QI Wen-hao, et al. Relationship between shear wave velocity and depth of conventional soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(7): 1142 – 1149. (in Chinese))
- [10] HASANCEBI N, ULUSAY R. Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2007, **66**(2): 203 – 213.
- [11] KUO C 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 and Earthquake Engineering*, 2011, **31**(3): 431 – 439.
- [12] Council Building Seismic Safety. *FEMA P-750 NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new building and other structures[S]*. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [13] KANLI A I, TILDY P, PRÓNAY Z, et al. V_{s30} mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinar region, SW Turkey[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, **165**(1): 223 – 235.
- [14] WANG S Y, WANG H Y. Site-dependent shear-wave velocity equations versus depth in California and Japan[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, **88**: 8 – 14.
- [15] 朱 娇, 陈国兴, 许汉刚. 地震基岩面的选取对深厚场地地表地震动参数的影响[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(11): 2079 – 2087. (ZHU Jiao, CHEN Guo-xing, XU Han-gang. Effect of seismic bedrock interface depth on surface motion parameters of deep site[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(11): 2079 – 2087. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达咨询有限公司
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 上海分元土木工程有限公司
后插 1 重庆地质仪器厂
后插 2 济南普业机电技术有限公司