

文章编号: 1001-1749(2023)05-0559-07

单孔法波速测试在宿州市区建筑场地类别划分的应用及该区特征研究

刘春超, 张倩清, 李能勇, 黄长友

(安徽省地勘局 第一水文工程地质勘查院, 蚌埠 233000)

摘要: 建筑场地的不同类别反映不同场地条件对基岩地震震动的综合放大效应, 建筑场地类别是根据土层等效剪切波速和覆盖层厚度进行划分的。这里介绍了单孔法波速测试在计算土层等效剪切波速度, 划分建筑场地类别上的应用, 以及通过对宿州市区 40 个建筑场地的 201 个土层等效剪切波速数据 V_{se20} 和场地类别划分结果进行统计分析、研究, 得出该区域类似地层条件的土层等效剪切波速近似呈正态分布特征, 估算范围在 195.89 m/s~222.46 m/s, 推测建筑场地类别为 III 类。

关键词: 场地类别; 等效剪切波速; 单孔法; 统计分析; 正态分布

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.05.01

0 引言

随着我国经济社会的快速发展和城镇化进程的不断加速, 人居环境逐步改善, 城市面积不断增大, 建筑工程数量日益增多。而建筑工程开始建设之前都应进行建筑场地岩土工程勘察, 以查明、分析、评价场地的地质、环境特征和岩土工程条件, 划分对建筑有利、不利和危险地段, 提供建筑的场地类别和岩土地震稳定性评价。建筑的场地类别则是根据土层等效剪切波速和覆盖层厚度进行划分的^[1]。准确、高效地测算土层等效剪切波速, 通常是通过波速测试这种原位测试技术^[2]来实现的, 然而对于大范围的区域性场地来说, 我们需要寻求一种基于现有场地剪切波速及场地类别数据来预测和估算方法^[3], 统计分析现有场地剪切波速及场地类别数据来寻找

数据特征和规律, 则给我们提供了一种能够实现上述目的的可能。

1 单孔法波速测试

1.1 基本原理

当固体介质受到外力冲击时, 介质受到应力作用而产生应变, 在作用于介质的应力消失后, 应变和应力失去平衡。应变就在介质中以弹性波的形式由介质中的质点依次向周围传播, 这种弹性波成分较复杂, 既有面波又有体波, 体波又分为压缩波(P波)和剪切波(S波), 剪切波分为垂直分量(SV波)与水平分量(SH波)。在地层表面传播的面波可分为瑞雷波(Rayleigh)和拉夫波(Love), 各种波在介质中传播的特征和速度各不相同^[4]。

波速测试方法主要有: ①面波勘探法(测定地层

的瑞雷波速度后,推算出地层的剪切波速度);②单孔法或跨孔法。单孔法就是在单个钻孔孔口附近地表施加水平冲击力,测量孔内不同深度处冲击信号的到达时间,以计算剪切波在岩土层内传播速度的方法。该方法具有准确度高、成本低和操作简便的优势,在岩土工程勘察中被广泛应用。单孔法剪切波速测试的基本假设是地层模型在地下呈水平层状分布,剪切波速在水平方向为均匀分布^[5],垂直方向随深度变化。利用地震波的直达波原理,选择地面激振方式,即在地面激发,井中接收的方式,一般采用自下而上逐点进行测量。由震源产生的剪切波(横波),经过岩(土)体,被放置在孔中的三分量检波器接收,根据波传播的距离和走时计算出场地地层的剪切波速度。由于不同地层的剪切波速不同,剪切波在震源和检波器间的地下传播路径为折线(图1中 *a* 实线而并非直线)^[6],当板孔距 *L* 相对测点深度 *H* 较小时,按照直线(图1中 *b*,虚线)路径计算。每一波速层的剪切波波速,应按式(1)计算。

$$V = \Delta H / \Delta T \quad (1)$$

式中: V 为波速层的剪切波波速(m/s); ΔH 为波速层的厚度(m); ΔT 为剪切波传到波速层顶面和底面的时间差(s)。

剪切波从震源到达测点的时间,应按式(2)进行斜距校正。

$$T = T_0 * \frac{H}{\sqrt{L^2 + H^2}} \quad (2)$$

式中: T 为剪切波从震源到达测点经斜距校正后的时间(s),相当于波从孔口到达测点的时间; T_0 为剪切波从震源到达测点的实测时间(s); H 为测点的深度(m); L 为从板中心到测试孔的水平距离(m)。

1.2 工作方法

单孔法剪切波测试的具体工作方法是,在距孔口一定距离处放置激震源,横波震源采用约 200 cm × 45 cm × 30 cm 的木板,底部嵌入三角铁钉,并在其上方压以重物以增加木板与地面间摩擦力。在板中央位置的地表插入外触发传感器,当重锤敲击木板的震动信号传递至该触发传感器时,该时刻作为接收设备的开始记录时间;在孔中放置三分量检波器,检波器上安装机械弹簧卡片,使三分量检波器与井壁紧密耦合以提高信噪比。在测量每一个测点的横波时,用重锤沿水平方向分别击振木板两端,产生极性相反的横波波形分别记录并保存。当采用自下

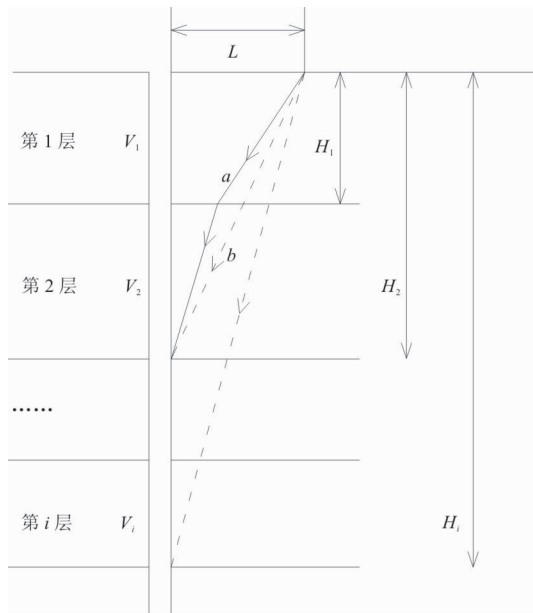


图1 剪切波旅行路径计算示意图

Fig.1 Schematic diagram of shear wave travel path calculation

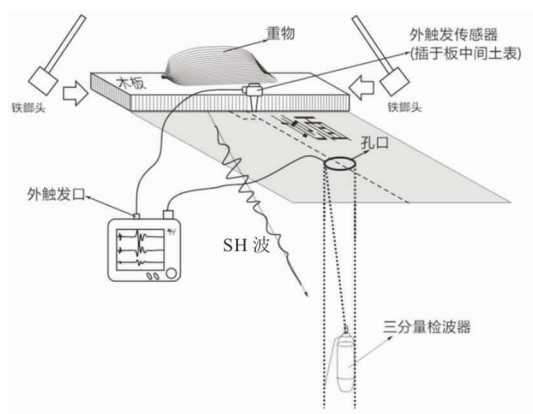


图2 现场测试示意图

Fig.2 Schematic diagram of field test

而上逐点进行测量的方式时,每个测点记录两个波形后,向上提升检波器一定距离,重新记录新测点的波形,直到从钻孔底部测量至孔口位置,形成一个钻孔的完整的剪切波速测试记录(图2)。

2 应用实例

2.1 工程概况

宿州市拟建某棚改安置区 CX102-04-02 地块,包括 9 栋高层住宅 28F-34F;6 栋 1-6F 层商业配套;配电房、大门、地下室等。总建筑面积约 259 000 m²。拟建场地位于宿州市三八街道,区域

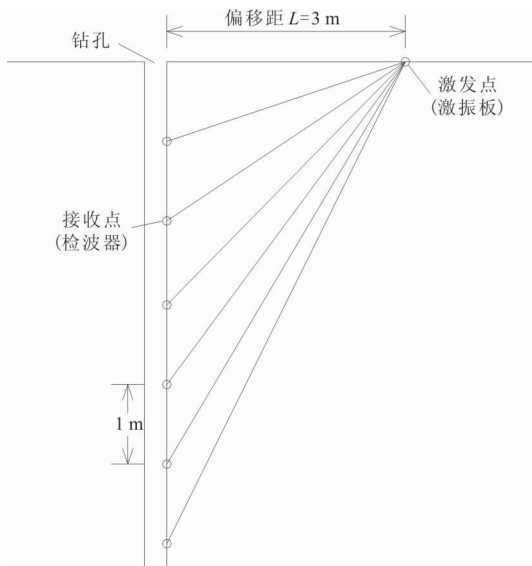


图 3 观测系统设计示意图

Fig. 3 Schematic diagram of observation system design

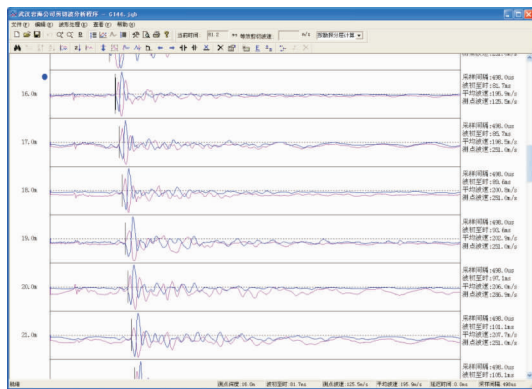


图 4 剪切波初至时间拾取示意图

Fig. 4 Schematic diagram of picking up the first break time of shear wave

地质资料及附近工程地质资料显示,该场地地形平坦,地貌类型单一,属于淮北冲积平原,微地貌单元为河间地块,地层结构较简单,分布连续,厚度基本稳定,物理力学性质均匀,场地及周围不存在全新活动的断裂构造、地裂缝等不良地质作用。为了满足建筑抗震设计要求,项目需要进行剪切波速测试以划分场地土类型、场地类别及估算场地卓越周期。

本次剪切波速测试工作,采用武汉岩海工程技术有限公司生产的 RS-1616(p) 基桩动测仪及井中 28 Hz 三分量电磁机械式检波器,敲击板激震源,偏移距为 3 m 左右,并准确测量记录,测点距为 1 m,采取自下而上逐点测量方式(图 3),共测试 9

个波速孔(G137 #、G139 #、G144 #、G154 #、G159 #、G164 #、G169 #、G176 #、G182 #),孔深均为 40 m。

2.2 资料处理

因工程人工激振横波的位置和方向可以根据勘探方法和目的需要进行人为控制,工程人工激振横波和天然源地震横波在识别上还是有一定的差别。在本次单孔法波速测试的资料处理上,室内我们采用武汉岩海公司剪切波分析程序将现场仪器测试的记录进行数字解编,回放波形,并进行适当去噪声处理,然后将每个测点上正反两个方向敲击激振板得到的两个横波记录进行重叠。在理想状态下,重叠的两个横波波形极性相反。根据极性相反这一特点以及纵波速度大、频率高,横波速度小、频率低的特性,可以较清晰地对横波(剪切波)进行识别,并对横波初至时间进行拾取(图 4)。

对原始数据初至时间拾取后,对剪切波的初至时间进行孔口(偏移)时间校正,绘制时距曲线图(图 5,深度 H 为纵坐标,时间 T 为横坐标),根据时距曲线图中各深度段斜率的变化再结合钻孔地质分层情况分出各波速段,并计算出各段的剪切波平均速度(表 1)。

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)(2016 版),土层的等效剪切波速按下列公式计算:

$$V_{se} = d_0/t \quad (3)$$

$$t = \sum_{i=1}^n (d_i/V_{s_i}) \quad (4)$$

式中: V_{se} 为土层等效剪切波速(m/s); d_0 为计算深度(m),取覆盖层厚度和 20 m 二者较小值; t 为剪切波在地面至计算深度之间的传播时间(s); d_i 为计算深度范围内第 i 土层的厚度(m); V_{s_i} 为计算深度范围内第 i 土层的剪切波速(m/s); n 为计算深度范围内土层的分层数。

由计算结果可知,该场地 9 个波速孔孔深度 40 m 内均无剪切波速大于 500 m/s 的土层,故建筑场地覆盖层厚度 d 大于 20.0 m。取 20 m 以上地层计算等效剪切波速度,经计算 G144 # 孔的等效剪切波速 V_{se20} 为 208.33 m/s。

2.3 测试成果

经过资料处理和计算,宿州市拟建某棚改安置区 CX102-04-02 地块项目 9 个波速孔土层的等效剪切波速度见表 2。

表 1 G144# 孔波速测试剪切波记录计算表

Tab.1 Calculation of shear wave records of G144# borehole wave velocity test

测点深 H/m	走时 t/ms	校正走时 t'/ms	波速 $V_s/m \cdot s^{-1}$
1	32.5	9.4	105.82
2	36.4	18.9	
3	35.7	24.0	
4	37.8	29.2	194.17
5	40.2	33.5	
6	43.2	37.9	
7	46.7	42.2	230.26
8	50.4	46.6	
9	54.2	50.9	
10	58.2	55.3	
11	62.2	59.6	
12	66.0	63.7	247.19
13	69.9	67.7	
14	73.7	71.8	
15	77.6	75.8	
16	81.5	79.9	
17	85.5	83.9	
18	89.4	88.0	
19	93.4	92.0	
20	97.3	96.0	
21	101.3	100.1	
22	105.3	104.1	
23	109.1	108.0	258.06
24	112.9	111.9	
25	116.7	115.7	
26	120.5	119.6	
27	124.3	123.4	261.78
28	128.1	127.2	
29	131.9	131.0	
30	135.7	134.9	
31	139.5	138.7	
32	143.0	142.3	277.78
33	146.6	145.9	
34	150.1	149.4	281.69
35	153.7	153.0	
36	157.0	156.4	295.86
37	160.4	159.7	
38	163.7	163.1	
39	167.1	166.5	
40	170.5	169.9	

偏移距 $L=3.3\text{ m}$

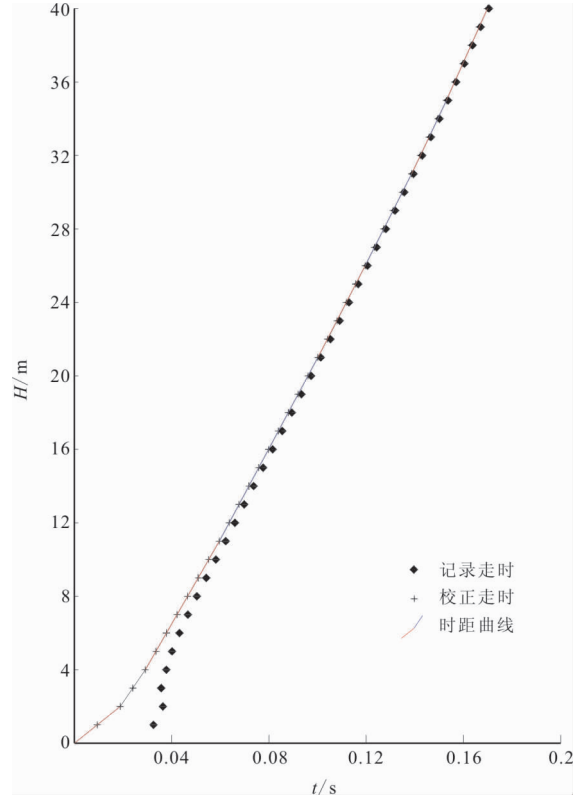


图 5 G144# 孔波速测试剪切波时距曲线图

Fig.5 Time distance curve of G144# borehole wave velocity test

表 2 各孔等效剪切波速成果表

Tab.2 Equivalent shear wave velocity results of each borehole

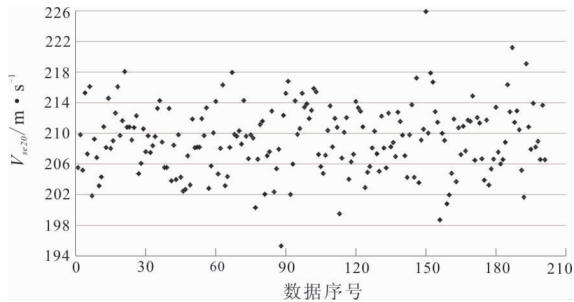
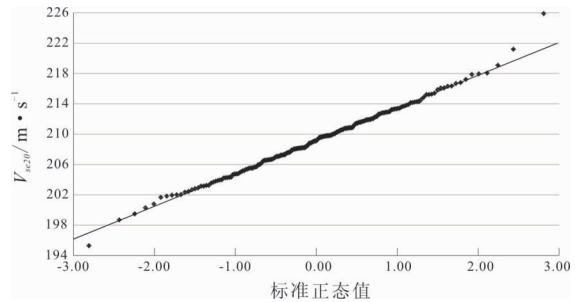
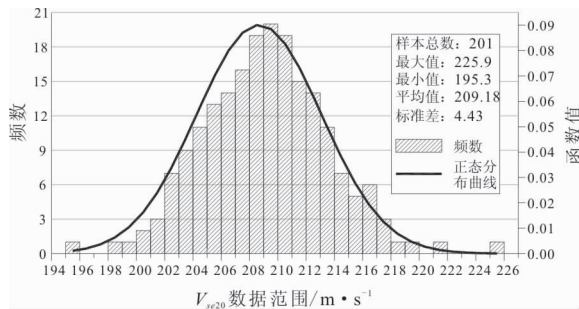
孔号	等效剪切波速 $V_{se20}/m \cdot s^{-1}$	孔号	等效剪切波速 $V_{se20}/m \cdot s^{-1}$
G137#	206.1	G164#	205.6
G139#	201.29	G169#	206.34
G144#	208.37	G176#	210.73
G154#	203.42	G182#	204.25
G159#	203.59	平均值	205.52

表 3 各类建筑场地的覆盖层厚度

Tab.3 Overburden thickness of various construction sites

岩石或土的等效 剪切波速/ $m \cdot s^{-1}$	场地类别				
	I ₀	I ₁	II	III	IV
$V_s > 800$	0				
$800 \geq V_{se} > 500$		0			
$500 \geq V_{se} > 250$		< 5	≥ 5		
$250 \geq V_{se} > 150$		< 3	3-50	> 50	
$V_{se} \leq 150$		< 3	3-15	15-80	> 80

V_s 系岩石的剪切波速度

图 6 $V_{s,e20}$ 数据散点图Fig. 6 $V_{s,e20}$ data scatter plot图 8 $V_{s,e20}$ 正态 Q-Q 图Fig. 8 $V_{s,e20}$ normal Q-Q plot图 7 $V_{s,e20}$ 频数直方图及正态曲线Fig. 7 $V_{s,e20}$ frequency histogram and normal curve

根据勘察资料并结合区域地质资料,该建筑场地覆盖层厚度 d 大于 50.0 m,9 个孔的等效剪切波速 $V_{s,e20}$ 为 201.29 m/s ~ 210.73 m/s,平均值为 205.52 m/s。由表 3 可知,该建筑场地类别为Ⅲ类,场地土类型属中软场地土,估算场地卓越周期为 $T=0.389$ s。

3 宿州市区建筑场地类别划分特征研究

3.1 宿州市区地质背景

宿州市位于黄淮平原南端,安徽省东北部,是安徽省的北大门,是长三角城市群、中原经济区重要节点,宿淮蚌都市圈、宿淮城市组群城市,安徽区域中心城市之一。历史上黄河曾多次决口和改道,夺淮河而入海,淮河与黄河的泛滥使淮北平原上堆积了厚达 200 m 左右的第四纪土层,多为粘性土和粉细砂互层,宿州市区及近郊无基岩出露^[7]。

宿州市区地层属华北地层大区,晋冀鲁豫地层区,徐淮地层分区,淮北地层小区,第四纪地层发育,厚 80 m ~ 100 m,北薄南厚,自下而上描述如下:①下更新统桃园组(Q_{1t});②中更新统潘集组(Q_{2p});③上更新统茆塘组(Q_{3m});④全新统萧垌组(Q_{4x})。

3.2 研究对象

场地剪切波速与场地类别数据,一般是通过钻孔及孔内原位测试的技术方法来获取的。为研究宿州市区建筑场地类别划分特征,笔者收集了 2012 年—2021 年宿州市区 40 个建筑场地的工程勘察资料,共 201 个钻孔的土层等效剪切波速 $V_{s,e20}$ 数据,该 40 个建筑场地几乎均匀分布于宿州市区的各个位置,场地类别均为Ⅲ类,201 个钻孔的土层等效剪切波速度 $V_{s,e20}$ 介于 195.3 m/s ~ 225.9 m/s 之间,平均值为 209.18 m/s(图 6)。通过对已有的波速进行统计分析,进而寻找该区域的建筑场地类别划分的特征规律。

3.3 统计分析

宿州市区 40 个建筑场地的 201 个钻孔土层等效剪切波速统计结果:最大值为 225.9 m/s、最小值为 195.3 m/s、平均值为 209.18 m/s、标准差为 4.43 m/s。图 7 为 201 个钻孔 $V_{s,e20}$ 数据直方图和根据统计结果(平均值、标准差)画出的正态分布曲线。从图 7 可以看出,本次收集的宿州市区 201 个钻孔 $V_{s,e20}$ 数据直方图和正态分布曲线形态基本拟合。

为检验本次收集宿州市区 201 个钻孔 $V_{s,e20}$ 数据的分布情况,对原始数据做正态 Q-Q 图(图 8)。Q-Q 图是一种散点图^[8],对应于正态分布的 Q-Q 图,是由标准正态分布的分位数为横坐标,样本值为纵坐标的散点图,要鉴别样本数据是否近似于正态分布,只需看 Q-Q 图上的点是否近似地在一条直线附近,图形是直线说明是正态分布,而且该直线的斜率为标准差,截距为平均值。从图 8 中可以看出,样本数据点近似地在一条直线上,该直线的斜率约为 4.4,截距约为 209,与计算的标准差和平均值吻合。故本次收集的宿州市区 201 个钻孔等效剪切波速度近似地呈正态分布特征。

根据正态分布的 3σ (μ 为平均值, σ 为标准差) 原则^[9]: 数值分布在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 中的概率为 0.997 4, 服从正态分布的数据几乎集中在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 区间内。由此, 推算出宿州市区类似地层条件的土层等效剪切波速度在 195.89 m/s ~ 222.46 m/s 之间。

3.4 宿州市区建筑场地类别划分特性

根据推算的宿州市区类似地层条件的土层等效剪切波速度为 195.89 m/s ~ 222.46 m/s, 市区覆盖层 > 50 m, 判定宿州市区类似地层条件的建筑场地类别为Ⅲ类。

收集的宿州市区 40 个建筑场地工程勘察资料中, 201 个钻孔 V_{se20} 在 195.3 m/s ~ 225.9 m/s 之间, 场地类别均为Ⅲ类, 符合上述推算结果。

由于地层的剪切波速与地层的土质类型、状态、埋深等有关, 也与相邻地层有关, 影响地层剪切波速的客观因素有很多^[10]。本次收集的宿州市区 40 个建筑场地不能完全覆盖宿州市区所有区域, 只对该地区类似地层条件的场地而言, 收集到的资料统计分析的结果具有一般性特征, 不排除局部个别区域地层变化大, 所测土层等效剪切波速和场地类型与统计分析结果不同的情况。

4 结论

经过对宿州市区其中一个建筑地块的 9 个波速孔进行单孔法波速测试, 结合工勘地层资料, 计算出各个波速孔的不同地层的剪切波平均层速度, 参考宿州市区覆盖层厚度 d 大于 50 m, 取 20 m 以上地层计算的该 9 个孔的土层等效剪切波速度 V_{se20} 为 201.29 m/s ~ 210.73 m/s, 平均值为 205.52 m/s, 判断该建筑地块场地类别为Ⅲ类。

根据宿州市区覆盖层厚度 d 大于 50 m 和收集的 40 个建筑场地的 201 个钻孔土层等效剪切波速及场地类别数据, 基于统计分析, 得出宿州市区类似地层条件的土层等效剪切波 V_{se20} 近似地呈正态分布特征, 估算范围在 195.89 m/s ~ 222.46 m/s, 预测建筑场地类别为Ⅲ类。

单孔法波速测试是岩土工程勘察中一种原位测试技术。它的激发信号由人工产生, 便于控制, 利于测试各个层位的波速, 可适用于泥浆较稀、无堵塞的

钻孔, 不受水位影响, 井斜、孔径等影响较小。相比跨孔法, 它不需要更多的钻孔, 节约了测试成本; 相比面波法, 它不需要复杂的仪器设备以及后期复杂的资料导致的误差。单孔法波速测试具有快速简便、经济、结果准确等优点, 通过工程实例证实, 应用单孔法测试土层等效剪切波速度, 进而进行土层类别评价具有显著效果。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范 (2016 年版): GB50011-2010 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
PRC National standard. Code for seismic design of buildings (2016 Edition): GB50011-2010 [M] Beijing: China Construction Industry Press, 2016. (In Chinese)
- [2] 张华, 曹军, 龚育龄, 等. 波速测试技术在场地抗震评价中的应用研究 [J]. 物探化探计算技术, 2010, 32(1): 68-71.
ZHANG H, CAO J, GONG Y L, et al. The application research of wave-velocity test technique in the evaluation of site earthquake resistant [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 32(1): 68-71. (In Chinese)
- [3] 张龙飞. 基于地统计分析的大同盆地 V_{se20} 及建筑场地类别预测 [J]. 城市地质, 2020, 15(01): 56-62.
ZHANG L F. Prediction of V_{se20} and building site classification in Datong Basin based on geostatistical analysis [J]. Urban Geology, 2020, 15(01): 56-62. (In Chinese)
- [4] 郭明珠, 贾连军, 铁瑞, 等. 剪切波速测试方法的现状分析 [J]. 西北地震学报, 2011, 33(z1): 21-23.
GUO M Z, JIA L J, TIE R, et al. Analysis on current situation of shear-velocity measurement method [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(z1): 21-23. (In Chinese)
- [5] 喻礼生. 剪切波速测试资料反演计算方法应用研究 [D]. 安徽: 安徽建筑大学, 2015.
YU L S. Application of inversion calculation method of shear wave velocity test data [D]. Anhui: Anhui Jianzhu University, 2015. (In Chinese)
- [6] 廖振鹏. 工程波动理论导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

- LIAO Z P. Introduction to wave motion theories in engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (In Chinese)
- [7] 张金海, 凌以奎. 宿州市市区浅层工程地质条件评价[J]. 安徽地质, 1998(03): 64-67.
- ZHANG J H, LING Y K. Appraisal of shallow horizon engineering geological conditions of the urban area of Suzhou city[J]. Geology of Anhui, 1998(03): 64-67. (In Chinese)
- [8] 宗序平, 姚玉兰. 利用 Q-Q 图与 P-P 图快速检验数据的统计分布[J]. 统计与决策, 2010(20): 151-152.
- ZONG X P, YAO Y L. Using Q-Q plot and P-P plot to quickly test the statistical distribution of data [J]. Statistics and Decision, 2010(20): 151-152. (In Chinese)
- [9] 车荣强. 概率论与数理统计[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2007.
- CHE R Q. Probability theory and mathematical statistics [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2007. (In Chinese)
- [10] 陆观宏, 林汉伟, 李双英. 地层剪切波速的经验确定问题[J]. 广东水利水电, 2005(03): 14-15.
- LU G H, LIN H W, LI S Y. Empirical value of shear wave velocity of strata [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2005(03): 14-15. (In Chinese)

Application of single borehole method wave velocity test in the classification of construction sites in Suzhou urban area and research on the characteristics in this area

LIU Chunchao, ZHANG Qianqing, LI Nengyong, HUANG Changyou

(The First Institute of Hydrology and Engineering Geological Prospecting Anhui Geological Prospecting Bureau, Bengbu 233000, China)

Abstract: Different classifications of construction sites reflect the comprehensive amplification effect of different site conditions on bedrock seismic vibration. The classifications of construction sites are divided according to the equivalent shear wave velocity of the soil layer and the overburden thickness. This paper introduced the application of a single borehole method wave velocity test in calculating the soil layer's equivalent shear wave velocity and dividing the construction site classifications. Through the statistical analysis and Research on the 201 data of soil layer's equivalent shear wave velocity and the division results of site classifications of 40 construction sites in the Suzhou urban area, it is concluded that the equivalent shear wave velocity of soil layer under similar stratum conditions in this area is an approximately normal distribution. The estimation range is 195.89 ~ 222.46 M / s, and speculated that the construction site is class III.

Keywords: site classification; equivalent shear wave velocity; single borehole method; statistical analysis; normal distribution