

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230215001

盐城市城区土层剪切波速与土层深度 相关性分析*

王金艳, 陶小三, 王琛, 邵斌, 徐烨

(江苏省地震局, 江苏南京 210014)

摘要: 剪切波速是评价土体力学性质的一个重要参数。为分析盐城市城区土层剪切波速与土层深度之间的相关性。收集了盐城市城区场地地震安评和区域性地震安全性评价工程中384个钻孔29925条剪切波速,对剪切波速度与土层深度数据进行处理,采用线性、多项式及幂函数3种模型对4类土剪切波速随深度变化进行回归分析,给出了4类土剪切波速随深度变化的三种关系式及相应的回归参数。将三种模型计算得到的剪切波速预测值及实测值进行对比分析与检验。结果表明,盐城市城区土层的剪切速度随着土层深度的增加而增加,拟合优度均在0.80以上,Ⅲ类场地粘土的相关性系数达到0.949;给出的各类岩土体的剪切波速与土层深度经验关系模型较为可靠,预测精度均较高。研究结果可供盐城城区无场地剪切波速数据时参考使用。

关键词: 盐城市; 剪切波速; 土层深度; 回归分析

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1193-09

Correlation Analysis between Shear Wave Velocity and Soil Layer Depth in Urban Area of Yancheng City

WANG Jinyan, TAO Xiaosan, WANG Chen, SHAO Bin, XU Ye
(Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China)

Abstract: Shear wave velocity is an important parameter for evaluating soil mechanical properties. This study aims to analyze the correlation between shear wave velocity and the soil layer depth in the urban area of Yancheng City. A total of 29,925 shear wave velocity data points from 384 boreholes in seismic safety assessments and regional seismic safety evaluation projects in Yancheng were collected. The relationship between shear wave velocity and soil layer depth was analyzed using three types of regression models: linear, polynomial, and power functions. Regression analysis was performed on four types of soil to understand the variation of shear wave velocity with depth, resulting in three corresponding equations and regression parameters for these soil types. The predicted shear wave velocity calculated from the three models was compared with the measured values for verification. The results showed that the shear wave velocity of the soil layer in the urban area of Yancheng increased with the

* 收稿日期:2023-02-15;修回日期:2023-06-20

基金项目: 江苏省地震局科研基金(2024002)、中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH24013B)、江苏省地震局情景地震构建与应用创新团队(2022-03)资助

作者简介: 王金艳(1982—),女,高级工程师,硕士。主要从事工程地质、三维建模、活动构造方面的研究。E-mail:117001305@qq.com

通信作者: 陶小三(1976—),男,高级工程师。主要从事地震工程方面的研究。E-mail:txs3880@163.com

increase of the soil layer depth, with all models achieving a goodness of fit above 0.80, and the correlation coefficient for class III clay reaching 0.949. The empirical relationship models between shear wave velocity and soil layer depth for various types of rock and soil provided in this study are reliable, with high prediction accuracy. These findings can serve as reference when shear wave velocity data for sites in Yancheng urban area is unavailable.

Keywords: Yancheng City; shear wave velocity; soil layer depth; regression analysis

0 引 言

剪切波速指的是一种物理参数,反映的是波在介质中的传播速度。剪切波速是评价土体力学性质的一个重要参数,它反映了土在动力影响下的惯性作用和波传行为,是反映土体在地震作用下行为反应的一个重要物理量^[1]。场地剪切波速是用于建筑场地类别、场地动力反应分析、地基土的液化判别、计算场地土层的动弹性模量、推算卵石、圆砾地基承载力标准值等研究中重要的土动力学参数之一^[2-6]。目前,现场剪切波速测试是获取可靠测试资料的最有效手段之一^[7],在实际工程项目中,剪切波速的测试往往受到测试环境、测量方法、测试深度、钻孔塌孔等因素的影响,有时得不到准确的测试结果,也无法确定建筑场地类别,进而影响工程规划初期的项目选址及抗震设计地震动参数的预估使用。因此,如何根据当地土层的类别、性质及深度给出相应的剪切波速是一项具有重要工程意义的研究课题。

目前,国内外大量学者针对剪切波速与土层深度关系进行了研究。如王帮圆等^[8]认为邯郸市土层剪切波速与深度之间砂性土、粉土及粉质粘土宜采用多项式进行拟合;蔡润等^[9]定性探讨了成都地区Ⅱ类场地常见的10类土的剪切波速与土层深度的关系;乔峰等^[10]基于广西柳州地区地震安全性评价中实测所获的钻孔资料,对该地区土层剪切波速与土层深度之间的相关性进行了拟合分析;李敏等^[11]基于杭州市场地钻孔剪切波速资料,采用3种常见的剪切波速与土层深度回归分析模型,得出了剪切波速与土层深度关系公式;宋健等^[12]依据哈尔滨市核心区域的钻孔实测剪切波速数据,定性分析了剪切波速与土层深度的关系;段蕊等^[13]对铜川市地区典型土层剪切波速随深度的变化关系进行统计回归,得到最优回归公式为一元三次多项式函数模型;蒋其峰等^[14]基于幂函数的回归模型,给出鲁西平原地区土剪切波速与土层深度之间经验关系;郑龙等^[15]根据大柴旦地震小区划的钻孔实测剪切波速数据,确定二次函数作为研究区域内剪切波速

与土层深度间的最优统计公式;沈方铝等^[16]研究结果表明除卵石外,福州市区土层剪切波速与土层深度间的相关性较为明显,一元二次多项式函数的适用性更强;林亚洲等^[17]对武汉后湖地区实测剪切波速数据的分析,得到了武汉后湖地区各土层的回归关系式和相关系数;王金艳等^[18]利用多元回归分析的方法给出了常州城区土层剪切波速与土层深度关系;何仲太等^[19]应用大量钻孔剪切波速实测数据,给出了分场地类别和不分场地类别的衡水市城区常规土剪切波速与土层深度间的统计公式。陶小三等^[20]对南京河西地区岩土体剪切波速与土层深度的关系进行了研究,给出了三种不同的经验回归方程。刘红帅等^[21]依据中国地震安评工作大量的钻孔实测剪切波速数据,建立了分场地类别和不分场地类别两种情况下常规土类剪切波速与土层深度间的统计公式。张小平等^[22]通过对大连地区工程场地各类岩土剪切波速资料的统计分析,探讨了大连地区工程场地各类岩土剪切波速的变化规律及在一定土层深度内的分布范围。

从之前研究可以看出,不同地区相同土层的剪切波速之间均存在较大差别,故土层剪切波速与土层深度之间的经验公式可能存在一定的区域性。因此,对于无法获得实测剪切波速的场地的情况,需要依据当地经验关系对剪切波速进行推算,确定某地区的剪切波速值与土层深度的相关性,以供选址及估计抗震设计地震动参数,具有较好的工程意义和应用价值。

就盐城市市区而言,尚未有学者提出该地区的剪切波速与土层深度的统计关系,因此拟合该地区的剪切波速与土层深度的经验公式具有重要的工程价值。为此,本文收集了盐城市城区场地和区域性地震安全性评价报告,得到了384个钻孔和29 925条剪切波速数据,对29 925条剪切波速度与土层深度数据进行分析处理,对不同场地类别下4类土层分别进行三种模型的回归分析,通过统计关系,给出了盐城市主城区土层剪切波速与土层深度之间的关系,将三种模型计算得到的剪切波速预测值及实测值进行对比分析与检验,对回归方程和回归系数进行了显著性检验。结果表明,给出的各类

岩土体的剪切波速与土层深度经验关系模型较为可靠,预测精度均较高,研究结果可供盐城城区无场地剪切波速数据时参考使用。

1 盐城市城区地质地貌概况

盐城市位于苏北平原地区,东临南黄海,水系密布,地貌类型为平原堆积地貌,主要由滨海冲积平原和江淮平原组成,据地貌成因及水系分布,以沟墩-上冈-伍佑-白驹一带为界,西部为江淮平原海拔3~5 m、东部为滨海平原区且海拔逐渐降低。新近纪以来沉积厚度在1 240~1 400 m之间,第四系厚度180~190 m。盐城市城区在盐城凹陷与建湖隆起之间,盐城凹陷中新生界发育齐全,新生界沉积厚度达4 500 m,为一南断北超的箕状凹陷,南以盐城-南洋岸断裂为界与建湖隆起相邻。建湖隆起位于苏北坳陷区中部,对晚白垩世及第三纪的沉积有一定的控制作用。盐城地区古近系和新近系发育齐全,古近系与新近系主要为一套陆相碎屑岩,沉积厚度大,最大厚度达3 000 m以上。新近纪地层主要包括中、上新统盐城

组和第四系下更新统五队镇组、中更新统小腰庄组、上更新统灌南组和全新统淤尖组。

盐城城区第四系松散沉积物厚度较大,覆盖层厚度大多数大于100 m,岩性较单一,主要为全新统及上更新统冲积、海陆交互沉积的粉质黏土、粉砂、黏土及粉土。根据盐城市城区地形、地貌、地层岩性及条件及受断裂构造影响的特点,结合收集到的钻孔资料,将盐城市城区工程地质分为I区和II区(图1)。I区地貌上属于滨海冲积平原和江淮平原,主要为第四系全新统及更新统地层,岩性以厚度较大的粉质黏土为主,其次为粉土、粉砂层^[23]。场区地下水土层深度在0.3~5.0 m之间,场地土类型为中软土,场地类别为III类。II区的地貌、岩性与I区相同,区内地下水位土层深度在0.25~2.59 m之间,场地土类型为软弱土,场地类别为IV类。

2 数据来源与分析方法

2.1 数据来源

本文收集了盐城市城区范围内2009~2022年

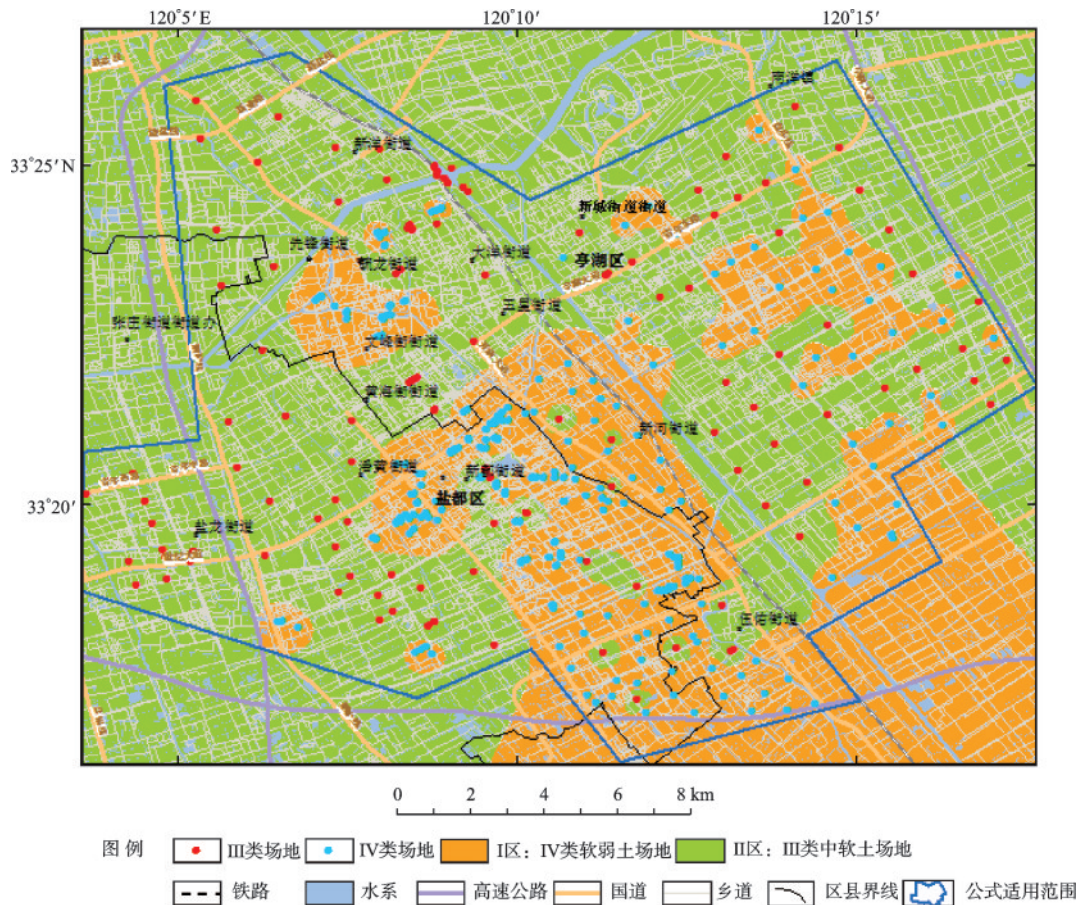


图1 盐城市城区工程地质分区

Fig.1 Engineering geological zoning map of Yancheng City

以来开展的场地和区域性地震安全性评价工作中的384个钻孔。其中Ⅲ类场地的钻孔122个,Ⅳ类场地的钻孔262个,共获取钻孔剪切波速数据29 925条。将收集到的剪切波速度和土层深度数据进行数据清理,去除异常值,结合安评或区评报告中的场地计算模型,将剪切波速度、土层深度数据与土层进行关联,确保每一组数据之间的对应关系。经过统计分析,选取的384个钻孔中孔深大于100 m的只有5个,其分析结果不具备代表性,因此

实际筛选场地剪切波速实测数据点Ⅲ类4 472个,Ⅳ类17 985个。所有钻孔波速测试使用仪器均为XG-I型悬挂式测井系统,采样率:0.003~10 ms,记录长度:512~16 384点。

盐城城区主要土层有素填土、粉质黏土、黏土、粉砂及粉土。分别研究不同场地类别下盐城城区各土层剪切波速随土层深度变化的关系。各类土实测剪切波速统计见表1,不同场地土层剪切波速与土层深度的散点图如图2所示。

表1 盐城市城区土层剪切波速测试点数据统计

Table 1 Statistical data of shear wave velocity test points in Yancheng City

分区及土类型	Ⅲ区					Ⅳ区				
	素填土	黏土	粉土	粉砂	粉质黏土	素填土	黏土	粉土	粉砂	粉质黏土
深度/m	0.4~6	5~100	4.9~100	5~100	1.4~100	0.3~5	9~100	5~100	4.2~100	3~100
波速/(m·s ⁻¹)	101~135	111~532	109~500	128~487	93~532	95~125	91~535	96~543	97~526	91~535
波速数量/个	122	908	980	1039	1545	262	4024	6535	2098	5328
平均波速/(m·s ⁻¹)	115	380	305	341	333	105	387	327	360	305
标准差	11.5	80.2	90.1	76.7	111.1	6.3	75.7	82.2	60.5	85.4

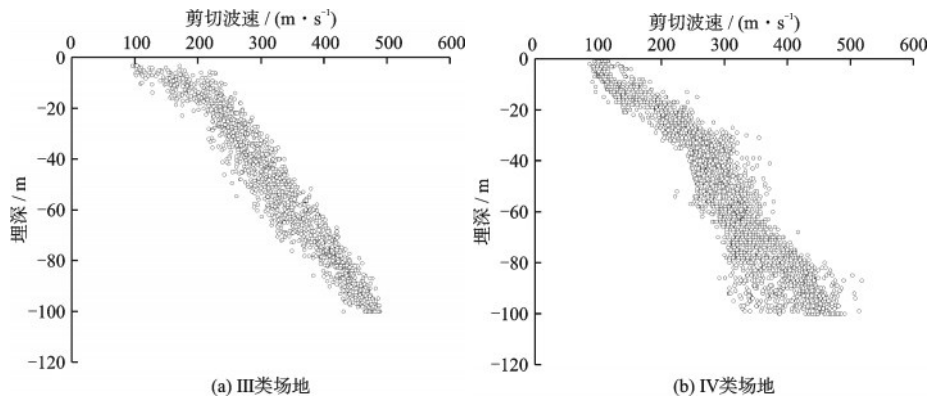


图2 不同场地土层剪切波速与土层深度间的散点图

Fig.2 Scatter plot of shear wave velocity and soil layer depth for different site classifications

2.2 分析方法

研究表明,剪切波速随深度的衰减速率与土层的孔隙度、渗透率、固结程度、地层厚度等地质性质有关。由于地质条件的不同,同一种函数形式在不同区域的参数可能存在差异。例如在砂土、砾石和粘土等不同类别的场地中,剪切波速度随着地层厚度的变化而变化,其变化趋势也是不同的^[9-22]。因此,在某一特定的区域内,应根据区域的实际情况,结合现有的统计回归函数,调整参数,从而求解出合适的回归函数,以此提高模型的准确性。目前,国内外在统计回归剪切波速与土层深度变化关系的函数主要有3种函数模型^[1-8]:线性 $V_s = a + bH$ 、多项式 $V_s = a + bH + cH^2$ 及幂函数 $V_s = aH^b$ 。其中 V_s 为土层剪切波速(m/s); H 为土层深度(m); a, b, c 为拟合参数。

本文针对盐城城区Ⅲ类和Ⅳ类两种场地类别,利用三种常用回归分析法,拟合出剪切波速度与土层深度之间的函数关系,通过统计学方法进一步分析数据,定量研究剪切波速度与土层深度之间的相关性。并以拟合优度 R^2 来检验回归方程对观测数据的拟合程度,用来度量方程总体回归效果的优劣。拟合优度为 $0 < R^2 < 1$ 。当 R^2 越接近1,其拟合效果亦越好^[18],最后进行对比分析给出盐城城区土地剪切波速与土层深度间的最优模型。

3 盐城城区土层剪切波速与土层深度间的关系分析

通过统计384个钻孔的土层分布特征,将盐城市

城区的土类划分为素填土、粉质黏土、粉砂、粉土、黏土5类,其中素填土未表现出剪切波速与土层深度间的相关性,因此本文不对素填土做回归分析。分别采用线性函数、多项式函数、幂函数3中模型对各类土体进行剪切波速与土层深度关系的回归分析,经验关系的拟合参数值见表2和表3,并统计计算了每种模型的拟合优度 R^2 。从各类土体的剪切波速与土层深度关系散点图(图3和图4)可以看出,随着土层

深度增加,剪切波速度也随之增加,剪切波速度与土层深度之间存在显著的正相关性,所有模型拟合优度均在0.80以上,其中Ⅲ类场地黏土的相关性系数达到0.949。根据拟合结果,Ⅲ类场地黏土、粉质黏土、粉砂适合幂函数模型,粉土适合多项式模型。Ⅳ类场地的粉土、黏土和粉质黏土适合幂函数模型,粉砂适合多项式模型。盐城城区不同场地类别中各土层剪切波速与土层深度间的最优模型见表4。

表2 盐城市城区Ⅲ类场地各类土模型参数及拟合优度

Table 2 Model parameters and goodness of fit for various soil types in Class Ⅲ sites in the urban area of Yancheng

场地类别	岩土类型	参数	黏土	粉土	粉质黏土	粉砂	
Ⅲ类场地	线性模型参数	a	192.001 89	172.619 45	160.676 1	188.855 75	
		b	2.912 76	3.271 03	3.308 26	2.946 65	
		R^2	0.882 53	0.883 79	0.912 74	0.857	
	多项式模型参数	a	144.562 21	125.312 04	136.990 12	156.301 97	
		b	5.086 7	5.805 29	4.643 9	4.499 87	
		c	-0.019 51	-0.025 37	-0.013 14	-0.014 67	
		R^2	0.905 64	0.914 66	0.922 16	0.871 06	
	幂函数模型参数	a	96.805 96	65.622 38	63.776 18	72.841 28	
		b	0.330 21	0.427 16	0.430 2	0.399 36	
		R^2	0.949 41	0.915 34	0.925 83	0.875 29	
	Ⅳ类场地	线性模型参数	a	137.90 513	157.709 93	111.926 39	160.197 39
			b	3.010 29	2.570 07	3.382 94	2.602 81
R^2			0.864 07	0.823 31	0.878 08	0.808 13	
多项式模型参数		a	141.699 28	132.286 76	76.721 58	154.954 08	
		b	2.841 97	3.841 59	5.833 65	2.832 35	
		c	0.001 44	-0.012 23	-0.027 16	-0.002 05	
		R^2	0.864 17	0.833 35	0.912 78	0.798 42	
幂函数模型参数		a	40.989 73	60.097 5	45.393 46	54.862 1	
		b	0.508 69	0.407 71	0.479 14	0.433 17	
		R^2	0.878 82	0.834 8	0.916 73	0.810 98	

表3 各类岩土体的 V_s-H 回归分析成果

Table 3 Results of V_s-H regression analysis for various rock and soil types

岩土类型	Ⅲ		Ⅳ	
	经验回归方程	相关系数	经验回归方程	相关系数
黏土	$V_s=96.805 96H^{0.330 21}$	0.949 41	$V_s=141.699 28+2.841 97H+0.001 441H^2$	0.864 17
粉土	$V_s=125.312 04+5.805 29H-0.0253 71H^2$	0.914 66	$V_s=60.097 5H^{0.407 71}$	0.834 8
粉质黏土	$V_s=63.776 18H^{0.430 2}$	0.925 83	$V_s=45.393 46H^{0.479 14}$	0.916 73
粉砂	$V_s=72.841 28H^{0.399 36}$	0.875 29	$V_s=154.954 08+2.832 35H-0.002 051H^2$	0.810 98

4 统计结果检验

为了验证本文提出的回归关系式的可靠性和适用性,本文从盐城市城区Ⅲ类和Ⅳ类工程场地各选取2个,并将各土层最优模型计算结果与实测值进行对比,得出相对误差,以此验证所得回归关系式的预测精度,由表4和表5可知,本文推荐

的拟合关系计算的剪切波速与实测值基本吻合。在验证的4个钻孔中,Ⅲ类场地的相对误差最大为10.31%,最小为0.25%,Ⅳ类场地的相对误差最大10.16%,最小为0.25%。结果表明,本文推荐的模型回归关系式能够准确预测盐城市城区钻孔剪切波速与埋深之间的关系,可以在无实测剪切波速数据时参考使用,满足盐城市城区建设工程的需求。

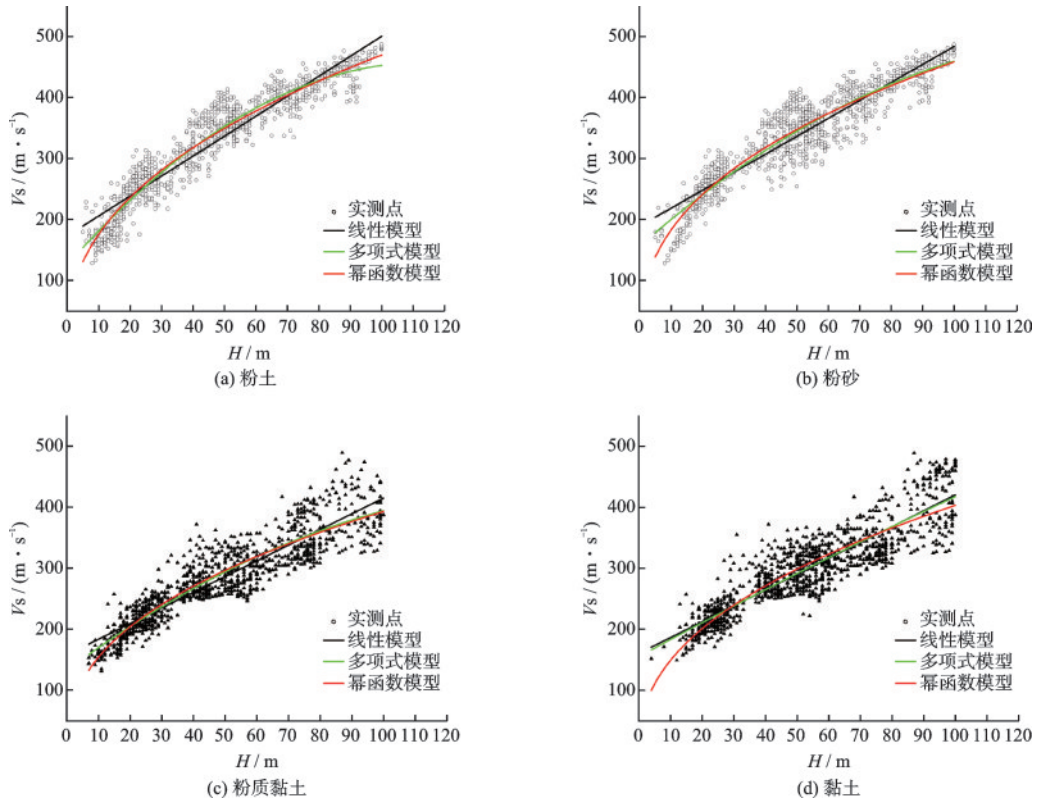


图3 III类场地各类土剪切波速与深度拟合关系曲线

Fig.3 Regression curve of shear wave velocity and depth for various types of soil in Class III sites

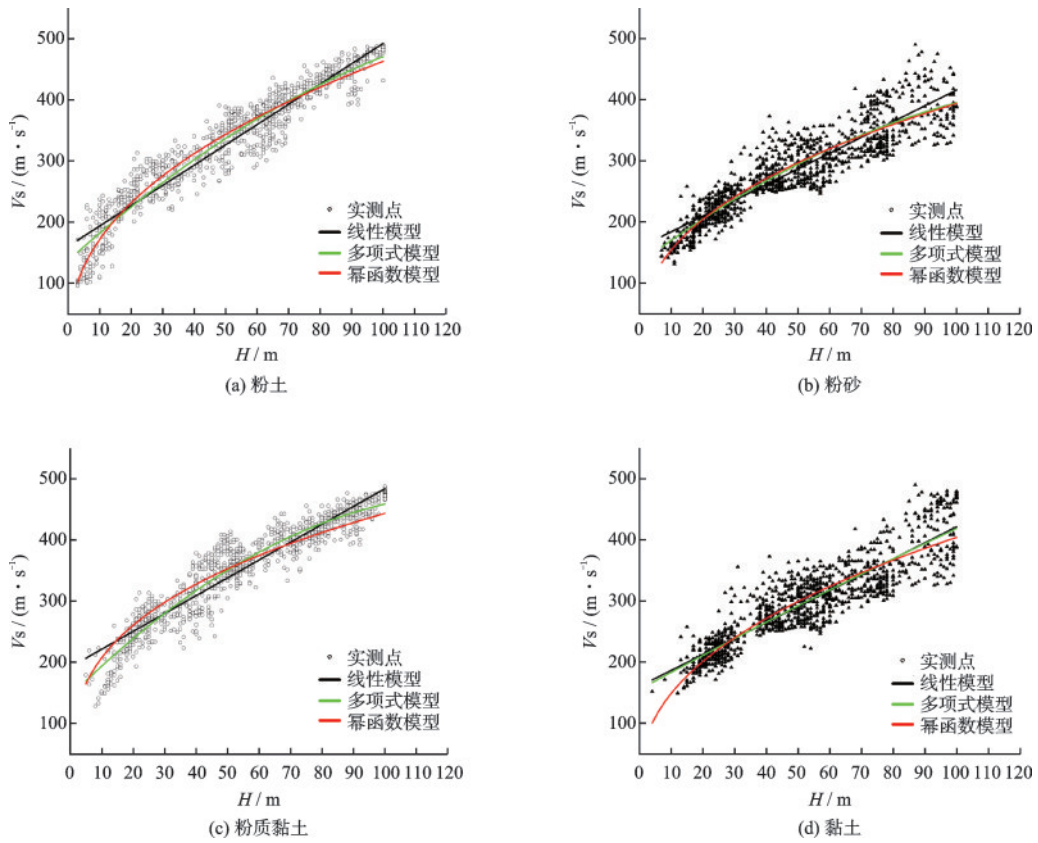


图4 IV类场地各类土剪切波速与深度拟合关系曲线

Fig.4 The Regression curve of velocity and depth of shear wave for various types of soil in Class IV sites

表4 III类场地模型与实测结果比较表

Table 4 Comparison of model predictions and measured results in Class III sites

钻孔1 土层岩性	埋深/m	实测波速 $V_s/(m \cdot s^{-1})$	推荐模型 $V_s/(m \cdot s^{-1})$	相对误 差/%	钻孔2 土层岩性	埋深/m	实测波速 $V_s/(m \cdot s^{-1})$	推荐模型 $V_s/(m \cdot s^{-1})$	相对误 差/%
粉土	8.1	159	171	7.34	粉砂	48.8	332	344	3.64
粉土	12.1	179	192	7.17	粉砂	54.8	338	360	6.63
粉土	16.1	201	212	5.57	粉砂	58.8	342	371	8.39
粉质黏土	19.1	235	227	3.46	粉土	8.1	159	168	5.63
粉质黏土	26.3	236	260	10.31	粉土	12.1	181	197	8.92
黏土	30.1	283	298	5.28	粉土	16.1	203	221	8.85
黏土	35.6	296	315	6.39	粉土	39.2	303	315	4.05
粉土	39.2	299	314	4.98	粉土	72.3	392	403	2.7
粉质黏土	42.4	316	320	1.17	粉土	85.1	409	430	5.05
粉砂	48.8	332	344	3.64	粉质黏土	19.1	235	237	0.67
粉砂	54.8	338	360	6.63	粉质黏土	26.3	246	269	9.27
粉砂	58.8	342	371	8.39	粉质黏土	42.4	316	325	2.94
粉质黏土	63.8	350	381	8.9	粉质黏土	63.8	350	383	9.42
粉质黏土	67.8	360	391	8.68	粉质黏土	67.8	360	392	8.99
粉土	72.3	392	412	5.21	黏土	30.1	275	284	3.16
黏土	79.6	422	411	2.66	黏土	35.6	305	303	0.54
粉土	85.1	409	436	6.5	黏土	79.6	422	418	0.87
黏土	90.9	440	429	2.46	黏土	90.9	440	441	0.25
黏土	96.9	440	438	0.38	黏土	96.9	440	453	2.84
黏土	100	471	443	5.96	黏土	100	471	458	2.71

表5 IV类场地模型与实测结果比较表

Table 5 Comparison table of model predictions and measured results in Class IV sites

钻孔1 土层岩性	埋深/m	实测波速 $V_s/(m \cdot s^{-1})$	推荐模型 $V_s/(m \cdot s^{-1})$	相对误 差/%	钻孔2 土层岩性	埋深/m	实测波速 $V_s/(m \cdot s^{-1})$	推荐模型 $V_s/(m \cdot s^{-1})$	相对误 差/%
粉土	10.7	150	158	5.31	粉砂	49.3	287	290	0.91
粉土	16.7	200	189	5.3	粉砂	62.7	316	324	2.68
粉质黏土	18.7	160	150	6.31	粉砂	66.7	316	335	5.93
粉土	21.9	225	212	5.99	粉砂	97.2	458	411	10.29
粉土	29.5	228	239	4.76	粉土	10.8	154	159	2.96
黏土	37.3	248	258	4.17	粉土	16.8	184	190	3.18
黏土	42.3	274	275	0.51	粉土	29.2	250	238	4.86
粉砂	49.9	282	291	3.26	粉土	33.2	250	251	0.25
粉砂	57.5	300	311	3.68	粉质黏土	4.2	101	90	10.61
粉质黏土	62.3	252	245	2.82	粉质黏土	23.1	222	204	7.95
黏土	70.2	368	356	3.16	粉质黏土	53.9	283	307	8.36
粉土	73.6	357	347	2.87	粉质黏土	58.7	317	319	0.78
黏土	77.4	405	375	7.53	粉质黏土	71.3	341	351	2.83
黏土	82.2	425	386	9.14	黏土	38.4	259	253	2.33
黏土	87.4	436	398	8.63	黏土	46.2	284	276	2.79
黏土	91.4	436	408	6.52	黏土	79.1	412	376	8.86
粉砂	99.3	430	416	3.26	黏土	86.1	412	397	3.62
					黏土	91.2	448	413	7.84
					黏土	100	472	440	6.71

5 结 论

分析了盐城市城区不同场地类别下土层剪切波速与土层深度间的关系,采用线性函数、多项式函数和幂函数3种模型对各类土体进行回归分析,结果表明:

(1)盐城城区不同类别场地中,剪切波速度与土层深度之间存在显著的正相关性,并建立了准确的回归模型关系式,所有模型拟合优度均在0.80以上,其中Ⅲ类场地黏土的幂函数模型相关性系数达到0.949。

(2)根据以上拟合结果Ⅲ类场地中黏土、粉质黏土、粉砂适合幂函数模型,关系式分别是 $V_s=96.805\ 96H^{0.330\ 21}$ 、 $V_s=63.776\ 18H^{0.430\ 2}$ 、 $V_s=72.841\ 28H^{0.399\ 36}$;粉土适合多项式函数模型,关系式为 $V_s=125.312\ 04+5.805\ 29H-0.0253\ 71H^2$ 。Ⅳ类场地中粉土和粉质黏土适合幂函数模型,关系式分别为: $V_s=60.097\ 5H^{0.407\ 71}$ 、 $V_s=45.393\ 46H^{0.479\ 14}$ 。黏土和粉砂适合多项式函数模型,关系式分别为 $V_s=141.699\ 28+2.841\ 97H+0.001\ 441H^2$ 、 $V_s=154.954\ 08+2.832\ 35H-0.002\ 051H^2$ 。

(3)根据实测钻孔和模型计算钻孔的结果检验,本文推荐的拟合关系计算的剪切波速与实测值基本吻合。在验证的4个钻孔中,Ⅲ类场地的相对误差最大为10.31%,最小为0.25%,Ⅳ类场地的相对误差最大10.16%,最小为0.25%。

(4)本文建立的回归关系式能够准确预测盐城市城区不同场地类别下土层剪切波速与土层深度间的关系,可以在无实测剪切波速数据时参考使用,满足盐城市城区建设工程的需求。

参考文献:

[1] 汪闻韶.土工地震减灾工程中的一个重要参量-剪切波速[J].水利学报,1994(3):80-84.
Wang W S. An important parameter in geotechnical earthquake disaster reduction engineering-shear wave velocity[J].Journal of Hydraulic Engineering, 1994(3): 80-84.(in Chinese)

[2] 刘红帅,宋东松,冯震.砂土液化剪切波速判别方法的对比分析[J].地震工程与工程振动,2022,42(4): 105-112.
Liu H S, Song D S, Feng Z. Comparative analysis of

shear wave velocity discrimination methods for sand liquefaction[J].Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2022,42(4):105-112.(in Chinese)

[3] 汪闻韶.剪切波速在评估地基饱和砂层地震液化可能性中的应用[J].岩土工程学报,2001,23(6):655-658.
Wang W S.Utilization of shear wave velocity in assessment of liquefaction potential of saturated sand under level ground during earthquakes[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23 (6) : 655-658. (in Chinese)

[4] 王亮,薄景山,李孝波,等.砂土液化判别方法研究若干进展[J].世界地震工程,2017,33(4):141-150.
Wang L, Bo J S, Li X B, et al. Research progress on methods of sand liquefaction potential evaluating [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(4) : 141-150. (in Chinese)

[5] T Williams, N Abrahamson. Site-response analysis using the shear-wave velocity profile correction approach [J].Bulletin of the Seismological Society of America, 2021,111(4):1989-2004.

[6] 黄承贤,宋大卫.在围压下岩石弹性波速的研究[J].岩土工程学报,1991,13(2):32-41.
Huang C X, Song D W. Study on elastic wave velocity of rock under confining pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(2) : 32-41. (in Chinese)

[7] 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(增1):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(Sup1) : 21-23. (in Chinese)

[8] 王帮圆,李世峰,王帮团,等.邯郸市市场地土剪切波速与埋深相关性分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2013,30(3):92-95.
Wang B Y, Li S F, Wang B T, et al. Correlation analysis between shear wave velocity and depth of soil in Handan city [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2013, 30(3) : 92-95. (in Chinese)

[9] 蔡润,彭涛,罗东林,等.成都地区土层剪切波速与埋深的关系[J].地震学报,2022,45(3):498-508.
Cai R, Peng T, Luo D L, et al. Correlation between the shear wave velocity and the soil depth in Chengdu Region [J]. Journal of Seismological Research, 2022, 45 (3):498-508.(in Chinese)

[10] 乔峰,薄景山,张兆鹏,等.广西柳州地区常见土类剪切波速与埋深之间的相关性[J].地震学报,2020,

- 42(1):109-119.
- Qiao F, Bao J S, Zhang Z P, et al. Correlation between shear wave velocity and buried depth of common soils in Liuzhou city of Guangxi region [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2020, 42(1):109-119. (in Chinese)
- [11] 李敏, 杨立国, 陈海鹏, 等. 杭州市典型土层剪切波速与埋深间的关系分析 [J]. *震灾防御技术*, 2020, 15(1): 77-88.
- Li M, Yang L G, Chen H P, et al. Relationship between shear wave velocity and soil depth of typical soil layers in Hangzhou area [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2020, 15(1): 77-88. (in Chinese)
- [12] 宋健, 师黎静, 党鹏飞, 等. 哈尔滨市剪切波速与埋深相关性分析 [J]. *建筑结构*, 2020, 50(增1):1088-1092.
- Song J, Shi L J, Dang P F, et al. Correlation analysis of shear wave velocity and depth in Harbin [J]. *Building Structure*, 2020, 50(Sup1): 1088-1092. (in Chinese)
- [13] 段蕊, 王晓军, 袁志祥, 等. 铜川新区土层剪切波速与土层深度的统计关系研究 [J]. *内陆地震*, 2019, 33(3): 218-228.
- Duan R, Wang X J, Yuan Z X, et al. Statistical study on the relationship between shear wave velocity and soil depth in Tongchuan area, tongchuan [J]. *Inland Earthquake*, 33(3): 218-228. (in Chinese)
- [14] 蒋其峰, 葛孚刚, 魏玮. 鲁西平原地区土体剪切波速与埋深关系研究 [J]. *世界地震工程*, 2019, 35(3): 136-143.
- Jiang Q F, Ge F G, Wei W. Study on relationships between shear wave velocity and depth of soil in plain of western Shandong [J]. *World Earthquake Engineering*, 2019, 35(3): 136-143. (in Chinese)
- [15] 郑龙, 李明永, 马紫娟. 大柴旦剪切波速与岩土体埋深关系分析 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(3):114-119.
- Zheng L, Li M Y, Ma Z J. Analysis on the relationship between shear wave velocity and depth of rock and soil mass in Da Qaidam [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(3): 114-119. (in Chinese)
- [16] 沈方铝, 李培, 张颖, 等. 福州市区土层剪切波速与土层深度的经验关系研究 [J]. *地震工程学报*, 2018, 40(A01):83-89.
- Sheng F L, L P, Zhang Y, et al. Empirical relationship between shear-wave velocity and depth of soils in fuzhou downtown area [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2018, 40(A01): 83-89. (in Chinese)
- [17] 林亚洲, 王秋良, 李井冈, 等. 武汉后湖地区土层剪切波速与深度的关系 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(4): 91-94.
- Lin Y Z, Wang Q L, Li J G, et al. Relation between shear wave velocity and depth of soils in Houhu area of Wuhan [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(4): 91-94. (in Chinese)
- [18] 王金艳, 侯莹. 常州市城区土层剪切波速与土层深度关系分析 [J]. *地震工程学报*, 2017, 39(A01):236-240.
- Wang J Y, Hou Y. Relation between shear wave velocity and soil depth in the urban area of Changzhou city [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2017, 39(A01): 236-240. (in Chinese)
- [19] 何仲太, 马保起, 卢海峰. 衡水市岩土体剪切波速与土层深度的关系 [J]. *科学技术与工程*, 2014, 35(14): 90-96.
- He Z T, Ma B Q, Lu H F. Empirical Relationship between shear wave velocity and depth of soils in urban area of Hengshui city [J]. *Science Technology and Engineering* [J], 2014, 35(14): 90-96. (in Chinese)
- [20] 陶小三, 杨伟林, 高志兵, 等. 南京河西地区岩土体剪切波速与土层深度的关系 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2009, 29(3):320-324.
- Tao X S, Yang W L, Gao Z B, et al. Relation between depth and shear wave speed of bedrocks and soils in Hexi district of Nanjing city [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2009, 29(3): 320-324. (in Chinese)
- [21] 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 H S, Zheng T, Qi W H, et al. Relationship between shearwave velocity and depth of conventional soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(7): 1142-1149. (in Chinese)
- [22] 张小平, 马顺, 金源, 等. 大连地区工程场地各类岩土剪切波速的变化特征分析 [J]. *防灾减灾学报*, 2012, 28(4):7-11.
- Zhang X P, Ma S, Jin Y, et al. Variation characteristic analysis of shear wave velocity by various types of soil on sites in Dalian region [J]. *Journal of Disaster Prevention and Reduction*, 2012, 28(4): 7-11. (in Chinese)
- [23] 应急管理部国家自然灾害防治研究院. 盐城市地震小区划报告 [R]. 北京: 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 2021.
- National Institute of Natural Hazards. Report on earthquake microzonation in Yancheng City [R]. Beijing: National Institute of Natural Hazards, 2021. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)