

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(增刊):83-89.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.083

SHEN Fanglü,LI Pei,ZHANG Ying, et al.Empirical Relationship between Shear-wave Velocity and Depth of Soils in Fuzhou Downtown Area[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(Supp):83-89.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.083

福州市区土层剪切波速与土层深度的经验关系研究

沈方铝,李培,张颖,任丛荣,黄宗林

(福建省地震局,福建福州350003)

摘要:土层剪切波速是岩土工程勘察和工程地震中重要的土动力学参数。以福州市区常规土类为研究对象,利用大量地震安全性评价工作获得的346个钻孔7562条实测剪切波速样本数据资料,分别运用一元二次多项式、指数和线性函数拟合方法,对福州市区8种不同典型土体进行土层剪切波速 v_s 与土层深度 H 间的相关性统计回归,并以拟合优度为评价指标来考虑适用模型参数。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。研究结果可供福州市区无场地剪切波速数据时参考使用。

关键词:剪切波速;土层深度;统计回归;拟合优度;福州市

中图分类号:P315.9

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2018)增刊-0083-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.083

Empirical Relationship between Shear-wave Velocity and Depth of Soils in Fuzhou Downtown Area

SHEN Fanglü, LI Pei, ZHANG Ying, REN Congrong, HUANG Zonglin

(Earthquake Agency of Fujian Province, Fuzhou 350003, Fujian, China)

Abstract: The shear-wave velocity of soils is an important soil dynamic parameter in geotechnical engineering investigation and earthquake engineering. First, the data of 7562 actual shear-wave velocity samples measured from 346 boreholes during the seismic safety evaluation of engineering sites in Fuzhou were collected and analyzed. Then, using three statistical models i.e., quadratic polynomials with one unknown, exponential equation, and linear equation, the respective empirical relationships between shear-wave velocity and depths of eight typical soil types in Fuzhou downtown area were obtained. The results show that there is an obvious relationship between the shear-wave velocity and depth of soils except cobble soil, and the applicability of one of two quadratic polynomials is superior. This research can be used as a reference for sites where shear-wave velocities are not tested in Fuzhou downtown area.

Keywords: shear wave velocity; soil depth; statistical regression; goodness of fit; Fuzhou city

收稿日期:2018-01-15

基金项目:福建省乡村抗震设防要求区划课题;福建省地震局青年科技基金(Y201705)

第一作者简介:沈方铝(1983-),男,浙江富阳人,硕士,工程师,主要从事工程地震及地球物理探测研究。E-mail:shen_fl@sina.com。

0 引言

土层剪切波速作为岩土工程勘察和工程地震中一个非常重要的土动力学参数^[1-2],其数值的大小反映了场地土层的软硬程度,同时在判定覆盖层厚度、工程建筑场地类别划分、砂土液化判断、场地土层地震反应分析计算以及沉积年代的确定中都有相当重要的影响。因此剪切波速的测试与估算在实际工作中有重要的作用。

土体剪切波速的影响因素很多,如土的孔隙度、含水率、天然重度、地质成因和土体埋深等,为此,国内外有很多学者进行过相关研究。已有研究表明,土体剪切波速与土体埋深有一定的统计关系^[3]。由于土层成因、埋深、含水率等差异,同一地区同一土类的剪切波速都有一定的差异性,但由于土层沉积环境、地质背景相同,其剪切波速具有一定的统计规律。因此如何根据当地的土类及深度给出相应剪切波速仍然具有重要的工程意义。

本文利用福州城区 346 个钻孔 7 562 条实测剪切波速的样本数据进行三种模型的回归分析,给出该市代表性的土体淤泥、淤泥质土、淤泥夹砂、粉细砂、中粗砂、粉质黏土、残积土和卵石类的土层剪切波速随深度不同模型的经验关系和最优回归公式。

1 福州市区地质地貌及岩土层特征

1.1 地形地貌

福州市位于我国东南沿海丘陵、盆地平原区,又是福建闽江下游河-海沉积地区,市区地处晚第四纪成型的盆地平原上。受盆地周围断层的影响,福州市在地形地貌上明显存在中低山与断层残山、丘陵台地与平原的差异。东部为鼓山—鼓岭断块低山地,北部为北峰低山山地,西南及南部为旗山—五虎山低山山地。同时闽江和乌龙江从该区中部、南部呈北西—南东向贯穿通过,形成起伏不平的地形地貌景观。

1.2 地质构造背景

福州市地处华南地块的武夷—戴云隆褶带与台湾海峡沉降带之间的闽东火山断拗带,二级构造单元属于福鼎—云霄断陷带中段,就其地球动力学环境而言,该区为中生代以来太平洋板块与欧亚板块俯冲—碰撞的构造环境。福州地区发育的区域性主要断裂构造有 NNE-NE 向长乐—诏安断裂带、NW 向闽江断裂带及 NEE 向连江—永定断裂带。

1.3 第四纪地层特征

福州市广泛出露晚中生代酸性、中酸性火山岩

及侵入岩,零星有新生代的基性小岩体或岩脉产出;第四系分布较广泛,主要为陆相冲洪积和海陆交互相沉积。由于地处闽江流域,因而存在古今的河床、溺谷、冲沟及河漫滩、沙洲相的沉积。此外,由于晚更新世至全新世时期存在三次明显的海浸—海退过程,导致该区存在多种类型的土层结构。福州盆地第四系沉积层种类繁多,结构复杂。但总体而言,属海湾溺谷型的河—海沉积相;一般厚度 20~40 m,最大近达 70 m 余(不包括残积层);其沉积中心为鳌峰州和乌龙江一带;地层自下而上大致如下:

(1) 更新统残积层(Q_p^{cl}):为棕红—褐黄色黏性砂土,含角砾或碎石,往下过渡到基岩。形成年代估计在中更新世前或中更新世。

(2) 上更新统龙海组冲、洪积层(Q_3^{al+pl}):沿山麓或冲沟零散出露,厚度 20~30 m,以泥质砂砾卵(碎)石和灰色含砾黏土为主,在平原深部则多见为泥砂质砾卵石层夹灰绿色粉砂黏土层,覆盖在残积层之上。

(3) 上更新统东山组海陆过渡层(Q_3^{ml}):主要是闽江冲积与海侵淤积之交互相粗中砂、中细砂、淤泥质土和黏土等,厚度 30~35 m。

(4) 全新统长乐组海浸淤积层(Q_1^m)和河流相冲积(Q_1^n)层:以淤泥、泥质细砂、亚黏土等沉积为特征,厚度 20~30 m,广泛分布于平原区。

(5) 第四系崩积-坡积(Q^{col})和洪积层(Q^{pl}):主要分布在陡峻山地山麓或谷地,以巨砾、砾石、碎石与亚黏土混合堆积为特征。在山体间歇性抬升中,还可见间夹有网纹红土或亚黏土或砂土层,其厚度数十厘米~1 米多。在北部、东部山谷地段明显可见洪积扇彼此迭置堆积:初步判别有 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 三个不同时代的洪积扇存在。

福州盆地内平原区大量钻孔资料所揭示的第四系沉积相特征和分布深度表明福州平原第四系沉积层可分为晚更新统和全新统。

1.4 水文地质条件

福州地区为亚热带海洋性气候,温和湿润,雨量充沛,对补给沿江两岸地下水十分有利。区内水系发育,总体上呈现从盆地四周向盆地中心汇聚的向心状水系特征,汇水中心偏向盆地南侧。区内最大的河流为闽江。

2 场地剪切波速数据来源及特征

多年以来,福州市开展了大量的重大工程场地地震安全性评价工作,运用单孔检层法进行波速测

试方法积累了丰富的实测钻孔剪切波速资料。为了避免统计结果受某一地点权重过大的影响, 本文对同一地点不同场地类别的钻孔各选取 1~2 个, 总计收集整理了福州市 165 个地震安全性评价报告共

346 条钻孔剪切波速资料。剪切波速测试资料获取钻孔分布位置见图 1。从图 1 可以看到, 钻孔分布较离散, 对统计分析有利。对钻孔剪切波速统计数据进行了筛选和整理, 剔除一些明显不合理的数据,

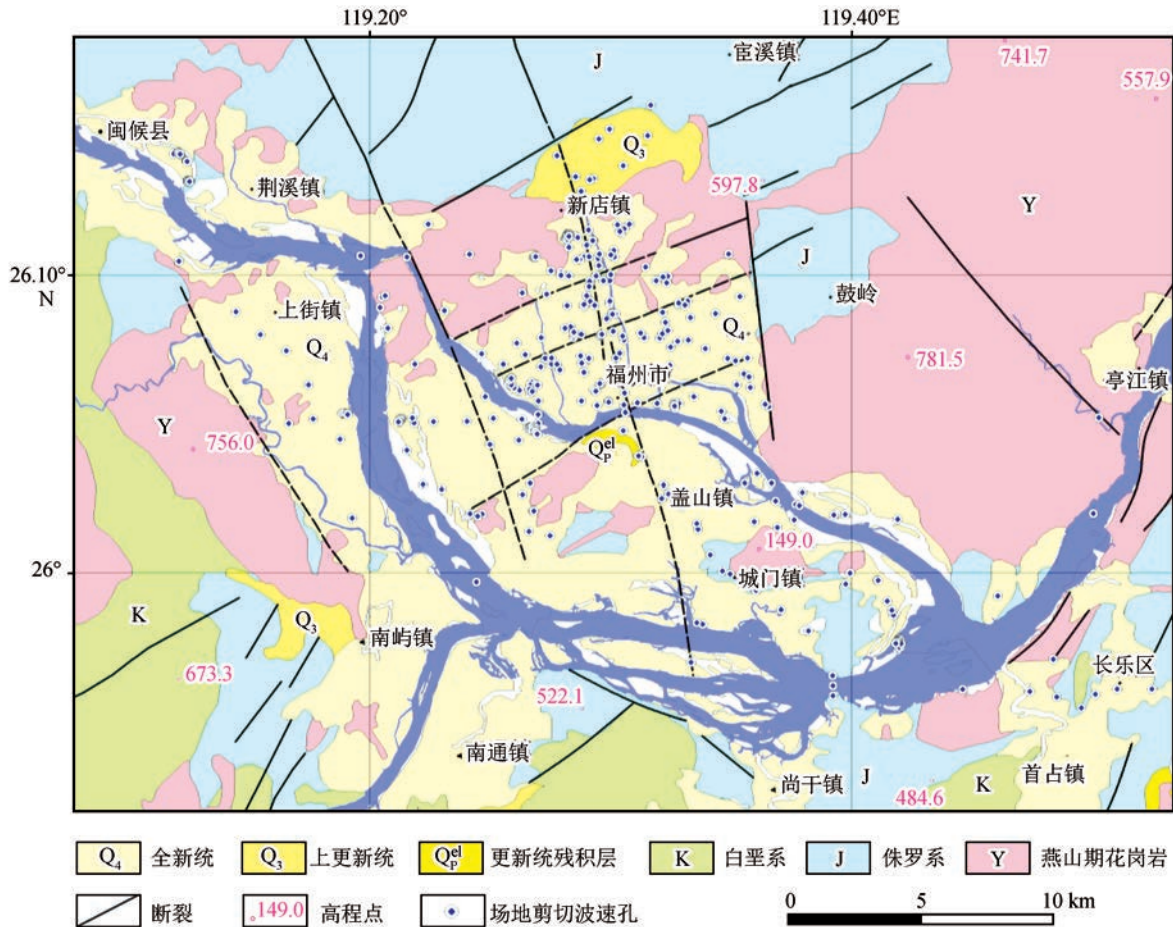


图 1 福州市剪切波速钻孔资料的分布位置

然后按《建筑抗震设计规范》的划分标准分类结果选取 II 类场地 125 个钻孔、III 类场地 221 个钻孔, 并选择福州市普遍分布的代表性土体淤泥 (1 247 个测试点)、淤泥质土 (1 135 个测试点)、粉质黏土 (1 238 个测试点)、粉细砂 (264 个测试点)、中粗砂 (1 733 个测试点)、残积土 (572 个测试点) 和卵石类 (881 个测试点), 共计 7 562 个测试点样本数据进行统计分析 (表 1)。所采用的实测剪切波速与土层埋深间的散点分布情况见图 2。结合表 1 和图 2 可以得出如下结论: (1) 土层剪切波速随土层深度的增加有增大的趋势, 说明土体剪切波速与土层埋深间有内在的相关性; (2) 总体而言, 土层深度越大, 剪切波速值的离散程度也相应地增大, 其中以埋深 10~40 m 间的离散程度最高, 而土层深度大于 60 m 情况由于数据量减少或者土体类型的减少, 总体离散性减小;

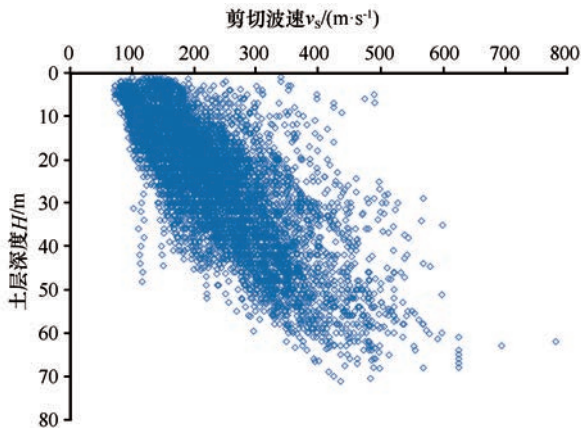


图 2 土体剪切波速与土层深度间的散点图

(3) 在本文所有钻孔揭示的深度范围内, 福州市浅表层土体 (除卵石、孤石等) 的剪切波速最大值为 488 m/s, 均小于 500 m/s; (4) 卵石类数据样本点增

表1 福州市区土层剪切波速测试点数据统计表

土类	样本数	数据深度范围/m	最小波速/(m·s ⁻¹)	最大波速/(m·s ⁻¹)	波速平均值/(m·s ⁻¹)	标准差
淤泥	1 247	1~39.3	71	173	111.1	18.8
淤泥质土	1 135	2~59.6	74	376	191.4	47.7
淤泥夹砂	492	2~56.2	85	338	181.7	46.4
粉质黏土	1 238	0.8~60.6	110	446	242.5	64.3
粉细砂	264	2~57	123	391	217.2	68.0
中粗砂	1 733	1.5~66.6	115	438	229.4	61.6
残积土	572	1.4~70.5	168	488	303.9	60.6
卵石	881	1~71.2	151	781	396.1	78.5

加了整体数据的离散程度。

在研究过程中,作者发现杂填土等填土类样本数据的统计结果离散程度较高,其统计结果未表现出剪切波速与土层深度间的相关性,相关系数小于0.1,为不相关。因此对于杂填土类的统计分析结果,本文不做赘述。

3 剪切波速与土层深度统计分析

3.1 研究现状

在实际工作中,经常会受到诸如场地条件、工作时间、技术、设备、工作经费等各种因素的制约,存在无法进行现场剪切波速测试(如塌孔、卡孔等)、测试数据或者收集的剪切波速数据不理想不完整的情况。针对此类情况,根据地下土体的类型及性质推测岩土相应的剪切波速就有了实际的工程意义。已有的研究表明,由于土层地质成因的差异,不同地区的土层剪切波速及同一地区不同深度、不同土类的剪切波速值差别都很大;同一地区同一土类的剪切波速也在一定范围内变化。这些现象在实际勘察工作及科研工作中也得到了证实。然而由于土层沉积环境相同,其剪切波速具有一定的统计规律。国内外有相当多的学者对此进行了大量的拟合、统计分析工作,得到了适用于特定地区的剪切波速随深度的一般经验关系,获得了能够在工程中实际应用的成果。刘红帅等^[4]依据中国地震安全性评价工作中大量的钻孔剪切波速实测数据,定性探讨了剪切波速与埋深间的关系,给出了分场地类别和不分场地类别的常规土类剪切波速与埋深间的统计公式,与《构筑物抗震设计规范》的经验公式进行了详细的对比分析,并将所提出的统计公式应用于某一具体工程场地。战吉艳等^[5]分析了苏州城区深软场地90个钻孔剖面的剪切波速资料,发现了剪切波速与土层深度的关系。董菲藩等^[6]根据福州、漳州、泉

州165个钻孔剪切波速实测资料,拟合得到了3个盆地的土层剪切波速随深度的变化关系。李帅等^[7]对新疆天山地区不同地貌单元场地土剪切波速与土层深度经验关系进行了研究,得到了不同土类剪切波速与土层深度的经验关系,认为统计关系中不同地区运用不同模型得到的拟合精度比较合理,地形地貌和地层岩性是决定剪切波速大小的首要因素。齐鑫等^[8]对下辽河平原地区的土层剪切波速与土层深度关系进行了研究,提出了不同岩类的统计关系。孔宇阳等^[9]通过运用线性函数、一元二次多项式函数、指数函数给出了武汉市区土体剪切波速与深度的经验关系,认为一元二次多项式函数的拟合效果最好。

各个学者的研究结果有近似的,也有区别较大的,因为他们所得到的结果受到其当地的地质条件、数据来源、数据质量、统计数据样本数等的制约。但总体而言在不同地区进行土体剪切波速与土层深度间的统计分析对当地的地质研究、工程建设等还是有一定的帮助。

3.2 统计分析

由前人的研究可知,土体剪切波速与土层深度的经验关系并不都是简单的线性关系,在不同地区得到的经验关系不同,有的地区以线性关系最优,有的则以指数关系最优,有的以一元二次多项式方程拟合最优。本文经过不断运用各种回归方程进行拟合,发现运用一元二次多项式方程、线性函数和指数函数拟合效果最佳。因此采用三种模型(模型1: $v_s = a + bH$;模型2: $v_s = ae^{bH}$;模型3: $v_s = a + bH + cH^2$)对福州场地剪切波速 v_s 与土层深度 H 之间的经验关系进行统计回归分析,运用Excel软件绘制散点图,通过添加趋势线方法拟合出回归曲线,得到福州市区普遍分布的代表性土体(淤泥、淤泥质土、淤泥夹砂、粉细砂、中粗砂、粉质黏土、残积土和卵石类)的剪切波速与土层埋深之间的关系式和拟

合优度 R^2 , 并依据拟合优度的大小来反映模型回归效果的优劣情况。拟合优度 $0 < R^2 < 1$, R^2 越接近 1, 则统计关系拟合效果越佳。

将得到的各种土类回归参数和适用土层深度结果统计成表(表 2)。以便于对比分析。同时为了能

更加清晰直观地揭示土层剪切波速与土体埋深之间的关系, 绘制了福州市区普遍分布的代表性土体(淤泥、淤泥质土、淤泥夹砂、粉质黏土、粉细砂、中粗砂、残积土和卵石类)的剪切波速与土层深度散点图及三种拟合关系的拟合曲线(图 3)。

表 2 福州市场地土层剪切波速与土层埋深拟合关系参数统计

土层分类	模型 1 参数			模型 2 参数			模型 3 参数			
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	
淤泥	82.665	2.586 9	0.683 2	86.091	0.022	0.658	82.271	2.657 9	-0.002 5	0.683 3
淤泥质土	96.924	3.403	0.489 5	110.14	0.018 7	0.505 4	88.939	4.076 3	-0.012 4	0.490 6
淤泥夹砂	98.389	4.338 3	0.843 8	111.39	0.023 2	0.801 2	91.501	5.134 7	-0.016 8	0.846 2
粉细砂	125.95	3.907	0.843 9	139.6	0.017	0.831 1	128.94	3.592 8	0.005 4	0.844 1
中粗砂	131.22	4.052 6	0.803 2	144.67	0.017 5	0.789 6	124.37	4.720 3	-0.012 1	0.804 8
粉质黏土	146	4.088 4	0.733	154.5	0.017 6	0.729 9	134.01	5.440 2	-0.027 2	0.739 7
卵石	340.44	1.650 3	0.164 3	257.9	0.126 3	0.276 1	309.61	4.649 9	-0.047 5	0.199 5
残积土	223.85	2.932 2	0.546 6	228.56	0.009 7	0.523 1	216.72	3.522 5	-0.009 2	0.548 2

3.3 统计分析结果

结合图 2 和表 3, 福州市 7 562 个数据样本统计分析的结果表明:(1)土层剪切波速随土层深度的增加有线性增大的趋势, 说明土体剪切波速与土层埋深间有内在的相关性。(2)总体而言, 除残积土和卵石类外, 其余土体随着土层深度的增加剪切波速值的离散程度也相应增大。(3)通过统计淤泥、淤泥夹砂、砂土类、粉质黏土和残积土的剪切波速和土层埋深的经验关系可以看出, 砂土类的相关系数最好, 拟合优度在 0.804 8~0.846 2 间; 粉质黏土、淤泥次之, 拟合优度分别为 0.739 7 和 0.683 3; 残积土、淤泥质土的拟合优度分别为 0.548 2 和 0.505 4, 为中度相关; 卵石类的拟合优度仅 0.276 1, 为弱相关。(4)除淤泥质土和卵石类以指数函数的拟合精度最高外, 其余土类以一元二次多项式模型的拟合精度最高。(5)线性函数拟合效果略低于一元二次多项式。(6)残积土和卵石类的波速数据在同一深度离散程度较大。

4 结论

本文对大量福州市区的钻孔剪切波速实测数据按照线性、指数函数和一元二次多项式方程进行统计分析, 得到不同模型的回归参数及适用土层深度。其结果总体来看, 福州市区场地土的剪切波速与土层深度相关性明显, 多项式的适应性更强。

(1) 杂填土等填土类和卵石类的剪切波速与土层深度不相关或弱相关, 运用文中三种方程拟合无

法得到较好的结果。

(2) 除淤泥质土和卵石外, 各土类剪切波速与土层深度的关系采用一元二次多项式拟合方式精度最高, 优于线性拟合和指数拟合。

(3) 各土类剪切波速与土层深度的关系运用线性拟合的效果与多项式拟合效果较为接近, 相对其他回归方式来说, 在本地区也有较好的适用性。

(4) 福州市区土体剪切波速与土层深度间的统计回归结果以砂类土的相关系数最好, 拟合优度在 0.8 以上; 粉质黏土次之, 拟合优度大于 0.7; 残积土、淤泥质土的拟合优度约 0.5, 说明其剪切波速和埋深有一定的相关性; 卵石类的拟合优度小于 0.3, 为弱相关。

(5) 残积土和卵石类的数据离散程度较大, 初步判断残积土主要受工程地质单元的控制, 受覆盖层厚薄的影响情况较大, 残坡积台地风化剥蚀地貌单元浅覆盖层和冲海积冲洪积厚覆盖层的残积土固结程度不同造成剪切波速数值差异。

(6) 相对于前人学者的很多研究, 本文所得的相关系数偏小, 采用原始波速数据进行回归的预测精度不够高。这可能受几个因素的影响: 一方面, 由于不同工程地质单元的土的类型、物理性质、地质成因存在一定的差异性, 而本文未针对不同地貌不同工程地质单元进行分区统计回归; 其次, 福州土层含软、硬夹层土的现象较多, 回归公式只能反映估计一般土质条件下的剪切波速值; 再者, 受到闽江水域的影响, 不同地点的相同土类土体性质有一定的差异;

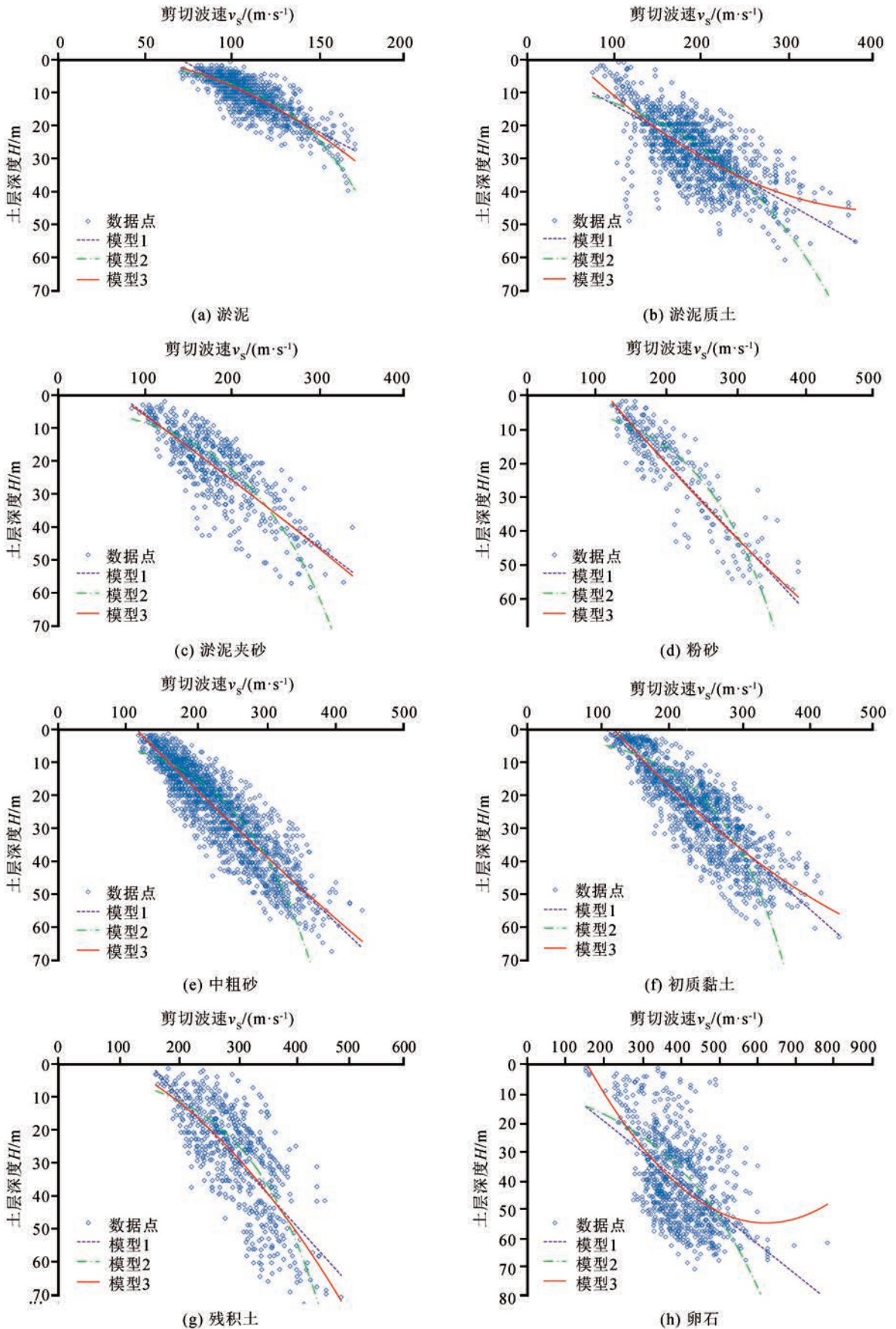


图3 不同土体剪切波速与土层深度间的散点图

表 3 福州场地土层最佳回归分析方程及拟合优度表

土体类型	推荐最优回归方程	拟合优度
淤泥	$v_s = 82.271 + 2.6579H - 0.0025H^2$	0.6833
淤泥质土	$v_s = 110.14e^{0.0187H}$	0.5054
淤泥夹砂	$v_s = 128.94 + 3.5928H + 0.0054H^2$	0.8462
粉细砂	$v_s = 128.94 + 3.5928H + 0.0054H^2$	0.8441
中粗砂	$v_s = 124.37 + 4.7203H - 0.0121H^2$	0.8048
粉质黏土	$v_s = 134.01 + 5.4402H - 0.0272H^2$	0.7397
残积土	$v_s = 216.72 + 3.5225H - 0.0092H^2$	0.5482
卵石类	$v_s = 257.9e^{0.1263H}$	0.2761

另外由于不同测试人员水平或者设备的原因,可能存在测试精度的问题。

本文推荐的统计公式可被参考使用在福州市区地下 70 m 深度范围的淤泥类、砂土类、粉质黏土类土体的剪切波速预测。

参考文献

[1] 工程场地地震安全性评价:GB17741-2005[S].北京:中国标准

出版社,2005.

[2] 汪闻韶.土地震减灾工程中的一个重要参量——剪切波速[J].水利学报,1994,25(3):80-84.

[3] 陈国兴,徐建龙,袁灿勤.南京城区岩土体剪切波速与土层深度的关系[J].南京建筑工程学院学报,1998,45(2):32-37.

[4] 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

[5] 战吉艳,陈国兴,刘建达.苏州城区深软场地土剪切波速与土层深度的经验关系[J].世界地震工程,2009,25(2):11-17.

[6] 董菲著,陈国兴,金丹丹.福建沿海 3 个盆地的土层剪切波速与深度的统计关系[J].岩土工程学报,2012,35(增刊 2):145-151.

[7] 李帅,赵纯青,刘志坚.新疆天山地区土层剪切波速与土层埋深的经验关系[J].世界地震工程,2014,30(2):208-214.

[8] 齐鑫,丁浩.下辽河平原区剪切波速与土层埋深关系分析[J].世界地震工程,2012,28(3):151-156.

[9] 孔宇阳,雷东宁,廉超等.武汉市区土体剪切波速与深度的经验关系[J].地震工程学报,2017,39(2):336-342.

(上接第 58 页)

[13] 郭良迁,马青,杨国华.华北地区主要构造带的现代运动和应变[J].国际地震动态,2007(7):67-75.

[14] 杨国华,杨博,武艳强,等.应变计算与分析的若干问题及有关偏差的修正[J].大地测量与地球动力学,2010,30(4):59-63.

[15] 杨博,张风霜,占伟,等.水平运动场滤波的尝试及其应变计算[J].大地测量与地球动力学,2010,30(5):106-112.

[16] 杨国华,江在森,武艳强,等.中国大陆整体无净旋转基准及其

应用[J].大地测量与地球动力学,2005,25(4):6-10.

[17] 杨国华,韩月萍,杨博.川滇地区地壳水平运动与变形场的演化特征及其机制讨论[J].地震研究,2009,32(3):275-282.

[18] 杨博,周伟,陈卓越.断裂区带变形分析方法及应用[J].西北地震学报,2010,32(3):215-219.

[19] 杨博,张风霜,韩月萍.球面水平应变场无偏差计算与滤波[J].地震研究,2011,34(1):59-66.