

福建沿海 3 个盆地的土层剪切波速与深度的统计关系

董菲蕃^{1, 2}, 陈国兴^{1, 2*}, 金丹丹^{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)

摘 要: 土体剪切波速是工程场地地震安全性评价和地震小区划工作需涉及的重要参数之一。以福建沿海的福州, 泉州, 漳州 3 个盆地为研究对象, 基于大量剪切波速实测资料, 得到各盆地土体等效剪切波速的空间分布特征: ①泉州盆地等效剪切波速整体大于福州、漳州两个盆地; ②福州盆地等效剪切波速呈现出闽江沿岸地区较小的分布特征。基于最小二乘法的拟合结果, 福州、漳州盆地的土层剪切波速随深度的变化呈线性关系, 泉州盆地则呈二次多项式的非线性关系, 并推荐了其拟合参数; 拟合公式预测的场地不同深度处土层的剪切波速值, 与场地的实测剪切波速值基本吻合, 可为该地区无剪切波速实测值的场地提供较好的参考依据。

关键词: 剪切波速; 土层深度; 统计分析; 空间分布特征; 经验公式; 福州、泉州、漳州盆地

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2013)S2 - 0145 - 07

作者简介: 董菲蕃(1987 -), 女, 硕士研究生, 主要研究场地地震效应。E-mail: dffnjut@126.com。

Statistical relation between shear wave velocity and depth of soils in three basins in coastal area of Fujian province

DONG Fei-fan^{1, 2}, CHEN Guo-xing^{1, 2}, JIN Dan-dan^{1, 2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 21009, China; 2. Civil Engineering & Earthquake

Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 21009, China)

Abstract: The shear wave velocity of soils is one of the most important parameters to evaluate the seismic safety of engineering sites and seismic micro-zoning work. The spatial distribution characteristics of the equivalent shear wave velocity of the three basins are analyzed based on the measured data of shear wave velocity from lots of boreholes in Fuzhou basin, Quanzhou basin and Zhangzhou basin in the coastal area of Fujian province. The analysis shows that: (1) the equivalent shear wave velocity of Quanzhou basin as a whole is greater than that of Fuzhou and Zhangzhou basins; (2) the equivalent shear wave velocity of areas along Minjiang River is smaller than that of other regions in Fuzhou basin. Based on the results of the least squares methods, the variation of the shear wave velocity of both Fuzhou and Zhengzhou basins with depth can be fitted by linear formula, however, that of the shear wave velocity of Quanzhou basin with depth presents a nonlinear relationship and can be fitted by quadratic polynomial. Moreover, the fitting parameters are recommended. And the shear wave velocity at some real sites in the three basins is predicted using the fitting equations and compared with the measured data. The comparisons show that it can predict well by the fitting equations. Thus, it may provide reference for the forecast of shear wave velocity at those sites without the test data in Fujian area.

Key words: shear wave velocity; soils depth; statistical analysis; spatial distribution characteristic; empirical formula; Fuzhou, Quanzhou, Zhangzhou basin

0 引 言

剪切波速的大小既反映了场地传播地震波的能力, 又反映了土层的“软、硬”程度, 代表了土动力特性, 其在场地类别划分、液化判别、场地地震反应分析等方面有着十分广泛的应用, 是目前工程场地地震安全性评价和地震小区划工作中所涉及到的重要参数之一。剪切波速的不确定性对反应谱具有一定影响: 兰景岩等^[1]研究表明剪切波速反映了土层的刚度特性, 并对

设计反应谱的特征周期 T_g 和平台值 a_{max} 有显著影响。孙悦等^[2]研究了 II、III 类场地剪切波速对地表反应谱的影响。刘红帅等^[3]研究了剪切波速对均匀场地峰值加速度和反应谱的影响。高玉峰等^[4]研究了剪切波速对砂土地场的峰值加速度和反应谱的影响。

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2009BAK55B00)

收稿日期: 2013 - 06 - 06

*通讯作者

剪切波速可通过室内试验和现场原位测试等^[5-6]方法获取,其中现场原位测试应用最为广泛,但有时由于地层复杂或受时间、费用、设备和技术等方面限制,无法进行剪切波速测试或不能获得令人满意的剪切波速测试资料。此时,必须根据土层某些特征推测工程上认可的剪切波速。由于土层成因差异,不同地区的土层剪切波速及同一地区不同土类的剪切波速都有很大差别。同一地区同一土类的剪切波速也不是定值,而是在一定范围内变化的,但是由于土层沉积环境,地质背景相同,其剪切波速具有一定统计规律。因此如何根据土类及深度给出相应剪切波速具有重要的工程意义。国内外学者已对该课题做了大量研究:刘红帅等^[7]应用大量地震安全性评价钻孔剪切波速实测数据,定性探讨了剪切波速与深度间的关系,给出了统计公式。高玉峰等^[8]在合肥膨胀土特性的基础上得到了该地区剪切波速随深度的一般变化规律经验公式。战吉艳等^[9]结合苏州城区地质成因,分析了苏州城区深软场地 52 个钻孔的剪切波速资料,得出了剪切波速随深度变化的经验关系。Mashall^[10]考虑土体的性质、物理状态和饱和度,给出了场地土剪切波速与土层深度的经验公式。

根据福建沿海的福州、泉州、漳州 3 个盆地共 165 个钻孔勘测资料(其中福州盆地 101 个钻孔,泉州盆地 33 个钻孔,漳州盆地 31 个钻孔),对福建沿海 3 个盆地各土类剪切波速进行统计分析,并对比各盆地的等效剪切波速分布情况;通过回归分析,给出各盆地剪切波速与土层深度的经验关系,为福州、泉州、漳州盆地重大工程建设场地地震效应评价提供基础性资料。

1 场地背景及剪切波速分析方法

1.1 福州、泉州、漳州盆地工程地质条件

福建沿海地区,由于长期受海洋和河流等外因力的侵蚀、剥蚀和堆积作用,形成面积较大的低山、丘陵和盆地,如图 1 所示。福州盆地位于福建省东部沿海、闽江下游,距入海口约三十多公里。广泛分布第四纪沉积层,结构复杂,土层厚度一般为 40~60 m,较大的情况下可达 70~90 m。土层结构一般下部为泥质砂砾卵(碎)石和含砾黏性土;中部是粗中砂、中细砂和黏土等,夹有数层厚度不一的软弱土层;上部为海侵淤积的淤泥。地表有人工杂填土外,大部分沉积有 2 m 左右的黏土层;基底以花岗岩为主。泉州盆地位于福建省东南部、台湾海峡西岸,该区内第四系更新统长乐组、统龙海组和全新统长乐组发育较好,土层厚度一般为 20~30 m。第四系更新、全新统长乐组主要为淤泥、淤泥质土、粉质黏土;第四系更新统

龙海组主要为黏土、粉质黏土和砂砾卵石。基底由花岗岩类岩石组成,岩性主要为燕山期侵入岩和上侏罗统火山岩。漳州盆地上部地层主要以流塑的淤泥层、淤泥质土层以及软塑的黏性土层和松散—稍密的砂性土层,中部主要以黏性土为主,底部为残积土层和风化岩层,土层厚度一般为 40~60 m。基于福州、泉州、漳州 3 个盆地 165 个钻孔的实测资料,依据岩土名称及状态,对土体进行归类。参照《岩土工程勘察规范》^[11]将土类分为 9 类。即类①:填土;以杂填土为主,局部为素填土;类②:淤泥土;以淤泥为主,局部夹有粉细砂;类③:粉质黏土;以粉质黏土为主,局部夹有淤泥土与粉细砂;类④:黏土;以黏土为主,局部夹有淤泥土;类⑤:粉、细砂;稍密,局部夹有黏性土;类⑥:中、粗砂;局部含砂质黏土;类⑦:卵、砾石;以卵石或者砾石为主,部分为残积土,局部夹有粉细砂及少量粉土;类⑧:强风化花岗岩;以强风化花岗岩为主,局部为全风化花岗岩及残积黏性土;类⑨:中、微风化花岗岩;以中、微风化花岗岩为主,少量为残积黏性土。分别以福州盆地钻孔 ZK6、泉州盆地钻孔 DK1、漳州盆地钻孔 ZK19 为例,各钻孔土层分布和波速资料如表 1~3 所示。

表 1 福州盆地 ZK6 的土层资料和剪切波速随土层深度的变化
Table 1 Borehole data of ZK6 and variation of shear wave velocity with depth in Fuzhou basin

岩土名称	测点深度/m	厚度/m	剪切波速/(m·s ⁻¹)
杂填土	0.8	0.8	142
黏土	3	2.2	142
淤泥	5.2	2.2	95
细砂	10.6	5.4	148
中粗砂	49	38.4	301
黏土	51	2	399
卵石	53.2	2.2	476
强风化岩	60.2	7	578

表 2 泉州盆地 DK1 土层资料和剪切波速随土层深度的变化
Table 2 Borehole data of DK1 and variation of shear wave velocity with depth in Quanzhou basin

岩土名称	测点深度/m	厚度/m	剪切波速/(m·s ⁻¹)
杂填土	2.2	2.2	150
粉质黏土	5.3	3.1	152
淤泥	13.2	7.9	150
中粗砂	18.1	4.9	172
淤泥	21.3	3.2	138
中粗砂	23.7	2.4	218
卵石	26.3	2.6	342
强分化岩	28.5	2.2	474
中风化岩	33.1	4.6	624

表 3 漳州盆地 ZK19 土层资料和剪切波速随土层深度的变化

Table 3 Borehole data of ZK19 and variation of shear wave velocity with depth in Zhangzhou basin

岩土名称	测点深度 /m	厚度 /m	剪切波速 / $(m \cdot s^{-1})$
杂填土	1	1	180
粉质黏土	4.5	3.5	184
中粗砂	8	3.5	207
黏土	14	6	308
卵石	35.2	21.2	299
强分化岩	52	16.8	553

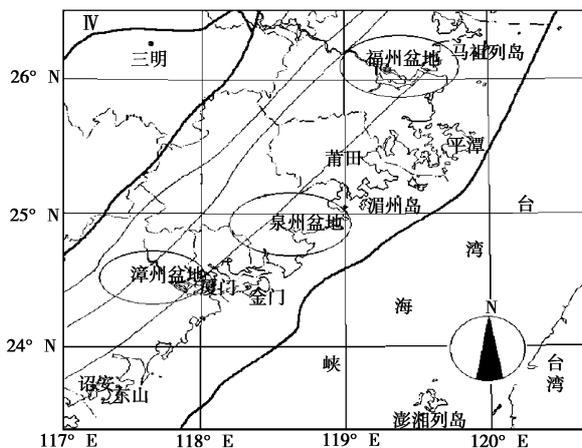


图 1 福建地区 3 个盆地分布图

Fig. 1 Distribution of three basins in Fujian area

1.2 土层剪切波速与深度关系的回归方法

目前剪切波速的推测工作已取得不少成果, 基本都是从土性参数出发, 对积累的实测波速资料进行统计分析, 得到剪切波速拟合公式。无论是整体考虑, 还是分段考虑, 经验公式一般有以下儿种: ①线性拟合: $V_s = a + bH$; ②二次多项式拟合: $V_s = a + bH + cH^2$; ③指数拟合: $V_s = ae^{bH}$ (V_s 为土层剪切波速 (m/s); H 为土层深度 (m); e 为自然对数的底数, 值约等于 2.718281828; a, b, c 为拟合参数)。采用最小二乘法原理进行统计回归分析。在拟合过程中, 回归方程是不可能全部通过每个数据点 ($(H_1, V_{s1}), (H_2, V_{s2}) \dots (H_n, V_{sn})$), 为了检验回归方程对数据的拟合程度, 可借助相关系数 R (或判定系数 R^2) 进行判断; $0 < R^2 \leq 1$, R^2 越趋近于 1, 其拟合效果越佳。

2 福州、泉州、漳州 3 个盆地的主要土层剪切波速分布特征

2.1 土层剪切波速空间分布特征

基于福州、泉州、漳州 3 个盆地的钻孔实测资料, 分析各类土的剪切波速, 分别绘制 3 个盆地的剪切波速等值线分布图, 可以直观地了解到剪切波速空间分

布规律, 因此, 本文对 3 个盆地已有的剪切波速和土层深度资料进行归整, 计算出各钻孔等效剪切波速值, 绘制了各盆地等效剪切波速等值线分布图, 进而研究 3 个盆地剪切波速在空间上的分布特征。

其中, 等效剪切波速的计算根据《建筑抗震设计规范 GB50011—2001》4.1.5 的计算方法:

$$V_{se} = d_0 / t \quad (1)$$

$$t = \sum_{i=1}^n (d_i / v_{si}) \quad (2)$$

式中 V_{se} 为等效剪切波速; v_{si} 为计算深度范围内第 i 层岩土的剪切波速; d_0 为计算深度, 选择覆盖层厚度和 20 m 二者较小的。以泉州盆地钻孔 DK1 为例 (见表 2), 计算深度为 33.10 m 与 20 m 二者较小值, 即 $d_0 = 20$ m。

$$t = \left[\frac{2.2}{150} + \frac{3.1}{147} + \frac{7.9}{131} + \frac{4.9}{172} + \frac{3.2}{138} + \frac{2.4}{218} + \frac{2.6}{342} + \frac{2.2}{474} + \frac{4.6}{624} \right] = 0.17003(s)$$

$$V_{se} = d_0 / t = 20 / 0.17003 = 117.6 \text{ (m/s)}$$

依此方法, 分别计算福州、泉州、漳州 3 个盆地共 165 个钻孔等效剪切波速和覆盖层厚度, 绘制图 2~4。

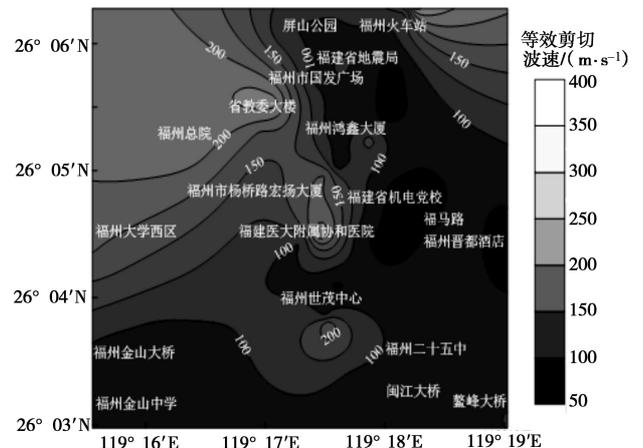


图 2 福州盆地等效剪切波速等值线分布图

Fig. 2 Distribution of equivalent shear wave velocity in Fuzhou basin

从图 2~4 可以看出, 泉州盆地等效剪切波速整体大于福州、漳州两个盆地, 泉州盆地等效剪切波速主要为 200~250 m/s, 局部地区达到 350 m/s; 福州盆地等效剪切波速集中在 100~150 m/s, 局部地区只有 60 m/s 左右; 漳州盆地等效剪切波速整体在 150~200 m/s 范围内。这样的差异很有可能与泉州盆地本身土层分布特性相关, 由现有的钻孔资料可得, 泉州盆地钻孔一般钻探至 20~30 m 就可能出现岩石层, 个别钻孔的覆盖层厚度只有十几米, 而福州、漳州盆地的覆盖层厚度至少要达 50~60 m, 福州盆地的局部钻孔土探

测至岩石层时深度已达 70~90 m。另外,由图 2 可得,福州盆地的等效剪切波速等值线呈现出东部较小的分布特征,主要由于福州盆地闽江沿岸地区,受海水冲击影响,土质偏软,密实度低,含水率较大,等效剪切波速较小。

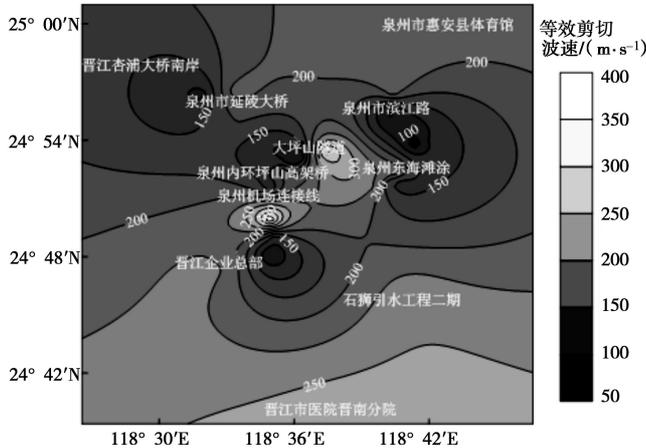


图 3 泉州盆地等效剪切波速等值线分布图

Fig. 3 Distribution of equivalent shear wave velocity in Quanzhou basin

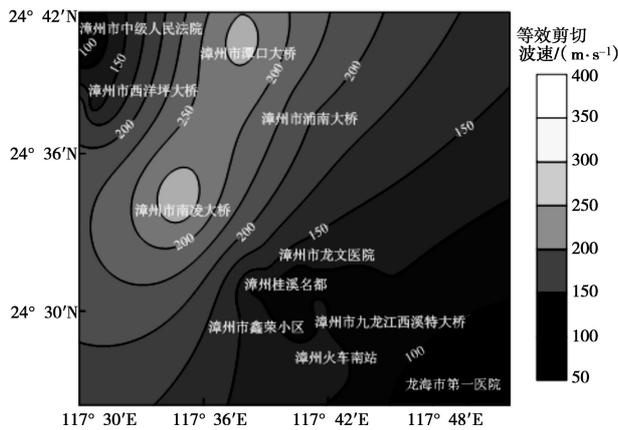


图 4 漳州盆地等效剪切波速等值线分布图

Fig. 4 Distribution map of equivalent shear wave velocity in Zhangzhou basin

2.2 剪切波速与土层深度的关系

根据 3 个盆地土层资料,分别对各盆地各钻孔中

淤泥土、粉质黏土、黏土、细砂、中粗砂的剪切波速与土层深度进行统计整理,共得到剪切波速与土层深度数据 1549 组,不同土的剪切波速分布范围见表 4。对于杂填土,由于其位于地表,常混有固体杂物,其剪切波速规律性不强;对卵、砾石,强风化花岗岩,中、微风化花岗岩,由于探测设备和方法的限制,测得的剪切波速往往也不具备规律性。

回归分析所得经验关系只能反映一般土质条件下的 V_s 值,对于软、硬夹层土的 V_s 值难以估计。因此,首先将软、硬夹层土的 V_s 资料及不可靠的数据剔除,再对剩余的数据进行回归分析。当同时存在以下两种情况,则认其是软、硬夹层土或不可靠的数据,予以剔除:①用同一类岩土体的实测数据绘制二维图形,深度 H 为横坐标, V_s 为纵坐标,某 V_s 值与相同深度 H 的其它所有 V_s 值相差很大,形成明显的孤点;②在同一个钻孔波速资料中,某 V_s 值与其上、下土层的 V_s 值相差很大。本次研究共删除 32 组数据,对剩余的 1517 组剪切波速与土层深度数据根据不同盆地、不同土类分别进行回归分析。由于泉州盆地的黏土钻孔资料极少,较难研究其剪切波速随土层深度的关系,本文主要研究福州、泉州、漳州 3 个盆地的淤泥土、粉质黏土、细砂以及中粗砂剪切波速与土层深度的关系,绘制拟合曲线见图 5~8。按土类将回归参数的统计结果列于表 5,进行对比分析。

由图 5~8 可知:福州、漳州盆地的淤泥土、粉质黏土、细砂以及中粗砂的剪切波速和土层深度关系用线性模型拟合较为合理,福州、漳州盆地的各类土的剪切波速随着土层深度的加深线性变大,其中漳州盆地的各类土的变化速率较小。泉州盆地各类土的剪切波速和土层深度关系用则适合用二次多项式模型拟合,泉州盆地各类土剪切波速随深度加深变大,但并不是简单的线性递增,在土层深度较浅时(一般 8 m 以浅),剪切波速随土层深度的加深变化速率较大。根据判定系数 R^2 ,采用线性模型拟合福州、漳州盆地各类土的剪切波速与土层深度的关系,二次多项式模型拟合泉州盆地各类土的剪切波速与土层深度的关

表 4 福建地区不同土类剪切波速的分布范围

Table 4 Distribution ranges of shear wave velocity of different soils in Fujian area (m/s)

土类	淤泥土			粉质黏土			黏土			细砂			中粗砂			
	福州盆地	泉州盆地	漳州盆地	福州盆地	泉州盆地	漳州盆地	福州盆地	泉州盆地	漳州盆地	福州盆地	泉州盆地	漳州盆地	福州盆地	泉州盆地	漳州盆地	
数据(组)	457	62	88	95	316	23	128			28	50	10	18	125	51	98
最大值	296	157	184	369	328	241	428	钻孔资料极少		352	361	169	248	396	205	328
最小值	65	62	69	115	130	150	110			208	110	126	114	133	115	125
平均值	137.8	123.1	120.8	230.9	218.6	178.5	230.1			243.0	218.5	151.9	182.6	244.0	168.5	199.5
标准差	42.3	21.7	28.9	63.5	54.6	23.9	76.8			39.0	63.3	12.4	41.4	63.1	18.8	46.6

表 5 各类土拟合公式的参数及判定系数

Table 5 Parameters and determinant coefficients of each fitting model of soils

土类	场地	线性拟合 $V_s = a + bH$			二次多项式拟合 $V_s = a + bH + cH^2$			
		参数 a	参数 b	判定系数 R^2	参数 a	参数 b	参数 c	判定系数 R^2
淤泥土	福州盆地	74.367	3.8272	0.8964	—	—	—	—
	泉州盆地	—	—	—	69.117	9.5042	-0.2909	0.9083
	漳州盆地	71.401	4.767	0.9006	—	—	—	—
粉质黏土	福州盆地	110.48	5.2805	0.9328	—	—	—	—
	泉州盆地	—	—	—	109.44	19.983	-0.5007	0.964
	漳州盆地	147.56	5.144	0.9234	—	—	—	—
细砂	福州盆地	96.778	4.7529	0.9297	—	—	—	—
	泉州盆地	—	—	—	78.336	12.453	-0.4317	0.9217
	漳州盆地	104.59	4.3411	0.9449	—	—	—	—
中粗砂	福州盆地	110.41	5.0893	0.9012	—	—	—	—
	泉州盆地	—	—	—	114.13	6.687	-0.1409	0.863
	漳州盆地	114.82	6.8045	0.8557	—	—	—	—

表 6 预测波速与实测波速对比分析

Table 6 Comparison between predicted and actual shear wave velocities

钻孔号	土类	深度 /m	预测波速 /($m \cdot s^{-2}$)	实测波速 /($m \cdot s^{-2}$)	相对误差/%	钻孔号	土类	深度/m	预测波速 /($m \cdot s^{-2}$)	实测波速 /($m \cdot s^{-2}$)	相对误差/%
QZ01	粉质黏土	4.9	195.3	173	12.9	C8	粉质黏土	15.4	191.8	177	8.4
QZ01	细砂	7.0	144.4	145	0.4	C8	淤泥土	17.0	139.4	154	9.5
QZ01	细砂	8.1	150.9	150	0.6	C8	粉质黏土	30.3	270.5	285	5.1
QZ01	中粗砂	9.8	166.1	165	0.7	C8	中粗砂	32.0	273.3	249	9.7
QZHA03	淤泥土	8.3	128.0	117	9.4	C8	粉质黏土	34.0	290.0	283	2.5
QZHA03	中粗砂	16.8	186.7	196	4.7	C8	粉质黏土	39.7	320.1	313	2.3
QZJJ14	淤泥土	6.0	115.7	110	5.2	C15	淤泥土	6.8	110.4	106	5.3
QZJJ14	淤泥土	7.5	124.0	125	0.8	ZK2-2	淤泥土	4	90.5	85	6.4
QZJJ14	粉质黏土	9.0	248.7	220	13.1	ZK2-2	淤泥土	8	109.5	120	8.7
QZJJ14	粉质黏土	10.3	262.1	242	8.3	ZK2-2	粉质黏土	2	157.8	105	50.3
QZJJ14	中粗砂	13	177.2	178	0.4	ZK2-2	粉质黏土	3	163	128	27.3
C5	淤泥土	10.0	112.6	108	4.3	ZK2-2	中粗砂	10	182.9	182	0.5
C5	淤泥土	16.6	137.9	136	1.4	ZK2-2	中粗砂	11	189.7	175	8.4
C5	粉质黏土	19.2	211.9	191	10.9	ZK2-3	淤泥土	14	138.1	157	12.0
C5	粉质黏土	31.8	278.4	274	1.6	ZK2-3	淤泥土	18	157.2	173	9.1
C5	中粗砂	20.0	212.2	216	1.8	ZK2-4	粉质黏土	13	214.4	191	12.3
C8	淤泥土	6.0	97.3	99	1.7	ZK2-4	粉质黏土	16	229.9	155	22.3

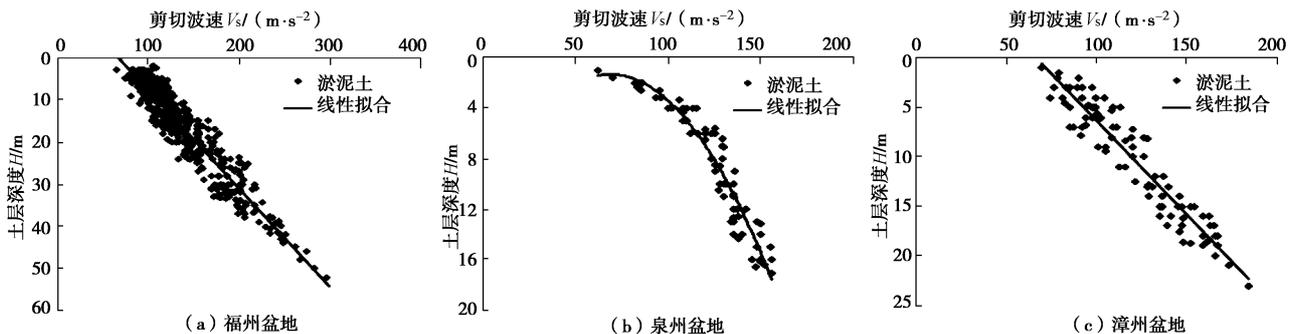


图 5 3 个盆地淤泥土剪切波速与土层深度拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves between shear wave velocities and depths of muddy soils in three basins

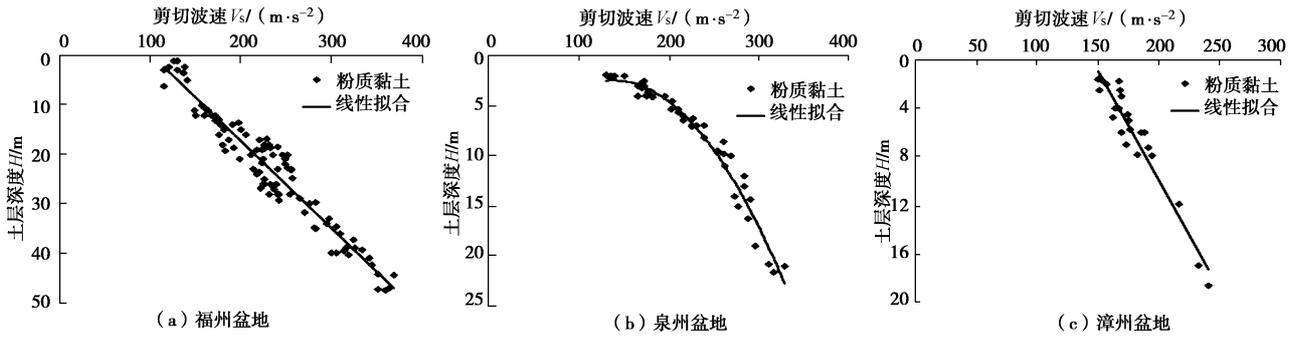


图 6 3 个盆地粉质黏土剪切波速与土层深度拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves between shear wave velocities and depths of silty clays in three basins

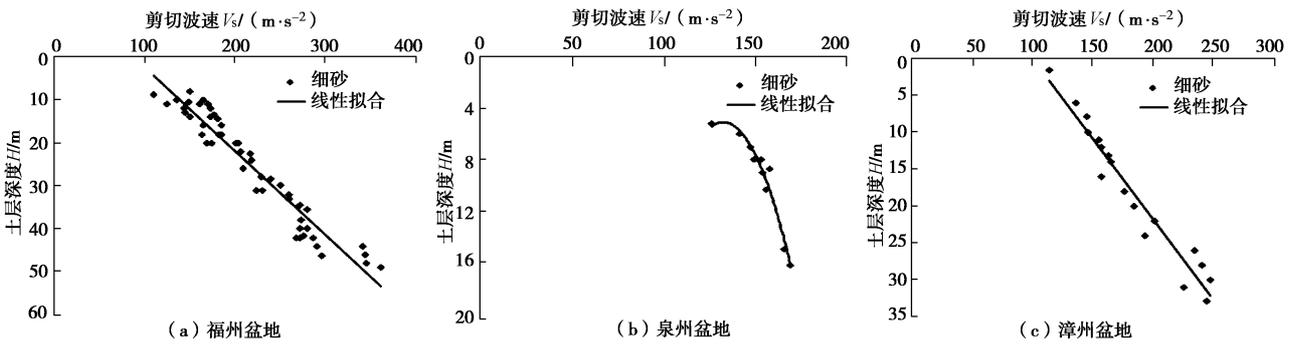


图 7 3 个盆地细砂剪切波速与土层深度拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves between shear wave velocities and depths of fine sands in three basins

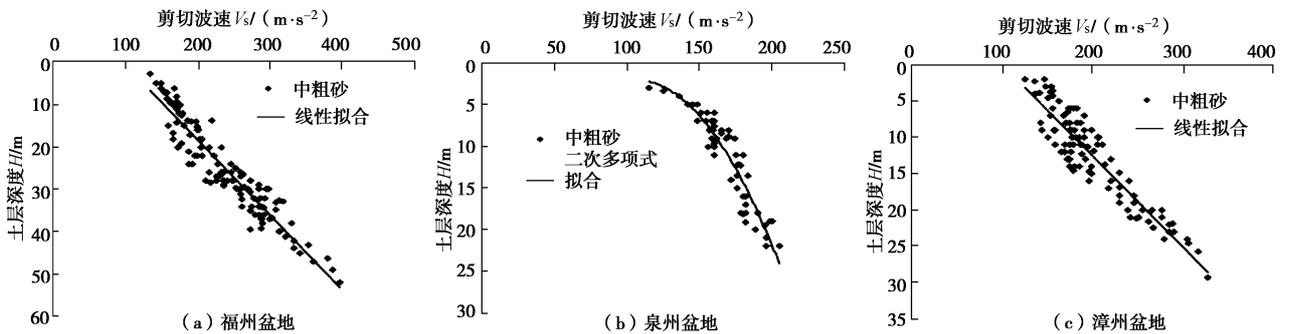


图 8 3 个盆地中粗砂剪切波速与土层深度拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves between shear wave velocities and depths of medium coarse sands in three basins

系，拟合效果均较为理想。

为验证上述拟合公式是否能较为精确地预测福州、泉州、漳州 3 个盆地各类土的剪切波速，将拟合公式应用于福州市轨道交通#1 线工程钻孔 C5, C8, C15, 泉州市延陵大桥工程钻孔 QZ01, QZHA03, QZJ14, 漳州融信·翠湖工程钻孔 ZK2-2, ZK2-3, ZK2-4 中各土类的剪切波速预测工作，将预测剪切波速与实测数据比较，并计算相对误差，结果见表 6 所示。

由表 6 可知：通过福州、泉州、漳州盆地各类土剪切波速拟合公式（见表 5）推测出的剪切波速值与实测值相对误差基本在 20%以内，最小只有 0.4%，说明该地区各类土的剪切波速 V_s 用上述各拟合公式预测，结果较为理想，可供该地区无波速测试场地参考使用。但是漳州盆地的部分粉质黏土的预测剪切波速

与实测值相差较大，预测效果较差，这可能是由于漳州盆地粉质黏土已有的剪切波速实测数据较少，基于该数据拟合得到的剪切波速公式误差较大。

3 结 论

通过分析福建沿海福州，泉州，漳州 3 个盆地的大量钻孔实测土层剪切波速和深度，绘制各盆地等效剪切波速等值线分布图；拟合福州、泉州、漳州盆地淤泥土、粉质黏土、黏土、细砂、中粗砂的土层剪切波速与深度的关系，得出以下结果：

(1) 泉州盆地等效剪切波速整体大于福州、漳州两个盆地，泉州盆地等效剪切波速主要为 200~250 m/s，局部地区达到 350 m/s；福州盆地等效剪切波速集中在 100~150 m/s，局部地区只有 60 m/s 左右；漳州盆地等效剪切波速整体在 150~200 m/s 范围内。

(2)福州盆地的等效剪切波速等值线呈现出闽江沿岸地区较小的分布特征。

(3)福州、漳州盆地土层剪切波速和深度关系呈线性关系,泉州盆地则呈二次多项式的非线性关系,并推荐了其拟合参数;拟合公式预测的场地不同深度处土层的剪切波速值,与场地的实测剪切波速值基本吻合,可为该地区无剪切波速实测值的场地提供较好的参考依据。

参考文献:

- [1] 兰景岩, 薄景山, 吕悦军. 剪切波速对设计反应谱的影响研究[J]. 震灾防御技术, 2007, 2(1): 19 - 24. (LAN Jing-yan, BO Jing-shan, LÜ Yue-jun. Study on the effect of shear wave velocity on the design spectrum [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2007, 2(1): 19 - 24. (in Chinese))
- [2] 孙 锐, 袁晓铭, 刘晓键. 动剪切模量比与剪切波速对地震影响及等量关系研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1267 - 1274. (SUN Rui, YUAN Xiao-ming, LIU Xiao-jian. Effects of dynamic shear modulus ratio and velocity on surface ground motion and their equivalent relations[J]. Chinese journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1267 - 1274. (in Chinese))
- [3] 刘红帅, 薄景山, 吴兆营, 等. 土体参数对地表加速度峰值和反应谱的影响[J]. 地震研究. 2005(2): 167 - 171. (LIU Hong-shuai, BO Jing-shan, WU Zhao-ying, et al. Effects of soil parameters on ground surface acceleration peak and response spectra[J]. Journal of Seismological Research, 2005, 28(2): 167 - 171. (in Chinese))
- [4] 高玉峰, 刘汉龙, 朱 伟, 等. 剪切波速对砂土地震反应的影响[J]. 工程勘察, 2001, 1(1): 39 - 42. (GAO Yu-feng, LIU Han-long, ZHU Wei, et al. Effects of shear wave velocity on seismic response of sand[J]. Geotechnical Investigations & Surveying, 2001, 1(1): 39 - 42. (in Chinese))
- [5] 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(增刊 1): 21 - 23. (GUO Ming-zhu, JIA Lian-jun, TIE Rui, et al. Analysis on current situation of shear-velocity measurement method[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011(S1): 21 - 23. (in Chinese))
- [6] COMINA C, FOTI S, BOIERO D, et al. Reliability of V_s ,30 evaluation from surface-wave tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(6): 579 - 586.
- [7] 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(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(7): 1142 - 1149. (in Chinese))
- [8] 高玉峰, 刘汉龙. 合肥膨胀土剪切波速的特征分析[J]. 岩土工程学报, 2003(3): 371 - 373. (GAO Yu-feng, LIU Han-long. Study on shear wave velocities in expansive soils of Hefei[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003(3): 371 - 373. (in Chinese))
- [9] 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(2): 11 - 17. (ZHAN Ji-yan, CHEN Guo-xing, LIU Jian-da. Empirical relationship between shear wave velocity and soil depth on deep soft sites in urban area of Suzhou city[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(2): 12 - 17. (in Chinese))
- [10] MARSHALL Lew. Correlations of seismic velocity with depth[C]// International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics (ICRA GEESD) U.S.A., 1981.
- [11] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 1995. (GB50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 1995. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)