

张忠利, 袁媛, 罗云. 北海市土层剪切波速与埋深的关联性[J]. 华南地震, 2015, 35(3): 40–45. [ZHAGN Zhongli, YUAN Yuan, LUO Yun. Relationship Between Soil Shear Wave Velocity and Soil Depth in Urban Areas of Beihai City[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(3): 40–45.]

## 北海市土层剪切波速与埋深的关系

张忠利<sup>1, 2</sup>, 袁媛<sup>1, 2</sup>, 罗云<sup>1</sup>

(1. 广西壮族自治区地震局, 南宁 530022; 2. 广西工程防震研究院, 南宁 530022)

**摘要:** 收集了2008年以来北海市城区44个工程场地地震安全性评价中的土层剪切波速测试资料, 采用幂函数模型分别对粘土、粗砂、砾砂、其它土类的土层剪切波速与埋深进行加权回归分析, 得到不同土类的模型参数及拟合优度指标(判定系数 $R^2$ 和误差标准差 $\sigma$ ), 并对回归方程和回归系数进行了显著性检验; 最后将土层剪切波速预测值与实测值进行对比, 验证回归关系式的合理性和适用性。结果表明: 北海市城区土层剪切波速与埋深呈现出较好的幂函数关系, 拟合优度均在0.81以上; 给出的土层剪切波速回归关系式能较好地预测出不同埋深土层剪切波速, 特别是在土层中部和底部推测结果准确性更高, 其推测结果可供北海市城区缺乏剪切波速测试资料的场地参考使用。

**关键词:** 回归分析; 北海市城区; 剪切波速; 土层埋深

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2015)03-0040-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2015.03.006

## Relationship Between Soil Shear Wave Velocity and Soil Depth in Urban Areas of Beihai City

ZHAGN Zhongli<sup>1, 2</sup>, YUAN Yuan<sup>1, 2</sup>, LUO Yun<sup>1</sup>

(1. Earthquake Administration of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China;

2. Guangxi Academy of Engineering Shock Prevention, Nanning 530022, China)

**Abstract:** Based on data of shear wave velocities measured from 44 engineering sites during the seismic safety evaluation since 2008, the paper does the weighted regression analysis for shear wave velocity and depth of soils with various of soil type, including clay, coarse sand, gravelly sand, et al, by using the power-law function, and gets the model parameters and goodness of fit (coefficient of determination  $R^2$  and error standard deviation  $\sigma$ ). Meanwhile, the paper tests the significance on regression equation and regression coefficient. Finally, the paper verifies the rationality and applicability of the regression equations via comparing measured values with the predicted values. The results show that there are remarkable relationships between the shear wave velocities and the depths of soils in beihai, which can be fitted by the power function and has the goodness of fit more than

收稿日期: 2015-05-29

基金项目: 广西地震局地震科研监测预报合同制课题(091405)

作者简介: 张忠利(1977-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩土地震工程研究。

E-mail: 421530917@qq.com.

0.81; the speculation equations can well speculate soil shear wave velocity in different depth, which is more accurate especially in the middle and bottom soil, and may provide reference for shear wave velocity at sites without the test data in urban areas of Beihai.

**Keywords:** Regression analysis; Beihai City; Shear wave velocity; Soil depth

## 0 引言

土层剪切波速是岩土地震工程中的一个重要物理量,在场地土类或场地类别划分、地基饱和土液化判别、土层地震反应分析等方面得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。通常采用现场原位测试方法确定土层剪切波速,现场原位测试方法分为单孔检层法、跨孔法和表面波法三种,其中单孔检层法能直接而可靠地给出土层的准确位置、厚度及其波速,并受测试场地环境限制很小,是目前应用最广泛的方法<sup>[3]</sup>。由于土体本身固有的变异性以及测试技术的原因,使测试结果具有更大的变异性,甚至可能超过30%<sup>[4-5]</sup>。因此,利用实测土层剪切波速资料建立土层剪切波速的统计关系,并将统计估计值、现场实测值和土层特征进行对比分析,综合确定土层剪切波速值并应用到工程实践中显得更为科学合理。

近年来,在城市地震动参数小区划和重大工程场地地震安全性评价工作中,开展了大量的土层剪切波速测试,积累了较丰富的土层剪切波速测试资料。基于这些实测资料,国内外学者建立了一些土层剪切波速与埋深或标准贯入值的经验关系<sup>[6-18]</sup>。综合以往成果可以看出:①除土层埋深外,影响土层剪切波速的因素还包括土质类别、形成条件、天然重度、物理性质等;②土层剪切波速与埋深关系可利用线性模型、一元二次多项式模型、幂函数模型进行拟合,总体上看一元二次多项式或幂函数模型的拟合精度较高;③不同地区土层剪切波速与埋深的经验关系具有较大差异,表现出很明显的地域性;④以土层动力性质较一致的工程地质单元作为一个统计单元,可得到较好的经验关系。鉴于上述认识,本文首先阐述了北海市城区地貌成因类型及堆积物的物质来源,经分析表明,北海市城区工程场地主要位于以剥蚀为主、侵蚀为次的台地,土层沉积环境、岩性特征相似,可以作为土层剪切波速与埋深的统计单元;然后采用幂函数模型,分别对粘土、粗砂、砾砂和其它土类的土层剪切波速与埋深进行了加权回归分析,得到相应的模型参数及拟合优度指标(判定系数 $R^2$ 和误差标准差 $\sigma$ ),并对回归方程和回归系数进行了显著性检验;最后将土

层剪切波速预测值与实测值进行对比,验证回归关系式的合理性和适用性。

## 1 工程地质条件概述

北海市位于我国大陆南端,濒临北部湾,三面环海。城区大部分为以剥蚀为主、侵蚀为次的台地,地面平坦,由于地表流水(包括季节性暂时流水及河流)的冲刷和切割,古滨海平原地形略有起伏;西部冠头岭、地角镇等地,基岩裸露,残坡积低山丘发育;南部局部发育了海积阶地和现代海滩<sup>[19]</sup>。

北海市城区主要建设规划用地位于具较厚的松散沉积物的台地。根据近年来收集到的勘测资料表明,基岩面起伏不大,高差在20 m左右,覆盖层厚度多在80 m以上;存在个别基岩隆起区,覆盖层相对较薄,在40 m左右。总体上来看,场地第四纪松散层厚度还是较稳定的,土层厚度变化明显受基底控制;层序也比较稳定,不同时代地层以整合或假整合接触,自上而下沉积有全新统、第四系中更新统北海组、第四系下更新统湛江组和新近系地层,普遍缺失第四系上更新统地层<sup>[20]</sup>。

全新统主要分布于海积阶地、现代海滩、残坡积区和侵蚀堆积洼地,岩性主要为淤泥质土、细砂、中砂、砾砂、粘土等,结构疏松,含贝壳,具有一定的分选性,砂、砾石磨圆较好,砂以石英为主,砾石主要为脉石英、硅质岩碎块,淤泥质土呈流塑状;第四系中更新统北海组地层广泛分布,在侵蚀低洼区,该层位有时缺失。上部岩性主要为中砂、粗砂含粘性土或含粘性土含中砂、粗砂,结构松散或稍密,粘性土为硬塑或坚硬状,下部岩性主要为粗砂、砾砂,结构稍密-密实,有时含粘性土;第四系下更新统湛江组为城区地层主体,在整个城区均有揭露。主要土层为粘土、粗砂、砾砂。粗砂、砾砂结构中密-密实状态,粗砂以石英质为主,砾石磨圆中等,成分以脉石英、砂岩为主。粘土质纯,密实,粘性大,一般为硬塑状态,以高岭石矿物为主。总体上可见,北海市城区土层水平范围内变化不大,垂直范围内结构简单,可作为一个工程地质单元确定土层剪切



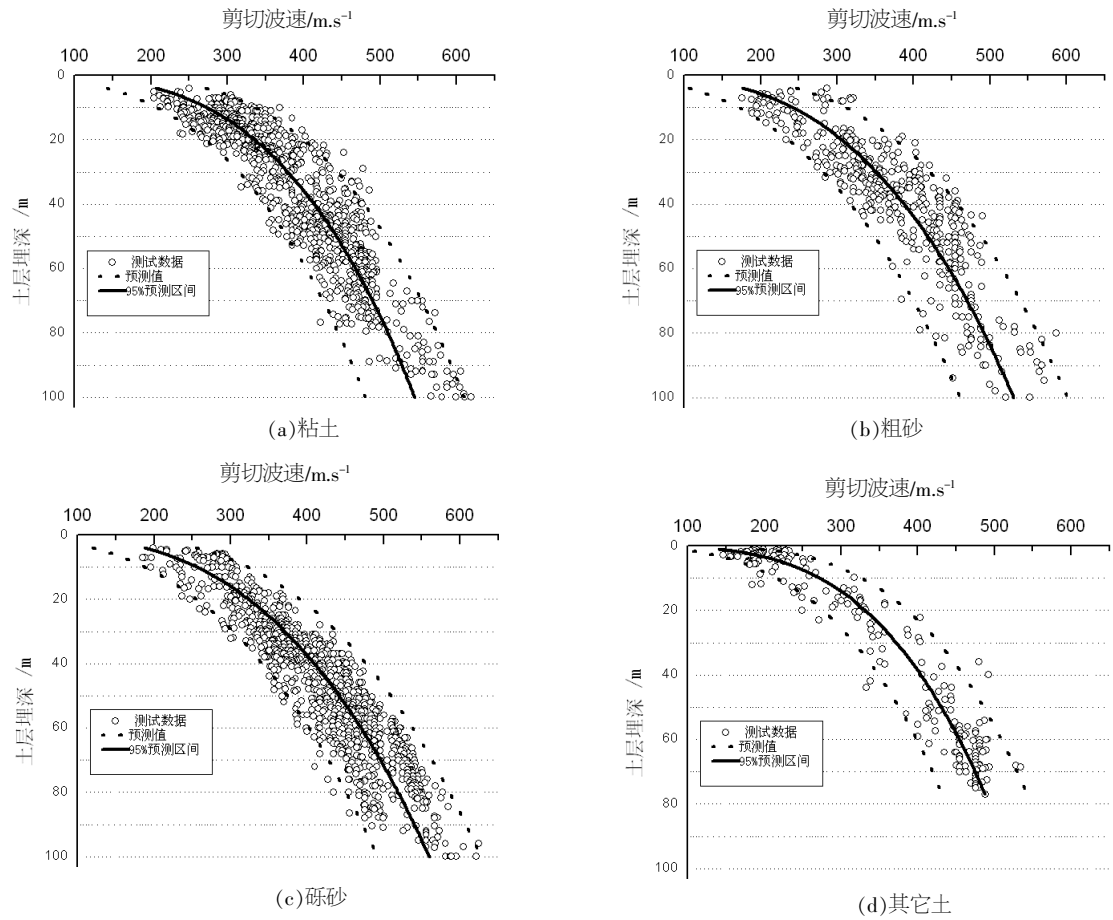


图2 土层剪切波速与埋深关系拟合曲线

Fig.2 Fitting curves of the shear wave velocity and depth of soils

表 2 土层剪切波速与埋深关系加权回归分析结果

Table 2 The results of weighted regression analysis between shear wave velocity and depth of soil layer

岩土类型	$V_s = a.H^b$			
	$a$	$b$	$R^2$	$\sigma$
粘土	136.331 1	0.301 1	0.839 6	32.902 4
粗砂	109.589 8	0.342 7	0.810 1	35.567 2
砾砂	116.807 6	0.340 2	0.850 8	34.452 7
其它土	140.550 9	0.286 3	0.919	27.966 5

表 3 土层剪切波速与埋深回归方程显著性检验表

Table 3 The significance test on regression equation between shear wave velocity and depth of soil layer

土类	方差来源	自由度	平方和	均方	$F$ 值	$P$ 值
粘土	回归	1	5 785 800	5 785 800	4 932	<0.005
	残差	942	1 105 100	1 173		
	总计	943	6 890 900			
粗砂	回归	1	2 721 800	2 721 800	1 885	<0.005
	残差	442	638 130	1 444		
	总计	443	3 359 930			
砾砂	回归	1	6 471 600	6 471 600	5838	<0.005
	残差	1 024	1 135 100	1 108		
	总计	1 025	7 606 700			
其它	回归	1	2 987 900	2 987 900	2 551	<0.005
	残差	225	263 520	1 171		
	总计	226	3 251 420			

表 4 土层剪切波速与埋深回归系数显著性检验表

Table 4 The significance test on regression coefficient between shear wave velocity and depth of soil layer					
土类	回归系数	估计值	标准差	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
粘土	<i>a</i>	136.331 1	2.393 7	56.954 1	<0.001
	<i>b</i>	0.301 1	0.004 3	69.418	<0.001
粗砂	<i>a</i>	109.589 8	3.338 8	32.823 6	<0.001
	<i>b</i>	0.342 7	0.007 5	45.808 2	<0.001
砾砂	<i>a</i>	116.807 6	2.165 8	53.932 6	<0.001
	<i>b</i>	0.340 2	0.004 6	74.628 4	<0.001
其它	<i>a</i>	140.550 9	3.831 3	36.684 9	<0.001
	<i>b</i>	0.286 3	0.007 2	39.602 3	<0.00

4 工程检验

为了检验上述推测公式的合理性和适用性，本文选取了北海市城区某工程场地钻孔，利用本文所得的回归关系式进行剪切波速预测，并计算出相对误差，以此验证所得回归关系式的预测精

度，具体对比结果见表 5 所示。由表 5 可以看出，土层剪切波速推测值相对误差均小于 11%，在 19 个测试点中只有 4 个测试点相对误差超过 5%，初步表明，利用本文给出的回归关系式可较准确的预测该地区土层剪切波速，供北海市城区缺乏剪切波速测试资料的场地参考使用。

表 5 土层剪切波速预测值与实测值对比

Table 5 Comparison between predicted values and measured values of shear wave velocity					
土层名称	状态或密实度	测试深度/m	实测值/m.s <sup>-1</sup>	推测值/m.s <sup>-1</sup>	相对误差/%
含粘性土粗砂	松散	2.4	174	181	4
含粘性土砾砂	中密	5	206	223	8
		7.9	248	254	2
粘土	可塑	11	284	281	1
		15	307	308	0
		18.8	337	330	-2
粗砂	中密	22	355	316	11
		26	358	335	6
		30	361	352	2
粘土	硬塑	34.1	362	367	1
		38	395	408	3
		41.1	430	417	3
砾砂	中密	44	410	423	3
		47.7	429	435	1
粘土	坚硬	50.7	427	445	4
粗砂	密实	54	461	430	7
		57	462	438	5
		59.1	468	443	5
粘土	坚硬	62.5	473	474	0

5 结语

通过对北海市城区土层剪切波速实测资料进行统计分析，得到如下结论：

(1) 通过对北海市城区场地土层结构分析表明，土层结构相对简单，水平变化不大，可将其

作为一个工程地质单元，确定土层剪切波速与埋深的关联性。

(2) 通过对回归方法和回归系数的显著性检验表明，利用幂函数模型  $V_s=a\cdot H^b$ ，可以较好的拟合出北海市城区粘土、粗砂、砾砂和其它土类的土层剪切波速与埋深关系。

(3) 通过与某一工程场地剪切波速实测值的对比分析,初步表明利用本文给出的回归公式可较准确的预测该地区土层剪切波速,供北海市城区缺乏剪切波速测试资料的场地参考使用。

### 参考文献:

- [1] 廖振鹏. 地震小区划:理论与实践[M]. 北京:地震出版社, 1989.
- [2] 周锡元,王广军,苏经宇. 场地·地基·设计地震[M]. 北京:地震出版社, 1990.
- [3] 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, 25 (3): 80-84.
- [4] 孙锐,刘红帅,刘德东. 土体动力参数不确定性及影响研究[R]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2009.
- [5] 刘红帅,郑桐,薄景山,等. 粘性土剪切波速不确定性的统计分析[J]. 世界地震工程, 2010, 26 (增刊): 99-103.
- [6] 李凡,李大华. 天津软土剪切波速影响因素的灰色关联分析[J]. 勘察科学技术, 2004 (3): 9-11.
- [7] 程祖锋,李萍,李燕,等. 深圳地区部分岩土类型剪切波速与深度的关系分析[J]. 工程地质学报, 1997, 5 (2): 163-168.
- [8] 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.
- [9] 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, 25 (3): 371-373.
- [10] 蔺宝云,简文彬. 福州盆地土层 S 波波速特征及分布规律[J]. 岩土工程界, 2005, 8 (10): 27-29.
- [11] 李存志,李向新,姚明波,等. 昆明盆地剪切波速与地基特性相关分析研究[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2006, 22 (3): 1-5.
- [12] 齐文浩,刘德东,兰景岩,等. 西安阎良区土层剪切波速统计分析[J]. 防灾科技学院学报, 2008, 10 (4): 10-12.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 齐静静. 山东东营城区剪切波速回归分析及应用[J]. 勘察科学技术, 2011 (2): 23-26.
- [16] 董菲蕃,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, 2013, 35 (增刊 2): 145-151.
- [17] 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.
- [18] 薛锋,王庆良,胡亚轩,等. 西安市岩土体剪切波速与土层深度关系的研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36 (2): 249-255.
- [19] 于克涛,戴丽思,梁小化,等. 北海市场地震工程地质环境特征和地震设防区划[J]. 工程地质学报, 1998, 6 (1): 55-60.
- [20] 马天骏. 广西北海市第四系工程地质特征[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1989, 9 (2): 187-194.
- [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.
- [22] 邱志刚,薄景山,罗奇峰. 土壤剪切波速与埋深关系的统计分析[J]. 世界地震工程, 2011, 21 (3): 81-88.