

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(增刊):236-240.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.增刊.236
WANG Jinyan,HOU Ying.Relation between Shear Wave Velocity and Soil Depth in the Urban Area of Changzhou City[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(Supp.):236-240.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.Supp.236

常州市城区土层剪切波速与土层深度关系分析^①

王金艳,侯 莹

(江苏省地震局,江苏 南京 210014)

摘要:结合海侵地质成因,收集了2009年以来常州市城区358个钻孔2 691条土层剪切波速测试资料进行统计分析。采用线性 $v_s=a+bH$ 、多项式 $v_s=a+bH+cH^2$ 及幂函数 $v_s=cH^d$ 对各类土剪切波速随深度变化进行回归分析,给出各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,并利用实际工程钻孔进行剪切波速预测与检验。检验结果表明,给出的各类岩土体的剪切波速与埋深经验关系是可靠的,可用文中得出的公式对土层剪切波速进行推测,为今后常州市区的工程抗震工作提供可靠的剪切波速值。

关键词:常州市;剪切波速;土层深度;回归分析

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)增刊-0236-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.Supp.0236

Relation between Shear Wave Velocity and Soil Depth in the Urban Area of Changzhou City

WANG Jinyan, HOU Ying

(Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

Abstract: Changzhou City is located on the alluvial plain of the Yangtze River Delta, which is covered by relatively thick Quaternary strata. Combining geological origin of transgression, 2 691 test data on shear wave velocities of soils from 358 boreholes in Changzhou City were collected for statistical analysis. Using the linear $V_s=a+bH$, the polynomial formula $V_s=a+bH+cH^2$, and the power function $V_s=cH^d$, regression analysis was performed on the variation in shear wave velocity in different soil types with different soil depths. Three relations between the type of soil and shear wave velocity variation with depth and the corresponding regression parameters are presented. The shear wave velocities were estimated and tested using actual data from engineering boreholes. The results show that the shear wave velocity and soil depth in Changzhou City exhibit a reliable empirical relation. The formulas can be used to predict the shear wave velocity in the study area and provide reliable values for use in future seismic engineering analyses of Changzhou City.

Key words: Changzhou City; shear wave velocity; soils depth; regression analysis

① 收稿日期:2016-06-06

作者简介:王金艳(1982—),女,硕士研究生,工程师,主要活动构造及岩土工程抗震方面研究。E-mail:117001305@qq.com。

0 引言

土层剪切波速是土动力学的一个主要物理量,它反映了土在动力响应下的惯性作用和波传行为,因此也是反映土体在地震作用下动力反应的一个重要物理量^[1]。场地土剪切波速可用于场地类别划分、砂土液化判别、场地土动剪切模量和地基动力阻抗的确定,而且是城市地震小区划和重大工程场地地震安全性评价工作不可缺少的基本参数,因此场地土剪切波速的测试是重大工程场地岩土工程勘察的一项重要内容^[2]。

目前,国内外学者曾做过各种方式的拟合统计工作,得到特定地区剪切波速随深度变化的经验公式。曾勇等^[3]分析了西安、徐州、鞍山等地区的场地土剪切波速与土层深度经验关系,认为土层深度是控制场地土剪切波速最重要的因素,并给出了非线性的经验公式 $v_s = a + b(H + c)^d$ 。王帮圆等^[4]认为邯郸市市区土层剪切波速与深度之间砂性土、粉土及粉质黏土宜采用多项式进行拟合;而黏土、卵石用幂函数拟合优于线性和多项式拟合。战吉艳等^[2]分析了苏州城区深软场地的剪切波速资料与土层深度的关系,认为 40.5 m 以上浅土层基本符合线性函数关系,40.5 m 以下深土层基本符合幂函数关系,给出了采用线性函数、幂函数分段形式拟合的苏州城区深软场地剪切波速随土层深度变化的经验关系。刘红帅等^[5]依据中国地震安评工作大量的钻孔实测剪切波速数据,利用最小二乘法分别采用线性模型、指数模型和一元二次多项式模型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埋深间的统计公式。陶小三等^[6]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,对于不同岩土体分别给出了采用线性模型、指数模型和一元二次多项式模型三种不同的经验回归方程。何仲太等^[7]应用大量钻孔剪切波速实测数据,回归分析了衡水市城区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衡水市城区常规土剪切波速与埋深间的统计公式。

我国各城市进行了大量的工程建设,获得了足够的钻孔和场地剪切波速测试资料,若能根据已有的钻孔资料,结合当地的岩土成因和性状,给出合理的场地剪切波速随土层深度变化的经验关系,不仅节约成本、提高工作效率,还将有利于加快该地区的重大工程建设进程,具有重大的社会 and 经济效益。本文利用常州市城区范围内 358 个钻孔 2 691 条剪

切波速数据进行三种模型的回归分析,得到不同岩土类相应的模型参数及拟合优度指标,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 常州市地貌及第四纪地层

常州市位于长江三角洲地带,地貌类型为平原(冲积、湖积相)、低山丘陵和岗地。平原由分布在长江南岸的长江三角洲冲积平原和太湖北岸的湖积平原组成。常州市及其邻近地区地层发育比较齐全,自前震旦纪到第四纪都有沉积,基岩露头区主要分布在常州东部地区。据钻探资料,常州市城区第四系广泛分布,第四纪沉积类型多样,可分为冲积相、湖积相、海积相和湖沼相。各地区地层的发育程度严格受到基地和沉积环境控制,厚度变化较大。

第四系可分为下更新统、中更新统、上更新统和全新统。在平原区下更新统沉积厚度约 30~80 m,岩性可分为三段:下段主要分布在常州盆地内,厚约 10~20 m,岩性为粗砂层,底部含砾砂;该段上部为半胶结状黏土,含钙质结核;中段一般厚约 10~40 m,岩性为灰色砂及砂砾层,常见黏土夹层;上段厚约 10~20 m,岩性为灰黄色黏土,富含钙质结核,局部夹粉、细砂层。中更新统沉积厚度在 60~80 m,可分为上、下两段:下段由一套河流冲积层组成,岩性为粉质黏土夹粉细砂层及淤泥质粉质黏土,其他岩性还有砂层、砂砾层等;上段为冲湖积相沉积,岩性为粉质黏土、细砂层及砂砾层。上更新统分布在长江漫滩及近场其他广大地区,是一套厚约 30~40 m,颜色为灰黄、灰白、灰、灰黑等色的砂,砾砂、粉质黏土、卵砾石层为主的松散沉积物,其可分为上、下两段:下段岩性为细砂、粉砂、亚砂土、粉质黏土,夹砂砾,含铁锰结核和钙质结核;上段包括冲积—坡积、洪积、河漫滩相等,主要岩性为粉质黏土、粉砂、粉质砂土等,富含铁锰质结核。全新统如东组地层广布于常州市北部长江河漫滩及河流湖荡低洼地带沉积区,厚度变化大。可分为上、下两段:下段为一套灰黑色粉质砂土、灰黄色淤泥质粉质黏土,粉质黏土、粉细砂土中局部云母片富集,含螺壳;上段为灰、青灰、灰褐、灰黑色淤泥质粉质黏土,夹粉质砂土、粉细砂土,厚度一般约 20 m 左右。

总体上可见,常州市城区各地层单元的厚度自老到新,自下而上依次变薄,更新世早期,自北西向

南东方向呈现依次埋深加大的缓坡变化,而更新世中期和晚期,总体地势较为平坦,地层厚度与埋深差异不大,可作为一个工程地质单元确定土层剪切波速与土层深度的统计关系。

2 剪切波速数据来源及分布特征

本次工作收集近年来常州市区范围内的工程勘察、地震安全性评价及活动断层探测与地震危险性评价工作中的剪切波速资料。剪切波速主要采用单孔检层法测试得到,采用 0.05 ms 采样间隔,测试点

间距 1 m。回归分析所得经验关系只能反映一般土质条件下的 v_s ,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 资料及不可靠的采样点剔除,再对剩余的采样点进行回归分析。若某采样点同时存在下述两种情况,则认其是软、硬夹层土或不可靠的采样点,予以删除^[6]。经过对测试结果的对比分析,共选取了 358 个钻孔 2 691 条剪切波速数据进行统计分析,该地区主要土层有素填土、粉质黏土、粉砂、黏土、细砂。各类土实测剪切波速统计如表 1 所列,所有钻孔的实测剪切波速见图 1。

表 1 不同岩土类型的剪切波速值

土层类别	深度/m	波速/(m·s ⁻¹)	平均波速/(m·s ⁻¹)	统计个数/个	标准差
素填土	4~10	119~152	135	4	11.8
黏土	5~82	137~513	360	460	113.6
粉土	5~78	139~490	276	259	88.0
粉砂	7~93	154~505	318	359	80.6
粉质黏土	5~99	108~510	328	926	99.7
细砂	14~100	238~205	413	40	87.7

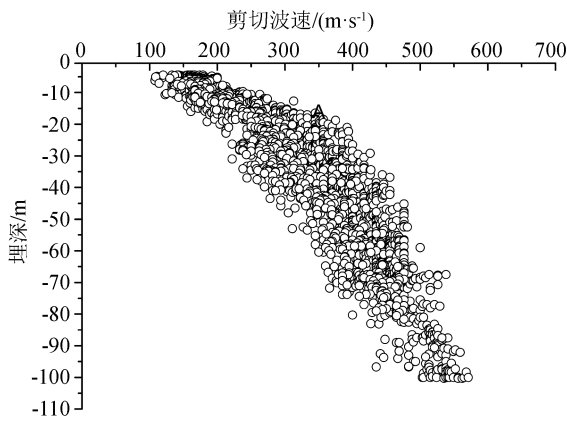


图 1 钻孔剪切波速实测值

3 常州城区场地土剪切波速与土层深度关系分析

多数情况下剪切波速与土层深度之间并非简单的线性关系^[1-8]。近些年,主要采用以下三种模型进行工程场地剪切波速 v_s 与土层深度 H 的经验关系分析,并拟合出相应的回归曲线。本文也采用这三种数学模型进行统计回归分析,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。

- 模型 1 $v_s=a+bH$;
- 模型 2 $v_s=a+bH+cH^2$;
- 模型 3 $v_s=cH^d$;

式中: v_s 为土层剪切波速(m/s); H 为土层埋深(m); a 、 b 、 c 、 d 均为拟合参数。

考虑土体类型对场地土剪切波速与土层深度 H 关系的影响,将常州市城区的土类划分为素填土、粉质黏土、粉砂、粉土、黏土、细砂 6 类,其中素填土在地表以下 5 m 的值从 119 m/s 到 152 m/s 均有分布,未表现出剪切波速与埋深间的相关性,本文不对素填土做回归分析。分别采用 3 种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,其经验关系的拟合参数值见表 2,各类土体的剪切波速与土层深度关系散点图如图 2。

据以上回归曲线可得出不同土类相应的模型,并计算出每种模型的拟合优度 R^2 。由表 2 可以看出:各类岩土体的 v_s-H 相关关系都很显著,其中粉砂、黏土、细砂剪切波速沿土层深度变化采用幂函数拟合优于多项式拟合,线性拟合效果最差;粉土、粉质黏土剪切波速随土层深度变化按多项式拟合较线性优于幂函数拟合,线性拟合效果最差。建议常州市城区各种岩土类采用的经验关系模型见表 3。

4 工程检验

为了验证以上对于常州市城区剪切波速与埋深关系回归分析的适用性和可靠性,将本文推荐模型的经验关系拟合函数应用于实际钻孔,并与钻孔实测数据进行比较分析。本文选取了常州市城区某工

表 2 常州市城区各类土模型参数及拟合优度

模型	参数	粉土	粉砂	粉质黏土	黏土	细砂
模型 1	a	159.414 76	202.765 90	179.968 79	177.299 48	248.476 70
	b	4.812 83	3.824 68	4.214 59	4.294 41	2.691 39
	R^2	0.847 77	0.801 71	0.770 46	0.865 05	0.902 97
模型 2	a	110.273 31	153.068 32	111.925 26	126.548 69	219.536 13
	b	8.814 42	7.251 27	8.898 31	9.012 92	4.398 39
	c	-0.054 78	-0.042 37	-0.058 01	-0.062 08	-0.016 04
	R^2	0.907 32	0.843 77	0.853 13	0.925 47	0.912 97
模型 3	c	70.670 11	92.095 17	80.260 51	94.676 26	121.366 94
	d	0.444 58	0.376 61	0.410 05	0.373 80	0.307 73
	R^2	0.901 95	0.847 73	0.846 06	0.926 68	0.914 69

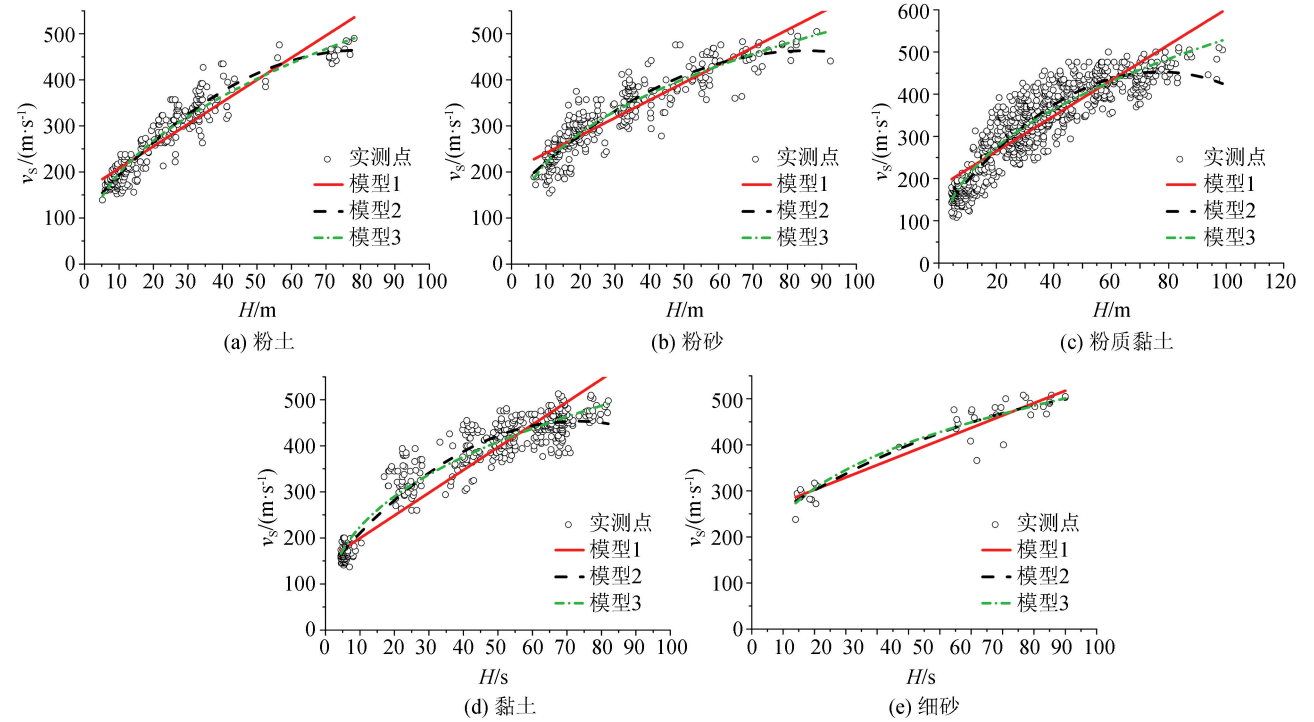


图 2 各类土剪切波速与深度拟合关系曲线图

表 3 各类岩土体的 v_s-H 回归分析成果

岩土类型	经验回归方程	相关系数
粉土	$v_s=110.273\ 31+8.814\ 42H-0.054\ 78H^2$	0.907 32
粉砂	$v_s=92.095\ 17H^{0.376\ 61}$	0.847 73
粉质黏土	$v_s=111.925\ 26+8.898\ 31H-0.058\ 01H^2$	0.853 13
黏土	$v_s=94.676\ 26H^{0.373\ 8}$	0.926 68
细砂	$v_s=121.366\ 94H^{0.307\ 73}$	0.914 69

程场地钻孔,利用本文所推荐的回归关系式模型进行剪切波速计算,得出相对误差,以此验证所得回归关系式的预测精度,具体对比结果如表 4 所列。

由表 4 可知,由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 43 组数据中,相对误差最大为 12%,最小为 0.42%,22 个点的误差均在 5%以内,只有 5 个点相对误差在 10%,表明本文所提出的模型回归公式对于常州市城区钻孔剪

切波速与埋深关系可靠实用,可以为一般工程参考使用。

5 结论

本文应用大量钻孔剪切波速实测数据,探讨了常州市城区 5 种土层剪切波速与土层深度的统计关系。结果表明,常州市城区各类土类型剪切波速与土层深度有显著地相关性,各类土剪切波速随土体

表 4 检验钻孔的剪切波速与土层深度关系的
预测结果与实测结果比较

土层岩性	埋深 /m	实测波速 v_s /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	推荐模型 v_s /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差 /%
粉质黏土	11.1	196	204	3.85
粉质黏土	11.4	194	206	6.10
粉质黏土	11.6	200	207	3.67
粉土	12.4	208	211	1.51
粉土	13.0	213	216	1.22
粉土	13.1	220	216	1.66
粉质黏土	14.8	250	231	7.63
粉质黏土	15.5	256	236	7.85
粉质黏土	15.7	267	237	11.11
黏土	26.3	308	321	4.34
黏土	26.4	306	322	5.18
黏土	26.5	291	322	10.75
粉质黏土	29.5	322	324	0.60
粉质黏土	29.8	303	326	7.45
粉质黏土	30.4	294	329	11.84
粉砂	34.8	333	351	5.29
粉砂	34.9	313	351	12.13
粉砂	35.4	338	353	4.40
粉质黏土	36.8	329	361	9.67
粉质黏土	36.8	351	361	2.80
粉质黏土	37.8	333	365	9.73
粉土	39.5	348	373	7.18
粉土	39.6	358	373	4.31
黏土	4.8	159	170	7.03
黏土	4.9	161	171	6.51
粉土	40.4	350	377	7.70
黏土	5.3	167	177	5.74
粉质黏土	5.6	154	160	3.85
黏土	52.2	417	415	0.42
黏土	52.4	410	416	1.42
黏土	52.7	397	417	4.97
粉质黏土	57.2	392	431	9.98
粉质黏土	57.3	388	431	11.17
粉质黏土	57.8	403	432	7.31
黏土	66.1	441	454	2.85
黏土	66.2	433	454	4.81
黏土	66.8	426	455	6.89
粉质黏土	77.5	450	453	0.69
粉质黏土	77.8	446	453	1.59
粉质黏土	78	457	453	0.86
细砂	91.5	521	487	6.49
细砂	92.5	521	489	6.18
细砂	93.1	529	490	7.41

深度变化的三种回归关系式都能得到令人满意的效果。其中粉土、粉质黏土的多项式拟合效果最好,关系式分别为 $v_s = 110.273\ 31 + 8.814\ 42H - 0.054\ 78H^{2\cdot}$, $v_s = 111.925\ 26 + 8.898\ 31H - 0.058\ 01H^{2\cdot}$ 。粉砂、黏土、细砂剪切波速沿土层深

度变化采用幂函数拟合效果最好,关系式分别为 $v_s = 92.095\ 17H^{0.376\ 61}$ 、 $v_s = 94.676\ 26H^{0.373\ 8}$ 、 $v_s = 121.366\ 94H^{0.307\ 73}$ 。经实际钻孔测试数据检验,以上统计公式准确可靠,对常州市区缺少测试资料或者深度波速缺失时,可用文中得出公式对土层剪切波速进行推测,为今后常州市区的工程抗震工作提供可靠的剪切波速值。

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 曾勇.土层的性质与剪切波速的关系[J].西北地震学报,1986,8(3):71-78.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 何仲太,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):1671-1815.

[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):32-3.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 李平,薄景山,孙有为,等.西昌市场地剪切波速与土层深度经验关系[J].世界地震工程,2010,26(4):13-17.

[12] 张忠利,袁媛,罗云.北海市土层剪切波速与埋深的关系[J].华南地震,2015,35(3):40-45.

[13] 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.

[14] 刘艳春.山西大同市区剪切波速与土层岩性及深度关系的研究[J].山西地震,2011,2:39-41.

[15] 李帅.石河子北开发区土层剪切波速与土层深度经验关系[J].震灾防御技术,2014,9(3):468-478.

[16] 李帅,赵纯青,葛鸣.喀什场地土剪切波速与土层深度经验关系[J].地震工程学报,2013,35(3):702-708.

[17] 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,(3):81-88.

[18] 裴强,雷焕珍,刘红帅.渤海浅表土层剪切波速与埋深间的关联性[J].世界地震工程,2013,29(2):46-51.

[19] 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.