

柳州官塘片区红粘土剪切波速与埋深的相关性分析*

刘华贵¹, 蒋文字^{2,3}

(1. 广西工程防震研究院, 广西 南宁 530022; 2. 广西大学 土木建筑工程学院 广西 南宁 530004;
3. 广西财经学院, 广西 南宁 530003)

摘要: 根据广西柳州市官塘片区地震小区划45个钻孔的红粘土土层剪切波速实测数据, 对其剪切波速与埋深的相关性进行了研究, 结果表明: (1) 红粘土的剪切波速随埋深增加的变化规律符合幂函数规律, 经验公式为 $V_s = 200.4H^{0.143}$ ($R^2 = 0.756$); (2) 与其它地区粘性土的剪切波速分布规律相比, 官塘片区红粘土在埋深较浅时具有较高的剪切波速, 随埋深增加其剪切波速递增率减小; (3) 所建立的经验公式用于该地区实际工程预测红粘土的剪切波速效果好于《构筑物抗震设计规范》推荐的经验公式, 可供当地实际工程估算研究红粘土的剪切波速借鉴使用。

关键词: 柳州官塘; 红粘土; 剪切波速; 土层埋深

中图分类号: TV411

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)02-0280-05

0 引言

土体剪切波速是地震横波(剪切波)在土中的传播速度, 它是工程场地地震安全性评价和岩土工程勘察工作中一个重要的物理量。目前在岩土工程中对剪切波速的研究和应用有: (1) 划分建筑场地土类型和场地类别; (2) 确定地基岩土的动力学参数; (3) 估算地面常时微动的卓越周期; (4) 评价地基饱和砂土、粉土液化的可能性(岩土工程勘察规范, 2009; 建筑抗震设计规范, 2010)。剪切波速一般受土层的成因、类型、成分、结构、物理状态等因素影响, 对同一地区相同沉积环境的土层, 由于形成的地质背景和成因相同, 其剪切波速相差不大, 并具有一定的统计规律(薄景山, 1998)。国内许多学者对不同地区不同类型土的剪切波速与埋深关系进行了大量的研究, 得到了许多有意义的成果: 周锡元等(1991)对不同地区、不同土层的剪切波速特征进行了系统研究, 得到了黏土、砂土、砾石、卵石、碎石等岩土层的剪切波速变化范围, 以及北京、上海、天津等城市的剪切波速与埋深的变化规律;

刘红帅等(2010)依据我国地震安评工作中大量的钻孔实测剪切波速数据, 建立了碎石土、砂土、粉土和黏性土等常规土类剪切波速与埋深间的统计公式; 对于缺少当地土层剪切波速经验公式的情况, 《构筑物抗震设计规范》(GB50191—2012)根据岩土层的软硬状态和密实程度等性状特点, 结合土层埋深也给出了常见类型土的剪切波速估算经验公式。但现有的研究均尚未具体给出红粘土剪切波速的估算经验公式。

红粘土是我国南方热带与亚热带地区较为常见的一种高塑性粘土, 它主要是由白云岩、灰岩等碳酸盐系岩石风化残坡积, 并经过长期缓慢的红土化作用形成。红粘土具有特殊的工程力学性质, 主要表现出高含水量、大孔隙比、低密度等特点, 但同时又具有高强度、低压缩性等良好力学性质(谭罗荣, 孔令伟, 2006)。在红粘土特性研究方面, 以往研究多注重宏观地质(包括红粘土结构、成因)、物质组成、微观结构、结合水与土的胀缩性、强度特征、土质改良方法等, 而对红粘土的剪切波速特性研究较少(周训华, 廖义玲, 2004; 王英辉等, 2009; 吕海波等, 2012; 王焕新, 2012)。

* 收稿日期: 2014-01-12.

基金项目: 广西壮族自治区地震局科研合同制项目——广西典型红粘土土层剪切波速与埋深的关系研究(GXJ2012009)和广西地震科学基础研究项目——广西重点地区活动断层与中强地震构造探测研究(桂科攻12426001-4)联合资助。

针对目前国内对红粘土剪切波速特性研究中的不足和实际工程的需要,本文通过对柳州市柳东新区核心区域——官塘片区45个钻孔的红粘土土层剪切波速实测资料进行统计回归分析,得到了该地区红粘土剪切波速随埋深变化的统计经验公式,并应用于实际工程中。这些成果不仅对当地开展建设工程的场地地震安全性评价、岩土工程勘察等工作具有十分重要的参考价值,而且对积累红粘土的剪切波速经验也具有很重要的意义。

1 统计资料及红粘土的特性

柳州市官塘片区位于柳东新区的东北部,下伏基岩主要为石炭系(C)白云岩,除个别钻孔表面分布有0~1 m厚的耕土或填土层外,上覆土层主要为原地风化残积的红粘土。红粘土呈棕红色、黄色,湿,土质均匀、致密,局部含少量铁锰结核及风化角砾颗粒,以硬塑状为主,粘性强,切面光滑,干强度较高,无摇振反应,层厚3~19 m。

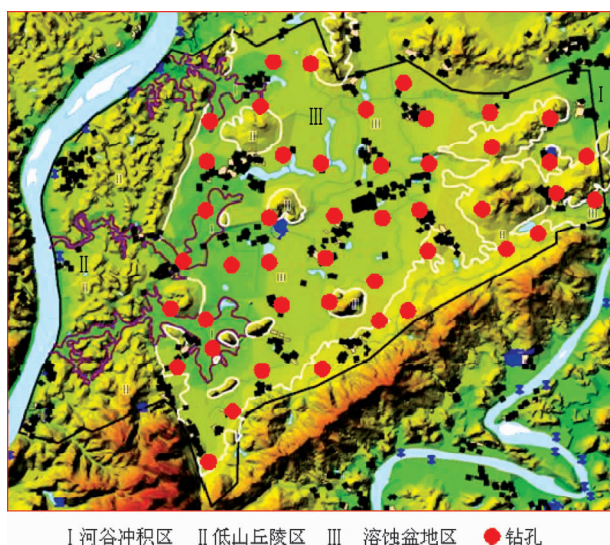


图1 红粘土剪切波速统计钻孔分布图

Fig. 1 The distribution map of statistical drill holes of shear wave velocity of red clay

本文的统计资料来源于广西柳州市官塘片区地震小区划的钻孔剪切波速资料^①。经过整理分析,本文共统计了其中的45个钻孔407个红粘土土层的剪切波速测试点结果,这45个钻孔较均匀地分布在官塘片区中部和东部的溶蚀盆地内(图

1),可以较好的揭示该片区的工程地质条件。

2 剪切波速测试方法

现场剪切波速测试采用的方法为单孔测试法(又称检层法),使用的测试仪器为中国科学院武汉岩土力学研究所生产的RSM-24FD型工程测试仪,测试示意图如图2所示。单孔测试法是在钻孔孔口附近(2~4 m)设置厚木板并上压重物作为激振板,通过人工敲击产生以剪切波能量为主的震源,同时将检波器放置在钻孔内不同深度并保证其紧贴孔壁,测出孔口激发震源所产生的剪切波传到孔内不同深度所需的时间,经计算得出剪切地震波在岩土层中的传播速度。由于红粘土土质均匀,厚度不大,本文中各剪切波速测试点的间隔均取1 m。

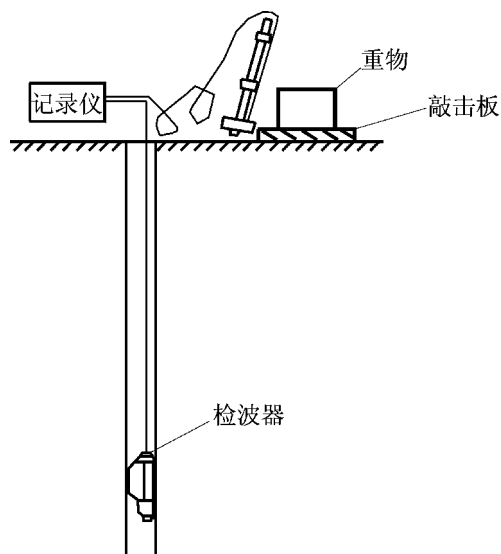


图2 单孔法波速测试示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shear wave velocity measurement by single-hole method

3 剪切波速随埋深的变化规律分析

目前国内统计分析岩土层剪切波速与埋深的变化规律采用的经验公式主要有线性函数、幂函数和多项式函数关系模型3种(高云峰,刘汉龙,

① 广西工程防震研究院. 2009. 柳州市柳东新区(阳和、官塘)地震小区划报告.

2003)。对于粘性土而言,《构筑物抗震设计规范》(GB50191—2012)和许多学者都推荐采用幂函数关系模型进行统计分析,并取得较好的拟合效果(张小平等,2012;高云峰,刘汉龙,2003;周杨锐,董明明,2012;邱志刚等,2011)。幂函数关系模型具体表示如下:

$$V_s = aH^b \quad (1)$$

式中: V_s 表示剪切波速, H 表示土层埋深, a 、 b 为待定系数。

根据上述统计分析方法,笔者将柳州官塘片区的45个钻孔的红粘土土层剪切波速测试结果绘制成散点图,通过添加趋势线拟合出其剪切波速与埋深间的幂函数回归曲线,并给出拟合参数和拟合优度 R^2 ,如图3所示。从图中可以看出,该片区红粘土的剪切波速值集中在200~300 m/s之间,随着土层埋深的增加,红粘土的剪切波速具有逐渐增大的趋势,两者间存在较明显的相关性;采用幂函数关系模型的拟合优度接近0.8,表明统计的结果具有较高的可信度。

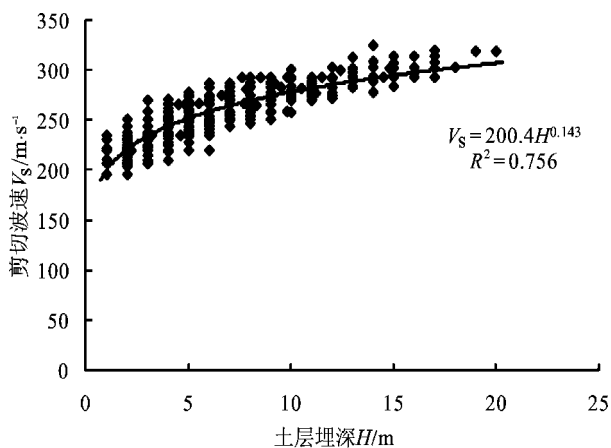


图3 红粘土剪切波速与埋深的关系曲线

Fig. 3 Relation curve between shear wave velocity and the depth of red clay

红粘土属于一种区域性的特殊粘性土,为了更好地了解柳州官塘片区红粘土剪切波速与埋深的关系特点,现将本文拟合的经验公式与集合肥、大连等多个地区总结的粘性土剪切波速与埋深的经验公式进行比较(表1、图4)。从表1中可以发现,不同地区的粘性土剪切波速与埋深的经验公式存在较大的差异,其中红粘土的拟合系数 a 值为最大,指数 b 值为最小。

表1 各地区粘性土剪切波速与埋深的经验公式

Tab. 1 Empirical formulas between shear wave velocity and depth of clays in different regions

粘性土简称	经验公式	来源/作者
柳州红粘土	$V_s = 200.4H^{0.143}$	本文
大连粘性土	$V_s = 88.43H^{0.350}$	张小平等(2012)
合肥膨胀土	$V_s = 120.1H^{0.340}$	高云峰, 刘汉龙(2003)
南海粘性土	$V_s = 97.774H^{0.3069}$	周杨锐, 董明明(2012)
黑龙江粘性土(硬塑)	$V_s = 82.96H^{0.410}$	邱志刚等(2011)

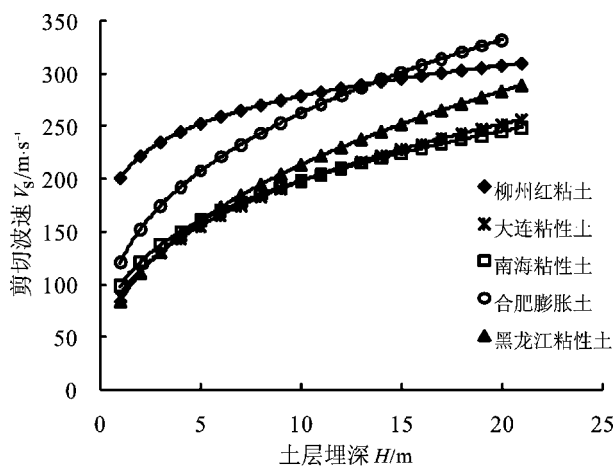


图4 各地区粘性土剪切波速随埋深变化的关系曲线

Fig. 4 Relation curves between shear wave velocity and the depth of clays in different regions

从各地区粘性土剪切波速随埋深变化的关系曲线图(图4)中可发现以下两大特点:(1)在同一埋深处,尤其是在土层埋深较浅时,柳州官塘片区红粘土的剪切波速明显高于其余大部分地区粘性土的剪切波速;(2)随着埋深的增加,柳州官塘片区红粘土的剪切波速递增率明显小于其余粘性土。国内外学者在对不同地区红粘土的物理力学性质研究中发现,红粘土虽具有高含水量、大孔隙比、低密度等不良特点,但同时又具有高强度、低压缩性等良好力学性质(谭罗荣,孔令伟,2006),柳州官塘片区红粘土的剪切波速随埋深变化的规律特点是否与其特殊的物理力学性质有关值得深入研究。

4 工程检验

为了验证本文成果的可靠性,选取柳州市官塘

片区某一工程场地钻孔的实测剪切波速数据，采用《构筑物抗震设计规范》（GB50191—2012）推荐的估算硬塑粘性土剪切波速的经验公式 $V_s = 130H^{0.300}$ 以及本文总结的经验公式进行了对比，并计算了相对误差，以此来验证本文所提出的剪切波速统计经验公式的预测精度，具体结果如表 2 所示。

表 2 规范推荐公式与本文经验公式预测剪切波速的对比分析

Tab. 2 Contrast analysis of the predict shear wave velocity between standard formula and recommended empirical formula in this paper

土层埋深 /m	土质类型	土的状态	实测波速 V_s /m · s ⁻¹	规范推荐公式		本文经验公式	
				计算值 V_s /m · s ⁻¹	相对误差/%	计算值 V_s /m · s ⁻¹	相对误差/%
1	耕植土	/	199	/	/	/	/
2	红粘土	硬塑	214	160	25. 2	221	3. 4
3	红粘土	硬塑	243	181	25. 6	234	3. 5
4	红粘土	硬塑	250	197	21. 2	244	2. 3
5	红粘土	硬塑	250	211	15. 7	252	0. 9
6	红粘土	硬塑	258	223	13. 7	259	0. 4
7	红粘土	硬塑	253	233	7. 9	265	4. 6
8	红粘土	硬塑	265	243	8. 5	270	1. 8
9	红粘土	硬塑	265	251	5. 2	274	3. 5
10	红粘土	硬塑	273	259	5. 0	279	2. 0
11	红粘土	硬塑	283	267	5. 7	282	0. 2
12	红粘土	硬塑	283	274	3. 2	286	1. 0
13	红粘土	硬塑	291	281	3. 6	289	0. 6
14	红粘土	硬塑	292	287	1. 7	292	0. 0
15	红粘土	硬塑	292	293	0. 3	295	1. 1
16	红粘土	硬塑	302	299	1. 1	298	1. 4

由表 2 可知：本文统计经验公式计算的剪切波速相对误差最大为 4.6%，最小为 0.0%，相对误差均小于 5%；而规范推荐的公式所预测的剪切波速，绝大部分层位的相对误差超过 5%，其中最大为 25.2%。同时还可以发现，规范所推荐的经验公式在预测埋深较浅的红粘土剪切波速时，效果相对较差。初步表明，本文所提出的统计经验公式在预测柳州市官塘片区红粘土剪切波速时效果较好，计算结果相对可靠，可应用于实际工程。而根据规范推荐的硬塑粘土经验公式，在预测红粘土的剪切波速效果欠佳。因此本文统计的经验公式对当地而言，可作为规范公式，是一个很好的补充。

5 结论

本文根据广西柳州市柳东新区官塘片区地震小区划的 45 个钻孔剪切波速实测数据，建立了该片区红粘土剪切波速与埋深的经验公式，与其它地区粘性土对比分析了红粘土剪切波速的分布特点，并通过实际工程场地实测结果将所建立的经

验公式与《构筑物抗震设计规范》（GB50191—2012）的经验公式进行了比较验证。研究结果表明：

（1）柳州官塘片区红粘土的剪切波速随埋深的变化规律符合幂函数规律，建立的经验公式为： $V_s = 200.4H^{0.143}$ （ $R^2 = 0.756$ ）。

（2）与国内其它地区的粘性土剪切波速分布规律相比，柳州官塘片区红粘土在埋深较浅时具有较高的剪切波速，其剪切波速随埋深增加递增率相对较小，具体原因有待进一步研究。

（3）本文建立的经验公式用于实际工程预测红粘土的剪切波速效果好于《构筑物抗震设计规范》（GB50191—2012）推荐的经验公式，可供该地区实际工程估算研究红粘土的剪切波速借鉴使用。

参考文献：

薄景山. 1998. 场地分类和设计反应谱调整方法研究[D]. 哈尔滨：中国地震局工程力学研究所。
高云峰, 刘汉龙. 2003. 合肥膨胀土剪切波速的特征分析[J]. 岩土工程学报, 25(3): 371 - 373.

- 刘红帅,郑桐,齐文浩,等. 2010. 常规土类剪切波速与埋深的关系分析[J]. 岩土工程学报, 32(7): 1142–1149.
- 吕海波,曾召田,尹国强,等. 2012. 广西红黏土矿物成分分析[J]. 工程地质学报, 20(5): 652–656.
- 邱志刚,薄景山,罗奇峰. 2011. 土壤剪切波速与埋深关系的统计分析[J]. 世界地震工程, 27(3): 81–88.
- 谭罗荣,孔令伟. 2006. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社.
- 王焕新. 2012. 广西红粘土填筑性能及土质学特征[D]. 南宁: 广西大学.
- 王英辉,聂庆科,张全秀,等. 2009. 广西靖西红粘土的变形和强度特性研[J]. 工程地质学报, 17(4): 550–556.
- 张小平,马顺,金源,等. 2012. 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, 28(4): 7–11.
- 周锡元,王广军,苏经宇主编. 1991. 场地·地基·设计地震[M]. 北京: 地震出版社.
- 周训华,廖义玲. 2004. 红粘土颗粒之间结构连结的胶体化学特征[J]. 贵州工业大学学报, 33(1): 26–29.
- 周杨锐,董明明. 2012. 海洋浅层土质剪切波速与深度的关系分析[J]. 海洋通报, 31(1): 63–66.
- GB50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB50021—2009, 岩土工程勘察规范[S].
- GB50191—2012, 构筑物抗震设计规范[S].

Correlative Analysis between Shear Wave Velocity and Depth of Red Clay in Liuzhou Guantang Region

LIU Hua-gui¹, JIANG Wen-yu^{2,3}

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

(2. College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

(3. Guangxi University of Finance and Economics, Nanning 530003, Guangxi, China)

Abstract

Aiming at the problems of studying the shear wave velocity characteristics of red clay and the need of construction projects, we carried out the research in the correlative between shear wave velocity and the depth of red clay based on the realistic shear wave velocity data of 45 drill holes which are located in Liuzhou Guantang region of Guangxi. The result shows that: (1) The change law between shear wave velocity and depth of red clay follows the power law relation, and the established empirical formula is $V_s = 200.4H^{0.143}$ ($R^2 = 0.756$). (2) Compared with the distribution law of shear wave velocity of clay soil in other area, the shear wave velocity of red clay is much higher when the depth is shallow, however the increase rate of it is smaller with the increasing of depth in Liuzhou Guantang region. (3) After comparing the relative deviation, the empirical formula established in this paper has a better forecasting effect than the empirical formula recommended by *Aseismic Design of Construction Works* on estimating the shear wave velocity of red clay, and it can be used for the reference in practical engineering of Liuzhou Guantang region.

Key words: Liuzhou Guantang region; red clay; shear wave velocity; depth of soils