

## 邯郸市场地土剪切波速与埋深相关性分析

王帮圆<sup>1</sup>,李世峰<sup>1,2</sup>,王帮团<sup>3</sup>,齐朝华<sup>1</sup>

(1.河北工程大学资源学院,河北邯郸056038;2.河北省资源勘测重点实验室,河北邯郸056038;3.昆明理工大学国土资源工程学院,云南昆明650093)

**摘要:**收集了邯郸市34个场地66个钻孔剪切波速资料,按土类别对所有剪切波速进行统计整理。采用线性 $V_s = a + bH$ 、多项式 $V_s = a + bH + cH^2$ 及幂函数 $V_s = aH^b$ 对各类土剪切波速随深度变化进行了回归分析,给出了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。经对比分析表明,邯郸市土层剪切波速与深度之间砂性土、粉土及粉质粘土宜采用多项式进行拟合;而粘土、卵石用幂函数拟合优于线性和多项式拟合。对邯郸市土工抗震工程中剪切波速的求取与应用具有重要的指导意义。

**关键词:**邯郸市;剪切波速;回归分析;拟合关系式

**中图分类号:** P315

**文献标识码:** A

### Correlation analysis between shear wave velocity and depth of soil in Handan city

WANG Bang-yuan<sup>1</sup>, LI Shi-feng<sup>1,2</sup>, WANG Bang-tuan<sup>3</sup>, QI Zhao-hua<sup>1</sup>

(1. College of Resource, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038;

2. Key laboratory of Resource Survey and Research of Hebei Province, Hebei Handan 056038;

3. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Yunnan Kunming 650093)

**Abstract:** The shear wave velocity dates of 66 boreholes in 34 sites have been collected in Handan city, and all the shear wave velocities have been statistical sorted. This article took advantage of linear  $V_s = a + bH$ , polynomial  $V_s = a + bH + cH^2$  and exponential function  $V_s = aH^b$  to regression analysis shear wave velocity along with the depth change. Then three types of relationships and the corresponding parameters of each kind of soil were obtained. By contrast, the result show that polynomial fitting method is better than both the linear fitting method and exponential fitting method between shear wave velocities and soil depths for sandy soil, silty soil and silty clay in Handan city; but exponential fitting method is better than the two other fitting method for clay and gravel. It has important directive significance to get and apply shear wave velocity in geotechnical earthquake engineering in Handan.

**Key words:** Handan city; shear wave velocity; regression analysis; fitting expression

剪切波速是指地震横波在岩土介质中的传播速度。与其它波相比剪切波速更能真实地反映土体的工程动力特性,是土工抗震中经常使用的一个重要物理量<sup>[1]</sup>;在场地岩土工程勘察中剪切波速也是划分场地土类型以及确定场地基岩面埋深的重要依据<sup>[2-3]</sup>;此外,剪切波速在求取地基土动力参数、地基加固检测、饱和砂土液化势判别等工程方面也有广泛应用<sup>[4-7]</sup>。本文以邯郸市场地剪切波速为研究对象,通过分析场地各类土剪切

波速随深度变化规律,对数据进行了统计回归分析,得出了剪切波速与深度的拟合关系式。该关系式可以为该地区岩性类似场地在缺乏实测剪切波速数据时提供参考。

### 1 研究区工程地质条件

#### 1.1 场地背景

邯郸市西依太行山东麓南段,东接华北平原。

地势自西向东呈阶梯状下降,中部以北东走向的邯郸大断裂划分成两类地质结构。东侧主要是冲洪积形成的平原区,地势较平坦。但滏阳河在长期的河流作用过程中,多次改道,河水泛滥频繁,使得本区的沉积物呈现交错分布;西则以洪积平原为主,该处位于邯郸大断裂之上盘,所受剥蚀作用明显,微地貌差异性变化较大,多见垅岗、冲沟分布,地势大平小不平<sup>[8]</sup>。

### 1.2 地层特征

波速测试深度范围内该区地层为第四系全新统和上更新统河流冲积相沉积物,土层结构较简单,包括粉质粘土、粘土、粉土、砂性土及卵石等地层。其中以粉质粘土为主,各个钻孔皆揭露该土层,该土层在全区范围内分布较稳定,呈灰褐色、褐黄色或棕黄色,其可塑性及力学性质在不同场地不同深度均有所差异;粘土及粉土层在本区大部分场地均有出露,一般分布在粉质粘土夹层中,不同场地厚度及岩性有一定变化;砂性土和卵石层是该区分布极不稳定的地层,厚度波动性大,其中砂性土在区内从1~48 m 都有出露,岩性主要为长石和石英,颗粒级配较好,卵石层主要分布在15~30 m 深度范围内,成分以石英砂岩及角砾岩为主,磨圆度分选性较好,充填物为中粗砂及少量粘性土。卵石分布如图1所示。

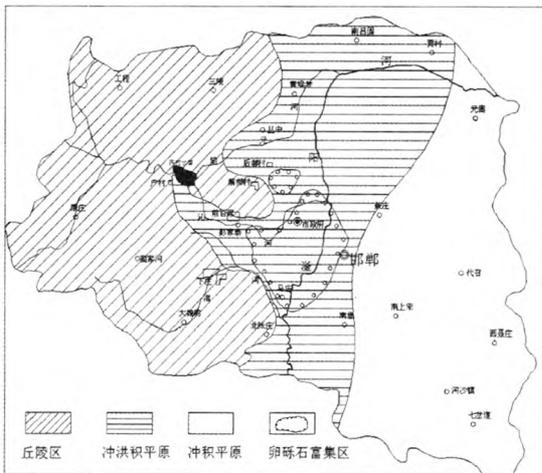


图1 卵石石分布平面图

Fig.1 Planar graph of the distribution of gravel deposit

### 2 剪切波速测试

土层剪切波速测定的方法有很多种<sup>[9]</sup>。但邯郸市剪切波速的测试大多采用了在城市地区应用最为广泛的单孔层检法。这种方法首先是利用

钻机一次性成孔并达到设计深度,然后沿孔不同标高逐点进行测试。其基本原理是在地面由人工激发震源,并由激发点的检波器和孔内波动信号接收点的检波器同时接收震源信号,即可找出两个拾振器接收到信号的到时差,再据震源与拾振器间的距离,便得出振动波在地层中传播的平均速度。单孔层检法剪切波速测试示意图如图2所示。

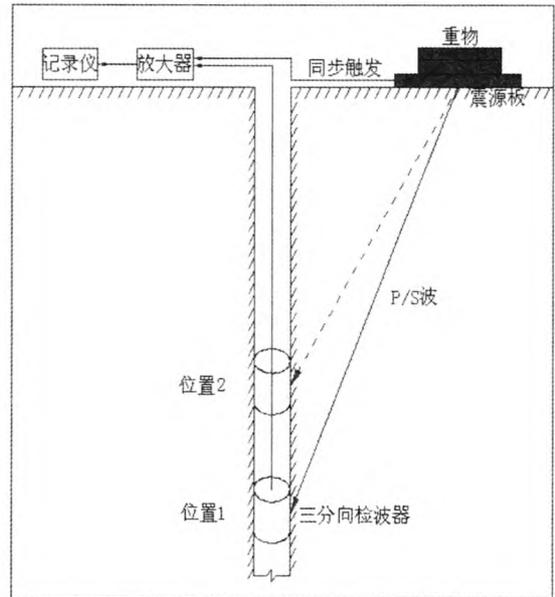


图2 单孔层检法剪切波速测试示意图

Fig.2 The schematic diagram of single-hole method of shear wave velocity measurement

### 3 各类土剪切波速的分布特性

本文通过对邯郸城区66个钻孔1000多组剪切波速资料进行统计分析,并考虑了土质类别对土层剪切波速与埋藏深度关系的影响。该地区主要土层有填土、粘性土、砂类土、卵石。由于表层填土厚度较薄,分布极不均匀,剪切波速测点较少,所以本次工作未涉及到填土层。各类土实测剪切波速统计如表1所示。

表1 不同土类的剪切波速值

Tab.1 Shear wave velocity values of different soil

土层类别	深度 /m	波速 / (m/s)	平均波速 / (m/s)	标准差 / (m/s)	变异系数
粉质粘土	1-70	100.5-615	319.7	115.8	0.36
粘土	4-66	124.5-653	402.6	121	0.30
粉土	2-54	98-499	234.2	94.1	0.40
砂类土	1-48	108.9-526.5	333	100.5	0.30
卵石	14-31	218.6-738.1	455.5	100.4	0.22

由表1可以看出,粉质粘土在探测深度1~70 m 范围内均有分布,是该地区分布最为广泛的地层,而卵石层深度分布范围最小,主要在14~31 m

之间,粉土和砂类土分布深度相差不大,粘土层埋藏深度为4~66 m。研究区各类土剪切波速主要分布在100~740 m/s范围内,其中,粉质粘土和砂类土剪切波速平均值较接近,而粉土平均剪切波速最低,卵石剪切波速值最高。

整体上看,邯郸城区各类土的剪切波速都是随深度增加而增大的;同类土分布深度范围较大时剪切波速的波动性也较大,且深度越大波速值越离散;硬度大的土层剪切波速值也较高,如卵石的剪切波速可达738 m/s左右。

#### 4 剪切波速的统计分析

有关剪切波速随土层埋藏深度关系的研究表

明,多数情况下它们之间并非是简单的线性关系<sup>[10-12]</sup>。统计分析时,本文按不同土类分别绘制剪切波速与深度变化离散点分布图,根据离散点的分布趋势,对各类土均按三种模型进行回归分析,并拟合出相应的回归曲线。

模型①:  $V_s = a + bH$ ;

模型②:  $V_s = a + bH + cH^2$ ;

模型③:  $V_s = aH^b$ 。

式中  $V_s$  - 土层剪切波速(m/s);  $H$  - 土层埋深(m);  $a$ 、 $b$ 、 $c$  - 系数。

各类土剪切波速与深度拟合关系曲线图如下:

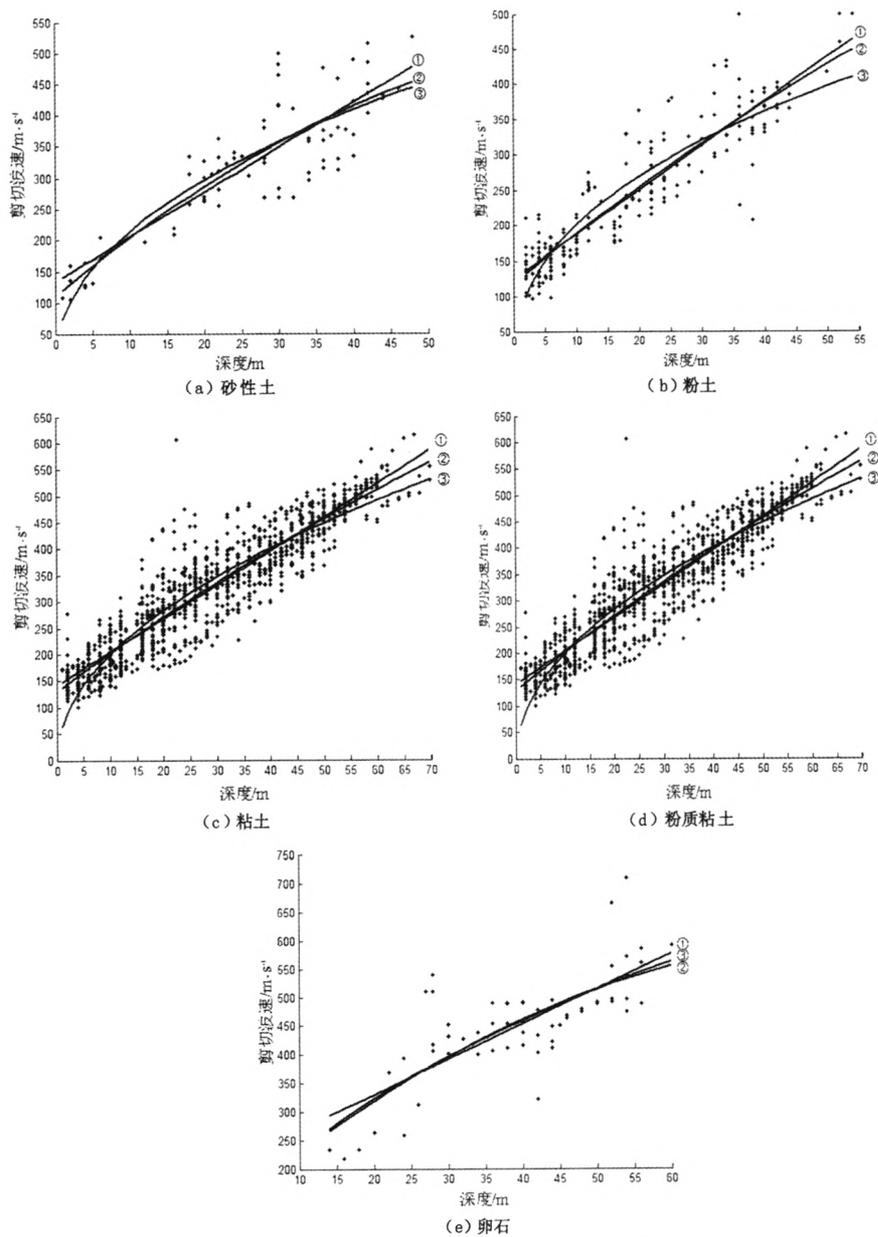


图3 各类土剪切波速与深度拟合关系曲线图

Fig. 3 Regression curve between shear wave velocity and depth of each kind of soil

表2 各类土回归关系式统计表  
Tab.2 Statistics of the regression relationship for each kind of soil

土层类别	$V_s = a + bH$			$V_s = a + bH + cH^2$				$V_s = aH^b$		
	a	b	R2	a	b	c	R2	a	b	R2
砂性土	134.1	7.155	0.738 2	111.2	9.896	-0.057 83	0.746 6	74.25	0.462 4	0.741 2
粉土	124.7	6.282	0.829 9	119.5	7.100	-0.018 46	0.831 0	75.83	0.423 2	0.806 6
粘土	181.7	5.838	0.718 0	141.6	8.720	-0.039 64	0.724 7	70.94	0.487 0	0.725 3
粉质粘土	140.9	6.374	0.846 4	129.9	7.400	-0.017 28	0.848 1	63.49	0.500 0	0.830 5
卵石	206.6	6.177	0.567 4	127.9	10.750	-0.060 30	0.575 4	70.35	0.508 4	0.581 4

据以上回归曲线可得出相应的拟合关系式,并计算了拟合优度 R2(见表2)。R2 用来检验与其对应的关系式对数据的拟合程度,拟合优度取值范围在 0~1。其值越接近 1 说明拟合效果越好,由此度量所得关系式的总体拟合效果。

由表可以看出:粘土、卵石地层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;砂性土、粉土和粉质粘土剪切波速随土层深度变化按多项式拟合较线性和幂函数拟合效果要好;粉土、粉质粘土剪切波速与土层埋深关系线性拟合优于幂函数拟合,而砂性土采用幂函数拟合则优于线性拟合;卵石地层剪切波速与深度关系采用三种模型回归效果都不尽人意,所以其剪切波速宜进行现场测试。

### 5 结语

- 1) 各类土剪切波速与土体深度都具有显著的相关性。
- 2) 随土体深度增加剪切波速的离散性有加大趋势。
- 3) 除卵石外,其它各类土剪切波速随土体深度变化的三种回归关系式都能得到令人满意的效果。
- 4) 粘土的幂函数拟合关系式及砂性土、粉土和粉质粘土的多项式拟合关系式最具代表性,对本地区该类土剪切波速的求取和分析应用具有较高的参考价值。

### 参考文献:

[1] 汪闻韶. 土工地震减灾工程中的一个重要参量 - 剪切

波速[J]. 水力学报, 1994, (3): 80 - 83.  
 [2] GB50021 - 2001, 岩土工程勘察规范[S].  
 [3] GB50011 - 2010, 建筑抗震设计规范[S].  
 [4] 金喆, 李世龙, 张大龙, 等. 西昌市海河沿岸场地震动分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2013, 30(1): 37 - 40.  
 [5] 王劲草, 阳金, 党钾涛, 等. 低阶烟煤热解半焦制浆黏度模型的建立[J]. 黑龙江科技学院学报, 2013, 23(2): 45 - 48.  
 [6] 张聪, 朱炎铭, 王猛. 梁宝寺井田瓦斯涌出规律及其预测[J]. 黑龙江科技学院学报, 2007, 17(6): 87 - 90.  
 [7] 汪闻韶. 剪切波速在评估地基饱和砂层地震液化可能性中的应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 655 - 658.  
 [8] 闫纯有. 邯郸地区地貌与构造[J]. 河北建筑科技学院学报, 2000, 17(4): 63 - 65.  
 [9] 徐超, 高彦斌, 石振明, 等. 岩土工程原位测试[M]. 上海: 同济大学出版社, 2005.  
 [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, 27(3): 81 - 88.  
 [11] 程祖峰, 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.  
 [12] 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, (2): 32 - 37.

(责任编辑 马立)