

柴荣建. 土层剪切波原位测试的误差分析及减小方法[J]. 华南地震, 2018, 38(S1): 119–122. [CHAI Rongjian. Error Analysis and Reduction Measure of In-site Measurement of the SWave in Soil Layer[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(S1): 119–122]

## 土层剪切波原位测试的误差分析及减小方法

柴荣建

(广东地震局, 广州 510070)

**摘要:** 弹性波在土层中的传播速度是反映土的动力特性的一项重要参数, 根据波速测试的实测地层波速, 场地土层剪切波速度不仅能为提供场地土的动力参数, 成为地震反应分析的重要基本参数, 同时也是场地分类法中划分场地类别的重要依据。本文根据误差分析理论, 分析土层剪切波测试的误差来源及影响程度, 通过作者十余年从事大量工程的波速测试工作工作经验, 提出减小误差的具体方法。

**关键词:** 工程地震; 地层; 剪切波; 压缩波; 波速

**中图分类号:** P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)S1-0119-04

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2018.S1.020

## Error Analysis and Reduction Measure of In-site Measurement of the SWave in Soil Layer

CHAI Rongjian

(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** The propagation velocity of elastic waves in soil layer is an important parameter reflecting the dynamic properties of soil. According to the wave velocity tests of actual shearing wave velocity, S-wave velocity of soil layer in engineering project sites can not only provide dynamic parameters of soil layer, but also become an important basic of dividing sites into categories in site classification methods. On the Basis of the error analysis theory, this paper analyses the sources and affecting degree of errors of in-site measurement of the S wave in soil layer. Based on more than ten years' substantial engineering experience of the wave velocity tests, the author puts forward specific methods to decrease the errors.

**Keywords:** Error; Engineering seismology; Soil layer; S-wave; P-wave; Wave velocity

收稿日期: 2018-10-28

作者简介: 柴荣建(1981-), 男, 工程师, 主要从事地震工程研究。

E-mail: 382960047@qq.com.

## 0 引言

波速测试技术是地震勘探方法之一,也是地球物理勘探技术的一个重要分支,是地震安全性评价的基础数据。目前已广泛应用于工业与民用建筑、铁路工程、水利水电工程、石油工程、冶金工程等众多岩土工程地质勘察领域,取得了良好的应用效果。

一般来说,波速测试可原位测定压缩波(P波)、剪切波(S波)等在岩(土)体中的传播速度,从而避免了室内测试所带来的误差,它能有效地解决许多地质问题,诸如确定场地土类型、建筑场地类别;提供断层破碎带、地层厚度、固结特性和软硬程度、评价岩(土)体质量等;并可计算工程动力学参数,如动剪切模量、动弹性模量等<sup>[1-2]</sup>。

波速测试作为浅层地球物理勘探方法(或原位测试技术),具有简便、快速、经济、准确、分辨率高、应用范围广等优点,受到工程技术人员的青睐和使用。但是,在波速测试的实际工作当中,不同的技术人员、不同的钻探队伍、不同的工作环境,得出的地层波速值往往差别很大,其原因很多,但误差不外乎本文提出的几个方面。

## 1 剪切波测试方法

当地面震源激发振动讯号时(振动讯号产生的时间被记录),仪器波便从震源发出穿过地层介质,到达井下三分量探头,探头中的检波器,经过机电转换把地震的振动信号转换成电信号,通过电缆传送到波速测试仪,由测试仪器记录并显示地震波形。

本文就单孔波速测试进行分析。为取得土层沿深度各测点的剪切波速数据,采用速度检层法对本场地的工程地震钻孔进行测试,沿孔深每一土层界面设一个测试点,厚度大于2 m的土层,一般每隔2 m左右设一个测试点。用速度检层法测得的剪切波速是钻孔内相邻二测点中间土层的平均剪切波速。首先从电脑测震仪记录到的波形确定剪切波的初至时刻,再根据震源的起始时刻和波的初至时刻确定波的走时,然后由钻孔中的测点深度与震源到孔的距离确定波的行程,将波的行程除以走时就可以确定剪切波的传播速度。

图1是剪切波速计算示意图。 $h_1, h_2 \dots, h_i$ 分别为钻孔内各测点间的厚度; $s$ 为震源到钻孔的距离; $L_1, L_2 \dots, L_i$ 是各测点到震源的距离; $\alpha_1, \alpha_2,$

$\dots, \alpha_i$ 是剪切波入射到孔壁的夹角。设 $t_1, t_2 \dots, t_i$ 分别为剪切波由震源到各个测点的走时,则剪切波在各层的速度 $v_1, v_2 \dots, v_i$ 分别为:

$$v_1 = \frac{h_1}{t_1 \cos \alpha_1} \quad (1)$$

$$v_2 = \frac{h_2}{t_2 \cos \alpha_2 - t_1 \cos \alpha_1} \quad (2)$$

$$v_3 = \frac{h_3}{t_3 \cos \alpha_3 - t_2 \cos \alpha_2} \quad (3)$$

$$v_i = \frac{h_i}{t_i \cos \alpha_i - t_{i-1} \cos \alpha_{i-1}} \quad (4)$$

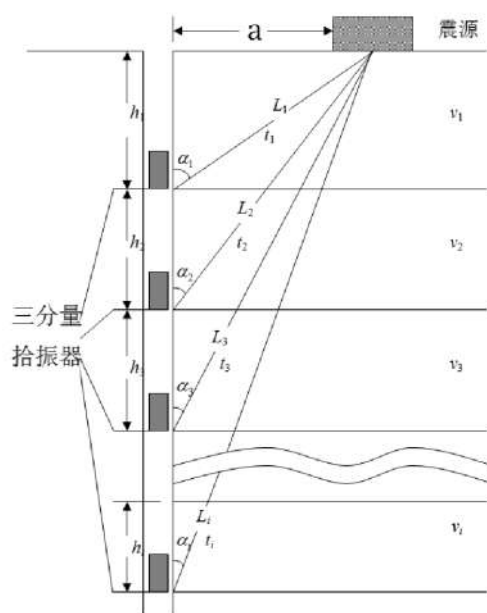


图1 剪切波速计算示意图

Fig1 Calculation sketch map of the P-wave

## 2 波速的误差来源及误差传递分析

一般说来,在任意深度 $h$ 的位置,公式(1)可以变换为:

$$v = \frac{h}{t \cos \alpha} = \frac{\sqrt{h^2 + a^2}}{t} \quad (5)$$

其中  $\cos \alpha = \frac{h}{\sqrt{h^2 + a^2}}$

由此可见,在工作中我们需测量的物理量有3个,深度 $h$ 、孔口至激震源距离 $a$ 和S波到时 $t$ ,它们在测量的时候都有一定的各自误差。包含有随机误差(random error)、系统误差(systematic error)和过失误差(mistake)。随机误差系不可预知的规律变化着的误差,绝对误差时正时负,时大时小,产生的原因为偶然因素,通过多次测量,

平均或期望值,从而减小误差。系统误差系在一定试验条件下,由某个或某些因素按照某一确定的规律起作用而形成的误差,产生的原因多方面,大小及其符号在同一试验中是恒定的,无法减小更无法消除,如受到仪器采样间隔影响等对到时 $t$ 产生的误差。过失误差(mistake),实验人员粗心大意造成,可以完全避免,本文不予考虑。

一般函数,由 $n$ 个自变量组成

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (6)$$

如果变量 $x_i$ 各自误差为 $\delta x_i$ ,根据直接测量值的误差来计算间接测量值的误差,对(6)式进行变分得到<sup>[3-5]</sup>:

$$\delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \delta x_n \quad (7)$$

对于(5)式则有:

$$\delta v = -\frac{\sqrt{h^2 + a^2}}{t^2} \delta t + \frac{h}{t\sqrt{h^2 + a^2}} \delta h + \frac{a}{t\sqrt{h^2 + a^2}} \delta a \quad (8)$$

$$\delta v = \frac{1}{t} \left[ -\frac{\sqrt{h^2 + a^2}}{t} \delta t + \frac{h}{\sqrt{h^2 + a^2}} \delta h + \frac{a}{\sqrt{h^2 + a^2}} \delta a \right] \quad (9)$$

根据(1)式则有

$$\delta v = \frac{1}{t} \left[ -v \delta t + \frac{h}{\sqrt{h^2 + a^2}} \delta h + \frac{a}{\sqrt{h^2 + a^2}} \delta a \right] \quad (10)$$

现在根据上述公式进行误差分析。假定深度 $h=10$  m, 孔口至激震源距离 $a=2$  m, 测得到 $t=35$  ms。根据(5)式, 则波速 $v=291.37$  m/s。若此时深度误差 $\delta h=0.1$  m=10 cm, 其它量准确,  $\delta a=0$ ,  $\delta t=0$ 代入(8)式,  $\delta v=2.80$  m/s, 相对误差 $|\delta v|/v=1.0\%$ 。若孔口至激震源距离误差 $\delta a=0.1$  m=10 cm, 其它量准确,  $\delta h=0$ ,  $\delta t=0$ 代入(8)式,  $\delta v=0.56$  m/s, 相对误差 $|\delta v|/v=0.2\%$ 。若此时到时误差 $\delta t=1$  ms, 其它量准确,  $\delta a=0$ ,  $\delta h=0$ , 则 $\delta v=-8.324$  m/s, 相对误差 $|\delta v|/v=2.86\%$ 。

可见深度 $h$ 和孔口至激震源距离 $a$ 的误差对波速引起误差的较小, 而到时 $t$ 误差对波速影响较大<sup>[6]</sup>。而且, 深度 $h$ 和孔口至激震源距离 $a$ 对波速引起误差一般是随机误差, 尤其是孔口至激震源距离 $a$ 误差通过多次认真测量而减小。但到时误差对波速影响较大, 而且一般是既有随机误差又有系统误差, 难以克服, 故到时 $t$ 测量和数据读取特别重要, 到时误差 $\delta t$ 的系统误差是有仪器系统的采样间隔造成的, 如果采样间隔 $\Delta t=1$  ms, 则波速 $v$ 固有误差 $8.314$  m/s。另外, 产生时误差 $\delta t$ 的

另一个更大因素是剪切波震相的识别正确与否, 导致其 $\delta t$ 达到如 $3\sim 5$  ms, 甚至更多,  $|\delta v|$ 达几十 m/s, 相对误差 $|\delta v|/v$ , 几十%。下面专门分析。

同时由(10)可见, 靠近地面几个测点由于, 到时 $t$ 较小, 则误差 $\delta v$ 较大; 反之, 随着测点深度的增加, 到时 $t$ 越来越大, 则误差 $\delta v$ 越来越小。

### 3 剪切波震相识别

我们知道, 现场采集的波形一般由三部分组成: 第一部分是从零时开始至直达波能量的到达, 其信号除受外部干扰出现毛刺外, 基本上是一条接近于直线的平稳段; 第二部分从波的第一个初至起到第二个初至止, 此段属于P波(压缩波、纵波)段, 振幅小, 频率高; 第三部分是以S波(剪切波、横波)为主的部分, 振幅大, 频率低(如图2)。

(1) P波传播速度较S波速度快, P波为初至动。

(2) 震源板两端分别作水平激发时, S波相位反向, 而P波相位不变。

(3) 检波器下孔一定深度后, P波波幅变小, 频率变高, 而S波幅度相对较大, 率相对较低。

(4) 最小测试深度应大于震源板至孔口之间的距离, 以避免浅部高速地层界面可能造成的折射波影响。

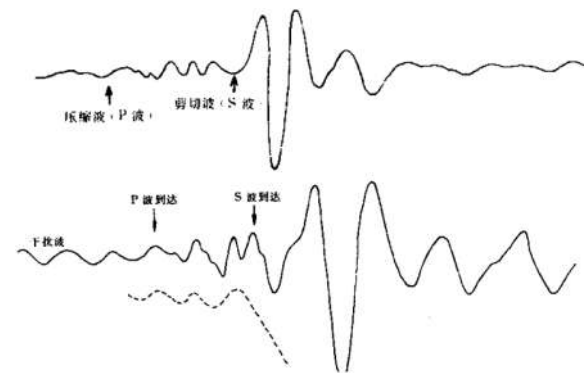


图2 剪切波震相识别

Fig.2 Phase identification of the S wave

室内判读主要是精确地判读出第一个S波到达的时间。对不同方向激振所记录下来的波形, 根据正反向激发S波极性相反的特点<sup>[7]</sup>, 确定S波的初至, 并以触发信号的起点为零时刻, 取第一个剪切波到达的时刻。如图3中的 $t_s$ 所示。

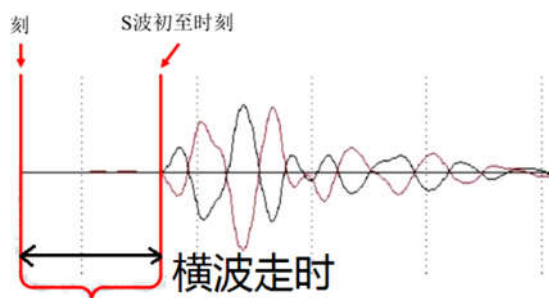


图3 横波走时的计算

Fig.3 Travel time calculation of the S-wave

随着测试深度的增加,有效信号的频率会有所降低,对数据的准确读取有一定的影响(可选在有效波起跳点或第一波峰处)。随着测试深度的增大,S波信号能量逐渐减小。为提高有效信号的幅度,单纯增加激发能量也会增大噪声的干扰。在选择适当激发能量的同时,采用多次叠加的方法不仅能提高有效信号能量,还可压制噪声。测试的时候应该认真、仔细,多次正反方向锤击激振器<sup>[8-9]</sup>。

## 4 结语

波速误差由深度  $h$ 、孔口至激震源距离  $a$  和到时  $t$  误差引起。其中探头深度  $h$  和孔口至激震源距离  $a$  对波速引起误差的较小,而到时  $t$  误差对波速影响较大。前二者是随机误差,可以通过多次认真测量而减小。时误差  $\delta t$  对波速影响较大,而且一般是既有随机误差又有系统误差,难以克服,到时误差  $\delta t$  的系统误差是有仪器系统的采样间隔造成的,产生时误差  $\delta t$  的另一个更大因素是剪切波震相的识别,需要特别注意。正确识别 S 波震相,对于到时  $t$  的数据准确与否至关重要,因为剪切波速的误差更多来源于此。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011-2010:建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50021-2001:岩土工程勘察规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [3] 王锺琦. 地震区工程选址手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [4] 林在贯. 岩土工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [5] 常士骝. 工程地质手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [6] 刘康和,童广才. 场地原位试验的工程应用[J]. 国外地质勘探技术,1996,18(6):7-11.
- [7] 高朝军,张志鹏,侯赛因,等. 基于远震 P 波接收函数计算巴里坤台站下方的地壳厚度和泊松比[J]. 华南地震,2016,36(1):1-6.
- [8] 丁伯阳. 土层波速于地表脉动 [M]. 兰州:兰州大学出版社,1996.
- [9] 吴华平,郭良田. 活动断层探测中断层气真、假异常判别方法[J]. 华南地震,2016,36(2):50-55.