

耕作土壤应力波波速的测定及其在土壤高速切削中的应用

毛罕平 桑正中

(江苏工学院)

提 要 本文研究了用间距为 l_2 两点瑞利波脉冲响应的互相关或互谱相位求耕作土层应力波速度的方法。用此法测定了几种土壤的应力波速,所测结果在土壤高速切削机理研究中得到应用。

关键词 耕作土壤 应力波 高速切削

1 前 言

农村建筑工程和农业工程在施工作业之前,往往需要知道施工现场土体的硬度和表土层的结构状况,以便合理选择施工机具和地基处理。测出土壤的应力波速度就能求得土壤的硬度、应变模量和表土的层理。

在土壤耕作中,一般都认为当工作部件的作业速度增加时阻力增加,然而有迹象表明:^[1]当切削速度达到塑性波传播速度时,切削阻力有可能下降。因此要研究切削速度接近或达到塑性波传播速度的高速切削的机理、高速切削的土壤应力—应变关系,应该了解土壤的应力波传播速度。

总之农业作业土壤的应力波测定与研究在今后将会引起农业工程领域的注意。在土动力学和建筑工程中所采用的跨孔法、下孔法和折射波法等测定土波速的方法^[2,3]所测定的深度较耕作土层要深得多。对于耕作土层的应力波速测定是不合适的。作者从土表瑞利波的传播性质着手,研究耕作土壤的应力波速度。并对高速切削试验中得到的结果用应力波传播作出解释。

2 弹性波在土层中传播性质

在弹性半空间有三种主要的波:P波(压缩波)、S波(剪切波)和R波(瑞利波)。瑞利波的运动局限于半空间的表面区域中,其速度与剪切波速度之间的关系见表1^[3]。

表1 瑞利波与剪切波速度之间的关系

Tab1. The relation between R propagation velocity and S propagation velocity

μ	0.25	0.29	0.33	0.4	0.5
V_R/V_S	0.919	0.926	0.933	0.943	0.955

收稿日期:1991-4-29

* 本文是高等学校博士学科点专项科研基金资助课题的部分内容

$$V_R/V_S = C_\mu \tag{1}$$

表中的 V_R ——瑞利波波速； V_S ——剪切波速度； μ ——泊桑比。

对于一确定土壤 C_μ 与泊桑比的相关常数见表 1。

如果一个点源作用于弹性半空间表面，扰动以对称的环形波的形式向外扩展。在输入为脉冲载荷时，土体表面的垂直响应将发展成图 1 所示的特征波，P 波最快，所以 P 波到达后，

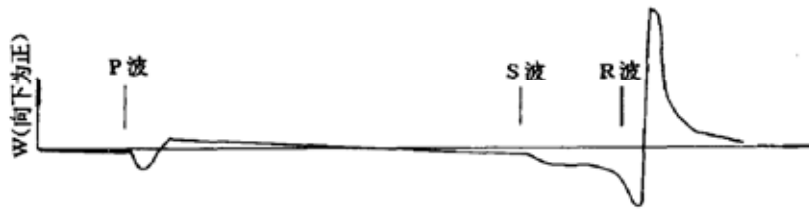


图 1 脉冲载荷作用下土表质点的垂直运动

Fig. 1 Vertical movement of soil surface particle under impulse force

经过一段相对平静的时期后，S 波到达，跟着 R 波到达，R 波的垂直位移最大，P 波和 S 波的位移与之比较几乎可以忽略，而且随着与振源距离的增大，各波到达的时间间隔增大，而振幅变小，P 波和 S 波振幅的减小与 $1/r^2$ 成比例，瑞利波振幅减小则与 $1/\sqrt{r}$ 成比例，P 波和 S 波的振幅衰减比 R 波更

快，因此 R 波是沿弹性半空间表面最重要的扰动，并可能是远离振源处唯一可辨别清楚的波。

这样当土表受垂直脉冲载荷作用时，只要把传感器放在离源足够远处(前提是保证有一定的信号输出)则检测到的基本上是瑞利波的信号。

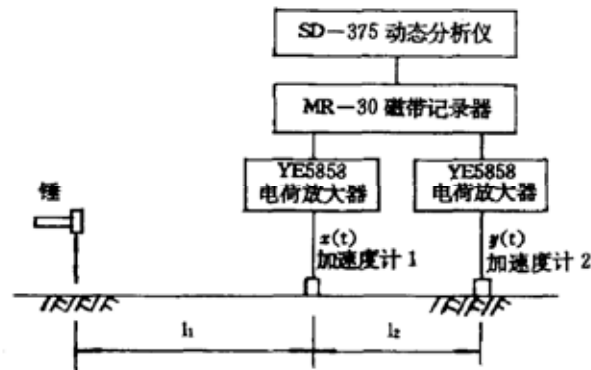


图 2 测试系统示意图

Fig. 2 Schematic of testing system

3 试验技术

如图 2 所示，利用锤击在土表作用一垂直脉冲载荷，在离锤击足够远 l_1 和 l_1+l_2 处放置二个加速度计，距离 l_1 是保证二个加速度计测得的应基本上是 R 波；距离 l_2 是保证二个信号 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 之间有一定的

分辨率。将记录的二个信号 $X(t), Y(t)$ 经互相关和互谱处理是可以求得 R 波的速度。

对于平稳的随机过程,两个不同的随机信号 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 之间的互相关函数 Φ_{XY} 。

$$\Phi_{XY}(\tau) = \sigma_X \cdot \sigma_Y \rho_{XY}(\tau) + m_X m_Y$$

式中 σ_X, σ_Y ——分别为随机信号 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 的方差;

m_X, m_Y ——分别为随机信号 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 的均值;

$\rho_{XY}(\tau)$ ——互相关系数,极限值为 ± 1 。

对于完全同相或完全反相的互相关必须是 $\pm \sigma_X \sigma_Y + m_X m_Y$ 。互相关越大,说明二个信号之间的相关性越好,因此互相关函数正的最大值偏离 O 点位置的时间坐标移动值,就是信号 $X(t)$ 通过距离 l_2 所需的时间 τ 。则 R 波的速度为

$$V_R = \tau / l_2 \quad (2)$$

结合式(1)(2)

$$V_S = \tau / C_v l_2 \quad (3)$$

$X(t), Y(t)$ 两信号的互谱密度 S_{XY} 是 Φ_{XY} 的傅里叶变换

$$S_{XY}(W) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{XY}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

$S_{XY}(W)$ 是复数,它的相位差表示 R 波在通过距离 l_2 时,信号 $Y(t)$ 比 $X(t)$ 时间滞后所产生的相位差。由互谱的相频特性中,对应某一频率 f_i ,就可得出一相位差 θ_i 。信号的相位转过 360° 即为一周期 T ,而频率 $f_i = 1/T_i$,所以 R 波通过 l_2 所需的时间 t 为

$$t = T_i \frac{\theta_i}{360} = \frac{\theta_i}{360 f_i}$$

在相频特性中取 n 个相位差来计算所需的平均时间的话,则又可写成

$$t = \sum_{i=1}^n \theta_i / 360 \sum_{i=1}^n f_i$$

因此

$$V_R = \frac{l_2}{t} = 360 l_2 \sum_{i=1}^n f_i / \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (4)$$

结合(4)、(1)式

$$V_S = 360 l_2 \sum_{i=1}^n f_i / C_v \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (5)$$

在相频特性曲线中选点的原则有两点:

1) 所选频段的凝聚函数应大于某一限值。凝聚函数是为了反映信号 $X(t)$ 在信号 $Y(t)$ 总量中所占的比重以及检查系统有否噪声干扰和非线性的程度,定义为

$$r_{xy}^2(W) = \frac{|S_{xy}^2(W)|}{S_x(W)S_y(W)}$$

式中 $S_x(W), S_y(W)$ 分别为信号 $X(t), Y(t)$ 的自谱。当 $r_{xy}^2(W)=1$ 时, 说明 $Y(t)$ 完全来自 $X(t)$, 计算得出的互谱是完全可信的, 当噪音、非线性增大及有其他输入干扰时, 凝聚函数变小, 因此希望 $r_{xy}^2(W)$ 接近于 1, 在工程应用时, 一般要求 $r_{xy}^2(W) > 0.85$ 。

2) 所选频段应尽量取高频部分。因为测量的是耕作层波速, 波长较短, 所以应以较高频为主。

4 实验结果

试验系统如图 2 所示, 试验前根据土壤的状态确定 l_1 和 l_2 值, 根据作者多次实验的结果表明, 测量耕作土壤波速时, 由于表土的波长较短, l_1 取值在 1~4.5m 范围内为宜, l_2 值应大于 0.5m, 以保证足够分辨率, 试验时用锤垂直敲击地面, 要求激励的信号为尖脉冲信号, 由磁带机记录, 反复敲击 10 次以上, 以便在处理时剔去较差的信号, 并能多次平均, 以消除噪音和误差影响。记录的信号在频谱分析仪上处理其互相关或互谱密度, 图 3 为典型的处理结果。表 2 为计算结果归总, 其中“按互相关计算波速”一栏是表示对二传感器信号求互相关, 并根据式(3)计算波速, “按互谱计算波速”一栏是表示对两信号求互谱, 根据互谱相频特性用式(5)计算波速, 两者的计算结果基本接近。因此可以用互相关或互谱相频特性计算耕作层的波速。

应该指出的是用互谱求波速, 它反映出了从低频到高频比较完全的范围, 也即从表土到较深土的波速。

表 2 各类耕作土壤应力波速

Tab. 2 The propagation velocity of elastic stresses in the various soil (波速单位: $m \cdot s^{-1}$)

土壤类型	室内土槽底土	高速切削试验土条	室外土槽土	蔬菜田砂壤土	绿肥田粘土	
密度 ($t \cdot m^{-3}$)	1.566	1.480	1.574	1.490	1.490	
按互相关计算波速 V_s	115.76	68.01	97.85	50.04	70.21	
由互谱主峰计算波速 V_s	106.61	49.66	92.36	47.51	71.40	
V_{smax}	109.13	60.90	108.56	63.88	69.21	
由互谱计算波速 V_s	V_{smin}	101.86	58.96	85.87	46.43	66.21
V_{smean}	106.02	59.90	95.96	54.62	67.21	

5 塑性波波速

塑性波波速 V_p

$$V_p = \sqrt{\frac{d\sigma/de}{\rho}}$$

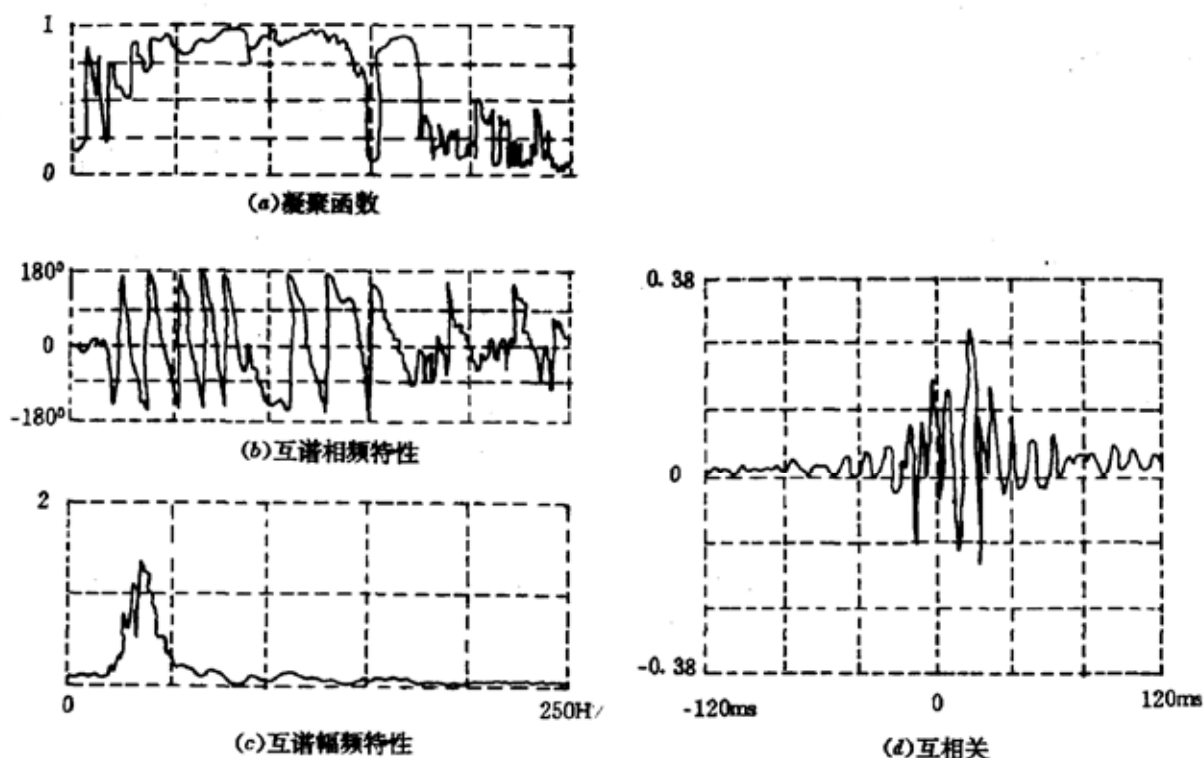


图3 典型工况的凝聚函数、互谱和互相关

Fig. 3 The coherence function, cross-spectral function and cross-correlation function of typical condition

其中 $d\sigma/de$ 是土壤塑性部的切线模量(斜率),它是应变的函数。 $d\sigma/de$ 随着应变增大而减小。作为近似处理,取切线模量为常数 E_p ,这时塑性波传播速度为恒值

$$V_p = (E_p/\rho)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

通常 $E_p <$ 弹性模量 E_e ,对于土壤 $E_p/E_e = 0.05 \sim 0.1$ ^[4]弹性波波速 V_e

$$V_e = (E_e/\rho)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

(7)式除以(6)式可得

$$V_p = \sqrt{\frac{E_p}{E_e}} V_e = (0.224 \sim 0.316) V_e$$

由表2得高速切削试验土条的剪切弹性波速为59.9 m/s。因此由(7)式可得剪切塑性波波速为13.42~18.93 m/s,大田的弹性波速为54.62~67.21 m/s。塑性波波速为12.23~21.24 m/s。

6 在土壤高速切削机理研究中的应用

6.1 实验方法

试验重点是研究土壤不同切削速度时的变形和切削功耗。切削刀具采用正切单刃直刀片,试验时对土壤含水率、密度、切削深度和宽度等参数加以控制以避免这些因素的相互影

响。在试验土条一侧预先划好网格,用高速摄影拍摄网格的变形,同时记录切削功率。

6.2 结果分析

试验结果如图4所示,土壤在切削过程中,随着切削速度增加,网格单元的剪应变减小,刀尖前方的变形面积也是减小,这一现象同塑性应力波的传播联系起来就不难作出解释。当刀具对土体的某部分施加载荷时,一开始只有那些直接受到外载作用的表面部分的质点离开初始平衡位置,由于这部份质点与相邻质点之间发生了相对运动(变形),当然将受到相邻质点所给予的作用力(应力)。因此变形越大,刀具所受到的阻力也越大。变形质点在受到相邻质点作用力的同时,也给相邻质点以反作用力,因而也使它们离开原位而产生变形,不过由于土体质点具有惯性和阻尼,相邻质点的变形将滞后于刀具作用表面质点的变形。依次类推,刀具表面土质点的塑性变形就这样地在土体中逐渐由近及远传播出去,且随着距离的增加而逐渐衰减为零。当切削速度接近塑性波传播速度时,刀具对土壤作用而产生的剪切变形来不及传播多远,土壤已被切掉。因此切削速度越大变形越小,也即土壤的切削力越小(不包括加速土壤的惯性力,抛土功)。

如果不考虑抛土功耗的话,用接近土壤塑性波速的切削速度是有利的,不仅提高功效,还能减少切削阻力,但由于高速切削时抛土功耗剧增,因此图4中的切削总功耗比低速时要大。然而当切削速度大于等于11 m/s时比功耗的曲线变得平坦起来,这也是说明当切削速度接近塑性波速(试验土条的波速 ≈ 13.4 m/s,切削阻力有下降。所以今后若能设计出能明显降低抛土功耗的刀具时,接近或达到土壤塑性波速的高速切削将会显示出它的优点。

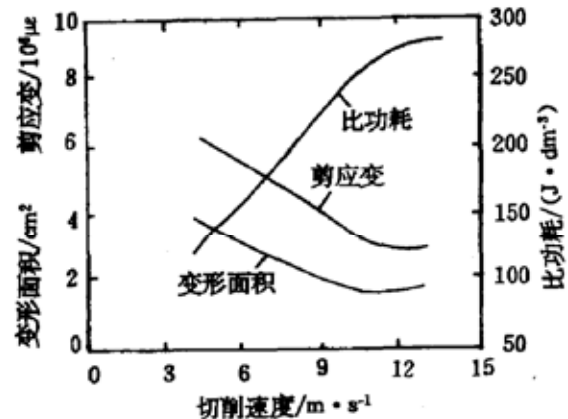


图4 剪应变、变形面积和比功耗与切削速度的关系

Fig. 4 The shearing strain, deformed square and ratio power requirement against cutting velocity

参 考 文 献

- 1 Hendrick J. G. Gill W. R. Soil reaction to high speed cutting. Transactions of the ASAE, 1973, 16(3): 401~403
- 2 S. 普拉卡什著. 徐攸在等译. 土动力学. 北京: 水利电力出版社, 1984
- 3 Braja M. Das 著. 吴世明等译. 土动力学原理. 杭州: 浙江大学出版社, 1984
- 4 王礼立. 应力波基础. 北京: 国防工业出版社, 1985. 5

Measurement of Stress Propagation Velocity of Tillage Soil and Its Application to Soil High Speed Cutting

Mao Hanping Sang Zhengzhong

(*Jiangsu Institute of Technology*)

Abstract

This paper studied the method that the stress propagation velocity of tillage soil was obtained by means of the cross-correlation function or cross-spectral function of Raylight wave impulse responses about two point of l_2 interval. The stress propagation velocity of various soil was measured by means of the method. Measured result was applied in the study on soil high speed cutting mechanism.

Key words Tillage soil Stress wave High speed cutting