瑞利波法测试原理及其工程应用

陈吉敏　　刘发齐
（浙江省台州地区路桥水利局，台州，318000）（江西省吉安县水利局，吉安，343100）

提　要　本文将简要介绍瑞利波法的测试分析原理，着重介绍瑞利波法在土木工程中的应用。

一　引　言

无界弹性介质中存在两种体波－压缩波和剪切波。1887 年瑞利(Rayleigh)发现了半空间弹性介质中存在一种由压缩波和剪切波干涉产生的波－瑞利波，并指出在均质，各向同性弹性半空间中瑞利波波速度和振动频率无关，瑞利波在深度方向衰减较快，而在水平向衰减很慢；而工程中经常碰到的层状土,瑞利波波速度将随频率而变，即具有弥散性。

剪切波速 *Vs* 是土动力学和地震工程学中的一个重要参数,也是土静力学中的一个重要参数，小应变情况下所测剪切波速 *Vs* 能反映静剪切模量 *G*，而土的抗剪强度 τ_f 与剪切模量 *G* 密切相关，一般 *G* 越大，τ_f 也越大。由于地基中主要以表面波形式传播，因此在理论上可较精确地获得表面波弥散曲线，而弥散曲线与土层的厚度、剪切波速等密切相关，因此可由实测瑞利波弥散曲线反演地基土层参数。下面将介绍其原理及其在工程的应用。

二　瑞利波法原理

1. 时域信号

根据波动理论,在地表脉冲荷载作用下，体波在地表处产生的位移和瑞利波相比几乎可以忽略。由于瑞利波在半空间的这种传播特性，对图 1 所示情况可以认为地表上的传感器 1 和 2 所检测到的基本上是瑞利波的竖向分量。在脉冲荷载作用下，瑞利波以圆柱面波的形式，从震源经传感器 1 向传感器 2 往外传播。设传感器 1 和 2 接收到的地域信号分别为 $A_1(t)$和 $A_2(t)$，则波从 1 行至 2 所需的时间等于 $A_1(t)$和 $A_2(t)$间的时间滞后。因此，求得 $A_1(t)$和 $A_2(t)$间的时间滞后，即可获得瑞利波速度。

2. 频域信号

瑞利波在成层地基中的传播速度是随频率或波长改变的(弥散性)，故只有通过频谱分析，才有可能确定 $x(t)$和 $y(t)$间的时间滞后。表面波瞬态振动法是在一次地面冲击下两检波器所获得的多频信号进行频谱分析，来确定相位差与频率的关系，由此得到表面波弥散曲线。如图 1 所示，在地表竖向冲击荷载作用下，距它一定远处的两检波器 1 和 2 所接收的基本上是表面的竖向分量的时域信号 $A_1(t)$和 $A_2(t)$。信号的傅里叶变换为

$$s(f)=\int_0^{\infty} A(t)\exp(-2\pi ift)\mathrm{d}t \qquad (1)$$

式中 $i=\sqrt{-1}$，t 和 f 为时间和频率. 由式(1)可得两信号的自功率谱 $G_{11}(f)$和 $G_{22}(f)$及互功率谱 $G_{12}(f)$, $G_{12}(f)$ 是复数，其相位代表两信号由于在波传播过程中的时间滞后所产生的相位差 $\Delta\varphi$，图 2 给出了互功率谱相位曲线，其相位曲线在-180°至 180°之间摆动，每摆动 360°为一周期。因此，由频率 f 和相位差 $\Delta\varphi$ 可计算波在检波器间传播所需时间 Δt，进一步得瑞利波速度 $V_R=x/\Delta t$，x 为两检波器距离。

在表面波法中，为了评价各个频段上的信号质量，还要分析两信号的相干函数谱:

$$\nu(f)=\frac{G_{12}(f)G_{12}*(f)}{G_{11}(f)G_{22}(f)} \qquad (2)$$

式中 $G_{12}*(f)$——$G_{12}(f)$的共轭复数。相干函数如在某频率上接近 1，表示两信号此时具有良好的相干性。在应用时，首先要确定相干函数值大于某界限值(如 0.85)的频段，并在其上识读与频率 f 相应差 $\Delta\varphi$，然后求出瑞利波速。噪声的存在、系统的非线性及信号多方向输入都会引起相干函数值的降低。因此,利用相干函数可方便地评价信号的测试质量。

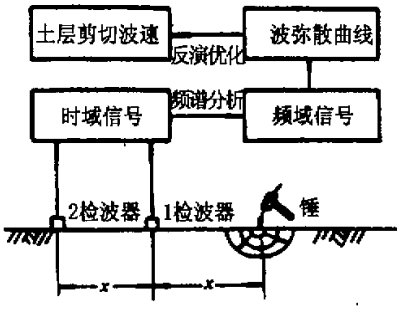


图 1　表面波测试图

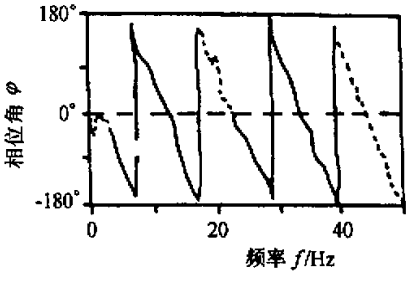


图 2 功率谱相位

3. 瑞利波速度弥散曲线

设两传感器间的距离为 x，瑞利波沿 1 和 2 点直线传播，故由时间 t 可得速度 V_R。此外，由相位角 φ 及距离 x 还可得到波长 λ，从而可得到瑞利波弥散曲线，即 λ 与 V_R 的关系曲线(见如图 3a 所示)。

三 工程应用

瑞利波的特性直接反映了结构的性质，而结构的性质也决定了瑞利波的特性。因此可根据现场实测瑞利特性(如弥散曲线)来分析结构的性质如剪切波速随深度的变化等。

1. 天然地基剪切波速度

测试剪切波速可采用跨孔法和下跨法，但需在地层中钻孔,工期长，费用高,不可以大面积检测，此外信号易受干扰等。折射波法和反射波法易受表面波干扰等，且仪器设备昂贵,难以普遍应用和满足精度。外荷作用下地基中主要以表面波形式传播，可测试获得瑞利波弥散曲线，而弥散曲线主要由地基土参数(如剪切波速)决定，因此通过反分析可得到不同深度处土的剪切波速。如图 3(a)所示为一现场所测弥散曲线，通过本测试系统的反分析得到图 3(b)所示深度与剪切波速度的关系图。此外本测试系统还可分析软硬夹层地基的剪切波速度。

2. 道路结构地基

随着交通事业的发展，高等级公路及机场的建设日趋增多，常规检测路面质量的弯沉法已不能满足要求，需一套能快速可靠检测道路质量的测试分析方法。表面波法是一种能快速无损检测道路结构质量的测试方法。如上所述道路结构中瑞利波弥散特性与道路结构的性状有关，不同结构弥散曲线各不相同，因此可检测道路结构的力学性质。此外，也可根据两传感器之间信号的相干函数的好坏来判别路面与垫层、垫层与地基的接触好坏。可用来快速测试高等级公路不同时期道路损坏情况(如出现裂缝、接触不好等)为及时进行修补提供可靠依据。

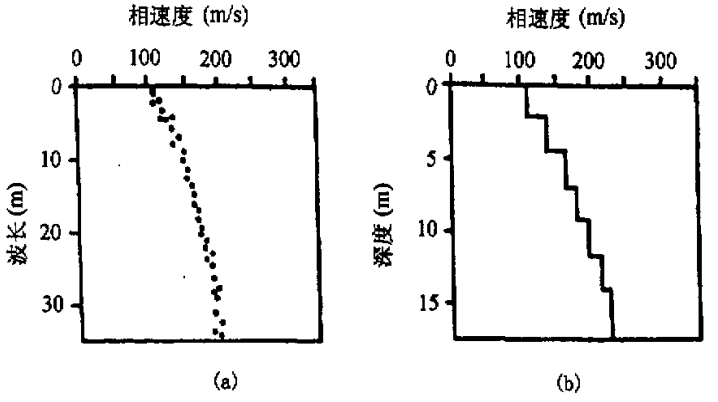


图 3　波速与波长、深度关系

3. 地基处理效果评估

软弱地基等处理一般有强夯法、换土垫层法、振密挤密法等方法，地基处理后一般需了解地基处理的效果，为设计等提供可靠依据。表面波法可用来检测地基处理后地基的整体效果，这是跨孔法等无法实现的，并且具有测试速度快、可大面积检测、费用低等优点。可在施工过程中进行检测，及时提供现场数据，可控制施工的质量。

4. 建筑物下地基剪切波速度

剪切波速直接反映了剪切模量的大小，而抗剪强度与剪切模量密切相关，因此剪切波速的大小也可反映地基的抗剪切强度状况，进一步可了解地基的承载力情况。在旧城改造中有时需要勘定已有建筑物下的地质情况，同时要满足住户及附近居民不受干扰，在这种情况下可同时采用表面波法及少量钻孔相结合的方法来测试土参数，从而达到测试精度，

减少测试费用。本表面波测试系统具有分析测试建筑物下地基的剪切波速度功能。频时φ 与 f不成线性关系，由此可判断 D值。

5. 混凝土裂缝检测

目前主要应用超声波绕射法来测量裂缝深度，对该方法研究也较多，并一直进行研究改进[5]。但是超声绕射法不能检测深层裂缝，因裂缝较深时，该法收不到真正的首波信号，目前最大的探测深度只能到 0.8m 左右；若裂缝中充水，则超声纵波可直接穿过裂缝，与绕射信号相混，使判断困难；超声纵波法仅适用于无钢筋或少钢筋混凝土情况，若有穿缝钢筋两探头连线与钢筋的距离应大于 $1.5d$(d 为裂缝深度)，如结构中有与裂缝重直的钢筋且排列较密则无法应用该法。

瑞利波质点位移沿深度(y 方向)衰减很快，在深度为 1 个波长处其波动分量已很小，其振幅只有表面振幅值的 20%。改变振动频率即能改变波长，从而达到控制面波穿透深度的目的。在检测材料性能时，相当于改变取样深度，这些特性是用纵波和横波检测无法达到的。若面波振动是正弦振动，测得相邻两点 P_a和 P_b的相位差φ，两测点距离为 L，则有：

$$V_R = \frac{2\pi fL}{\varphi} \tag{3}$$

式中 f（$=\omega/2\pi$）为振动频率。从上式可见若 V_R不变，φ与 f 呈现线性关系；如果有裂缝存在，φ与f将不呈现线性关系，从而达到测量裂缝深度的目的。

参考文献

[1] 夏唐代，吴世明：《稳态振动时平面内地基中波的能量分布》，见《浙江大学学报》，28(增刊)，1994。

[2] 王建人：《粘土的剪切模量、剪切波速度与强度、固结度的相关关系》，见《浙江大学硕士学位论文》，1987。

[3] 夏唐代等：《道路结构瑞利波弥散曲线》，见《第六届全国土力学及基础工程学术会议论文集》，上海，1991。

[4] 夏唐代：《地基中表面波特性及其应用》，见《浙江大学博士学位论文》，1992.12。

[5] 琼斯 R，费格瓦将 J：《混凝土非破坏试验》，北京，中国建筑工业出版社，1982。