

文章编号: 1000-7598-(2007) 01-0188-05

半无限介质内异质体方位探测数值研究

柴华友¹, 卢应发², 李 祺¹, 刘明贵¹

(1.中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2.华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074)

摘 要: 用数值模拟方法研究了地下异质体对波散射, 分析了散射波对表面波相速度影响, 结果表明: 由相速度曲线扰动难以有效确定异质体方位。在表面波场中, 散射波能量相对较小, 不易辨别, 以振源为中心, 在测线上对称布置一组测点, 通过两侧测点质点响应曲线比较, 得到表面散射波场。在表面散射波场中, 散射瑞利波是主要的, 由散射瑞利波走时随测点位置变化可判断地下异质体的方位。最后, 给出地下异质体方位测试方案。

关 键 词: 表面波; 散射波; 地下异质体; 相速度; 频散曲线

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Numerical study on detection of heterogeneities in half space

CHAI Hua-you¹, LU Ying-fa², LI Qi¹, LIU Ming-gui¹

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. College of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The waves scattered by underground heterogeneities are studied by numerical simulation; and effects of the scattered waves on the surface wave velocity are analyzed. The results indicate that the location of a heterogeneity can not be effectively detected from variation of the phase velocity with the receiver position. Because energy of the scattered waves is small in the surface wave field, the scattered waves are not easily distinguished. When the source is taken as the center, and a group of receivers are symmetrically set along a measuring line, the scattered wave field can be obtained by comparing particle responses on two sides. The scattered Rayleigh waves dominate the scattered wave field, the locations of underground heterogeneities can be predicted by variation of traveling time of the scattered Rayleigh waves with the distance between the receiver and the source. Finally, the detection schemes are proposed.

Key words: surface wave; scattered wave; underground heterogeneity; phase velocity; dispersion curve

1 引 言

废弃的防空洞、污水池及垃圾填埋场会威胁城市建筑物安全, 蚁穴、溶洞、局部软弱区会导致水库大坝、江河堤坝渗漏甚至溃堤溃坝; 历代帝王墓穴都有珍贵文物, 如何发现古墓对文物保护、发掘具有重大意义; 重要的排水管道、天然气管道施工过程中若开挖不慎, 可能会带来很大危险, 同时会影响人们的日常生活, 管道方位探测对确保正常施工及安全维修都很重要。因此, 地下异质体探测在岩土工程中是非常重要的研究课题。

钻探、开挖是一种有效的方法, 但其费时、费工、破坏地表、环境污染。无损探测地下异质体显得尤其重要, 有许多物理的及地球物理方法、技术

用于地下异质体探测, 如: 重力计、磁或电磁感应方法、地震反射、折射方法、地质雷达等, 这些方法在浅部的地下异质体探测, 有一定的局限性^[1]。对埋深在 30 m 以内地下异质体, 散射波场中散射瑞利波占主导地位, 散射体波不易识别^[2], 利用散射体波分析介质异质体方位比较困难。

对振源与异质体之间表面各点, 由于表面散射波传播方向与从振源向外传播表面波相反, 表面波相速度出现扰动。利用表面波相速度扰动探测地下异质体是近年发展起来的新物探方法^[3-6]。夏宇靖^[4]根据稳态表面波实验总结了不同形态相速度扰动与地下异质体分布关系, Nagueria^[3]、Gucunski^[5]、Ganji^[6]等用数值方法研究了表面散射波对表面波相速度扰动的影响。然而, 相速度扰动与表面散射波

能量、测点距、偏移距等因素有关，扰动关系复杂。与波在周围介质传播相比，异质体上方介质表面波相速度、能量会发生变化，若测线经过异质体上方，利用波场中表面波波速、能量变化可用来探测地下异质体^[1, 7]。Gucunski 和 Shokouhi 通过对不同位置响应进行小波分析，由响应波列的时间-频率域上相关系数分布曲线变化来识别来自地下异质体散射波^[8]。这些研究一般限于异质体在测线下方。本文用三维有限元数值模拟，研究异质体在测线外侧情况下散射波传播及获取散射波方法，并由散射瑞利波的传播规律研究异质体方位探测方法。异质体侧面形状、侧面与测线的倾角、埋深 h 、高度 d 及水平宽度 w 与波长比以及异质体与周围介质刚度比都会影响散射波，本文限于异质体为理想的充气方体洞穴，侧面与测线平行或垂直情况下波的散射。

2 散射波对表面波相速度影响分析

从理论上分析散射波场比较复杂、困难，这里采用三维有限元方法。计算模型尺寸取 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ ，施加无反射边界来消除波在边界的反射。材料阻尼比 ξ 取 0.05，泊松比 $\nu = 0.3$ ，剪切波速 $c_R = 200\text{ m/s}$ ，密度 $\rho = 1.8\text{ g/cm}^3$ （下同）。

为了保证计算精度，单元网格尺寸取

$$\Delta l \leq (1/10 \sim 1/8)\lambda \quad (1)$$

在波场中所关心的是瑞利波，这里，波长取最小瑞利波长。由于瑞利波在传播过程中高频衰减较快，网格尺寸可随传播距离及深度增加而增加。在均匀弹性半无限介质中，瑞利波相速度有近似解^[9]，用有限元数值模拟计算得到相速度与近似解比较可检验单元网格划分、无反射边界设置是否合适。

为了避免分析复杂，假设地下异质体位于测线下方，且只考虑一个侧面的散射，在表面波场中瑞利波能量一般占主导地位，故仅考虑瑞利波。取振源中心为坐标原点， x, z, y 分别为水平、竖向坐标轴，测点沿 x 轴布置（下同），见图 1。

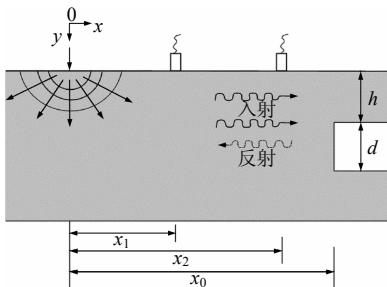


图1 振源、测点及地下异质体位置示意图

Fig.1 Schematic illustration setup of the source, receivers and a heterogeneity

散射瑞利波与入射波叠加后，位置 x_1, x_2 处波场质点速度响应可近似表示为^[6]

$$\left. \begin{aligned} R_1(t) &= A_1(\omega, x) e^{i\omega(t-x_1/c_R)} + \overline{A_1}(\omega, x) e^{i\omega[t-(2x_0-x_1)/c_R] + i\phi_0} \\ R_2(t) &= A_2(\omega, x) e^{i\omega(t-x_2/c_R)} + \overline{A_2}(\omega, x) e^{i\omega[t-(2x_0-x_2)/c_R] + i\phi_0} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： ϕ_0 为瑞利波在地下异质体处散射后相移； $\overline{A_1}, \overline{A_2}$ 为散射瑞利波在测点 x_1, x_2 处的振幅，它与地下异质体埋深、高度和瑞利波波长比值等参数有关。

对两点响应作互谱分析，表面波在 x_1, x_2 相位差随频率变化可表示为

$$\Delta\phi = \arctan[B(f)/A(f)] \quad (3)$$

式中：

$$\begin{aligned} B(f) &= \frac{\overline{A_2}}{A_2} \sin(2\phi_3 - \phi_0) - \frac{\overline{A_1}}{A_1} \sin(2\phi_2 - \phi_0) - \\ &\quad \frac{\overline{A_1 A_2}}{A_1 A_2} \sin(2\phi_1) \\ A(f) &= 1 + \frac{\overline{A_2}}{A_2} \cos(2\phi_3 - \phi_0) + \frac{\overline{A_1}}{A_1} \cos(2\phi_2 - \phi_0) + \\ &\quad \frac{\overline{A_1 A_2}}{A_1 A_2} \cos(2\phi_1) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\phi_1 = \omega(x_2 - x_1)/c_R$ ； $\phi_2 = \omega(x_0 - x_1)/c_R$ ； $\phi_3 = \omega(x_0 - x_2)/c_R$ 。

在散射瑞利波的影响下，表面波相速度及波长分别为

$$c = \frac{2\pi f(x_2 - x_1)}{(\phi_1 + \Delta\phi)} = \frac{c_R}{(1 + \Delta\phi/\phi_1)}; \quad \lambda = \frac{\lambda_R}{(1 + \Delta\phi/\phi_1)} \quad (5)$$

式中： $\phi_1 = 2\pi f(x_2 - x_1)/c_R$ ； $\Delta\phi, \phi_1$ 是弧度单位。

由式（4），（5）可以看出，表面波相速度扰动受以下几种因素影响：

（1） $A(f), B(f)$ 与频率的三角函数有关，这样，相位角 $\Delta\phi$ 随频率增加呈周期性变化， $\Delta\phi$ 大小并不是唯一由散射瑞利波能量决定。

（2）相速度扰动及其对应波长是由 $\Delta\phi/\phi_1$ 决定， ϕ_1 与频率、测点距成正比，而 $\Delta\phi$ 随频率、测点距变化是有限的，这样，随频率、测点距增加， $\Delta\phi/\phi_1$ 会减小，相速度扰动也减小，反之，则相速度扰动增加。因此，散射波对相速度变化在小道距情况下比较明显，但失真信号或其他干扰信号对相速度影响也增加，不利于实际应用^[9]。

假设地下异质体各个面距振源中心分别为

$x=1.5\sim 1.8\text{ m}$; $y=1\sim 2.6\text{ m}$; $z=-\infty\sim +\infty\text{ m}$, 介质参数同上, 不同测点距、偏移距(测点与振源间距)情况下相速度随波长变化见图 2。

由于相速度扰动随波长(或频率)、测点距、偏移距变化, 扰动形态、程度与异质体方位没有直接对应关系, 由表面波相速度扰动无法直接预测地下异质体方位, 见图 2。

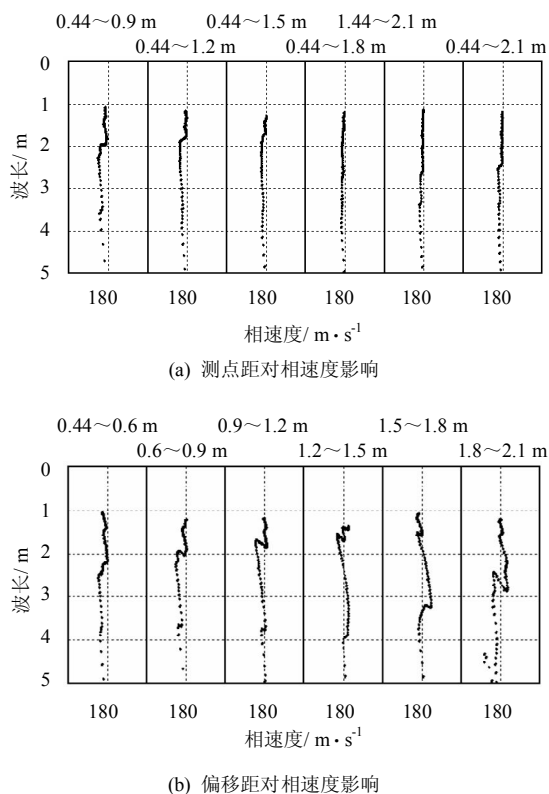


图 2 不同测点距、偏移距对相速度影响

Fig. 2 Effects of the distance between the source and the receiver on phase velocity

3 散射瑞利波传播分析

表面散射波场主要有: PP、PS、SS、SP、RP、RS、RR 等类型波(第 1 个字母代表入射波类型, 第 2 个字母代表散射波类型)。随着散射波传播距离相对波长增加, 表面散射波场以瑞利波为主。当地下异质体距测点水平距离远大于地下异质体的埋深, 可不考虑埋深对散射波走时的影响。对靠近异质体测点 A, 如图 3(a)所示, 散射瑞利波走时与测点位置关系为

$$t_R = \frac{\sqrt{s^2 + x_1^2} + \sqrt{s^2 + (x_1 - x_0)^2}}{c_R} \quad (6)$$

式中: s 是异质体与测线垂直距离(即异质体在 z 方向与测线距离), s 或 x_1 增加, t_R 也相应增加。由

式(6)可以看出, x_0-t_R 曲线上最小走时对应的位置 x_0 就是异质体相对振源位置, 随着测线上测点与该位置距离增加, 散射瑞利波走时也增加, 这样, 由测线上散射波走时随测点位置变化, 可以确定异质体 x 向位置。已知介质瑞利波速后, 由式(6)可大致估算异质体与测线垂直距离 s 。

作为特例, 当地下异质体位于测线下方, 且测点、振源位于地下异质体同一侧, 见图 3(b)。散射瑞利波到达测点 A 时间为

$$t_R = (2x_1 - x_0)/c_R \quad (7)$$

瑞利波遇到异质体后, 一部分能量继续在异质体上方介质透射传播, 波长相对异质体埋深越小的, 散射波能量越少, 透射波能量越多, 随着波长增加, 散射波能量增加, 透射瑞利波传播速度及衰减规律也发生改变^[7]。

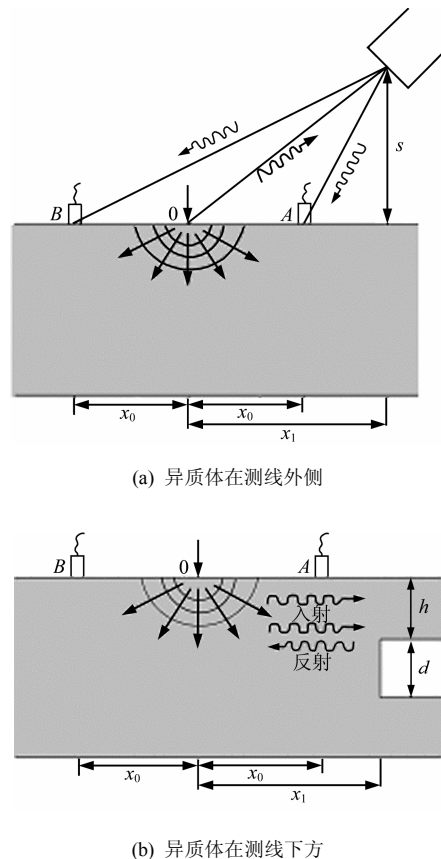


图 3 振源、测点、异质体相对位置

Fig.3 Relative positions among the source, receivers and a heterogeneity

4 散射波测试方法

假设地下异质体各面距振源中心分别为 $x=2.4\sim\infty\text{ m}$; $y=1\sim 2\text{ m}$; $z=-\infty\sim +\infty\text{ m}$, 距振源不同位置质点速度响应图案见图 4。

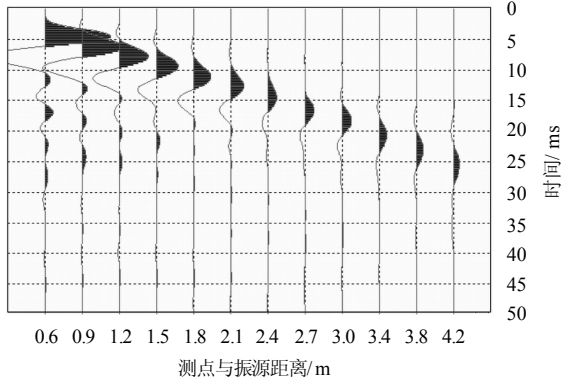


图4 表面波场图案

Fig.4 Pattern of the surface wave field

由图可以看出，散射波与入射波叠加，表面波场以入射波为主，散射波识别有难度。如果能消除强入射信号，突出弱散射信号，则易于识别异质体散射瑞利波，进而估计地下异质体方位。

测点响应可分解成入射波与散射波两部分，振源两侧对称测点 A 、 B 的入射波响应是相同的。散射波场较复杂，这里仅考虑散射波 PP、SS、RR，测点 A 响应可以近似表示为

$$V_A(x_0, f, t) \approx V_I(x_0, f, t) + \alpha(f, L_1)V_p^P(t - L_1/c_p) + \beta(f, L_1)V_s^S(t - L_1/c_s) + \gamma(f, L_1)V_R^R(t - L_1/c_R) \quad (8)$$

测点 B 响应可近似表示为

$$V_B(x_0, f, t) \approx V_I(x_0, f, t) + \alpha(f, L_2)V_p^P(t - L_2/c_p) + \beta(f, L_2)V_s^S(t - L_2/c_s) + \gamma(f, L_2)V_R^R(t - L_2/c_R) \quad (9)$$

式中： $L_1 = l_0 + l_1$ ， $L_2 = l_0 + l_2$ ， $l_0 = \sqrt{s^2 + x_1^2}$ ， $l_1 = \sqrt{s^2 + (x_1 - x_0)^2}$ ， $l_2 = \sqrt{s^2 + (x_1 + x_0)^2}$ ，系数 α 、 β 、 γ 与波的几何、阻尼衰减、散射角及不同频率成份散射系数有关。 V 的上标表示散射波类型，下标表示入射波类型。

V_I 表示测点入射波响应：

$$V_I(t, x_0) \approx \sum_{i=1}^3 \chi_i(f, x_0)V_i^I(t - x_0/c_i) \quad (10)$$

$i=1, 2, 3$ 分别代表 P 波、S 波、R 波， $\chi_i(f, x_0)$ 表示波的几何、阻尼衰减。

式 (8) 减去式 (9)，消除入射波后得：

$$V(t, x_0) = \alpha(f, L_1)V_p^P(t - L_1/c_p) - \alpha(f, L_2)V_p^P(t - L_2/c_p) + \beta(f, L_1)V_s^S(t - L_1/c_s) - \beta(f, L_2)V_s^S(t - L_2/c_s) + \gamma(f, L_1)V_R^R(t - L_1/c_R) - \gamma(f, L_2)V_R^R(t - L_2/c_R) \quad (11)$$

式 (11) 表示距振源 x_0 对称测点 A 、 B 散射波响应之差， B 、 A 散射波响应之差与 A 、 B 散射波响应之差大小相等，但相位相反。当对称布置测点距振源较近，即 L_1/L_2 比值较小，散射波到达两侧测点走时接近，由式 (11) 可知，散射波相减后相互抵消。随着 L_1/L_2 增加，两测点间散射波时差增加，各种类型散射波分离。

5 散射波图案分析

地下异质体各个面距振源中心分别为 $x = 2.4 \sim \infty$ m； $y = 1 \sim 2$ m； $z = 3 \sim \infty$ m，即异质体相对测线垂直距离 $s = 3$ m。通过振源两侧质点响应差得到散射波走时随测点位置变化，如图 5 所示。可以看出，散射瑞利波在表面散射波场占主导地位，其走时随测点与振源距离增加而减小，距振源 2.4 m 测点散射瑞利波走时最小，随后又逐渐增加。散射瑞利波走时最小的测点位置与地下异质体在 x 方向位置对应。由于地下异质体方位是未知的，散射波是由 $V_A - V_B$ 还是由 $V_B - V_A$ 得到不能确定，这样，也就不能确定地下异质体在 x - z 平面坐标象限。将振源沿测线向一侧移动，由于 x_1 发生变化，由式 (6) 可知， t_R 会发生变化。当 t_R 减小时，振源在向地下异质体一侧移动，反之，远离地下异质体；将测线平行移动改变 s 大小，当 t_R 减小时，测线在向地下异质体一侧移动。这样，由 $x_0 - t_R$ 曲线，结合式 (6)，可确定地下异质体在 x 、 z 向方位。

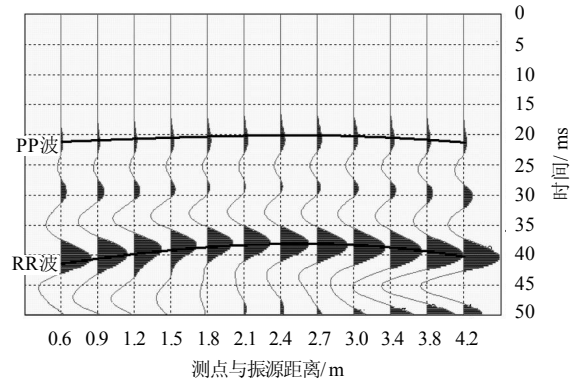


图5 地下质体不在测线情况下散射波场

Fig.5 The scattered wave pattern for a heterogeneity beside the measuring line

当地下异质体各面距振源中心 $x = 2.4 \sim \infty$ m； $y = 1 \sim 2$ m； $z = -\infty \sim +\infty$ m，距振源 0.6~2.4 m 两侧表面波场质点速度响应差可得到表面散射波，散射瑞利波走时随着测点与异质体在水平 x 向接近而减小。由于波在异质体上方介质中传播速度及衰减规律都发生改变，异质体上方表面波场与另一侧表

面波场质点速度差不代表散射波, 见图 6 右半部。在两侧波场差中, 瑞利波差仍是主要的, 其传播速度近似于透射表面波在异质体上方介质传播速度。

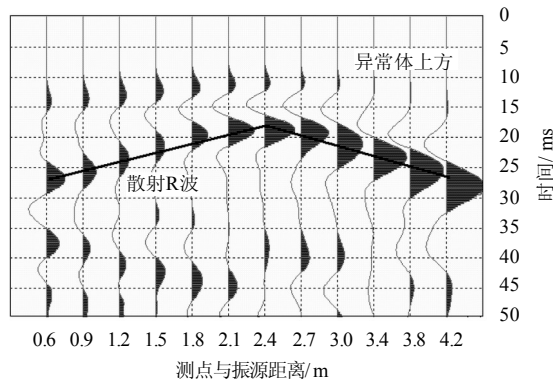


图 6 异质体在测线下方时振源两侧波场差别

Fig.6 Differences between the surface waves on two sides symmetrical to the source for a heterogeneity beneath the measuring line

6 异质体方位测试方案

根据以上分析, 地下异质体方位测试方案在建议如下:

(1) 选择一定数量幅频及相频特性一致的传感器, 以振源为中心, 沿测线对称布置测点;

(2) 由表面波场中瑞利波传播时间随距离变化估算瑞利波平均速度 $\bar{c}_R$;

(3) 将两侧信号进行比较得到散射波响应, 改变落锤重量、锤垫材料及接触面, 以获得能量较强的散射波;

(4) 若散射波传播时间随测点位置变化是非线性关系, 异质体在测线外, 波阵列中散射瑞利波最小走时的测点位置对应于异质体在测线垂直位置。若散射波传播时间随测点位置变化近似线性关系, 且斜率倒数接近瑞利波波速, 则异质体在测线下方, 测点与异质体位置越近, 走时越小;

(5) 沿测线移动振源来确定异质体 x 向位置; 平移测线以确定异质体 z 向位置。

7 结 论

(1) 表面波遇到地下异质体会发生散射, 这些散射波会使表面波相速度发生扰动, 扰动程度及形态与地下异质体位置是一种隐含对应关系, 由表面波相速度扰动难以有效分析地下异质体方位;

(2) 在表面波场中, 散射波能量较小, 散射波识别困难, 利用振源两侧对称测点质点速度响应比较, 可以得到表面散射波;

(3) 在散射波场中, 散射瑞利波占主导地位。

由散射瑞利波走时随测点位置的变化可估算异质体水平方位。

参 考 文 献

- [1] Vogelaar B B S A. Cavity detection----A feasibility study towards the application of seismic surface wave stack methods for the identification and localization of underground voids[PH. D]. Utrecht, The Netherlands: University of Utrecht, 2001.
- [2] Pant D R, Greenhalch S A. Blocking surface waves by cut: physical seismic model results[J]. **Geophysical Prospecting**, 1989, 37: 589—605.
- [3] Nagueria A C, Roësset J M, Tassoulas J L. Effect of cavities on the propagation of surface waves[A]. **Proceedings of the Eighth International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics** [C]. Rotterdam: [s. n.], 1994. 949—954.
- [4] 夏宇靖. 稳态表面波实测地下异质体 $D-\bar{V}_R$ 曲线的类型[J]. 煤田地质与勘探, 1996, 24(1): 50—55.
XIA Yu-jing. Types of $D-\bar{V}_R$ curves obtained by steady Rayleigh wave testing[J]. **Coal Geology and Prospecting**, 1996, 24(1): 50—55.
- [5] Gucunski N, Ganji V, Maher M H. Effects of obstacles on Rayleigh wave dispersion obtained from the SASW test[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 1996, 15: 223—231.
- [6] Ganji V, Gucunski N, Maher A. Detection of underground obstacles by SASW method——Numerical aspects[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(3): 212—220.
- [7] Park C B, Miller R D, Xia J. Detection of near-surface voids using surface waves[A]. **SAGEEP 99**[C]. Oakland, Calif.: [s. n.], 1999b, 281—286.
- [8] Gucunski N, Shokouhi P. Detection and characterization of cavities under the airfield pavements by wavelet analysis of surface waves[A]. **The 2004 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference Technical Papers**[C]. Atlantic City: New Jersey, 2004.
- [9] 柴华友, 卢应发, 刘明贵, 等. 表面波谱分析影响因素研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 347—353.
CHAI Hua-you, Lu Ying-fa, Liu Ming-gui, et al. Influences of measuring factors on spectral analysis in surface wave testing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(3): 347—353.