

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1569

地下浅部异质体对表面波场谱扰动分析

柴华友¹, 柯文汇², 柴扬斐³, 朱红西², 王贤达³, 刘 欢¹

(1. 武汉工程大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430073; 2. 武汉市市政建设集团有限公司, 湖北 武汉 430023;

3. 中铁建电气化局集团南方工程有限公司, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 均匀半无限体中表面源激发近表面波场由瑞利波主导, 当浅部存在异质体, 前行瑞利波发生散射, 异质体周围表面波场响应谱发生变化。当异质体长度相对波长较大时, 由异质体上方表面质点响应谱提取绕射波频散曲线可分析异质体与周围介质刚度差异对绕射波传播特性的影响。与含软层或硬层半无限体中瑞利波特性比较, 可以发现绕射波具有与瑞利波类似的传播特性。异质体上方谱变化特征与异质体和周围介质间刚度差异有关, 本研究基于异质体绕射波与入射瑞利波位移结构差异解释谱变化现象。结果表明: 异质体上方谱与周围谱明显不同, 在偏移距-波长域, 相对于前方波场, 软质体上方谱密度整体呈减弱趋势, 硬质体上方谱密度整体呈增强趋势。根据谱密度变化对应偏移距、波长及谱密度强弱, 可以预估异质体在传播方向的位置、埋深, 并识别异质体类型。

关 键 词: 异质体; 瑞利波; 波散射; 位移结构; 谱变化

中图分类号: O 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 06-1683-11

Analysis of spectral changes of the surface wave-field caused by underground shallow heterogeneities

CHAI Hua-you¹, KE Wen-hui², CHAI Yang-fei³, ZHU Hong-xi², WANG Xian-Da³, LIU Huan¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430073, China;

2. Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430023, China;

3. Southern Engineering Co., Ltd. of China Railway Construction Electrification Bureau Group, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: In homogenous half spaces, the wave-fields in the shallow depth are dominated by Rayleigh waves elicited by surface sources. When the forward Rayleigh waves encounter a shallow heterogeneity, the surface response spectrum over the heterogeneity is changed. When the length of the heterogeneity is significantly long compared to the wavelength of the forward Rayleigh waves, the effects of the stiffness contrast between the heterogeneity and the surrounding soil on the behavior of the diffracted waves are analyzed from the dispersion curves extracted from the spectrum performed on the surface response over the heterogeneity. Compared to Rayleigh waves in the half space containing the soft or hard soil layer, it can be found that the behavior of the diffracted waves is similar to that of Rayleigh waves. The spectral changes over the heterogeneity are related to the stiffness contrast. The phenomena of the spectral changes are explained using the displacement structure differences between the diffracted waves and the incident Rayleigh waves. It is shown from the results that the spectrum over the heterogeneity is obviously different from those in front of and behind the heterogeneity. In the offset-wavelength domain, compared to the spectrum in front of the heterogeneity, the spectral density decreases as a whole over a soft heterogeneity, while the spectral density increases over a hard heterogeneity. The location and the burial depth of a suspected heterogeneity can be estimated from the offsets and the wavelengths corresponding to the spectral changes, respectively. The type of the heterogeneity can be identified from the relative decrease or increase in the spectral density.

Keywords: heterogeneity; Rayleigh waves; wave scattering; displacement structure; spectral change

1 引 言

在岩土工程中, 地下掩藏的充气或充水地下防

空洞、溶洞、管道、软土、淤泥、飘石等异质体会影响施工安全及工程质量, 特别是在隧道盾构施工过程中, 这些异质体可能导致开挖面失稳、盾构机

收稿日期: 2021-09-20

修回日期: 2022-03-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.41474113); 武汉工程大学人才专项经费资助项目; 湖北省建设科技计划项目 (2019)。

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (41474113), the Talent Project of Wuhan Institute of Technology and the Plan Project of Construction Science and Technology of Hubei Province (2019).

第一作者简介: 柴华友, 男, 1965年生, 博士, 教授, 主要从事多相介质动力响应及波动特性研究。E-mail: chy_rsm@hotmail.com

通讯作者: 柯文汇, 男, 1987年生, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程、地下工程等领域的建造管理与科研工作。E-mail: kewenhui1989@126.com

突陷、刀盘刀具损坏等风险。为确保施工安全及工程质量,地下异质体必须及时探测及处理。

当场地存在异质体时,异质体与周围介质的材料特性参数出现差异,从而形成一个材料特性参数分界面。材料参数有热学的、磁学的、电学的、力学的,目前,已发展了很多不同种类物探方法探测这些物理性质参数分界面,如地质雷达、井中雷达、电磁波 CT、高密度电法、电法 CT 等^[1]。不同物探方法有其局限性及适用范围。

波的运动学及动力学特性对介质力学参数特别是剪切波速度变化敏感,地震反射波及折射波法通过时域及频域对体波在异质体散射分析探测异质体。对浅部异质体,由于体波散射波在表面波场能量相对较弱,且与表面波时间窗口重叠,体波散射波信号识别难度较大。与体波相比,瑞利波能量主要分布在一个波长深度内,当浅部存在异质体,相对体波散射,瑞利波散射能量较大^[2-6]。

对充气矩形截面洞穴情形,利用瑞利波在洞穴拐点散射波具有抛物型时程曲线特征,可由测试信号中散射波路径来确定洞穴位置,但散射波往往淹没在前行瑞利波响应中,为了突出散射波,需在频率-波数域对信号二维滤波,压制前行瑞利波,滤波参数设置会影响散射波路径识别^[7]。利用表面两个不同位置测点信号作互谱分析可得到两测点之间表观相速度,瑞利波散射导致表面波场表观相速度随频率扰动,扰动形态与洞穴位置及深度有关。由表面一组测点得到的不同位置相速度变化特征可识别洞穴位置及埋深,但该方法易受体波干扰、测点与洞穴以及测点间距离等因素影响^[8-10]。不同波长入射波在洞穴上方能量变化较大,利用谱密度扰动可较好预测地下浅部洞穴位置及埋深^[11-12]。充气洞穴只是软质体一个特例(剪切波速度及密度趋于 0),针对洞穴探测各种分析方法应用于一般地下浅部软质体及硬质体探测分析可能会导致异质体漏判或误判。因此,开展浅部异质体散射波对表面波场谱扰动研究有助于提高浅部异质体探测及分析精度。为此,本文开展以下工作:首先,基于层状半无限体中瑞利波传播理论研究夹软层及硬层半无限体状介质中瑞利波传播特性及位移结构(或称位移振型);其次,将层状介质中瑞利波频散曲线与异质体上方绕射波响应提取的频散曲线比较,分析绕射波传播特性;然后,由绕射波与前行瑞利波位移结构差异分析偏移距-波长域谱密度扰动特征;最后,建立偏移距-波长域谱密度变化特征与异质体水平向位置、埋深及相对刚度间关系。

2 散射波场质点振动响应

散射波理论建立了散射波位移与介质间力学特性参数差异隐式积分关系式,由关系式可模拟散射波场响应,分析异质体位置、埋深、几何形状、材料特性等参数对散射波场影响,但该方法涉及到复杂迭代计算^[13-16]。下面以有限元数值计算模拟波场响应。

考虑到点荷载激发瑞利波以柱状波阵面传播,数值模拟采用轴对称模型。为了便于描述,根据异质体相对于振源方位,本文将波场分成 3 个区域,前方区域、上方区域及后方区域,相关参数定义见图 1。图中 r_n 、 r_f 、 h_t 、 h_b 、 h 及 l 分别表示矩形异质体前、后边界与振源中心水平距离、上边界深度(即埋深)、下边界深度、高度及长度。

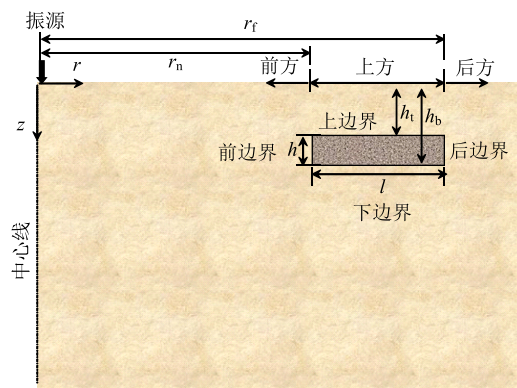


图 1 波场划分及异质体位置参数

Fig.1 Division of wave field and location parameters for heterogeneities

振源函数采用 Ricker 函数, Ricker 函数时域、频域的表达式为

$$p(t) = (1 - 2\pi^2 f_M^2 \hat{t}^2) e^{-\pi^2 f_M^2 \hat{t}^2}, \quad P(f) = e^{-i2\pi f_M f} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{f^2}{f_M^3} e^{-\frac{f^2}{f_M^2}} \quad (1)$$

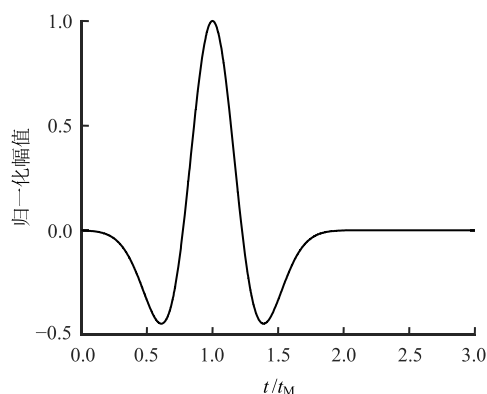
式中: $i = \sqrt{-1}$; $\hat{t} = t - t_M$; t_M 为信号峰值对应时间; f_M 为峰值频率或中心频率, $f_M = 1/t_M$ 。Ricker 振源谱密度一般分布频率范围为 $[0, 3f_M]$, Ricker 函数时程曲线及频谱如图 2 所示,利用这种振源可有效控制分析频率范围。

数值模拟采用轴对称模型,模型长为 25 m,厚(深)度为 20 m,半无限体剪切波速、密度及泊松比分别取为 130 m/s、1 800 kg/m³ 及 0.3,取 Ricker 子波荷载主频中心频率 $f_M = 100$ Hz(即 $t_M = 0.01$ s),作用半径为 0.1 m, Ricker 面荷载幅值为 1 N/m²。为消除波在模型边界的反射,在底部及侧边界加无

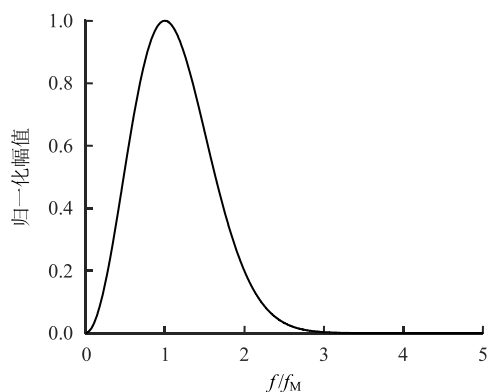
反射边界。半无限体表面竖直向振源会激发以柱面波阵面沿表面传播的瑞利波、以球心位于振源中心的半球面向外传播的 P 波（纵波）、S 波（横波或剪切波），以及介于 P 波与 S 波之间能量很小的首波（或 Von Schmidt 波）。P 波及 S 波在近表面质点振动幅值较小，沿表面传播的 P 波也称直达 P 波或擦射波。瑞利波波速 c_R 与剪切波速 c_s 相近，两者回归关系式为^[17]

$$c_R \approx \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} c_s \quad (2)$$

式中： ν 为泊松比。由剪切波速可得半无限体介质 $c_R \approx 120.6$ m/s。中心频率对应入射瑞利波波长 $\lambda_M = 120.6/100 \approx 1.2$ m。由图 2(b)可知，Ricker 源最大频率 $f_{\max} \approx 3f_M = 300$ Hz，最小瑞利波长 $\lambda_{\min} = c_R/f_{\max} \approx 120/300 \approx 0.4$ m。由于瑞利波能量分布于一个波长深度，为了保证一个波长有足够单元网格，近表面一个最小波长深度内网格尺寸取 0.02 m（最小波长 1/20），然后网格尺寸随着深度逐渐增加，模型变尺寸网格有效性参见文献[18]。



(a) 时程曲线



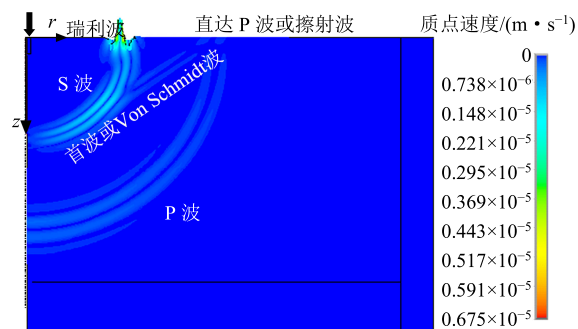
(b) 频谱

图 2 Ricker 函数

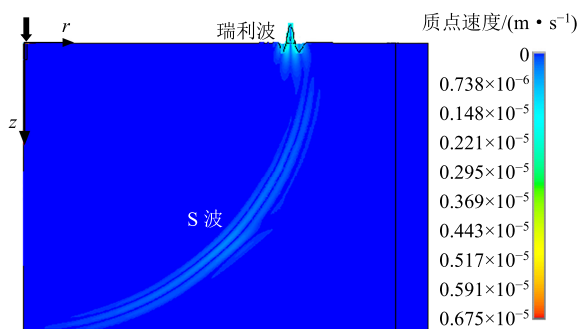
Fig.2 Ricker wavelet

数值模拟得到的均匀半无限体中不同时刻质

点速度幅值云图见图 3。由于瑞利波与剪切波波速接近，由图 3(a)可见，近振源处瑞利波与 S 波没有分离，随着传播距离增加，两者分离，见图 3(b)。由于 S 波在近表面波场振动能量较小，近表面波场由瑞利波主导。



(a) 瑞利波与 S 波耦合



(b) 瑞利波与 S 波分离

图 3 表面源激发波场质点速度快照

Fig.3 Snapshots of wave field induced by the surface source

前行瑞利波遇到浅部异质体会发生散射，为了增加异质体散射波能量，取异质体位于瑞利波影响深度内，且异质体长度相对波长及埋深较大，这样可避免前、后边界近场散射波对异质体上方波场影响。假设异质体剪切波速参数与周围介质相差较大，密度变化较小，异质体材料力学参数及几何参数见表 1，括号表示相应的由式（2）计算的介质瑞利波速。

表 1 异质体埋深及几何参数

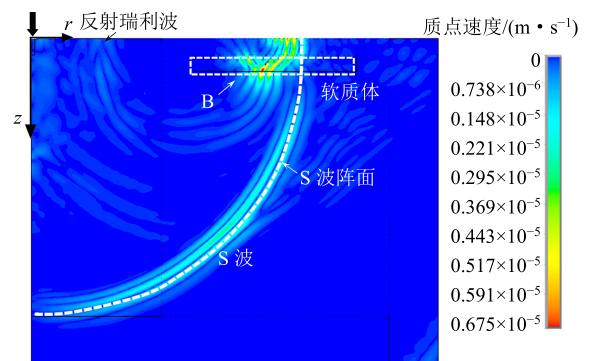
Table 1 Burial depths and geometrical parameters of heterogeneities

异质体 类型	剪切（瑞利）波 速度/(m · s ⁻¹)	密度 /(kg · m ⁻³)	泊松比	水平范围 /m		深度范围 /m	
				r_n	r_f	h_t	h_b
软质体	80(74.8)	1 600	0.35	10	20	1	2
硬质体	200(184.0)	2 000	0.25	10	20	1	2

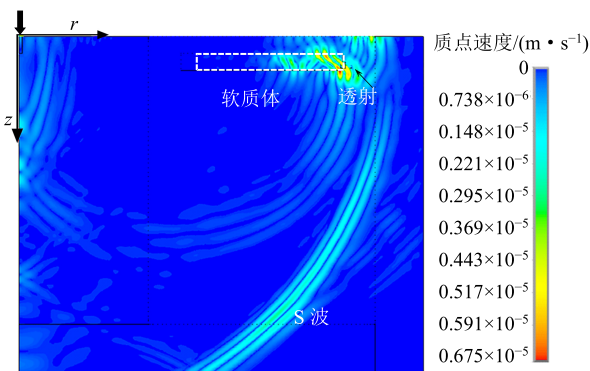
2.1 软质体

由数值模拟得到含软质体半无限体波场质点

速度响应。为了研究软质体对瑞利波散射过程及特征,选择两个典型时刻波场质点速度幅值分布快照,见图 4。由图 4(a)可以看出,前行波在软质体上、下边界间来回反射,绕射波能量向软质体聚集(由于本文基于振动参数分析,这里能量指波阵面质点振动能量,下同),波形发生弥散。以 S 波阵面作为参考,软质体上方波主要能量传播略慢于 S 波,软质体下边界附近波(见符号 B)传播速度明显低于 S 波速。在后边界区域,由于波形弥散,在快照图 4(b)上难以分辨出软质体内波在边界反射。考虑到无异质体情况下表面波场由以柱状波阵面传播的瑞利波主导,用柱面波阵面几何衰减规律 $r^{-1/2}$ 对表面竖直向质点速度响应进行校正,以消除几何衰减影响。以距振源中心 0.4 m 位置竖直向质点速度响应为参考响应,用其响应最大幅值对其他位置响应进行归一化处理,处理后距振源中心 0.4~24 m,间隔 0.4 m 的表面波场竖直向质点速度响应等值线云图见图 5。可以看出,在软质体上方有多个不同波簇(见符号 B),这表明,波在这一区域传播特性不同于瑞利波。当波传播至软质体后边界,波发生了较强反射。



(a) 前方及上方



(b) 上方及后方

图 4 软质体对波场扰动快照

Fig.4 Snapshots of wave field disturbances caused by the soft heterogeneity

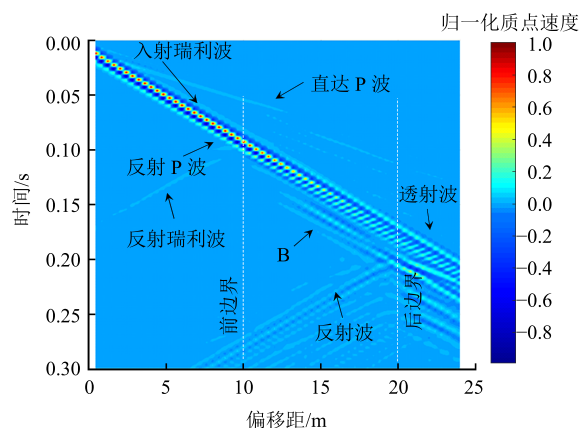
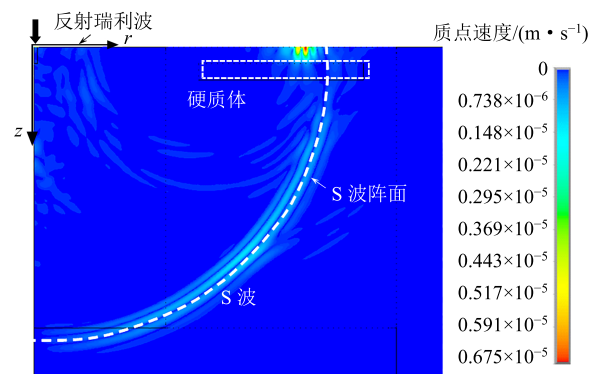


图 5 软质体对竖直向表面质点速度响应影响

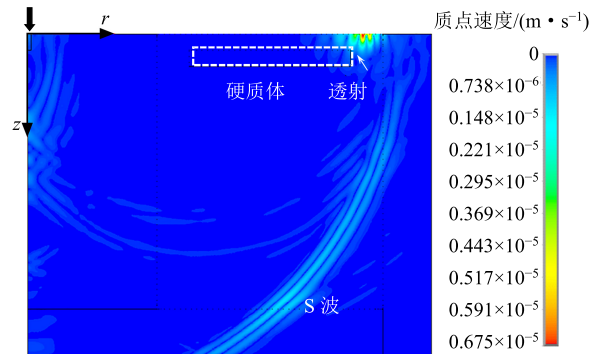
Fig.5 Effects of the soft heterogeneity on vertical surface particle velocity response

2.2 硬质体

含硬质体半无限体波场质点速度幅值不同时刻典型快照见图 6。由图 6(a)可以看出,绕射波能量向硬质体上方介质聚集,在硬质体内及下方能量相对较少,虽然波形也出现弥散现象,但不如软质体情形明显。在后边界,质点速度幅值分布图案变化不明显,这表明反射能量微弱,大部分能量向后透射,见图 6(b)。图 7 为表面质点速度响应时程,



(a) 前方及上方



(b) 上方及后方

图 6 硬质体对波场扰动快照

Fig.6 Snapshots of wave field disturbances caused by the hard heterogeneity

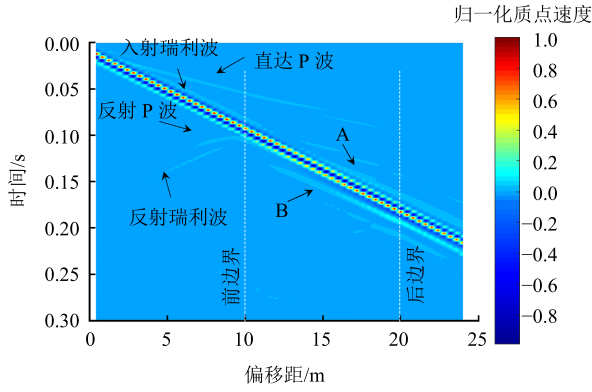


图 7 硬质体对竖直向表面质点速度影响

Fig.7 Effects of the hard heterogeneity on vertical surface particle velocity response

由图可以看出,硬质体上方波场出现能量微弱分支,用符号 A、B 标识,上方波具有弱频散特性,在后边界,反射波能量微弱,无法识别。

3 异质体区域波传播特性分析

激发瑞利波位移随深度变化由简正(或称本征,波阵面为平面)瑞利波随深度位移变化决定,均匀半无限体中简正瑞利波水平向及竖直向位移振型(位移结构)函数有解析式^[19-20]。泊松比为 0.3 的均匀半无限体中,简正瑞利波归一化位移(分别与表面水平向及竖直向位移比值)随深度与波长之比变化见图 8。在深度与波长之比 $z/\lambda = 1$ 、1.2、1.5 处,竖直向位移分别是表面位移 21.7%、13.73%及 6.85%。这意味在一个波长深度附近瑞利波相对位移仍然较大,若异质体位于一个波长的深度,瑞利波在异质体上边界仍会产生较大散射。

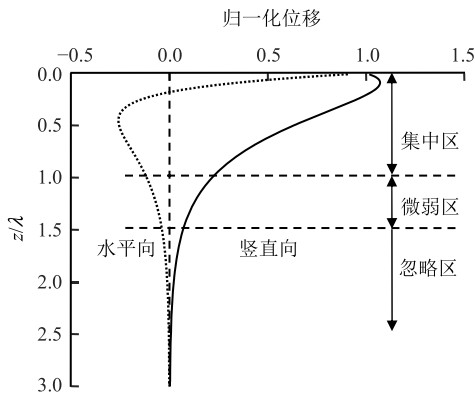


图 8 均匀半无限体中瑞利波位移结构

Fig.8 Displacement structures of Rayleigh waves in homogenous half spaces

3.1 软质体

对软质体上方(距振源 10~20 m)表面不同位

置竖直向振动质点速度响应(即时间-空间域响应,见图 5)作二维傅里叶变换,得到频率-波数($f-k$)域谱。由相速度与频率、波数关系 $c = 2\pi f/k$ 得到频率-相速度域谱。利用关系 $f = c_R/\lambda_R$, 得到无量纲波数 h_t/λ_R -无量纲相速度 c/c_R 域谱,见图 9。谱能量脊线反映了软质体区域波传播特性与 z/λ 之间的关系。由图 9 可以看出,当 $h_t/\lambda_R > 1.5$, 软质体区域波近似以瑞利波波速传播,这表明软质体对其传播影响可以忽略,对波长大于埋深入射瑞利波,则在软质体区域波传播速度呈明显减小趋势。由于软质体长度相对波长较大,前、后边界影响较小,下面基于夹软质层半无限体介质中瑞利波传播特性分析图 9 谱分布。

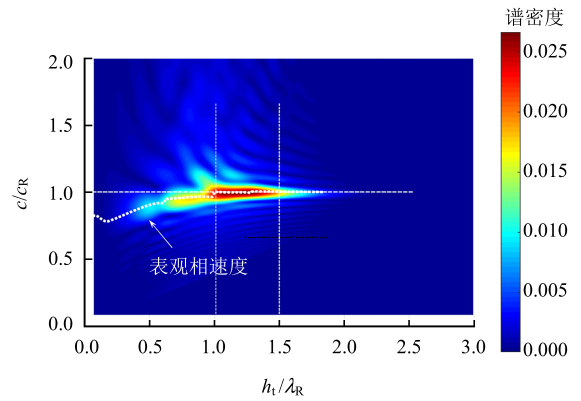


图 9 软质体上方表面响应谱

Fig.9 Surface response spectrum over the soft heterogeneity

半无限体中水平无限延伸软层材料力学参数、深度及厚度同表 1 所给的软质体参数,层状半无限体中各模态(或模式)瑞利波频散曲线及位移振型函数可以用矩阵方法得到^[21-24]。在 250 Hz 频率范围内,夹软层半无限体中前 4 阶模态瑞利波频散曲线见图 10。随着频率增加,各阶次瑞利波相速度趋于软质体剪切波速,高阶瑞利波趋近速率慢于基阶瑞利波。不同阶次瑞利波表面竖直向相对位移见图 11,由图可以看出,在大于 50 Hz 频率范围内波场表面响应由高阶模态瑞利波主导。由于这些模态相速度比较接近,在较短的传播距离内,这些模态波响应难以分离,相互叠加,由图 9 谱脊线提取相速度可近似认为是多个模态叠加表观相速度或有效相速度^[25]。对水平分层介质中多模波场,距半径 a 表面振源中心 r 处竖直向表观相速度为^[26-27]

$$c_z(r, \omega) = \frac{\sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M \hat{B}_{lm} [Y_0(k_l r) Y_0(k_m r) + J_0(k_l r) J_0(k_m r)]}{\sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M \hat{B}_{lm} c_m^{-1} [Y_0(k_l r) J_1(k_m r) - J_0(k_l r) Y_1(k_m r)]} \quad (3)$$

式中: 系数 $\hat{B}_{lm} = (\phi_z^{(l)} \phi_z^{(m)})^2 (k_l k_m)^{-1} J_1(k_l a) J_1(k_m a)$, 这里 $\phi_z^{(l)}$ 及 $\phi_z^{(m)}$ 分别为第 l 阶和第 m 阶瑞利波标准化垂直向位移振型在表面位移^[24]; $J_n(\zeta)$ 、 $Y_n(\zeta)$ ($n = 0, 1$) 分别为 n 阶第一类和第二类贝塞尔函数, 宗量 $\zeta = k_l r$ 、 $k_m r$; k_m 及 c_m 分别为第 m 阶瑞利波波数及相速度; M 为角频率 ω 处瑞利波模态数量。

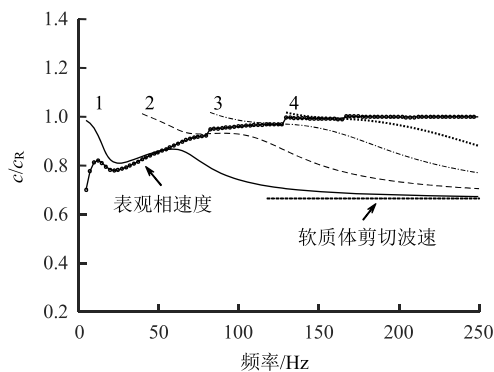


图 10 前 4 阶模态瑞利波频散曲线
Fig.10 Dispersion curves of the first four modes of Rayleigh waves

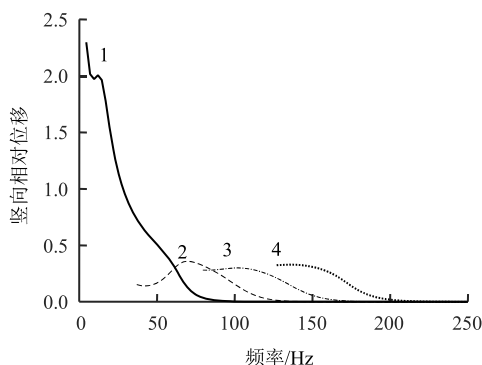


图 11 前 4 阶模态瑞利波表面相对竖向位移
Fig.11 Relative vertical surface displacements of the first four modes of Rayleigh waves

按式 (3) 计算异质体中心位置 ($r = 15$ m) 表观相速度与谱脊线比较见图 9, 这表明在软质体区域波近似具有夹软层介质中瑞利波传播特性。

在频率 50 Hz 处, 由图 10 中频散曲线对应的 c/c_R 比值 ($c/c_R \approx 0.86$) 可得基阶瑞利波相速度约为 103.6 m/s, 波长为 $103.6/50 \approx 2$ m, 入射瑞利波 (波长为 $120.6/50 \approx 2.4$ m) 与含软质层基阶瑞利波归一化位移结构 (对各自表面位移进行归一化处理) 比较见图 12。由图可以看出, 相较于入射瑞利波, 夹软层半无限体中基阶瑞利波能量向软质层聚集。在频率 50、100、150 Hz 处瑞利波分别有 2、3、4 个阶次瑞利波, 各阶模态瑞利波竖向相对位移随深度分布见图 13。由图可以看出, 高阶模态相对基阶模

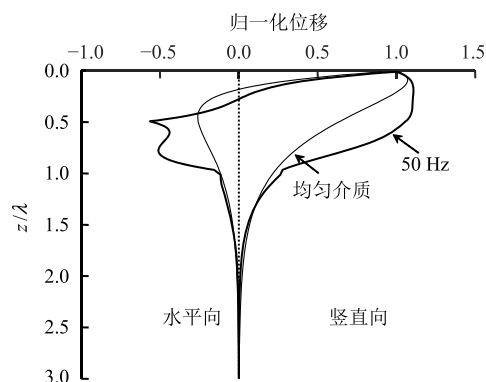
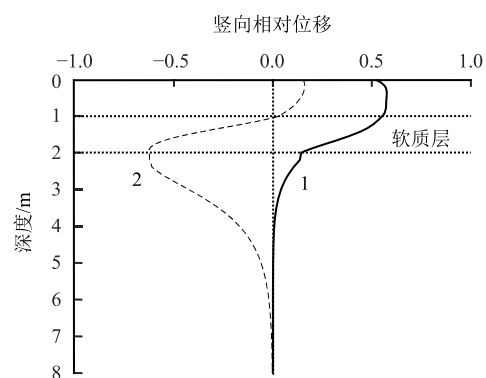
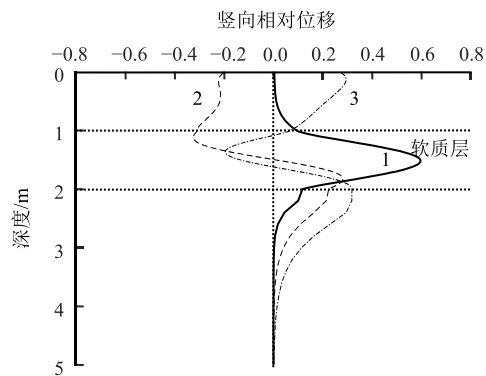


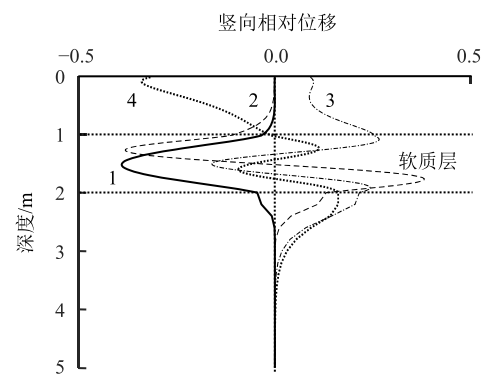
图 12 入射瑞利波与基阶模态瑞利波位移结构比较
Fig.12 Comparison of displacement structures of the incident and the fundamental mode Rayleigh waves



(a) 50 Hz



(b) 100 Hz



(c) 150 Hz

图 13 不同频率处各阶模态瑞利波竖向相对位移
Fig.13 Relative vertical displacements of different modes of Rayleigh waves at different frequencies

态能量分布更深, 随着频率增加, 各阶模态瑞利波能量向软质层聚集, 由位移结构可以较好解释图 4 质点速度幅值分布图案。

3.2 硬质体

硬质体上方表面竖直向质点速度响应无量纲波数 h_l/λ_R -无量纲相速度 c/c_R 域谱如图 14 所示。对层状介质, 瑞利波位移在底部半无限体随深度呈指数衰减, 位移式含指数项 $\exp[-kz\sqrt{1-(c/c_s)^2}]$, 这里 k 与 c 分别为瑞利波波数及相速度, c_s 为半无限体剪切波速度^[27]。对夹硬层半无限体, 为确保瑞利波位移在硬质层以下半无限体随深度指数衰减, 相速度需介于均匀介质瑞利波速与剪切波速度之间, 瑞利波具有弱频散特性, 见图 15。将频率转换成无量纲频率后, 频散曲线与谱脊线比较见图 14, 两者比较接近, 这表明硬质体区域波场仍由瑞利波主导。由图 15 频散曲线 c/c_R 比值可得弱频散瑞利波在频率 75、100 Hz 处相速度分别为 128.6、123.0 m/s, 弱频散瑞利波与均匀介质中瑞利波位移结构比较见图 16。由图可以看出, 当介质出现硬质体, 瑞利波能量向硬质体上方介质聚集, 频率越低, 无量纲深

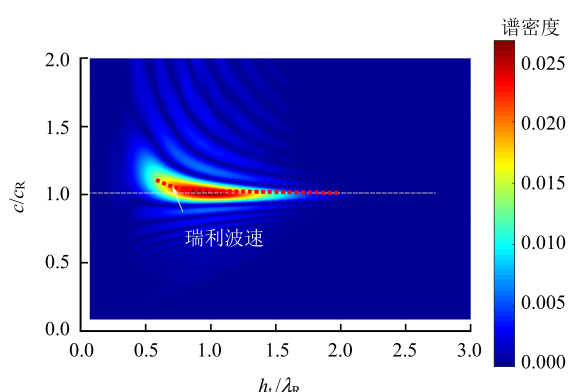


图 14 硬质体上方表面响应谱

Fig.14 Surface response spectrum over the hard heterogeneity

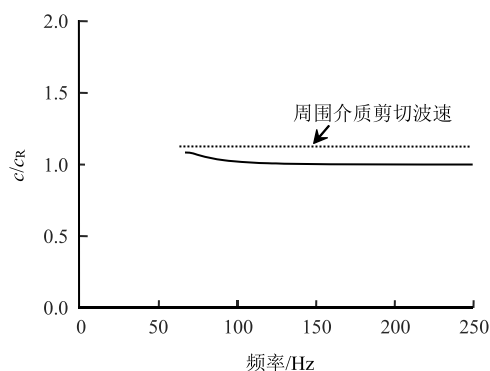


图 15 夹硬层介质中瑞利波频散

Fig.15 Dispersion curve of Rayleigh waves in the homogenous half space sandwiched with the hard layer

度越小。在频率 75 Hz 处, 归一化位移随深度分布见图 17。由图可以看出, 硬质层中能量较小, 这种位移结构变化可以很好地解释图 6 所示的质点速度幅值分布图案。

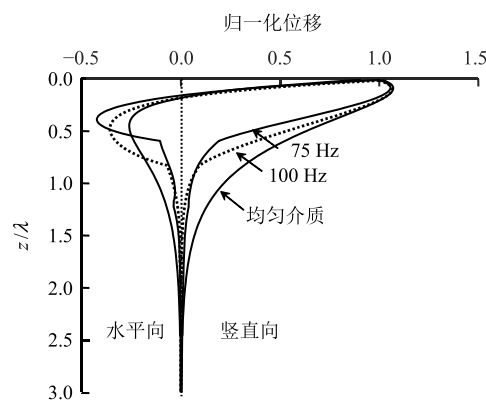


图 16 频散瑞利波与入射瑞利波位移比较

Fig.16 Comparison of displacements of the incident and the dispersive Rayleigh waves

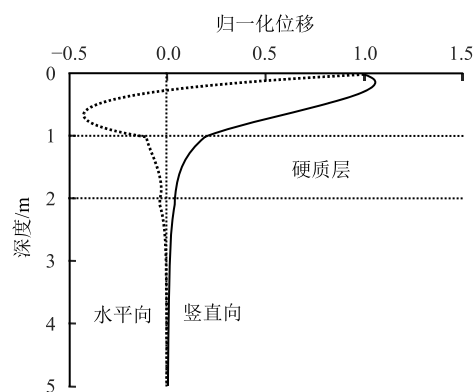


图 17 夹硬层介质中瑞利波位移

Fig.17 Displacements of Rayleigh waves in the homogenous half space sandwiched with the hard layer

4 表面波场谱扰动特征

由于瑞利波能量分布与波长有关, 埋深/波长比值是影响谱扰动的一个重要参数, 相对于波的运动学特性, 对波的动力学特性分析更有利于异质体探测。

对表面波场一点响应信号作一维傅里叶变换得到该点频谱, 由一组不同位置频谱得到偏移距(与振源中心距离)-频率域谱密度等值线云图, 由谱变化可建立异质体位置与偏移距关系。波长与深度具有长度量纲, 由均匀介质瑞利波速, 利用关系 $\lambda = c_R/f$ 将频率转换为表观波长, 得到偏移距-波长域谱密度等值线云图。距振源 0.4~24 m, 间隔为 0.4 m 的均匀半无限体表面质点速度响应谱密度等值线云图见图 18(a)。由图可以看出, 在近场(波场距振源

较近),直达体波会导致不同位置谱幅值分布略有不同;在远场,不同位置谱分布规律较一致。当半无限体出现软质体及硬质体,表面谱分别见图 18(b)、18(c)。为了便于分析谱扰动对应波长、偏移距与异质体水平位置、埋深之间的关系,谱图也给出了异质体对应范围,用虚线方框表示,右侧深度坐标网格与波长网格代表长度相同。与图 18(a)谱分布相比,图 18(b)、18(c)谱变化明显。虽然异质体前、后边界反射波会导致波场产生干涉条纹,但由于反射波能量相对入射波较弱,波场谱扰动主要特征不是干涉条纹。下面基于异质体区域波相对前行瑞利波位移结构差异分析谱扰动,由不同波长前行瑞利

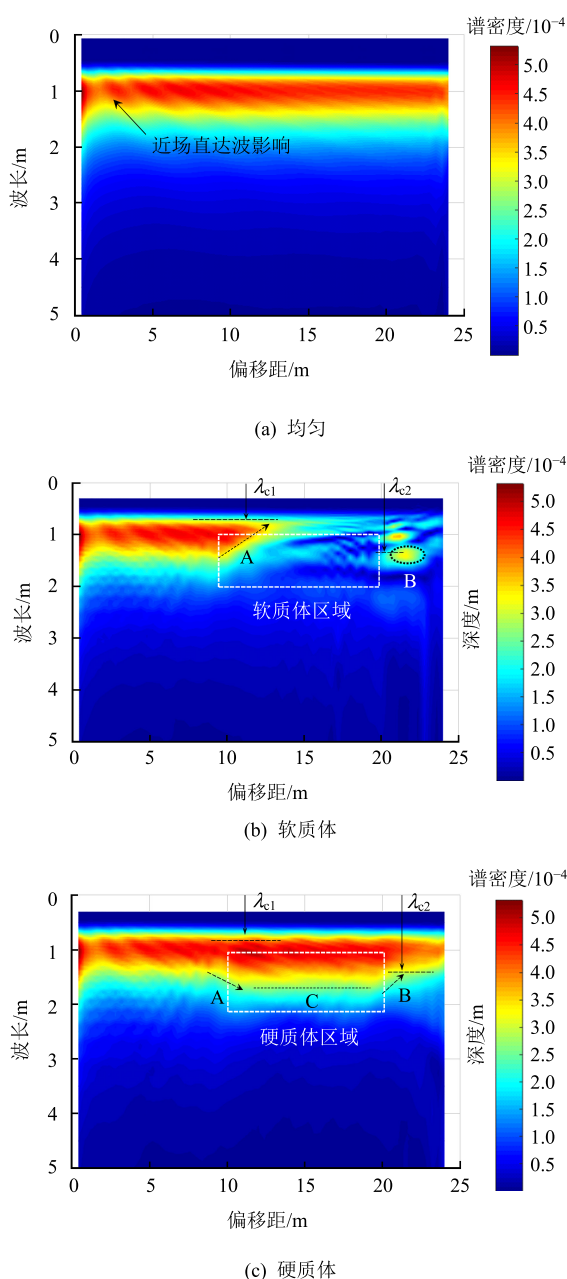


图 18 表面响应谱

Fig.18 Surface response spectra

波在异质体区域谱变化,建立在波长域谱扰动与异质体位置、埋深以及异质体类型(即软质体或硬质体)的关系。

4.1 软质体对谱扰动

第 3 节图 12、13 表明,软质体区域波位移结构不同于入射瑞利波,这种位移结构使软质体上方介质振动能量向软质体迁移,从而导致表面振动能量减少。在埋深深度内位移结构变化并不是在软质体前边界突然发生的,而是逐渐演变。这样,在前边界过渡区域,不同波长表面质点振动能量随传播距离呈渐进递减趋势,波长越小,递减越缓慢,见图 18(b)箭头 A 所示。由图 4(b)可以看出,软质体区域波传播至后边界,软质体区域波在后边界散射,部分能量向后方区域透射。透射波具有复杂的传播路径,软质体上方透射波会逐渐向后方介质下方扩散,而软质体下方透射波会逐渐向后方介质上部传播,这会导致一些频率成分在后方表面振动能量相对加强,见符号 B 所示区域。随着透射波传播距离增加,软质体后方介质等同于半无限体,透射波位移结构逐渐向均匀介质瑞利波位移结构过渡。

4.2 硬质体对谱扰动

图 16、17 所示的弱频散瑞利位移结构会导致硬质体深度范围的能量向硬质体上方介质迁移,这样,上方表面质点振动能量呈增加趋势,波长越大,增加越明显,谱密度分布随传播距离变化不大,见图 18(c)中虚线 C 标注区域。在前边界过渡区域,由于位移结构逐渐演变过程,振动能量随传播距离及波长呈渐进增加趋势,见图 18(c)箭头 A 所示。在硬质体后方,弱频散瑞利波逐步向均匀介质中瑞利波过渡,位移结构变化导致表面振动能量呈递减趋势,波长越小,递减越缓慢,见区域 B 所示。

4.3 剪切波速度差异影响

保持表 1 异质体几何参数、位置、密度及泊松比参数不变,将软质体的剪切波速由 80 m/s 减至 40 m/s,将硬质体波速由 200 m/s 增至 250 m/s。由图 10 可以看出,随着频率增加,夹软层半无限体中各阶模态瑞利波相速度渐进趋于软质体剪切波速度。这样,随着软质体与周围介质剪切波速度差异增加,软质体区域瑞利波展示更强的频散特性,同时瑞利波模态数量也会增加。图 19(a)为剪切波速为 40 m/s 的软质体上方竖直质点速度响应在无量纲波数-无量纲速度域谱。与图 9 比较可以看出,图 19(a)中谱有较多分支(簇),见符号 A、B、C、D 所示,这些分支与瑞利波不同模态对应。当软质体与周围介质剪切波速差异增加,不同模态瑞利波速度差异

也增加, 在软质体区域传播各模态逐渐分离。剪切波速为 250 m/s 的硬质体上方响应谱见图 19(b), 与图 14 相比, 可以看出两者变化趋势相近, 这表明虽然硬质体与周围介质波速差异增加, 但由于周围介质剪切波速不变, 弱频散瑞利波速上限不变。

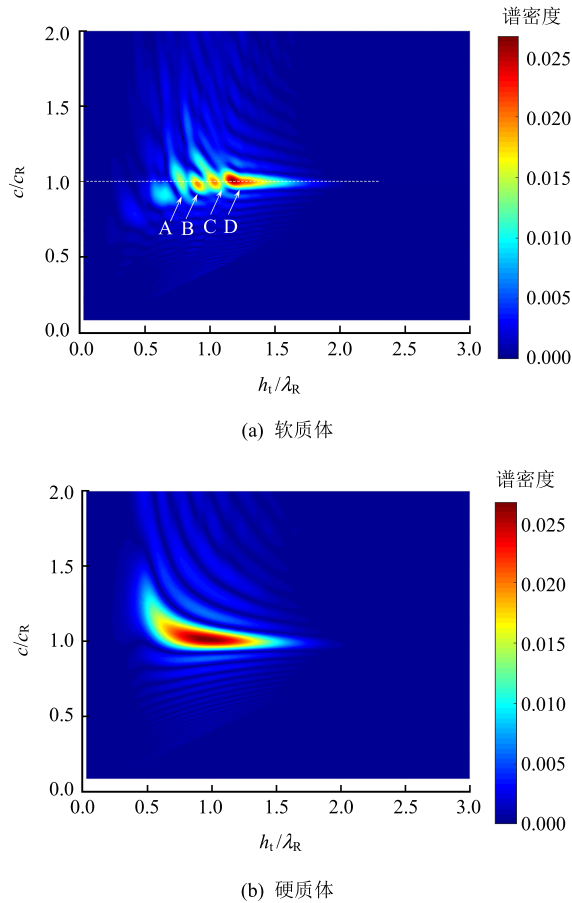


图 19 异质体上方表面响应谱

Fig.19 Surface response spectra over heterogeneities

异质体与周围介质剪切波速差异增加对谱变化影响见图 20。图 20(a)与图 18(b)比较可以看出, 剪切波速差异对软质体前边界附近区域谱密度随波长及传播距离递减变化规律(箭头 A 所示)影响较小。由第 3 节分析可知, 软质体上方能量向软质体迁移, 一些频率成分波在软质体前、后边界来回反射, 软质体起一种陷波作用。当剪切波速差异增加, 陷波作用加强, 后边界透射能量减小, 这些频率成分谱在边界后方变化不明显, 见图 20(a), 这样, 难以从谱相对变化判断后边界大致位置。

图 20(b)为硬质体与周围介质剪切波速差异增加后表面谱, 与图 18(c)比较, 虽然硬质体与周围介质剪切波速差异比增加了 25%, 但对谱变化影响并不明显, 仅硬质体上方波长较大谱密度略有增加, 即图 20(b)中虚线 C 比图 18(c)中虚线 C 对应的波长

略有增加。

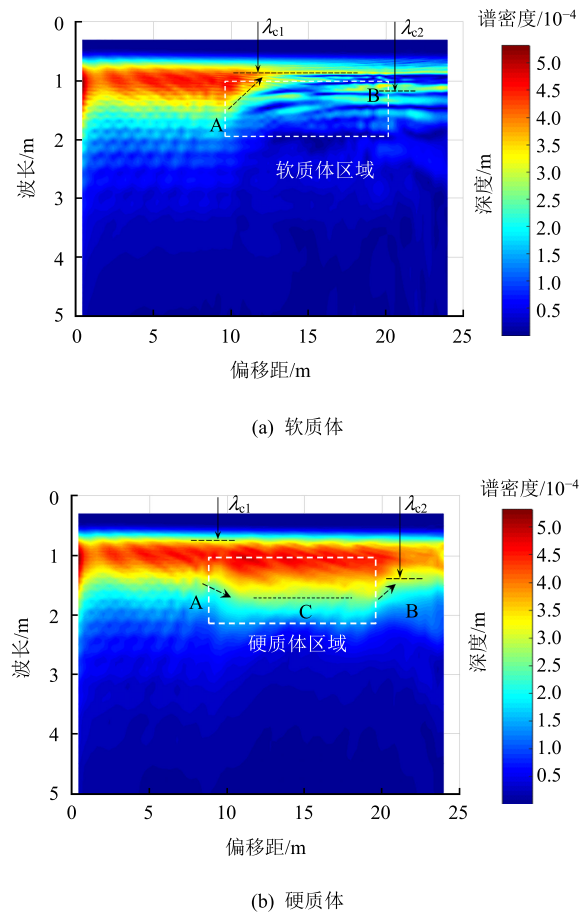


图 20 剪切波速差异对表面响应谱影响

Fig.20 Effects of shear wave velocity contrast between the heterogeneity and the surrounding medium on surface response spectra

以上分析表明, 软质体区域瑞利波具有较强的频散特性, 同时存在多阶模态瑞利波, 不同模态的瑞利波位移结构不同, 波速差异对方及后边界附近谱变化影响较大。而对硬质体, 上方由弱频散瑞利波主导, 波位移结构相对简单, 波速差异对方及后边界附近谱变化特征影响较小。

5 异质体埋深预测

由图 8 可知, 当瑞利波在 1.5 倍波长深度处相对振动位移很小, 这意味着, 当 $h_t/\lambda_R > 3/2$, 异质体对入射瑞利波谱幅值扰动较小。假设前边界过渡区域谱弱扰动对应的最大波长(特征波长)用符号 λ_{c1} 表示, 则有 $\lambda_{c1} < h_t$ 。

对于软质体, 波长大于埋深的波在软质体内及其下方仍有较大能量, 这些波在后边界过渡区域透射或向上绕射导致表面谱密度有所增强, 用 λ_{c2} 表示谱密度增强区域对应的最大波长, 则有 $h_t < \lambda_{c2}$ 。但

当波速差异导致软质体陷波作用明显,后边界附近谱扰动特征不明显时, λ_{c2} 确定较困难,见图 20(a),在此情形下,只能预测埋深下限,即 $h_t > \lambda_{c1}$ 。

对于硬质体,硬质体后方谱与软质体情形相反,由于波位移结构逐渐恢复至入射瑞利波结构,波长大于埋深波谱密度有所减弱,用 λ_{c2} 表示谱密度扰动对应最大波长,则有 $h_t < \lambda_{c2}$ 。

异质体埋深与 λ_{c1} 及 λ_{c2} 比较见图 18、20,由此可见,在一般情况下,可按 $\lambda_{c1} < h_t < \lambda_{c2}$ 预估异质体埋深。

6 结 论

(1) 均匀半无限体在表面源作用下,近表面波场由瑞利波主导。若在 1.5 倍波长深度内出现异质体,前行瑞利波位移结构改变,瑞利波发生散射。

(2) 当异质体在波传播方向水平长度远大于波长及埋深时,前、后边界近场对异质体区域波传播影响较小,异质体区域波具有以下一些特性:①软质体区域波场中瑞利波具有多模态及频散特性,上方能量向软质体内聚集,软质体起陷波作用;②对硬质体情形,存在一临界频率,超过该频率,上方波场仍由瑞利波主导,瑞利波具有弱频散特性,波能量向硬质体上方介质聚集。

(3) 波结构变化导致前边界波场过渡区域表面质点响应谱密度随波长及传播距离逐渐减小(对软质体)或增加(对硬质体)。当波长小于埋深,谱变化程度较小。在后边界附近,波长大于埋深波表面质点响应谱幅值有所加强(对软质体)或减弱(对硬质体)。在偏移距-波长域,由前、后边界附近表面质点响应谱扰动对应的偏移距可预估异质体位置,由特征波长可预估异质体埋深,由异质体上方表面响应谱密度减弱或增强可判断异质体类型。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ/T—2017 城市工程地球物理探测标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. CJJ/T—2017 Standard for urban engineering geophysical exploration[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [2] GRANDJEAN G, LEPAROUX D. The potential of seismic methods for detecting cavities and buried objects: experimentation at a test site[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2004, 56(2): 93-106.
- [3] GELIS C, LEPAROUX D, VIRIEUX J, et al. Numerical modeling of surface waves over shallow cavities[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2005, 10(2): 111-121.
- [4] NASSERI-MOGHADDAM A, CASCANTE G, PHILLIPS C, et al. Effects of underground cavities on Rayleigh waves—field and numerical experiments[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007, 27(4): 300-313.
- [5] TALLAVÓ F, CASCANTE G, PANDEY M. Experimental and numerical analysis of MASW tests for detection of buried timber trestles[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(1): 91-102.
- [6] 柴华友, 卢应发, 李祺, 等. 半无限体介质内异质体方位探测数值研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 188-192.
CHAI Hua-you, LU Ying-fa, LI Qi, et al. Numerical study on detection of heterogeneities in an half space[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 188-192.
- [7] XIA J H, NYQUIST J E, XU Y X, et al. Feasibility of detecting near-surface feature with Rayleigh-wave diffraction[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2007, 62(3): 244-253.
- [8] 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.
- [9] GANJI V, GUCUNSKI N, MAHER M H. Detection of underground obstacles by SASW method—numerical aspects[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(3): 212-219.
- [10] 柯文汇, 柴华友, 王亚军, 等. 浅部地下洞穴散射波对表观相速度影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(5): 771-777.
KE Wen-hui, CHAI Hua-you, WANG Ya-jun, et al. Effects of Rayleigh waves scattered at shallow cavities on apparent phase velocity[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(5): 771-777.
- [11] 柴华友, 柯文汇, 陈健, 等. 浅部地下洞穴散射波对波场扰动分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1473-1480.
CHAI Hua-you, KE Wen-hui, CHEN E J, et al. Disturbances of surface wave field due to wave scattering at shallow cavities[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(8): 1473-1480.
- [12] CHAI H Y, PHOON K K, GOH S H, et al. Some

- theoretical and numerical observations on scattering of Rayleigh waves in media containing shallow rectangular cavities[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2012, 83: 107-119.
- [13] VAN WIJK K. Multiple scattering of surface waves[D]. Colorado: Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines, 2003.
- [14] CAMPMAN X H, VAN WIJK K, SCALES J A, et al. Imaging and suppressing near-receiver scattered surface waves[J]. **Geophysics**, 2005, 70(2): 21-29.
- [15] CAMPMAN X H. Imaging and suppressing near-receiver scattered seismic waves[D]. Delft: Delft University of Technology, 2005.
- [16] RIYANTI C D. Modeling and inversion of scattered surface waves[D]. Delft: Delft University of Technology, 2005.
- [17] GRAFF K F. Wave motion in elastic solids[M]. Columbus, Ohio: The Ohio State University Press, 1975.
- [18] 柴华友, 柯文汇, 朱红西, 等. 层状半无限体浅部洞穴对表面响应谱扰动[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3126-3136.
- CHAI Hua-you, KE Wen-hui, ZHU Hong-xi, et al. Disturbances in surface response spectra caused by shallow cavities in layered half spaces[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(11): 3126-3136.
- [19] 罗斯 J L. 固体中的超声波[M]. 何存富, 吴斌, 王秀彦译. 北京: 科学出版社, 2005.
- ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. Translated by HE Cun-fu, WU Bin, WANG Xiu-yan. Beijing: Science Press, 2005.
- [20] 柴华友, 柯文汇, 朱红西. 岩土工程动测技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2021.
- CHAI Hua-you, KE Wen-hui, ZHU Hong-xi. Dynamic testing techniques in geotechnical engineering[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2021.
- [21] FOTI S. Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves[D]. Torino: Polytechnic University of Turin, 2000.
- [22] LU L Y, ZHANG B X. Analysis of dispersion curves of Rayleigh waves in the frequency-wavenumber domain[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2003, 41(4): 583-598.
- [23] CHAI H Y, CUI Y J, WEI C F. A parametric study of the apparent phase velocity of surface waves in layered media[J]. **Computers and Geotechnics**, 2012, 44: 176-184.
- [24] KAUSEL E, ROËSSET J M. Stiffness matrices for layered soils[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1981, 71(6): 1743-1746.
- [25] GUCUNSKI N, WOODS R D. Numerical simulation of the SASW test[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 1992, 11(4): 213-227.
- [26] CHAI H Y, LI T B, PHOON K K, et al. Spatial behaviour of Rayleigh waves in layered half-spaces under active surface sources[J]. **Geophysical Prospecting**, 2017, 65(4): 992-1003.
- [27] 柴华友, 吴慧明, 张电吉, 等. 弹性介质中的表面波理论及其在岩土工程中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- CHAI Hua-you, WU Hui-ming, ZHANG Dian-ji, et al. Theory of surface waves in elastic media and its application in geoenvironmental engineering[M]. Beijing: Science Press, 2008.