

文章编号: 1000-7598-(2008) 01-0087-07

表面波有效相速度近似分析方法

柴华友, 韦昌富, 白世伟

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 分层介质中瑞利面波有多个模态, 表面瞬态响应是多个模态响应的叠加。在近场, 面波模态响应传播速度随传播距离而变化; 在远场, 其趋于模态相速度。由分层介质表面两不同点响应互谱分析(SASW)得到的有效相速度并不对应于面波基阶模态相速度, 它与波场中高阶模态能量分配比例有关。有效相速度随传播距离而变化, 近场体波对有效相速度影响较大。对分层介质在简谐荷载下表面质点位移响应进行了互谱分析, 得到了有效相速度理论值, 通过理论值与测试值匹配分析可估算分层参数, 该分析方法考虑了近场及高阶面波模态对有效相速度的影响。

关 键 词: 表面波; 模态; 相速度; 有效相速度; 互谱分析

中图分类号: O 241; O 347.4

文献标识码: A

Approximate approach to analyzing effective velocity of surface waves

CHAI Hua-you, WEI Chang-fu, BAI Shi-wei

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The Rayleigh waves on layered systems are of multimode. The transient responses of the surface are comprised of ones of multimodes. In the near field where propagating distance is small relative to the wavelength, the propagating velocities of modal responses vary with the distance from the loading center, and approach to the phase velocities of modes in the far field. Affected by higher Rayleigh wave modes in the surface wave field, the effective phase velocity obtained by spectral analysis of surface waves (SASW) is not corresponding to the phase velocity of the fundamental mode. The effective phase velocity varies with the propagating distance. In the near field, the body waves have great influences on the effective phase velocity. The theoretical effective phase velocities can be got by spectral analysis of the discrete solution of surface displacement; the layer parameters can be evaluated by matching the measured phase velocity data with the theoretical ones. Influences of the near field as well as higher modes on the effective phase velocity are taken into consideration in this method.

Key words: surface waves; mode; phase velocity; effective phase velocity; SASW

1 引 言

瑞利面波各阶模态频散曲线与分层参数有紧密联系, 通过对模态频散曲线分析可以得到分层物理力学参数^[1-6]。在剖面刚度随深度递增的场地, 瑞利面波基阶模态影响是主要的, 无论是采用 $f-k$ 分析还是表面波互谱分析(SASW)方法, 由表面响应得到的频散数据与瑞利波基阶模态频散曲线接近^[2, 7, 8]。基于分层模型, 通过对面波基阶模态频散曲线分析, 可以得到剖面剪切波速^[9]。但当剖面刚度随深度反常变化时, 高阶模态影响增加, 波场不同频率区间参与的模态阶次及数量不同。SASW 是通过相位展开方法得到相速度, 高阶模态相位差计

算要利用低阶模态产生的相位折叠^[10], 只能得到所谓的“有效相速度”^[11]。由于相同频率不同模态的相速度是不同的, 在表面波场中, 随着传播距离增加, 这些模态会逐渐分离。从理论上讲, $f-k$ 域分析可以分离出主导表面波场的面波模态, 但在有限的测试空间, 难以分离出面波不同模态, 更不用说传播特性接近的模态^[12]。在大多数情况下, 基于谱极值的 $f-k$ 分析也只能得到各模态叠加后能量团的传播速度, $f-k$ 分析得到速度随频率变化曲线与 SASW 得到的相速度曲线关联程度很高^[7, 8, 13]。除了模态难分离外, 近场对 SASW 分析法及 $f-k$ 分析法有较大影响, 具体表现为: (1) 表面波场中体波的相对能量较大, 利用表面响应得到的有效相速度

收稿日期: 2007-07-10

作者简介: 柴华友, 男, 1965 年生, 博士, 副研究员, 从事波动理论分析、数值计算及测试工作。E-mail: chy_rsm@hotmail.com; chy_rsm@sina.com

不完全对应于面波相速度；(2) 面波模态响应传播速度不同于模态相速度，这样，即使表面响应只有一个面波模态响应，在近场也无法得到模态相速度。基于以上分析，由表面响应信号得到的相速度与分层介质中面波模态频散曲线有较大的差别，建立有效相速度与剖面参数间的关系可以推动基于互谱分析及 $f-k$ 分析的瞬态表面波测试方法在工程中应用。

在平稳波场中，Tokimatsu 等^[14]给出竖直及水平向有效相速度与各阶瑞利面波模态相速度、水平、竖直向质点速度比等参数间的关系。然而，在近场，表面波场不是平稳的，有效相速度随传播距离而变化。为了消除近场影响，测试相速度数据需进行筛选。由于场地分层数量、厚度及剖面参数不同，波场中起主导作用的面波模态阶次、数量不同，直达体波能量大小也不同，很难有统一的筛选准则^[15]，部分筛选准则对测试要求苛刻，场地范围难以满足。本文尝试考虑近场及高阶模态影响的有效相速度分析方法。

为了便于区分，本文模态相速度系指在自由状态下，瑞利波模态（波阵面为平面或柱面状）在分层介质中的传播速度；在动荷载下，表面响应为多个模态响应叠加，根据表面响应计算的相速度为有效相速度。

2 简谐荷载波场分析

将半无限水平分层介质按一定要求细化成 n 个薄层^[2]，刚度矩阵求解问题可简化成广义特征问题，利用广义特征值分析可以得到距荷载中心 $r(r > R)$ 处 P-SV 波水平向及竖直向表面质点位移响应离散解^[16]（先不考虑时间项 $\exp(i\omega t)$ ）：

$$\begin{cases} u^1(r) \\ w^1(r) \end{cases} = -\frac{i q R \pi}{2} \begin{cases} \sum_{l=1}^N \phi_u^{ll} \phi_w^{ll} J_1(k_l R) H_1^{(2)}(k_l r) / k_l \\ \sum_{l=1}^N \phi_w^{ll} \phi_w^{ll} J_1(k_l R) H_0^{(2)}(k_l r) / k_l \end{cases} \quad (1)$$

式中： R 为荷载作用半径； q 为幅值； N 为薄层总自由度数量 ($N = 2n$)； k_l ， ϕ_u^{ll} ， ϕ_w^{ll} 分别为第 l 阶特征值、归一化之后水平向、竖直向特征向量在分层系统自由表面分量（这里特征向量意义与结构有限元中振型相同），部分特征值、特征向量与瑞利波模态波数、位移对应。所有振型的响应叠加后，就可以得到简谐荷载下表面响应（同结构有限元中振型叠加法）； J_1 为 1 阶贝塞尔函数； $H_0^{(2)}$ ， $H_1^{(2)}$ 分别为 0 阶、1 阶第 2 类 Hankel 函数。利用式 (1) 可以研究近场、远场波动特点。

式 (1) 中第 2 类 Hankel 函数可写为

$$H_m^{(2)}(x) = J_m(x) - i Y_m(x) \quad (2)$$

式中： $J_m(x)$ ， $Y_m(x)$ 分别为 m 阶第 1 类、第 2 类贝塞尔函数。当 x 较大时， $J_m(x)$ ， $Y_m(x)$ 的近似式为^[17]

$$J_m(x) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos\left(x - \frac{\pi}{4} - \frac{m\pi}{2}\right) \quad (3)$$

$$Y_m(x) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \sin\left(x - \frac{\pi}{4} - \frac{m\pi}{2}\right) \quad (4)$$

当 $m = 0, 1$ ， $J_0(x)$ ， $J_1(x)$ ， $Y_0(x)$ ， $Y_1(x)$ 精确值与近似式比较见图 1。

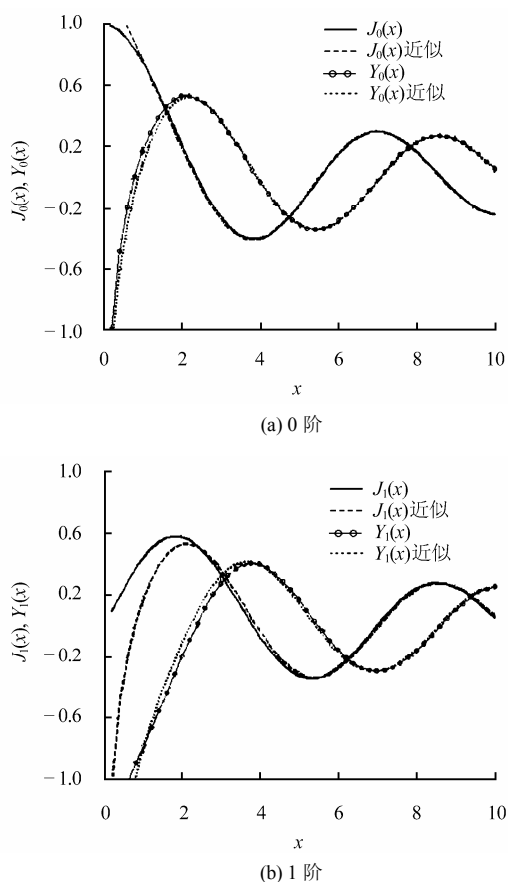


图 1 0 阶和 1 阶 Bessel 函数及其近似表达式结果比较
Fig.1 Comparison of the zeroth order and the first order Bessel functions and their approximate expressions

从图 1 可以看出，对 0 阶第 2 类 Hankel 函数，当 $x \geq 2$ ，式 (3)、式 (4) 有很高近似精度。这样，当 $k_l r \geq 2$ ，即当 $r \geq \lambda_l / \pi \approx \lambda_l / 3$ ，式 (1) 第 l 阶振型的表面竖向位移可近似为

$$w_l^1(r) \approx -\frac{i q R \pi}{2} \sqrt{\frac{2}{\pi k_l r}} (\phi_w^{ll})^2 J_1(k_l R) \cdot \left[\cos\left(k_l r - \frac{\pi}{4}\right) - i \sin\left(k_l r - \frac{\pi}{4}\right) \right] / k_l \quad (5)$$

对1阶第2类Hankel函数,当 $x \geq 5$,式(3)、式(4)近似精度较高。当 $k_l r \geq 5$,也即当 $r \geq 5\lambda_l/(2\pi) \approx \lambda_l$,第 l 阶振型的表面水平位移响应可近似为

$$u_l^1(r) \approx -\frac{i q R \pi}{2} \sqrt{\frac{2}{\pi k_l r}} \phi_u^{ll} \phi_w^{ll} J_1(k_l R) \cdot \left[\cos(k_l r - \frac{3\pi}{4}) - i \sin(k_l r - \frac{3\pi}{4}) \right] / k_l \quad (6)$$

式(5)、式(6)可写成指数形式:

$$w_l^1(r) = \frac{q R \pi}{2} \sqrt{\frac{2}{\pi k_l r}} (\phi_w^{ll})^2 J_1(k_l R) \cdot \exp \left[-i \left(k_l r + \frac{\pi}{4} \right) \right] / k_l, \quad r \geq \lambda_l / 3 \quad (7)$$

$$u_l^1(r) = \frac{q R \pi}{2} \sqrt{\frac{2}{\pi k_l r}} \phi_u^{ll} \phi_w^{ll} J_1(k_l R) \cdot \exp \left[-i \left(k_l r + \frac{3\pi}{4} \right) \right] / k_l, \quad r \geq \lambda_l \quad (8)$$

假设与第 l 阶振型对应的是面波模态,式(1)、式(7)、式(8)与时间项 $\exp(i\omega t)$ 结合后可知,在近场(指传播距离相对波长较小),模态水平向及竖直向响应传播速度随距离变化,在远场接近模态速度 c_l ($c_l = \omega/k_l$)。

在半无限弹性空间,瑞利波仅有一个模态,且其相速度与介质剪切波速、泊松比有关^[2],不同位置有效相速度(由表面质点位移响应计算得到)与模态相速度比较^[18]见图2。由图可以看出,近场表面波相速度随传播距离、泊松比变化较大。随泊松比增加,P波的波速、波长增加,衰减相对变慢^[19],波场中瑞利面波能量分配比例减少,体波对表面波相速度影响增加;随着传播距离的增加,体波几何衰减比瑞利波快,表面波场以瑞利波为主,传播速度趋于模态相速度(速度比值趋于1)。

3 表面波有效相速度计算

3.1 平稳波场有效相速度

对功率谱估计不随时间、位置变化的平稳波场,若表面波场中各个面波模态传播互不干扰,考虑高阶面波模态影响,Aki给出了平均有效相速度 c 的表达式^[14]:

$$\cos(2\pi f D / c) = \sum_{l=1}^N P_l \cos(2\pi f D / c_l) / \sum_{l=1}^N P_l \quad (9)$$

式中: c_l 为第 l 阶模态相速度; D 为两测点距; P_l 为第 l 阶模态功率谱密度函数。由互谱分析知道 $c = 2\pi f D / \varphi$, φ 为绝对相位差。这样, $\cos(2\pi f D / c_l)$ 为

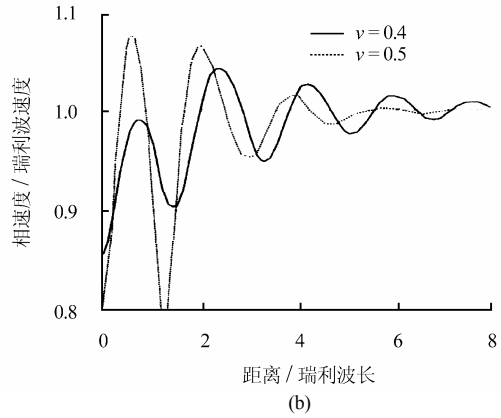
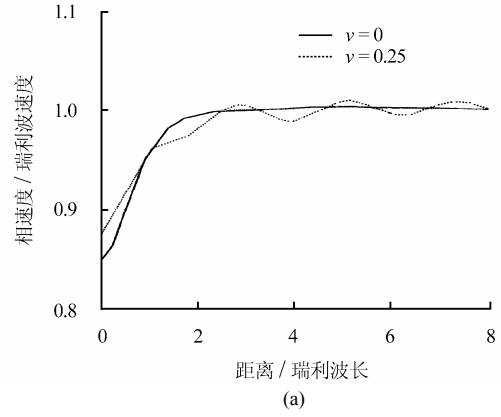


图2 不同泊松比下相速度/瑞利波速随距离/瑞利波长变化
Fig.2 Variation of the ratio of phase velocity to Rayleigh wave velocity with the ratio of distance to Rayleigh wavelength for different Poisson's ratios

第 l 阶模态在测点间相位差余弦。式(9)为 N 个模态响应叠加后,表面波在测点间相位差余弦与各阶模态在测点间相位差余弦及其功率谱加权平均有关。利用传递矩阵方法得到波场中 N 个面波模态位移解,然后利用式(9)可得到 N 个模态叠加后竖直向及水平向面波有效相速度^[14]。传递矩阵快速算法不适合复模量运算^[3],无法考虑波的阻尼衰减。刚度矩阵方法可进行复数运算,式(1)、式(7)、式(8)中复特征值及特征值向量的虚部代表阻尼影响^[2]。在远场,由式(7)、(8)可知,第 l 阶模态水平向位移的振幅 $\tilde{A}_u^l$ 和竖直向位移的振幅 $\tilde{A}_w^l$ 分别为

$$\tilde{A}_u^l = \left| \frac{q R \pi}{2} \phi_u^{ll} \phi_w^{ll} J_1(k_l R) \sqrt{\frac{2}{\pi k_l^3 r}} \right| \quad (10)$$

$$\tilde{A}_w^l = \left| \frac{q R \pi}{2} (\phi_w^{ll})^2 J_1(k_l R) \sqrt{\frac{2}{\pi k_l^3 r}} \right| \quad (11)$$

式中: $| \cdot |$ 为复数模。

或写成:

$$\tilde{A}_u^l = \left| \frac{q R \pi}{2} \phi_u^{ll} \phi_w^{ll} J_1(\omega R / c_l) \sqrt{\frac{2 c_l^3}{\pi \omega^3 r}} \right| \quad (12)$$

$$\tilde{A}_w^l = \left| \frac{qR\pi}{2} (\phi_w^l)^2 J_1(\omega R/c_l) \sqrt{\frac{2c_l^3}{\pi\omega^3 r}} \right| \quad (13)$$

功率谱与振幅是平方关系, 利用式 (9) 得

$$c_w = \frac{2\pi f D}{\cos^{-1} \left[\frac{\sum_{l=1}^N |(\phi_w^l)^2 J_1(\omega R/c_l) c_l^{3/2}|^2 \cos(2\pi f D/c_l)}{\sum_{l=1}^N |(\phi_w^l)^2 J_1(\omega R/c_l) c_l^{3/2}|^2} \right]} \quad (14)$$

$$c_u = \frac{2\pi f D}{\cos^{-1} \left[\frac{\sum_{l=1}^N |\phi_u^l \phi_w^l J_1(\omega R/c_l) c_l^{3/2}|^2 \cos(2\pi f D/c_l)}{\sum_{l=1}^N |\phi_u^l \phi_w^l J_1(\omega R/c_l) c_l^{3/2}|^2} \right]} \quad (15)$$

式 (14)、式 (15) 是基于 Aki 表达式, 利用刚度矩阵方法得到的平稳波场有效相速度。

3.2 瞬态波场有效相速度

表面波在近场是非平稳的, 为了考虑这些因素及实测分析方法 (表面波互谱分析方法) 对结果的影响, 对两测点竖直向表面质点位移 (或速度) 作互谱分析, 由式 (1) 得

$$w_{r_1 r_2} = w(r_1) \bar{w}(r_2) = \frac{(\frac{qR\pi}{2})^2 \sum_{l=1}^N (\phi_w^l)^2 J_1(k_l R) H_0^{(2)}(k_l r_1) / k_l}{\sum_{l=1}^N (\phi_w^l)^2 J_1(k_l R) H_0^{(2)}(k_l r_2) / k_l} \quad (16)$$

式中: 上横线 “—” 表示共轭复数, $\bar{w}(r_2)$ 为共轭的竖向位移。

或者写成:

$$w(r_1) \bar{w}(r_2) = \sqrt{\text{Re}^2(w_{r_1 r_2}) + \text{Im}^2(w_{r_1 r_2})} \exp(i\theta_w) \quad (17)$$

式中: Re , Im 分别表示实部、虚部。根据实部、虚部所在象限可以得到范围在 $(-\pi \sim +\pi)$ 之间的折叠相位差 θ_w 。

相位差 θ_w 满足:

$$\tan \theta_w = \text{Im}(w_{r_1 r_2}) / \text{Re}(w_{r_1 r_2}) \quad (18)$$

折叠相位差展开后得到绝对相位差 φ_w , 根据相位差及测点距得到竖直向有效相速度:

$$c_w = 2\pi f (r_2 - r_1) / \varphi_w \quad (19)$$

上述方法考虑了介质阻尼及测点位置对有效相速度的影响, 与实测分析过程相同。

在一般岩土工程实践中, 表面波测试最大频率在 200 Hz 以下, 面波模态数量有限, 如果忽略体波的影响 (由测试波列中体波走时与瑞利波走时的差

异, 对体波进行切除, 可降低体波影响), 剔除式 (16) 与面波模态无关的振型响应, 则计算量会大大减少。在仅考虑面波模态情况下, 当 $k_m r$ 较大时 ($m=1, 2, 3, \dots, M$, M 为面波模态的数量), 式 (16) 可简化为

$$w_{r_1 r_2} = w(r_1) \bar{w}(r_2) = \left(\frac{qR\pi}{2} \right)^2 \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{r_1 r_2}} \sum_{m=1}^M A_w^m \exp(-ik_m r_1) \sum_{m=1}^M \bar{A}_w^m \exp(ik_m r_2) \quad (20)$$

式中: $A_w^m = (\phi_w^{1m})^2 J_1(k_m R) k_m^{-3/2}$ 。

式 (20) 可改写为

$$w_{r_1 r_2} = \left(\frac{qR\pi}{2} \right)^2 \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{r_1 r_2}} \sum_{m=1}^M |A_w^m| \exp(i\theta_w^m) \exp(-ik_m r_1) \cdot \sum_{m=1}^M |A_w^m| \exp(-i\theta_w^m) \exp(ik_m r_2) \quad (21)$$

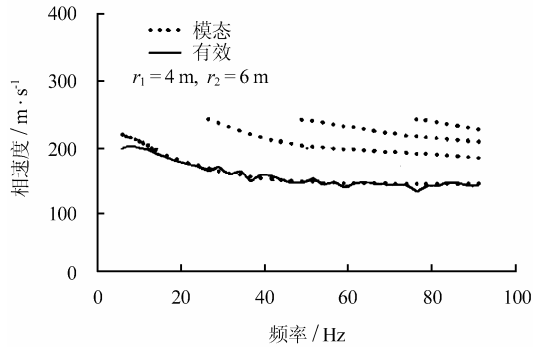
式中: $\tan \theta_w^m = \text{Im}(A_w^m) / \text{Re}(A_w^m)$ 。

岩土场地剖面刚度大致有两种情形: (1) 随着深度递增; (2) 随着深度反常变化。为了检验上述方法, 假设两种不同情形分层参数, 如表 1 所示。取振源作用面半径 $R=0.1$ m, 由式 (16) ~ (19) 得到距振源中心 $r_1=4$ m, $r_2=6$ m 两点间理论有效相速度。若忽略体波的影响, 仅考虑面波模态, 理论值与前几阶模态频散曲线比较见图 3。由图可以看出, 对情形 I, 面波基阶模态在波场占主导地位, SASW 计算的有效相速度接近基阶模态频散曲线; 对情形 II, 随着频率增加, 高阶模态影响增加, 有效相速度随之变化。

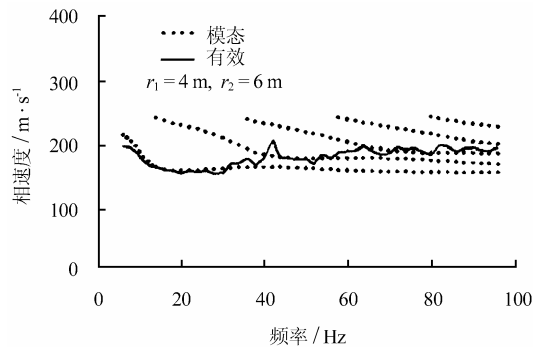
利用上述方法得到的有效相速度与式 (14) 得到的结果比较见图 4。可以看出, 在传播距离相对波长较大情况下 (远场), 用 SASW 方法得到的有效相速度与 Aki 法结果接近, 这是由于在远场, 模态响应传播速度接近模态相速度, 不随距离变化, 波场近似看作平稳的。随着波长增加, 波场是非平稳的, 两者结果差别增大。

表 1 模型参数
Table 1 Parameters of models

分层状况	层厚 / m	剪切波速 / m · s ⁻¹	密度 / g · cm ⁻³	阻尼比	泊松比
情形 I	2.0	150	1.90	0.025	0.4
	4.0	200	1.90	0.015	0.35
	∞	250	1.90	0.010	0.3
情形 II	2.0	200	1.90	0.015	0.35
	4.0	150	1.90	0.025	0.4
	∞	250	1.90	0.010	0.3



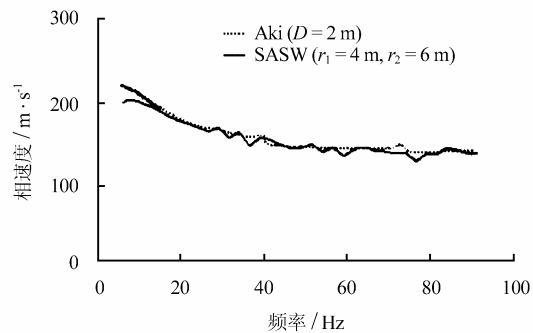
(a) 情形 I



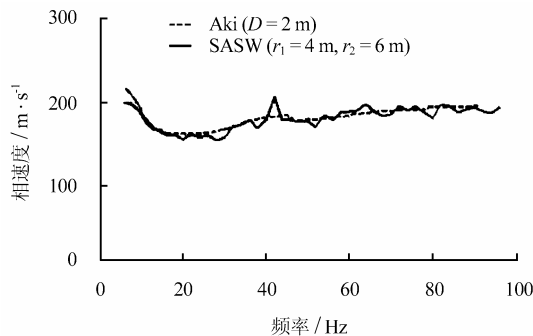
(b) 情形 II

图 3 有效相速度曲线与模态频散曲线比较

Fig.3 Comparison of the effective phase velocity curve and dispersion curves of modes



(a) 情形 I



(b) 情形 II

图 4 Aki 法有效相速度与 SASW 法结果比较

Fig.4 Comparison of the effective phase velocity curves calculated by Aki and SASW methods

4 数值模拟计算

时间步长、网格尺寸及阻尼等有关参数对有限元模拟面波响应的影响, Zerwer 等^[20]进行了详细的研究。Ryden 等^[21]用有限元方法模拟路面响应。结果表明: 只要时间步长、网格尺寸满足一定条件, 模拟精度可以满足分析要求。下面用 ANSYS 数值模拟分层介质表面距振源中心 10 m 范围内各点质点速度响应, 用 SASW 法分析表面质点响应得到 15~100 Hz 频率范围相速度数据。轴对称模型尺寸为 30 m×20 m, 自由边界, 模型物理力学参数见表 2。由于高频面波波长小, 影响深度浅, 因此, 采用变尺寸网格, 接近表面的网格较小, 随深度增加网格尺寸增大。根据有效相速度在高频趋于表层介质瑞利波速这一特点^[7, 8], 算例 I 和算例 II 最小波长分别为 $\lambda_{\min} = c/f_{\max} = 150/100 = 1.5$ m, $\lambda_{\min} = c/f_{\max} = 200/100 = 2$ m, 取最小网格尺寸为 0.1 m, 保证一个波长范围内至少有 10 个单元, 时间步长为 5×10^{-5} s。模型底面及侧面边界距表面计算点较远。这样, 波经几何及阻尼衰减后, 在边界散射能量微弱, 同时由于散射波时间延迟增大, 保证在计算时间窗口内散射波不会影响, 即使在计算时间窗口内, 出现散射波干扰, 也易于切除。根据表面波列中直达波与瑞利波走时差别, 切除部分直达波, 降低直达波影响, 这样理论计算时只选取面波模态, 提高计算效率。对距振源中心 5 m 和 10 m 处有限元计算的质点速度响应作互谱分析, 得到有效相速度 (称为计算值)。根据分层参数, 按式 (16)~(19) 得到理论有效相速度。有效相速度计算值与理论值比较见图 5, 两者匹配程度差异可能是由数值模拟计算误差造成的, 但从两者整体匹配程度及高频、低频渐近趋势一致性可以看出, 用式 (16)~(19) 可以对测试计算值进行分析。

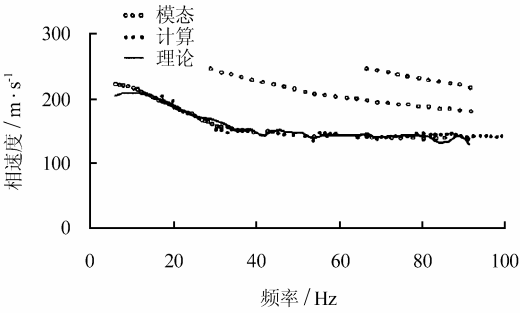
5 场地测试初步分析

荆东高速公路某段路基有 2 m 左右厚度填土, 并经初步碾压。面波两测点距振源分别为 2, 8 m, 测点间表面波有效相速度计算值如图 6 所示, 最大探测波长约为 15 m。根据勘探报告, 波长深度内场地大致分为 3 层: 填土、软塑黏土、硬塑黏土, 探测深度以下场地分层对有效相速度影响较小, 与第 3 层结合近似作为底层。由于缺乏其他波速测试资料 (如跨孔法、单孔法等), 这里根据勘探报告分层厚度及土性波速取值范围^[22], 在波速取值范围试凑参数使有效相速度计算值与理论值达到较好匹配, 分层参数取值见表 3。

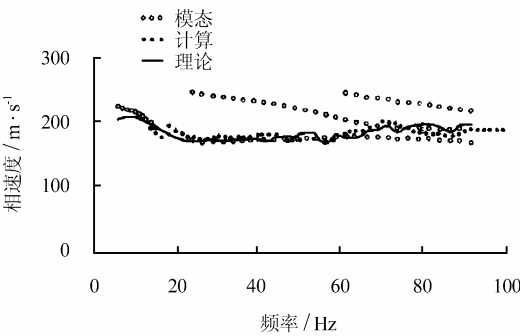
表 2 模型参数

Table 2 Parameters of models

算例	层厚 / m	剪切波速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	α 阻尼 / s^{-1}	β 阻尼 / 10^5s	泊松比	阻尼比
算例 I	2.0	150	1.90	5.0	10	0.3	0.02
	2.0	200	1.90	5.0	5	0.3	0.015
	16.0	250	1.90	5.0	5	0.3	0.01
算例 II	2.0	200	1.90	5.0	5	0.3	0.015
	2.0	150	1.90	5.0	10	0.3	0.02
	16.0	250	1.90	5.0	5	0.3	0.01



(a) 算例 I



(b) 算例 II

图 5 有效相速度计算值与理论值比较

Fig.5 Comparison of the calculated and the theoretical effective phase velocities

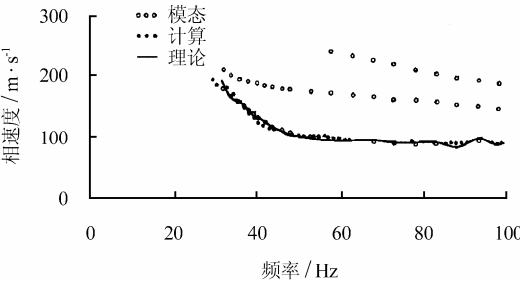


图 6 路基系统有效相速度计算值与理论值比较

Fig.6 Comparison of the calculated and the theoretical phase velocities for a road system

表 3 路基分层参数

Table 3 Parameters for a road system

层厚 / m	剪切波速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	阻尼比	泊松比
2.0	95	1.90	0.012 5	0.4
2.0	190	1.90	0.010 0	0.35
底层	250	1.90	0.010 0	0.35

沌口国家某储粮基地, 填土厚 5~6 m, 局部夹杂淤泥, 下部是厚度约 10 m 的老黏土, 用强夯方法来改善基础浅部。在强夯后场地进行表面波测试, 两测点距振源分别为 10, 20 m。根据勘探报告, 将场地粗略地划分成 3 层, 在土性波速取值范围调整参数使有效相速度计算值与理论值达到匹配, 分层参数取值见表 4, 计算值与理论值比较见图 7。

表 4 强夯地基分层参数

Table 4 Parameters for a weight compacted foundation

层厚 / m	剪切波速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	阻尼比	泊松比
3.5	165	1.90	0.010	0.35
2.0	100	1.70	0.015	0.40
底层	230	1.90	0.010	0.35

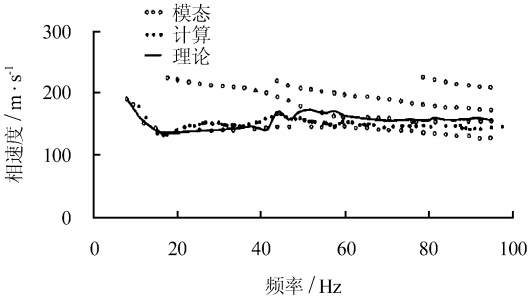


图 7 强夯场地有效相速度计算值与理论值比较

Fig.7 Comparison of the calculated and the theoretical phase velocities for a weight compacted foundation

虽然缺乏跨孔法、单孔法等其他波速测试资料验证表 3、表 4 数据可信度, 但分析采用勘探分层, 试凑波速也在土性合理取值范围内, 初步说明用式 (16)~(19) 分析测试计算值是可行性。

6 结 论

(1) 分层介质中面波有多个模态, 表面响应是各模态响应叠加。在近场, 模态响应传播速度随传播距离变化; 在远场, 其趋于模态相速度。

(2) 由表面响应得到的有效相速度与波场中各阶面波模态能量分配有关, 在剖面刚度随深度反常变化场地, 高阶模态的影响增加。

(3) 在近场, 体波能量较大, 体波对有效相速度的影响不可忽视。

(4) 利用刚度矩阵方法得到分层介质表面质点位移响应; 对位移响应作互谱分析, 得到理论有效相速度。由实测响应计算的有效相速度与理论值匹配分析, 可以确定剖面参数。该方法考虑了近场及高阶面波模态影响, 即考虑了测点位置的影响, 避免对测试数据进行筛选的麻烦。由于理论计算与测

试数据处理都采用互谱分析, 因而该分析可以更好地模拟测试分析, 避免了分析方法不同导致的误差。

参考文献

- [1] HASKELL N A. The dispersion of surface waves on multilayered media[J]. **Bulletin of the seismological Society of America**, 1953, 43: 17—34.
- [2] 柴华友, 白世伟, 刘明贵, 等. 瑞利波特性刚度矩阵分析方法[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 209—213.
CHAI Hua-you, BAI Shi-wei, LIU Ming-Gui, et al. Analysis of behaviours of Rayleigh waves by stiffness matrix method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 209—213.
- [3] 凡友华. 层状介质中瑞利面波频散曲线的正反演研究[博士学位论文 D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
- [4] XIA J H, MILLER R D, PARK C B, et al. Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2003, 52: 45—57.
- [5] GUCUNSKI N, WOODS R D. Inversion of Rayleigh wave dispersion curve for SASW test[C]//Proceedings of 5th Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Karlsruhe: Computational Mechanics Publications, 1991: 127—138.
- [6] 鲁来玉, 张碧星, 汪承灏. 基于瑞利波高阶模式反演的实验研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1 082—1 091.
LU Lai-yu, ZHANG Bi-xing, WANG Cheng-hu. Experiment and inversion studies on Rayleigh wave considering higher modes[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2006, 49 (4): 1 082—1 091.
- [7] FOTI S. Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves[D]. Torino: Politecnico di Torino, 2000.
- [8] STROBBIA C. Surface wave methods —acquisition, processing and inversion[D]. Torino: Politecnico di Torino, 2003.
- [9] YUAN D, NAZARIAN S. Automated surface wave method, inversion technique[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1993, 119(7): 1 112—1 126.
- [10] ALHUNAIDI M O. Insight on the SASW nondestructive testing[J]. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 1993, 20: 940—950.
- [11] GUCUNSKI N, WOODS R D. Numerical simulation of the SASW test[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 1992, 11(4): 213—227.
- [12] ALHUNAIDI M O. Nondestructive evaluation of pavements using spectral analysis of surface waves in frequency wave-number domain[J]. **Journal of Nondestructive Evaluation**, 1996, 15(2): 71—82.
- [13] LU Lai-yu, ZHANG Bi-xing. Analysis of dispersion curves of Rayleigh waves in the frequency-wavenumber domain[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2004, 41: 583—598.
- [14] TOKIMATSU K, TAMURA, KOJIMA H. Effects of multiple modes on Rayleigh wave dispersion characteristic[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1992, 118(10): 1 529—1 543.
- [15] KIM D S, PARK H C. Determination of dispersive phase velocities for SASW method using harmonic wavelet transform[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2002, 22: 675—684.
- [16] KAUSEL E, PEEK R. Dynamic loads in the interior of a layered stratum: an explicit solution[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1982, 72(5): 1 459—1 481.
- [17] 杨应辰, 徐明聪. 数学物理方程与特殊函数(第二版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [18] FOINQUINOS R, ROËSSET J M. Elastic layered half-space subjected to dynamic surface loads. Wave Motion in Earthquake Engineering[M]. Southampton UK: WIT Press, 2001.
- [19] CHEN L Z, ZHU J Y, YAN X S, et al. On arrangement of source and receivers in SASW testing[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2004, 24: 389—396.
- [20] ZERWER A, CASCANTE G, HUTCHINSON J. Parameter estimation in finite element simulations of Rayleigh waves[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128(3): 250—261.
- [21] RYDEN N, PARK C B, ULRIKSEN P, et al. Multimodal approach to seismic pavement testing[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004, 130(6): 636—645.
- [22] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.