

横观各向同性饱和沉积谷地对平面 qP1 波的散射*

巴振宁^{1,2}, 张恩玮^{1,2}, 梁建文^{1,2}, 吴孟桃^{1,2}

(1. 天津大学 土木工程系, 天津 300350; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350)

摘要: 基于 Biot 流体饱和多孔介质模型, 采用间接边界元方法 (IBEM) 在频域内求解了横观各向同性 (TI) 饱和沉积谷地对平面 qP1 波的散射问题。通过与各向同性饱和结果的对比验证了方法的正确性, 开展了不同情况的数值计算分析, 重点研究了沉积 TI 性质对地表动力响应的影响。结果表明: 沉积 TI 性质对地表位移的幅值及其空间分布均有显著影响, 且影响程度与 qP1 波的人射角度、入射频率和观测点位置有关。考虑沉积的 TI 性质可更为精确地模拟沉积谷地对平面 qP1 波的散射。

关键词: 沉积谷地; 横观各向同性饱和; 平面 qP1 波; 地震波散射; 间接边界元法

中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2019)04-0474-09

0 引言

沉积谷地是十分常见的局部场地之一, 其对地震动的显著放大作用已在多次地震观测和震害调查中被证实。如 1976 年唐山 $M_s 7.8$ 地震中, 天津古河道及新近沉积土内外两侧建筑物破坏情况更为严重 (首培杰等, 2009); 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震中, 汉源县冲积河谷出现了整体 VI 度区内的 VIII 度震害异常区 (张建毅等, 2012)。近年来, 沉积谷地对地震动的影响一直是地震工程、地震学和地球物理等诸多领域中备受瞩目的研究课题。

国内外学者在沉积地形地震效应方面已开展了大量研究, 其研究方法总体上可分为以波函数展开法为主的解析法和包括域离散型方法、边界型方法和混合方法等在内的数值方法。对于弹性介质的研究始于 Trifunac (1971) 采用波函数展开法解决均匀半空间中半圆形沉积谷地对平面 SH 波散射问题; 随后 Wong 和 Trifunac (1974) 以及 Yuan 和 Liao (1995) 进一步给出了 SH 波入射半椭圆形沉积的地表位移动力响应解析解; Dravinski (1983) 采用间接边界积分方法, 研究了均匀半空间中任意形状二维沉积盆地在平面 SH 波作用时的

地震响应问题, 指出地表位移依赖于入射波类型、入射角、入射频率和场地条件等因素; Dravinski 和 Mossessian (1987) 用同一方法进一步研究了 P 波、SV 波和 Rayleigh 波作用的情况; 梁建文和巴振宁 (2007)、巴振宁和梁建文 (2011) 采用间接边界元法研究了入射平面 SH 和 SV 波在层状半空间中沉积谷地周围的散射问题, 表明入射波在层状半空间中沉积谷地周围的散射和均匀半空间中情况有着本质区别; 巴振宁等 (2017) 采用“分区契合”技术, 发展了一种多域间接边界元方法, 研究了层状半空间中多层沉积层序对 SH 波入射下地表位移的影响; Sanchez - Sesma 和 Luzon (1995)、Liang 等 (2008)、Chaillat 等 (2010)、Lee (2013)、Liu 等 (2015)、刘中宪等 (2017)、Fajardo 等 (2017) 采用各种数值方法研究了三维沉积盆地对地震波的散射, 获得了许多有益成果。对于饱和介质, 李伟华和赵成刚 (2003, 2004) 利用波函数展开法给出了饱和半空间中圆弧形沉积河谷对平面 P 和 SV 波的散射解析解; 赵成刚和韩铮 (2007) 进一步给出了平面 Rayleigh 波入射饱和沉积的地表位移动力响应解析解; 梁建文和刘中宪 (2010) 利用间接边界积分方程法求解了平面 SV 波在饱和半空间中任意形状沉积谷地周围的二维散射问题; 刘中宪和梁建文 (2013) 进一

* 收稿日期: 2019-06-30.

基金项目: 国家自然科学基金—基于横观各向同性层状介质模型的复杂场地地震效应研究 (51578373) 资助.

步研究了层状饱和半空间中任意形状沉积谷地对平面 P1, P2 和 SV 波的散射;巴振宁等 (2013) 采用间接边界元法研究了斜入射 P1 波在层状饱和半空间沉积谷地周围的散射。

上述研究均基于各向同性介质 (弹性或饱和) 的假定。而长期沉积和风化作用使得天然土体呈现出明显的各向异性性质,且众多学者 (Payton, Harris, 1983; 龚晓南, 1990; 丁浩江, 1997) 指出横观各向同性 (TI) 介质是描述土体各向异性的合理力学模型,相关研究已在地基 Lamb 问题 (王小岗, 黄义, 2004; 蔡袁强等, 2005)、桩-土相互作用 (吴大志, 2005; Gharahi *et al.*, 2014) 和列车运行地基振动 (周晔等, 2011; 高广运等, 2014) 等方面开展。在 TI 介质相关的局部地形场地效应方面,刘殿魁和韩峰 (1990)、刘殿魁和许贻燕 (1993)、韩峰和刘殿魁 (1997) 采用复变函数法研究了 TI 均匀半空间中半圆凹陷、衬砌凹陷和多个凹陷对 SH 波的散射;薛松涛等 (2000, 2002, 2004) 研究了层状 TI 弹性场地在 SH、P 和 SV 波入射下的自由场;巴振宁等 (2018) 利用间接边界元法对层状 TI 半空间中多种局部地形对 SH、qP 和 qSV 波的散射进行了比较全面的研究;此外, Lin 和 Han (2014)、Han 等 (2015)、Morshedifard 和 Eskandari (2017)、Ba 和 Gao (2017) 研究了层状 TI 半空间土-结构地震相互作用问题。可以看出,基于 TI 介质模型的局部场地地震效应研究尚处于起步阶段,尤其是同时考虑天然土体的饱和多孔特性和 TI 特性、基于 TI 饱和层状介质模型的局部场地地震效应研究还较少。

基于上述分析,本文将 IBEM (巴振宁等, 2018) 进一步拓展到 TI 饱和介质情况,并对平面 qP1 波在 TI 饱和沉积谷地周围的散射问题进行研究。文中介绍了求解 TI 饱和沉积地形地震响应的思路和方法,通过与饱和和各向同性结果对比,验证了方法的正确性。进而以层状半空间中半圆形 TI 饱和沉积为例,在频域内进行计算分析,重点讨论了 TI 参数对沉积谷地地表动力响应的影响。

1 模型与求解方法

如图 1 所示,一任意截面形状的沉积谷地位

于层状半空间中,半空间由 N 层水平土层及其下基岩组成,其中土层和基岩半空间均可考虑为 TI 饱和介质。介质特性由 5 个工程常数 (E_h , E_v , G_v , ν_h , ν_{vh})、8 个饱和相关参数 (m_1 , m_3 , α_1 , α_3 , k_1 , k_3 , η , φ)、质量密度 ρ 和阻尼比 ξ 进行描述 (Ba *et al.*, 2017)。假设模型中土层厚度为 D ,沉积地形与层状半空间的交界面为 S 。设 qP1 波在基岩露头处入射,入射方向与竖直方向夹角为 θ 。值得注意的是,在 TI 介质中, P 波的振动方向不再与传播方向一致,二者之间存在偏振角。

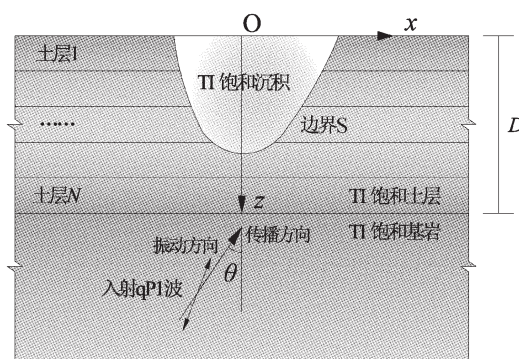


图 1 TI 饱和沉积模型图

Fig. 1 The model of TI saturated alluvial

为获得层状 TI 饱和半空间中沉积地形的地震响应,采用 IBEM 方法并结合“分区契合”技术进行模型求解,将整个沉积场地分解成层状半空间开口域和沉积闭合域,同时将波场分解为自由波场和散射波场。自由波场定义为无沉积存在时层状半空间的动力响应,可由直接刚度法求得;散射波场定义为由于沉积地形存在而产生的附加场,可通过求解格林函数来模拟,其中边界上的虚拟荷载通过边界条件确定。最后,将开口域内的响应 (包括自由场和散射场) 和闭合域内 (仅有散射场) 的响应叠加,即可求得问题的解。

1.1 直接刚度法求解自由波场

本文在 Ba 等 (2017) 已给出的层状 TI 饱和场地平面内土层精确动力刚度矩阵 [S^L] 和基岩精确动力刚度矩阵 [S^R] 的基础上,采用直接刚度法求解自由波场。首先,通过集整得到的场地总刚度矩阵为:

$S_{qP1-qP2-qSV} =$

$$\begin{bmatrix} S_{11}^{L1} & S_{12}^{L1} & & & \\ S_{21}^{L1} & S_{22}^{L1}+S_{11}^{L2} & S_{12}^{L2} & & \\ & S_{21}^{L2} & S_{22}^{L2}+S_{11}^{L3} & & \\ & & & O & \\ & & & & S_{22}^{LN-1}+S_{11}^{LN} & S_{12}^{LN} \\ & & & & S_{21}^{LN} & S_{22}^{LN}+S_{11}^R \end{bmatrix}_{3(N+1) \times 3(N+1)} \quad (1)$$

其次, 将土层的外荷载与位移之间的关系表示为:

$$\begin{aligned} & \{R_{x1}, iR_{z1}, iP_{z1}, L, R_{x(N+1)}, iR_{z(N+1)}, iP_{z(N+1)}\}^T \\ & = [S_{qP1-qP2-qSV}] \{U_{x1}, iu_{z1}, iw_{z1}, L, u_{x(n+1)}, iu_{z(n+1)}, \\ & iw_{z(n+1)}\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\{R_{x1}, iR_{z1}, iP_{z1}, \dots, R_{x(N+1)}, iR_{z(N+1)}, iP_{z(N+1)}\}^T$ 为作用在土层交界面上的外荷载幅值向量; $\{u_{x1}, iu_{z1}, iw_{z1}, \dots, u_{x(N+1)}, iu_{z(N+1)}, iw_{z(N+1)}\}^T$ 为土层交界面上的位移幅值向量。最后, 将入射 qP1 波产生的基岩顶部位移向量乘以基岩刚度矩阵求得的外荷载代入式 (2), 则可求出土层交界面的位移幅值, 进而得到土层中任一点的自由场响应。

1.2 格林函数模拟散射波场

采用动力格林函数法求解散射波场, 即在边界上施加虚拟均布斜线荷载, 通过求解虚拟荷载所产生的动力响应来模拟。

对于层状 TI 饱和半空间, 设斜线上作用有 x 和 z 向的均布荷载 p_0 和 r_0 以及孔隙水压 q_0 , 则均布斜线荷载及孔压动力格林函数的求解方法为: 首先, 采用傅里叶变换将荷载由空间域转换到波数域; 然后, 将受荷载作用层固定, 在波数域内求得层内响应和固端反力, 进而由刚度矩阵方法求得反加固端反力于整个层状半空间而产生的响应; 最后, 叠加层内解和固端反力解经由傅里叶逆变换求得空间域内解。对于斜线格林函数, 段化贞 (2018) 的研究中已给出了详细的求解过程, 在此不再赘述。

开口域内波场包括自由波场 (以 “ f ” 表示) 和散射波场 (以 “ L ” 表示), 将沉积与层状半空间交界面边界 S 离散为 M 个单元, 其位移和应力

可表示为:

$$\begin{Bmatrix} u_x^L(x) \\ u_z^L(x) \\ w_n^L(x) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^M \left\{ [g_u^L(x, \xi_i)] P^L \right\} + \begin{Bmatrix} u_x^f(x) \\ u_z^f(x) \\ w_n^f(x) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} t_x^L(x) \\ t_z^L(x) \\ p_n^L(x) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^M \left\{ [g_t^L(x, \xi_i)] P^L \right\} + \begin{Bmatrix} t_x^f(x) \\ t_z^f(x) \\ p_n^f(x) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中: $[g_u^L(x, \xi_i)]$ 和 $[g_t^L(x, \xi_i)]$ 分别为层状 TI 饱和半空间中的位移和应力格林函数, 表示在第 i 个单元土层内作用单位均布荷载时, 点 x 处产生的位移和应力; $P^L = \{p^L(\xi_1), p^L(\xi_2), \dots, p^L(\xi_M), r^L(\xi_1), r^L(\xi_2), \dots, r^L(\xi_M), q^L(\xi_1), q^L(\xi_2), \dots, q^L(\xi_M)\}^T$ 是为了构造开口域内散射波场而在沉积边界上施加的虚拟荷载向量, 包括 x 方向、 z 方向的均布荷载以及孔隙水压力。

闭合域内仅存在散射波场 (以 “ V ” 表示), 将沉积与层状半空间交界面边界 S 离散为 M 个单元, 其位移和应力可表示为:

$$\begin{Bmatrix} u_x^V(x) \\ u_z^V(x) \\ w_n^V(x) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^M \left\{ [g_u^V(x, \xi_i)] P^V \right\} \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} t_x^V(x) \\ t_z^V(x) \\ p_n^V(x) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^M \left\{ [g_t^V(x, \xi_i)] P^V \right\} \quad (6)$$

式中: $[g_u^V(x, \xi_i)]$ 和 $[g_t^V(x, \xi_i)]$ 分别为沉积内部闭合域的位移和应力格林函数; $P^V = \{p^V(\xi_1), p^V(\xi_2), \dots, p^V(\xi_M), r^V(\xi_1), r^V(\xi_2), \dots, r^V(\xi_M), q^V(\xi_1), q^V(\xi_2), \dots, q^V(\xi_M)\}^T$ 是为了构造闭合域内散射波场而在沉积边界上施加的虚拟荷载向量。

1.3 边界条件

对于 TI 饱和层状半空间中的波动问题, 由于传播介质为固液两相材料, 建立边界条件时, 不但要考虑土体的性质, 还要考虑土体与孔隙流体的相互作用。假定半空间界面与交界面完全透水, 即孔隙水可以自由透过边界流动, 孔隙水相对于

土骨架的相对位移连续、孔压连续，则边界条件可表示为：

$$\int_s [W(s)]^T \begin{Bmatrix} u_x^L(s) \\ u_z^L(s) \\ w_n^L(s) \end{Bmatrix} d_s = \int_s [w(s)]^T \begin{Bmatrix} u_x^V(s) \\ u_z^V(s) \\ w_n^V(s) \end{Bmatrix} d_s \quad (7)$$

$$\int_s [W(s)]^T \begin{Bmatrix} t_x^L(s) \\ t_z^L(s) \\ p_n^L(s) \end{Bmatrix} d_s = \int_s [w(s)]^T \begin{Bmatrix} t_x^V(s) \\ t_z^V(s) \\ p_n^V(s) \end{Bmatrix} d_s \quad (8)$$

假定半空间界面与交界面完全不透水，孔隙水相对土骨架的位移为零，边界条件可表示为：

$$\int_s [W(s)]^T \begin{Bmatrix} u_x^L(s) \\ u_z^L(s) \end{Bmatrix} d_s = \int_s [w(s)]^T \begin{Bmatrix} u_x^V(s) \\ u_z^V(s) \end{Bmatrix} d_s \quad (9)$$

$$\int_s [W(s)]^T \begin{Bmatrix} t_x^L(s) \\ t_z^L(s) \end{Bmatrix} d_s = \int_s [w(s)]^T \begin{Bmatrix} t_x^V(s) \\ t_z^V(s) \end{Bmatrix} d_s \quad (10)$$

$$\{w_n^L\} = 0 \quad (11)$$

$$\{w_n^V\} = 0 \quad (12)$$

式中： $[W(s)]$ 为权函数，取为单位矩阵，可在每层内独立积分。根据边界条件求得作用在沉积边界上荷载密度后，将其代入式 (3) ~ (6)，即可得到场地任意位置的动力响应。

2 方法验证

将 TI 饱和半空间退化为各向同性情况，通过

与 Liu 和 Liang (2010) 给出的各向同性饱和半空间中半圆形沉积的散射结果进行对比来验证本文方法。由于各向同性情况是横观各向同性的一种特殊情况，因此将 TI 介质水平和竖向材料参数取为相等，即可计算沉积内外均为各向同性饱和介质的结果。

计算中，沉积地形的半径取为 a ；沉积内的弹性模量 $E_h = E_v = 2.31$ GPa，土骨架体积模量 $K_s = 9$ GPa，泊松比 $\nu_h = \nu_{vh} = 0.25$ ，土颗粒密度 $\rho_s = 2650$ kg/m³，阻尼比 $\xi = 0.001$ ；沉积外部半空间的弹性模量 $E_h = E_v = 9.25$ GPa，土骨架体积模量 $K_s = 36$ GPa，泊松比、土颗粒密度、阻尼比与沉积内部相同；沉积内外饱和和相关参数取值为：流体体积模量 $K_l = 2.0$ GPa， $m = 7223.33$ kg/m³， $a = 2.167$ ，孔隙率 $\varphi = 0.3$ ，流体密度 $\rho_l = 1000$ kg/m³，动态渗透率 $k = 1000$ m²，孔隙流体动力黏滞系数取为 0.001。无量纲频率定义为 $\eta = \omega a / \pi c_s$ （下同），其中 ω 为振动圆频率， c_s 为半空间的剪切波速。图 2 给出了 P 波入射时不同入射角度下的各向同性饱和介质地表位移幅值，图中 $|u/A_{qP1}|$ 、 $|w/A_{qP1}|$ 为水平、竖直方向无量纲位移幅值，其中 u 、 w 分别为地表水平、竖直方向位移， A_{qP1} 为入射 qP1 波位移幅值。从图 2 中可以看出，本文计算结果与 Liu 和 Liang (2010) 给出的结果十分吻合，验证了本文方法的正确性。

3 结果与分析

以基岩上单一 TI 饱和土层中半圆形沉积为例进行计算分析，研究沉积 TI 性质、入射频率和

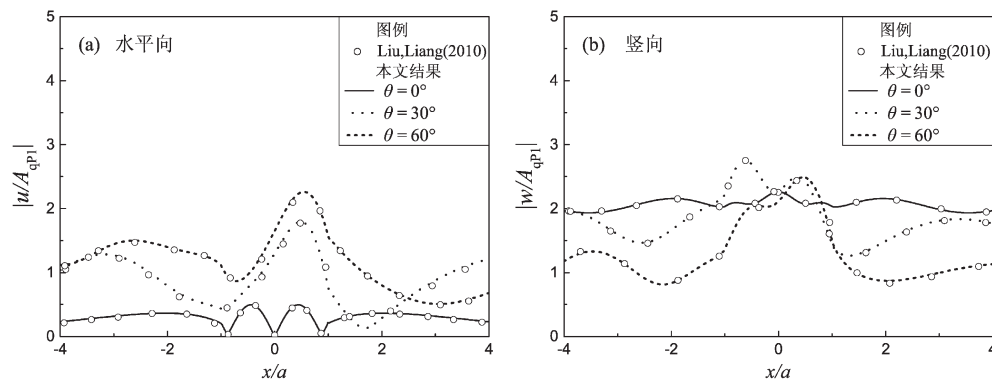


图 2 不同 P 波入射角下水平向 (a) 和竖向 (b) 地表位移幅值与 Liu 和 Liang (2010) 研究结果的比较 ($\eta = 0.5$)

Fig. 2 Comparison of the horizontal (a) and vertical (b) surface displacement amplitudes when $\eta = 0.5$ with the results of Liu and Liang (2010)

入射角度对场地动力响应的影响,给出了沉积附近地表位移幅值(单个频率)及频谱结果。计算中沉积半径为 a ,土层厚度为 $D=2a$ 。详细材料参数如表1所示,其中将沉积内部土层材料考虑为TI饱和介质,由Jamiolkowski等(1995)和Conte(1998)的研究可知,TI土层的水平与竖向模量比值范围为

0.55~4.0,因此将沉积材料分3种情况进行参数研究: $E_h/E_v=0.5$, $E_h/E_v=1.0$, $E_h/E_v=2.0$ 。沉积外部土层与基岩考虑为各向同性饱和介质。频域结果图2~6中无量纲位移幅值为 $|u/A_{qPl}|$ 和 $|w/A_{qPl}|$,其中 u 和 w 分别为水平向和竖向位移幅值, A_{qPl} 为入射波的位移幅值。

表1 TI饱和沉积材料参数

Tab.1 Material parameters of the TI saturated alluvial

材料种类	E_h/MPa	E_v/MPa	G_v/MPa	$\nu_h=\nu_{vh}$	K_s/MPa	K_l/GPa	$\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_f/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	ξ
沉积材料1	61.7	123.3	37.0	0.25	360	2.0	2 000	1 000	0.05
沉积材料2	92.5	92.5	37.0	0.25	360	2.0	2 000	1 000	0.05
沉积材料3	123.3	61.7	37.0	0.25	360	2.0	2 000	1 000	0.05
沉积外	370	370	148.0	0.25	1 440	2.0	2 000	1 000	0.05
基岩	1 480	1 480	592.0	0.25	4 760	2.0	2 000	1 000	0.02

注:孔隙率 $\varphi=0.3$,水平和垂直动态孔隙弯曲度 $\alpha_1=\alpha_3=2.167$,动态渗透率取为 $k_1=k_3=1\,000\text{ m}^2$,孔隙流体动力黏滞系数取为0.001。

图3和图4分别给出了 $\eta=0.5$ 和 $\eta=1.0$ 时,qPl波在不同入射角度 $\theta=0^\circ$ (垂直入射)、 30° 和 60° 对应的沉积地形附近地表的无量纲位移幅值。

从图3和图4中可以看出:①沉积TI性质对场地地表动力响应有重要影响,表现为不同模量比 E_h/E_v 对应地表位移幅值的大小和空间分布有明显差异。比较沉积内外的地表位移幅值可以发现,沉积内部动力响应受TI性质影响更为显著,而沉

积外部差异较小。②TI性质对地表动力响应的影响依赖于入射角度和入射频率。以较低频率 $\eta=0.5$ 入射时,地表位移幅值变化规律较为简单,总体上,随着 E_h/E_v 的增大,幅值逐渐减小;而随着入射角度的增大,水平位移幅值逐渐增大(除 $E_h/E_v=0.5$ 情况外),竖向位移幅值逐渐减小。以较高频率 $\eta=1.0$ 入射时,地表位移幅值分布变得更加复杂,沉积内的幅值分布呈现出

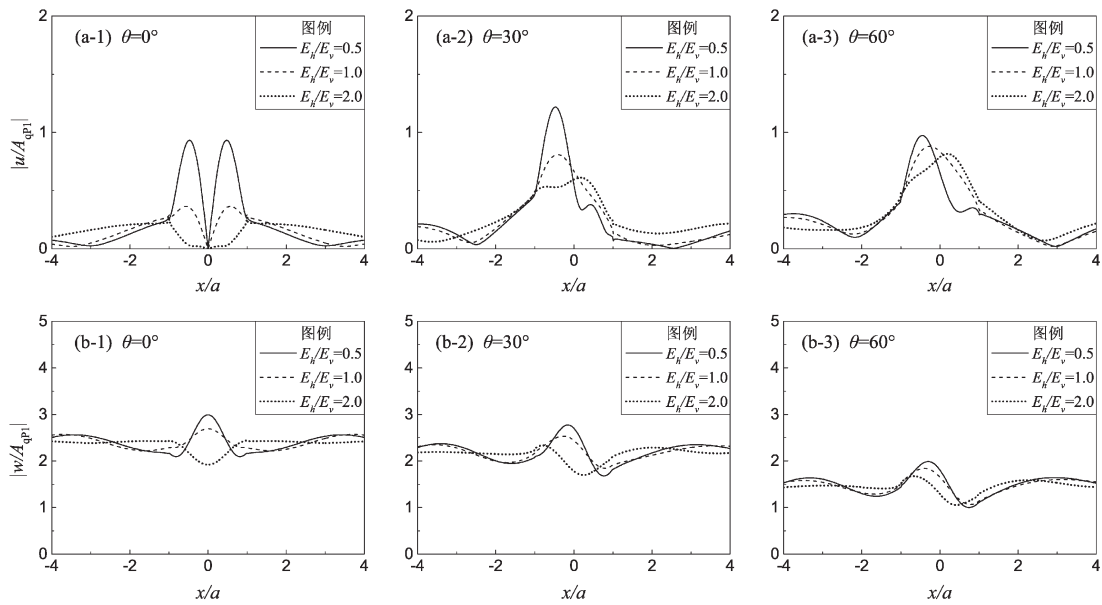


图3 不同qPl波入射角度下TI饱和沉积介质附近地表水平向(a)和竖向(b)的位移幅值($\eta=0.5$)
Fig.3 The horizontal (a) and vertical (b) surface displacement amplitudes with different incident angle of the TI saturated alluvial surface ($\eta=0.5$)

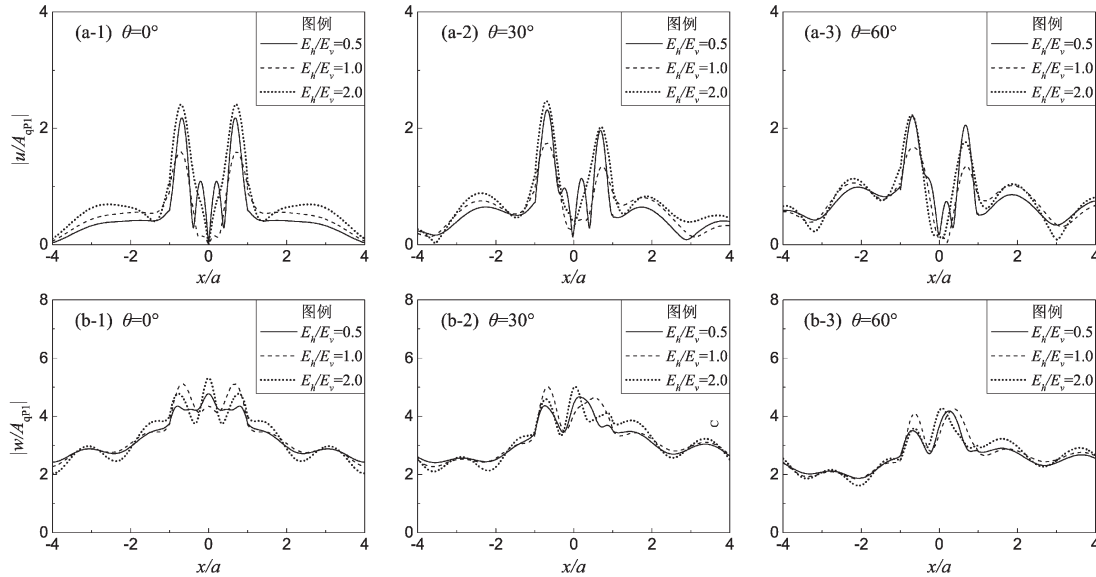


图4 不同 qP1 波入射角度下 TI 饱和沉积介质附近地表水平向 (a) 和竖向 (b) 的位移幅值 ($\eta=1.0$)

Fig. 4 The horizontal (a) and vertical (b) surface displacement amplitudes with different incident angle of the TI saturated alluvial surface ($\eta=1.0$)

明显的振荡, 出现了多个波峰和波谷, 但振动的幅度明显减小, 而沉积外的幅值曲线较为平缓, 地表位移幅值相差不大, 即沉积外部动力响应对频率的变化更敏感。

图5和图6分别给出了 TI 饱和沉积地表各观测点的位移幅值频谱结果, 其中沉积内观测点位置分别取为 $x/a=0.0$ 、 $x/a=0.8$ 和 $x/a=-0.8$, 无量纲频率范围 $\eta=0 \sim 2.0$ 。

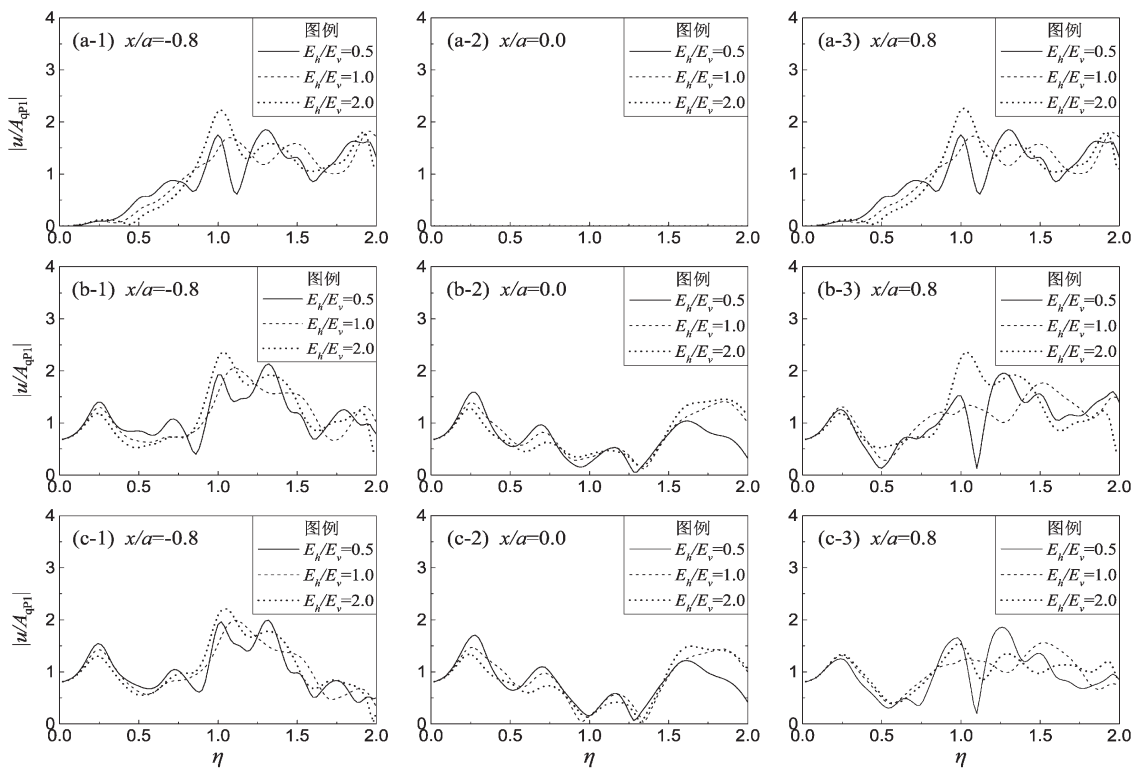


图5 入射角为 0° (a)、 30° (b) 和 60° (c) 时, TI 饱和沉积附近不同位置处地表水平向位移幅值放大谱

Fig. 5 Three different positions' Spectral amplification of surface horizontal displacement amplitudes with 0° (a), 30° (b) and 60° (c) incident angle on the TI saturated alluvial surface

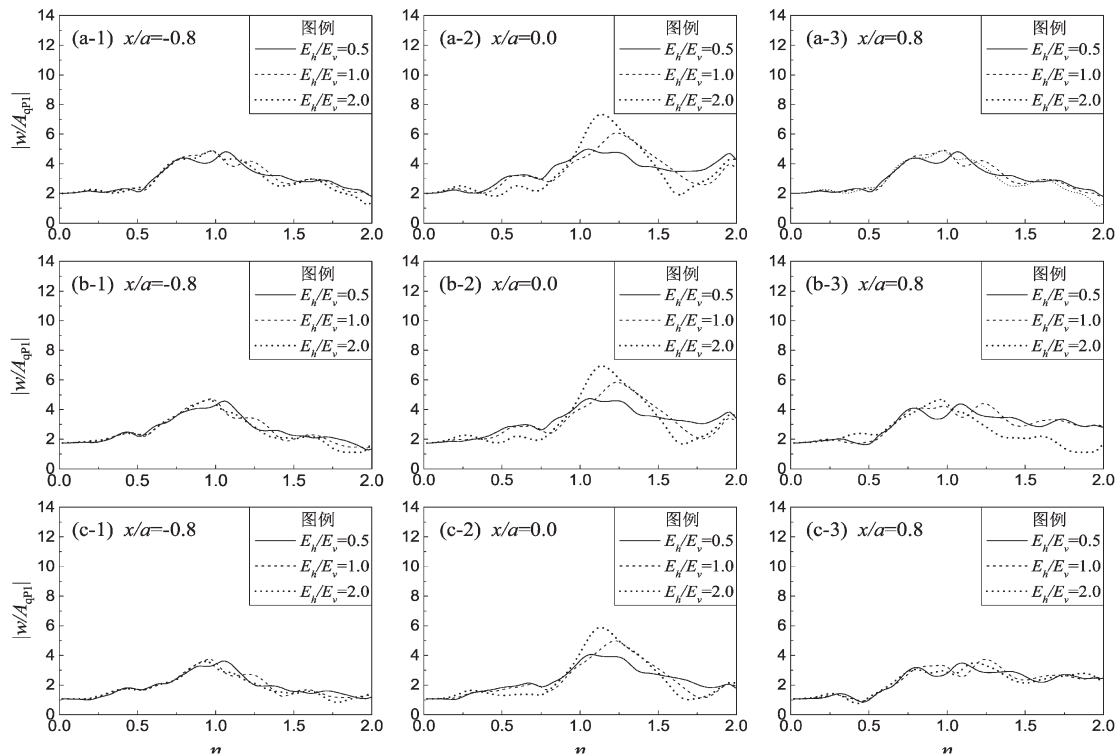


图6 入射角为 0° (a)、 30° (b)和 60° (c)时, TI 饱和沉积附近不同位置处地表竖向位移幅值放大谱

Fig. 6 Three different positions' Spectral amplification of surface vertical displacement amplitudes with 0° (a), 30° (b) and 60° (c) incident angle on the TI saturated alluvial surface

从图5和图6中可以看出: 频率很低 (η 接近于0.0) 时, 幅值谱放大曲线基本重合, 此时地表动力响应主要取决于土层自身的特性 (对于自由场响应); 随着频率增大, 沉积 TI 性质对地表动力响应的影响逐渐明显, 但其差异仍然较小; 在较高频率范围内 ($\eta = 1.0 \sim 2.0$), 不同 TI 参数对应地表位移幅值差异较为突出, 总体上随着 E_h/E_v 的增大, 频谱的共振频率基本不变, 而对应峰值频率有增大趋势。这表明沉积 TI 性质的变化改变了场地的动力特性, 使得不同 TI 参数场地对地震波产生了不同的滤波和放大效应, 进而使得地表地震动频谱成分产生差异。另一方面, TI 参数对地表动力响应影响程度与观测点位置有关, 沉积边缘处 ($x/a = \pm 0.8$) 的地表位移幅值差异较小, 而沉积中心处 ($x/a = 0.0$) 的地表位移幅值随 E_h/E_v 的变化而明显改变。这是由于沉积 TI 性质的变化既改变了沉积本身的动力特性也改变了沉积外部土层的动力特性, 二者的相互作用使得地表各位置的动力响应产生差异。

4 结论

本文将 IBEM 方法拓展到 TI 饱和介质情况, 求解了 qP1 波入射时 TI 饱和沉积谷地的动力响应问题。与已有文献对比验证了方法的正确性, 进而进行了数值计算分析, 重点研究了沉积的 TI 参数对场地地表动力响应的影响, 得到以下主要结论:

(1) 沉积 TI 性质对场地地表动力响应有重要影响, 表现为不同模量比 E_h/E_v 对应地表位移幅值的大小和空间分布有明显差异, 且影响程度依赖于 qP1 波的入射角度、入射频率和观测点位置。qP1 波以较低频率入射时, 地表位移幅值随模量比和入射角度的变化规律较为明显; qP1 波以较高频率入射时, 地表位移幅值分布变得非常复杂, 沉积内的幅值曲线呈现出明显的振荡, 出现了多个波峰和波谷。比较沉积内外的地表位移幅值及频谱结果可以发现, 沉积内部动力响应受 TI 参数影响更为显著, 而沉积外部差异较小。

(2) 沉积 TI 性质的变化改变了场地的动力特性,使得不同 TI 参数场地对地震波产生了不同的滤波和放大效应,进而使得地表地震动频谱成分产生差异。再者,沉积地形地表地震动是由沉积本身的动力特性和土层动力特性共同决定,二者的相互作用使得地表各位置的动力响应产生差异。本文研究表明,考虑沉积的 TI 性质可更为精确地模拟沉积谷地对平面 qP1 波的散射。

参考文献:

- 巴振宁,梁建文,梅雄一. 2013. 层状饱和半空间中沉积谷地对斜入射平面 P1 波的三维散射[J]. 工程力学,30(9):47-55,62.
- 巴振宁,梁建文. 2011. 平面 SV 波在层状半空间中沉积谷地周围的散射[J]. 地震工程与工程振动,31(3):18-26.
- 巴振宁,印泉,梁建文. 2017. 沉积层序对谷地场地地震反应的影响-SH 波入射[J]. 土木工程学报,50(1):95-107.
- 巴振宁,喻志颖,梁建文. 2018. 横观各向同性沉积谷地对平面 qP 和 qSV 波的放大作用[J]. 地球物理学进展,33(6):2193-2203.
- 蔡袁强,占宏,郑灶锋,等. 2005. 横观各向同性饱和土体振动分析[J]. 岩土力学,26(12):1917-1920.
- 丁浩江. 1997. 横观各向同性弹性力学[M]. 杭州:浙江大学出版社.
- 段化贞. 2018. 层状 TI 饱和半空间中地下隧道地震响应分析研究[D]. 天津:天津大学.
- 高广运,陈功奇,李佳. 2014. 高速列车荷载作用下横观各向同性饱和地基动力特性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报,33(1):189-198.
- 龚晓南. 1990. 软粘土地基各向异性初步探讨[J]. 浙江大学学报,20(4):99-109.
- 韩峰,刘殿魁. 1997. 各向异性介质中 SH 波对有衬砌的任意形半凹陷地形的散射[J]. 应用数学和力学,18(8):753-761.
- 李伟华,赵成刚. 2003. 饱和土沉积谷地对平面 P 波的散射[J]. 岩土工程学报,25(3):346-351.
- 李伟华,赵成刚. 2004. 饱和土沉积谷地对平面 SV 波的散射问题的解析解[J]. 地球物理学报,47(5):2911-919.
- 梁建文,巴振宁. 2007. 弹性层状半空间中沉积谷地对入射平面 SH 波的放大作用[J]. 地震工程与工程振动,27(3):1-9.
- 梁建文,刘中宪. 2010. 平面 SV 波在饱和半空间中沉积谷地周围的散射[J]. 地震工程与工程振动,30(3):12-21.
- 刘殿魁,韩峰. 1990. SH 波对各向异性凹陷地形的散射[J]. 地震工程与工程振动,10(2):11-25.
- 刘殿魁,许贻燕. 1993. 各向异性介质 SH 波与多个半圆形凹陷地形的相互作用[J]. 力学学报,25(1):93-102.
- 刘中宪,梁建文. 2013. 流体饱和半空间中不均质体对地震波散射的 MFS 求解[J]. 应用力学学报,30(6):815-821,948-949.
- 刘中宪,朱丽双,王冬. 2017. 平面 P、SV 和 Rayleigh 波入射下沉积河谷地震响应 IBEM 宽频模拟[J]. 地震工程学报,39(1):58-71.
- 首培杰,刘曾武,朱镜清. 2009. 地震波在工程中的应用[M]. 北京:地震出版社.
- 王小岗,黄义. 2004. 横观各向同性饱和地基的稳态动力响应分析[J]. 青海大学学报,22(4):1-6.
- 吴大志. 2005. 横观各向同性饱和地基与圆形基础的扭转动力相互作用研究[D]. 杭州:浙江大学.
- 薛松涛,陈军,王远功. 2000. 有限元 TI 层状场地对平面入射 SH 波的响应分析[J]. 振动与冲击,19(4):54-56.
- 薛松涛,陈谔,秦岭. 2002. 横观各向同性层状场地在 SH 波入射时共振特性[J]. 同济大学学报(自然科学版),30(2):127-132.
- 薛松涛. 2004. 平面 P-SV 波入射时 TI 层状自由场地的响应[J]. 岩石力学与工程学报,23(7):1163-1163.
- 张建毅,薄景山,王振宇,等. 2012. 汶川地震局部地形对地震动的影响[J]. 自然灾害学报,21(3):164-169.
- 赵成刚,韩铮. 2007. 半球形饱和土沉积谷地对入射平面 Rayleigh 波的三维散射问题的解析解[J]. 地球物理学报,50(3):905-914.
- 周晔,郑荣跃,刘干斌. 2011. 列车荷载下上覆弹性层横观各向同性饱和地基的动力响应[J]. 岩土力学,32(2):604-610.
- Ba Z N, Gao X. 2017. soil-structure interaction in transversely isotropic layered media subjected to incident plane SH waves[J]. Shock and Vibration:1-13.
- Ba Z N, Kang Z Q, Lee V W. 2017. Plane strain dynamic responses of a multi-layered transversely isotropic saturated half-space[J]. International Journal of Engineering Science,119:55-77.
- Chaillat S, Bonnet M, Semblat J F. 2010. A new fast multi-domain BEM to model seismic wave propagation and amplification in 3-D geological structures[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society,177(2):509-531.
- Conte E. 1998. Consolidation of Anisotropic Soil Deposits[J]. Soils and Foundations,38(4):227-237.
- Dravinski M, Mossessian T K. 1987. Scattering of plane harmonic P, SV, and Rayleigh waves by dipping layers of arbitrary shape[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,77(1):15-24.
- Dravinski M. 1983. Scattering of plane harmonic SH wave by dipping layers or arbitrary shape[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,73(5):1303-1319.
- Fajardo K C, Semblat J F, Chaillat S, et al. 2017. Seismic wave amplification in 3D alluvial basins: aggravation factors from fast multipole BEM simulations[A]. 16th World Conference on Earthquake. Kanpur: National Information Centre for Earthquake Engineering.
- Gharahia A, Rahimiana M, Eskandari - Ghadia M, et al. 2014. Dynamic interaction of a pile with a transversely isotropic elastic half-space under transverse excitations[J]. International Journal of Solids and Structures,51(23-24):4082-4093.
- Han Z J, Lin G, Li J B. 2015. General formulation and solution procedure for harmonic response of rigid foundation on isotropic as well as anisotropic multilayered half-space[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,70:48-59.

- Jamiolkowski M, Lancellotta R, Lo Presti D C F. 1995. Remarks on the stiffness at small strains of six Italian clays[J]. *Pre - failure Deformation of Geomaterials*, 2: 817 - 836.
- Lee J. 2013. Earthquake site effect modeling in the Granada basin using a 3 - D indirect boundary element method[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 63: 102 - 115.
- Liang J W, Ba Z N, Lee V W. 2008. Surface motion of a 3 - D alluvial valley in layered half - space for incident plane waves[C]. 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing: Seismological Society of China.
- Lin G, Han Z J. 2014. Soil - structure interaction analysis on anisotropic stratified medium[J]. *Geotechnique*, 64(7): 570 - 580.
- Liu Z X, Liang J W, Huang Y H. 2015. IBIEM modelling of the amplification of seismic waves by a three - dimensional layered alluvial basin [J]. *Geophysical Journal International*, 204(2): 999 - 1023.
- Liu Z X, Liang J W. 2010. Diffraction of plane P waves around an alluvial valley in poroelastic half - space[J]. *Earthquake Science*, 23(1): 35 - 43.
- Morshedifard A, Eskandari M. 2017. Coupled BE - FE Scheme for Three - Dimensional Dynamic Interaction of a Transversely Isotropic Half - Space with a Flexible Structure[J]. *Civil Engineering Infrastructure Journal*, 50(1): 95 - 118.
- Payton R G, Harris J G. 1983. *Elastic Wave Propagation in Transversely Isotropic Media*[M]. Boston: Martinus Nijhoff Publishers.
- Sanchez - Sesma F J, Luzon F. 1995. Seismic response of three - dimensional alluvial valleys for incident P, S, and Rayleigh waves[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(1): 269 - 284.
- Trifunac M D. 1971. Surface motion of a semi - cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(6): 1755 - 1770.
- Wong H L, Trifunac M D. 1974. Surface motion of semi - elliptical alluvial valley for incident plane SH waves[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(1): 1389 - 1408.
- Yuan X M, Liao Z P. 1995. Scattering of plane SH waves by a cylindrical alluvial valley of circular - arc cross - section[J]. *Earthquake engineering & structural dynamic*, 24(10): 1303 - 1313.

Scattering by a Transverse Isotropic Saturated Alluvial Valley for Incident Plane qP1 Wave

BA Zhenning^{1,2}, ZHANG Enwei^{1,2}, LIANG Jianwen^{1,2}, WU Mengtao^{1,2}

(1. *Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China*)

(2. *Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Ministry of Education, Tianjin 300350, China*)

Abstract

Based on Biot's theory of fluid saturated medium, the Indirect Boundary Element Method (IBEM) is used to solve the scattering problem of the plane qP1 wave from transversely isotropic (TI) saturated alluvial valley in frequency domain. The correctness of the method is verified by comparing with the results of isotropic saturated sites. Numerical calculation and analysis of different situations were carried out, with emphasis on the influence of TI properties of alluvial valley on the dynamic response of the surface. The results show that the TI properties have significant influence on the amplitude and spatial distribution of surface displacement, and the degree of influence depends on the incident angle, incident frequency and observation point location of the qP1 wave. Considering the TI properties, the scattering of the plane qP1 waves by alluvial valleys can be simulated more accurately.

Keywords: alluvial valley; transverse isotropic saturated; plane qP1 wave; seismic wave scattering; indirect boundary element method (IBEM)