

瞬态波诱发土-岩地层动力响应特性研究

刘卫卫, 贾磊, 付艳青, 王腾

(济南市勘察测绘研究院, 山东济南 250101)

摘要: 明晰瞬态波作用下土-岩地层的动力响应特性, 对准确评估和控制爆破或地震等动力作用的危险效应具有重要意义。针对典型土-岩地层结构, 引入标准线性固体描述土体本构, 构建土-岩地层受瞬态波作用的物理分析模型, 并基于特征线法和位移连续法建立了求解瞬态波在土-岩地层中传播的显示数学描述, 最后通过参数分析, 系统讨论了无量纲厚度、松弛时间以及土体等效动模量对土-岩地层中瞬态波的传播特性与场地放大效应的影响。结果表明: (1) 考虑土体黏弹性时, 地表场地放大效应较小; (2) 随无量纲厚度增加, 土-岩界面质点振速放大效应先减后稳, 应力波峰值先增后减, 地表振速放大效应先增后减; (3) 随松弛时间增加, 界面振速放大效应基本不变, 地表放大效应先增后稳, 应力波峰值逐渐增大; (4) 随等效模量增加, 地表及界面振速放大效应几乎不变, 应力波峰值逐渐减小; (5) 土层具有高频滤波性; (6) 动刚度差异越大, 其地层的放大效应越明显。

关键词: 瞬态波; 土-岩地层; 动力响应; 特征线法

中图分类号: 文献标识码: A

引言

土-岩地层作为典型的地层结构, 在城市地下空间开发、矿山开采、隧道建设等岩土工程领域中屡见不鲜^[1]。该地层的形成与地球漫长的地质演化有着必然的联系, 一般来说土-岩地层多呈现为上覆松散土体、下伏坚硬基岩的复合地层结构, 这就导致土体与岩体的力学性质具有较大差异。随着近年来地震频发以及爆破等技术在交通、水利等领域的不断发展, 由于土体与岩石具有明显地性质差异, 如何准确的揭示地震波或爆破波在该地层中的传播规律与衰减特性已成为岩土工程领域中的亟待解决的热点问题。

目前在研究瞬态波在土岩介质中传播与动力响应方面, 诸多学者在理论上已开展了较多的工作。早期的研究多集中在频域的分析方法, 例如 Schoenberg^[2]、Miller 等^[3]就是通过频域的分析方法得到了平面简谐波垂直和斜入射通过节理时的透射和反射系数。张茂晨等^[4]和周俊等^[5]通过动力刚度矩阵的方法分别分析了柱面和平面 SH 波在土-岩地层中的传播特性, 两者均指出土体具有高频滤波作用。李伟华等^[6]基于非饱和和多孔介质波动理论, 利用传递矩阵法得到了平面 P 波和 SV 波入射下非饱和土-岩场地波动问题的解析解, 探究了地下水位的变化对波场的影响。随着研究的深入, 学者们逐渐开始考虑复杂的情况, 而相对于频域的分析方法, 时域中的理论分析可以直接处理边界条件上的非线性等复杂问题^[7-8], 因此部分学者逐渐开展了时域上的理论研究。Cai 和 Zhao 等^[9-11]基于特征线法针对岩体中的节理界面如何影响瞬态波传播的问题进行了理论分析, 探究了节理刚度、间距等对瞬态波传播的影响。J. C. Li 等^[12]基于时域递归法对平面波斜入射节理的情况进行了分析, 进一步地对入射角度如何影响瞬态波传播规律进行了讨论。俞缙等^[13-15]利用改进的特征线法对节理的非线性本构进行了分析, 并根据节理的非线性力学行为探究了瞬态波通过节理的传播规律。Y. L. Gui 等^[16]通过有限差分的方法探究了土-岩地层中土-界面对爆破振动传播规律的影响。另一方面在考虑率效应方面, Wang 与 Fan 等^[17-19]基于特征线法建立了双尺度的瞬态波分析模型, 对岩体中微观的裂隙和宏观的节理如何影响瞬态波传播规律问题进行了研究。

*收稿日期: 2026-04-xx; 修回日期:

作者简介: 刘卫卫 (1989—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察设计方面的研究.E-mail: 15553127106@163.com TEL: 15553127106

通讯作者: 付艳青 (1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察设计方面的研究.E-mail: fuyanqing7768@163.com TEL: 18366157768

基于上述综述可知，对于岩体内的瞬态波传播问题研究较多，而对于土-岩复合地层的研究则相对较少，尤其从时域的角度对土-岩地层中瞬态波传播特性及动力响应进行分析的研究更是罕见。此外，土体与岩体相比其黏性更为显著，有必要考虑土的黏性对瞬态波传播衰减特性的影响。基于此，本研究基于特征线法将岩石视为线弹性介质，土体视为黏弹性介质构建土-岩地层中瞬态波传播的物理分析模型，并讨论相关参数对瞬态波传播的影响，以较深入地分析土-岩地层中瞬态波的传播规律与动力响应特性。

1. 问题描述

1.1 物理模型与基本假定

考虑到实际问题中的地震波或者爆破振动波一般在岩体中产生，将其抽象为如图 1 所示的物理模型，其中瞬态波从岩石内部向土体中入射，由于界面两侧的波阻抗不同，入射波到达土-岩界面时会发生透射反射行为。另一方面考虑到地表的振动会对地表上的工程建筑、人等产生危害效应，且现有的规范中也多以地表的振动水平作为控制标准与评价指标^[20-23]，因此将图 1 的物理模型中土体上边界考虑为自由面其中土层厚度为 h 。为了将理论推导建立在严谨的力学框架内，忽略次要问题突出主要问题，作如下基本假设：岩体与土体介质均视为均匀、各向同性的连续介质且土-岩界面满足应力与位移连续条件；瞬态波传播过程中的两种介质变形均属于弹性变形范围内，其中岩体为线弹性介质，土体为黏弹性介质；忽略瞬态波在横向的几何发散，将其简化为平面波正入射的传播问题。

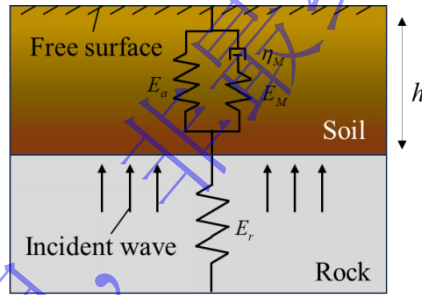


图 1 瞬态波入射土-岩地层的物理模型

Fig.1 Physical model of transient wave incident on soil-rock stratum

1.2 本构关系与控制方程

根据图 1 中的物理模型与基本假定，在平面波正入射的条件下，土体和岩体介质其内部微元的运动微分方程与连续性方程均可统一表示为：

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

式中， σ 为质点应力， ε 为质点应变， t 为时间， ρ_0 为介质的密度， v 表示速度， x 为物质坐标。

本研究中岩石采用线弹性本构，土体采用常用的黏弹性介质模型即标准线性固体模型，其是由 Maxwell 体与弹簧元件并联形成的三单元体。根据其力学特性，岩体与土体本构关系的数学描述为：

$$\sigma = E_r \varepsilon \quad (3)$$

$$E_M \sigma + \eta_M \frac{\partial \sigma}{\partial t} = E_a E_M \varepsilon + (E_a + E_M) \eta_M \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (4)$$

式中, E_r 为岩石的弹性模量。 E_M 和 η_M 分别为 Maxwell 单元中弹簧与黏壶的黏性系数, E_a 为与 Maxwell 单元平行的弹簧的弹性模量。

1.3 特性线及其相容关系

根据式(1)~(4), 利用特性线法可求解得到其土岩介质中的相容关系分别为:

$$dv = \pm \frac{1}{\rho_r C_r} d\sigma \quad (5)$$

$$dv = \pm \frac{1}{\rho_s C_s} d\sigma \pm \left[\frac{\sigma - E_a \varepsilon}{(E_a + E_M) \theta_M} \right] dx \quad (6)$$

$$d\varepsilon = \frac{d\sigma}{E_a + E_M} + \frac{\sigma - E_a \varepsilon}{(E_a + E_M) \theta_M} dt \quad (7)$$

式中, ρ_r 为岩体的密度, ρ_s 为土体的密度。 θ_M 为松弛时间, 满足 $\theta_M = \eta_M / E_M$ 。 C_r 、 C_s 分别为岩体和土体中 P 波或 S 波波速, 其具体的计算公式分别为:

$$\begin{cases} C_{rp} = \sqrt{\frac{E_r(1-\mu_r)}{\rho_r(1+\mu_r)(1-2\mu_r)}} \\ C_{rs} = \sqrt{\frac{E_r}{2\rho_r(1+\mu_r)}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} C_{sp} = \sqrt{\frac{(E_a + E_M)(1-\mu_r)}{\rho_s(1+\mu_r)(1-2\mu_r)}} \\ C_{ss} = \sqrt{\frac{E_a + E_M}{2\rho_s(1+\mu_r)}} \end{cases} \quad (9)$$

式中, C_{rp} 、 C_{sp} 分别为岩体和土体中 P 波波速, C_{rs} 、 C_{ss} 分别为岩体和土体中 S 波波速。 μ_r 、 μ_s 为岩体和土体的泊松比。

根据式(5)~(7)可知, 岩石内部的微元体满足双特性线关系, 土体中则满足三特性线关系, 多出了应变随时间变化的应变率效应, 这也是体现土体中黏性的根本所在。

1.4 边界条件

图 1 中的物理模型共有两个物理边界, 即土-岩界面和自由边界, 土-岩界面在自然条件下通常会胶结、固化形成一个整体, 参照已有研究^[24], 本研究中假定土-岩界面满足位移与应力连续条件, 即有:

$$\sigma_f = 0 \quad (10)$$

$$\sigma = \sigma^r = \sigma^s \quad (11)$$

$$u = u^r = u^s \quad (12)$$

其中, σ_f 为自由面的应力。 u 为质点位移, u^r 为土-岩界面处岩石侧的位移, u^s 为界面处土体侧的位移。类似地 σ^r 、 ε^r 分别为土-岩界面处岩石侧的应力和应变, σ^s 、 ε^s 分别为土-岩界面处土体侧的应力和应变。

2. 计算模型及其特征线法求解

2.1 计算模型

基于图 1 的物理模型, 瞬态波在传播过程中主要受到土-岩界面、自由面和土体的黏性影响。在土-岩界面处由于两侧土岩介质的波阻抗不同, 瞬态波通过此界面时会发生透反射行为。之后通过土-岩界面的透射波在土体中传播时又会受到土介质黏性的影响从而发生进一步的衰减, 直至到

达自由面处发生全反射，在自由面处的反射波又会受到土介质和界面的影响发生衰减和透反射行为，一直到波动效应收敛，扰动结束。波在其中透射及反射传播的过程可与左右行特性线相对应。根据式(5)~(7)，可将平面空间划分层数，只要层数划分的足够多，每一层的间距就足够小，微分的相容方程就可以作为差分方程处理。对于下伏岩层， Δt 时间步长所对应的空间网格步长为 $\Delta x_r = C_r \Delta t$ 。对于上覆土层， Δt 时间步长所对应的空间网格步长为 $\Delta x_s = C_s \Delta t$ 。岩体内部、土-岩界面和土体内部上的特性线计算模型如图 2 所示。

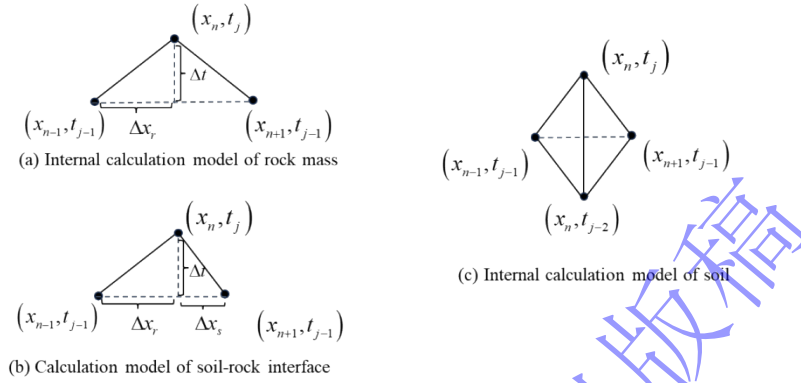


图 2 特性线网格计算模型

Fig. 2 Characteristic line grid computing model

由图 2 可知，岩体内部节点可根据左右特征线对应得相邻位置前一时刻节点得物理状态解得，界面处得节点可根据非对称得左右特征线进行求解，而对于土体中，由于应变率效应，在进行求解时需要考虑应变的变化，因此除了左右特征线所携带的物理信息还需要根据同一位置之前时刻的状态进行求解。其中 x 和 t 分别代表其空间及时间坐标，下标 n 与 j 分别代表离散后空间与时间网格的索引，显然有 $x_n = n\Delta x$ ， $t_j = j\Delta t$ 。

2.2 特征线法求解

根据上述建立时空差分网格及计算模型（图 2）与相容方程即式(5)~(7)，可通过沿特征线方向的积分，推导各节点物理量在时域内的显式迭代计算公式。

在岩体内部沿左右特征线分别有：

$$\begin{cases} v_n^j - v_{n+1}^{j-1} = \frac{1}{\rho_r C_r} (\sigma_n^j - \sigma_{n+1}^{j-1}) \\ v_n^j - v_{n+1}^{j-1} = -\frac{1}{\rho_r C_r} (\sigma_n^j - \sigma_{n+1}^{j-1}) \end{cases} \quad (13)$$

其中 v_n^j 和 σ_n^j 分别为第 n 层， j 时刻节点的速度和应力，即上标表示时间索引，下标表示空间索引。后面其他变量类似不再逐一说明。

联立式(13)求解得到岩体内部节点应力与速度迭代计算公式如下：

$$\begin{cases} \sigma_n^j = \frac{1}{2} [\sigma_{n-1}^{j-1} + \sigma_{n+1}^{j-1} + \rho_r C_r (v_{n+1}^{j-1} - v_{n-1}^{j-1})] \\ v_n^j = \frac{1}{2\rho_r C_r} (\sigma_{n+1}^{j-1} - \sigma_{n-1}^{j-1}) + \frac{1}{2} (v_{n+1}^{j-1} + v_{n-1}^{j-1}) \end{cases} \quad (14)$$

对比式(5)和式(6)、(7)可知，与线弹性的岩体相比，在土体内部的相容方程中多出了表征其黏滞耗散的非线性源项因此其迭代公式较复杂，但其推导过程与岩体中迭代公式类似，将式(6)、(7)的微分方程转化为差分方程联立求解可得土体中应力、应变及速度的迭代公式如下：

$$\begin{cases} \sigma_n^j = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{n-1}^{j-1} + \sigma_{n+1}^{j-1} + \rho_s C_s (v_{n+1}^{j-1} - v_{n-1}^{j-1}) + \frac{\rho_s C_s \Delta x_s}{(E_a + E_M) \theta_M} \left[(\sigma_{n+1}^{j-1} + \sigma_{n-1}^{j-1}) - E_a (\varepsilon_{n+1}^{j-1} + \varepsilon_{n-1}^{j-1}) \right] \right\} \\ v_n^j = \frac{1}{2 \rho_s C_s} (\sigma_{n+1}^{j-1} - \sigma_{n-1}^{j-1}) + \frac{1}{2} (v_{n+1}^{j-1} + v_{n-1}^{j-1}) + \frac{\Delta x_s}{2(E_a + E_M) \theta_M} \left[(\sigma_{n+1}^{j-1} - \sigma_{n-1}^{j-1}) - E_a (\varepsilon_{n+1}^{j-1} - \varepsilon_{n-1}^{j-1}) \right] \\ \varepsilon_n^j = \varepsilon_n^{j-2} + \frac{1}{E_a + E_M} (\sigma_n^j - \sigma_n^{j-2}) + \frac{\Delta t}{(E_a + E_M) \theta_M} \left[(\sigma_{n-1}^{j-1} + \sigma_{n+1}^{j-1}) - E_a (\varepsilon_{n-1}^{j-1} + \varepsilon_{n+1}^{j-1}) \right] \end{cases} \quad (15)$$

需要说明的是，为了显示利用特征线法解析时，其公式形式具有时间中心性和左右传播对称性上式中应变采用了中点差分近似。在土-岩界面处，分别根据来自下方岩石侧的特征线方程与上方土体侧的特征线方程，结合界面处连续条件即应力连续位移连续，可以得到其迭代公式为：

$$\begin{cases} v_n^j = \frac{(\sigma_{n+1}^{j-1} - \sigma_{n-1}^{j-1}) + \rho_r C_r v_{n-1}^{j-1} + \rho_s C_s v_{n+1}^{j-1} + \frac{\rho_s C_s \Delta x_s}{(E_a + E_M) \theta_M} (\sigma_{n+1}^{j-1} - E_a \varepsilon_{n+1}^{j-1})}{\rho_r C_r + \rho_s C_s} \\ \sigma_n^j = \frac{\rho_s C_s \sigma_{n-1}^{j-1} + \rho_r C_r \sigma_{n+1}^{j-1} + \rho_r C_r \rho_s C_s (v_{n+1}^{j-1} - v_{n-1}^{j-1}) + \frac{\rho_r C_r \rho_s C_s \Delta x_s}{(E_a + E_M) \theta_M} (\sigma_{n+1}^{j-1} - E_a \varepsilon_{n+1}^{j-1})}{\rho_r C_r + \rho_s C_s} \end{cases} \quad (16)$$

通过式(14)~(16)，可编写迭代计算的程序，在给定的初始条件和荷载条件，就可以逐层、逐时步地精确追踪瞬态波在土-岩地层中的多次透反射与能量黏滞耗散演化。需要说明的是上述公式虽然是基于 P 波作用进行推导的但是对于 S 波仍然适用，只需要将公式中应力、应变、波速等替换成 S 波对应的物理量就可以对 S 波进行讨论。

3. 参数分析

3.1 土层厚度对应力波衰减效应与场地放大效应的影响

为了更直观的分析瞬态波在土岩地层中的传播衰减特性，定义放大效应为速度峰值的比值进行讨论，并采用半正弦速度波作为入射波进行讨论，其数学描述如下：

$$v = \begin{cases} A \sin(2\pi ft), & t = 0 \sim 1/(2f) \\ 0, & t > 1/(2f) \end{cases} \quad (17)$$

式中 A 表示振幅，取 1m/s，f 表示入射波的频率，取 50Hz。

根据前节特征线求解得到的显示迭代公式，利用相关编程软件进行编程求解式(17)为入射波的作用下，土-岩界面及地表的振速时程曲线如图 3 所示。其中岩体参数选取典型的花岗岩物理力学参数进行计算，具体为密度取 2500 kg/m³，弹性模量取 25GPa，泊松比取 0.25。覆盖土层选取典型的黏性土层参数，密度取 1800kg/m³，泊松比取 0.35。为更明显的突出应力波在软弱地层中的能量耗散，土体黏弹性模型中的相关参数分别取为 E_M=260MPa、E_a=130MP、θ_M=0.05s。另外先土层厚度取 h 为 5m 进行计算，这是浅埋地下结构（如管道等）顶部的覆土厚度，也是露天爆破或者强夯工程中常见浅表风化层的厚度。

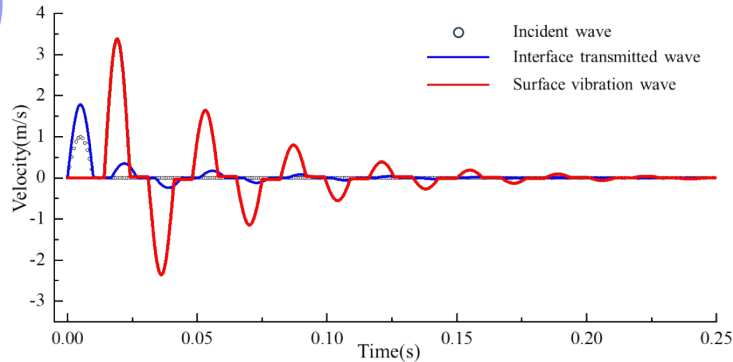


图 3 半正弦入射情况下界面及地表的振动时程曲线

Fig.3 Vibration time history curves of interface and ground surface under half-sine incidence

由图 3 分析可知, 入射波从岩体中透射到土体中时, 振动速度发生了放大效应, 振幅的最大值数值上从入射波的 1m/s, 放大了约为 1.78m/s, 之后入射到地表的振动速度又得到了进一步的放大, 其数值上显示为 3.38m/s, 如果土是线弹性的地表的振动速度峰值由于自由面的全反射应为界面透射波的 2 倍即 3.56m/s, 也就是说土的黏弹性使得应力波的能量得到了进一步的衰减。随着波在土-岩地层中的多次反射, 能量逐渐耗散最终约在 0.25s 之后波形收敛为 0, 扰动结束。另外由于本研究中土-岩界面采用应力和位移连续的边界条件, 为了进一步验证理论的可靠性, 在上述参数的条件下, 根据波阻抗理论, 土-岩界面和地表振速可分别由下式进行计算:

$$v_{inter}(t) = T_{rs} \sum_{n=0}^{\infty} R_{sr}^n [v_{inc}(t - 2nt_0) + v_{inc}(t - 2(n+1)t_0)] \quad (18)$$

$$v_{surf}(t) = 2T_{rs} \sum_{n=0}^{\infty} R_{sr}^n \cdot v_{inc}(t - (2n+1)t_0) \quad (19)$$

式中, T_{rs} 为 R_{sr} 分别为透反射系数, t_0 为延迟时间, n 为透反射的次数。透反射系数和延迟时间可按下式计算:

$$T_{rs} = \frac{2Z_r}{Z_r + Z_s}, \quad R_{sr} = \frac{Z_s - Z_r}{Z_s + Z_r}, \quad t_0 = h / C_s \quad (20)$$

式中, Z_s 为 Z_r 分别为土体和岩石的波阻抗。

将特征线解退化为线弹性解, 即将土体的黏弹性本构参数中的松弛时间 θ_M 趋于无穷, 再与式 (18) ~ (20) 多次波阻抗透反射理论的解析解进行对比验证。代入相应的岩土体参数两者的计算结果对比如图 4 所示, 从图中可以看出利用特性线法求解得到的结果与波阻抗的解析解一致, 证明了上述理论的可靠性。

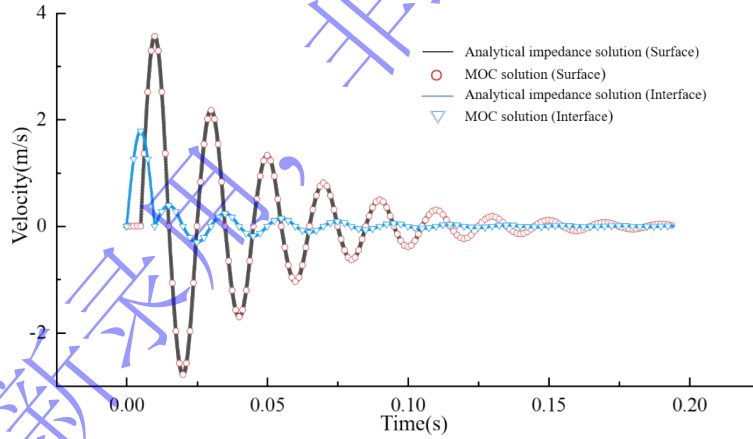


图 4 退化为线弹性的土-岩界面和地表的波阻抗解与特征线解对比

Fig.4 Comparison of the wave impedance solution and characteristic line solution for soil-rock interfaces and the ground surface reduced to linear elasticity

土层厚度的改变, 直接影响着波的干涉效应从而影响地表质点的振动速度峰值, 为了更好的体现土层厚度与波长的相关关系, 定义土体和岩石中的无量纲厚度分别为:

$$H_s = \frac{h}{\lambda_s} = \frac{hf}{C_s} \quad (21)$$

$$H_r = \frac{h}{\lambda_r} = \frac{hf}{C_r} \quad (22)$$

式中, h 为土体覆盖层的厚度; λ_s , λ_r 分别为土体和岩石中的波长; f 入射波为频率; C_s , C_r 为分别为土体和岩石中的波速。

根据式 21 和式 22, 土体中的无量纲厚度和岩石中的无量纲厚度具有如下关系:

$$\frac{H_s}{H_r} = \frac{C_r}{C_s} \quad (23)$$

即土体和岩石中的无量纲厚度之比, 与其介质的波速成反比。当两种介质的波速确定时, 两者的无量纲厚度也可以进行相互转化, 由于本文分析的重点在于地表覆盖层的影响, 因此下面以土体中的无量纲厚度作为统一量进行分析。

通过改变无量纲厚度 H_s , 对比分析其余参数不变的情况下, 不同无量纲土层厚度其地表和界面处的峰值质点振动速度就可以判断其是否发生了波的干涉以及干涉的影响如何。如图 5 和图 6 分别为不同无量纲土层厚度下的土-岩界面及地表振速的时程曲线。

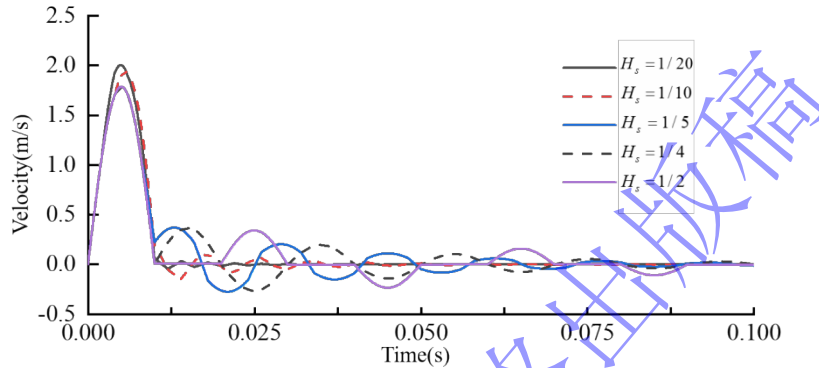


图 5 不同无量纲厚度下土-岩界面的振动波形

Fig.5 Vibration waveforms of soil-rock interface under different dimensionless thicknesses

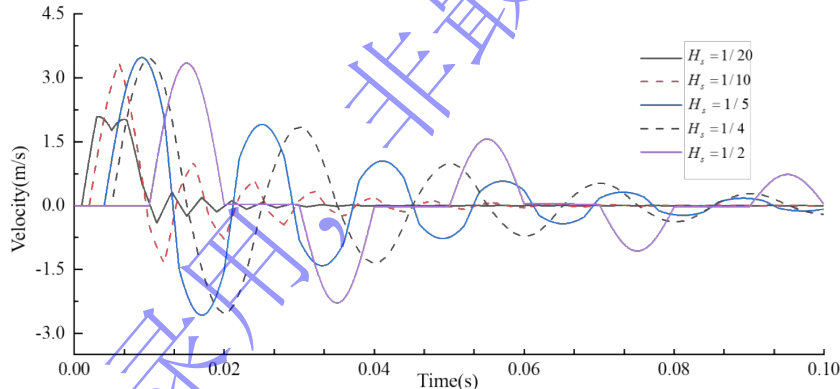


图 6 不同无量纲厚度下地表质点的振速时程曲线

Fig.6 The vibration velocity time history curves of surface particles under different dimensionless thicknesses

根据图 5 和图 6 可知, 无量纲土层厚度的变化对地表以及土-岩界面的质点振速会产生较大的影响。对于土-岩界面而言, 在无量纲厚度较小时, 即 $H_s < 1/5$ 时, 满足无量纲厚度越小其峰值质点的振速越大的规律, 此时放大系数约为 2, 但当 $H_s > 1/5$ 时, 峰值质点振速基本不变。这说明当 $H < 1/5$ 时, 波形产生了叠加效应, 进一步放大了界面处的振速, 而当 $H_s > 1/5$ 时, 地表反射波尚未抵达界面时, 首波已经完成透射, 此时的首波峰值基本上只取决于岩-土介质的波阻抗比, 根据式 (18) 可知其放大系数约为 1.78。对于地表而言, 总体上满足随着无量纲厚度的增加, 放大效应呈现出先增大再减小的规律。具有而言当 $H_s < 1/20$ 时, 振速峰值约为为入射波波峰的 2 倍, 此时土层厚度相当于入射波波长较小, 波往返周期较短, 地表的反射波在首波脉冲尚未结束前便已折返回土-岩界面, 可以认为土层为薄层。当 $H_s > 1/20$ 时, 地表质点速度振动的峰值均在 3.34~3.48m/s 范围内放大效应趋于稳定, 在无量纲厚度取 1/5 时, 峰值最大为 3.48m/s, 放大效应最明显。此外从相位延迟来看, 随着无量纲厚度的增加, 波形收敛的时间也在逐渐增加, 在 $H_s = 1/2$ 时, 相位延迟最明显, 扰动时间最长。

为进一步分析土层厚度对应力波能量耗散的影响，计算出应力波的峰值在土层中传播时的分布，其计算结果如图 6 所示，其中 z 表示距离土-岩界面的距离，横坐标为归一化距离，其值为 0 时代表土-岩界面，值为 1 时表示为地表的自由面。

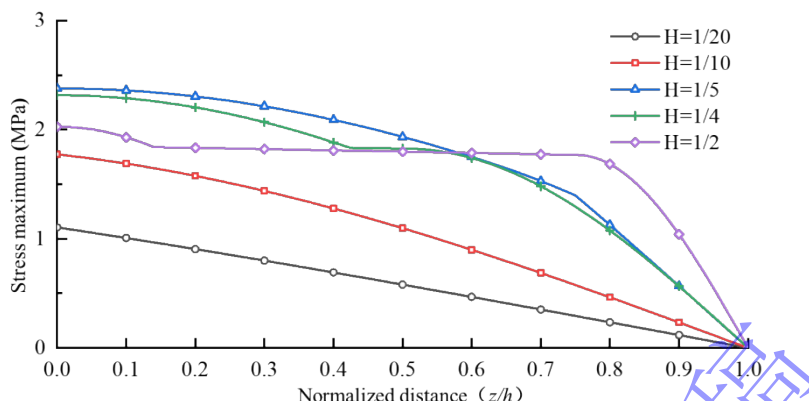


图 7 不同无量纲厚度下应力波峰值随传播距离的变化

Fig.7 The variation of stress wave peak with propagation distance under different dimensionless thicknesses

由图 7 分析可知，应力波的峰值整体上均满足随着距离的增加应力波逐渐衰减的规律。在土-岩界面处的初始峰值依赖于覆盖层厚度，随着无量纲厚度 H_s 的增大呈现先增大后减小的趋势。其原因为当土层厚度较薄，应力波在土层中的单程传播时间较短。入射压缩波还没完全穿过界面，由地表自由面全反射为拉伸波的就与持续入射的压缩波发生了相消干涉，从而使得应力峰值较低，当厚度逐渐增加时，反射波相位的延迟使得干涉效应逐渐从消弱变为了增加，在无量纲厚度达到 1/5 时，应力波的峰值最大。但当土层厚度进一步增加时由于土层足够厚，当入射波在界面处完全透射时，地表自由面的反射波还没有传过来，应力没有发生叠加效应，因此应力峰值反而减小了。此外当 $H_s = 1/2$ 时，根据应力衰减效应的不同分为了三段，在 $z/h < 0.15$ 时，应力峰值逐渐衰减但在 $0.15 < z/h < 0.8$ 区间时，应力峰值基本相同，在 $z/h > 0.8$ 时应力峰值快速衰减为 0。这是由于此时入射波的脉冲长度正好与土层厚度相当，除了两端有界面和地表的影响，中间段的波峰基本只取决于土体的黏弹性参数和入射波的波峰。

3.2 土体黏弹性参数对应力波衰减效应与场地放大效应的影响

为进一步探究土体的黏弹性参数对应力波衰减效应与场地放大效应的影响，通过改变土体的黏弹性参数，需计算出不同参数下的界面及地表的质点振速时程曲线和应力波峰值。根据差分计算公式 (14) ~ (16)，土体本构的黏弹性参数可以转换为松弛时间 θ_M 与等效模量 $Ee = E_a + E_M$ 两个参数进行讨论。其不同 θ_M 的计算的结果如图 8 和图 9 所示。

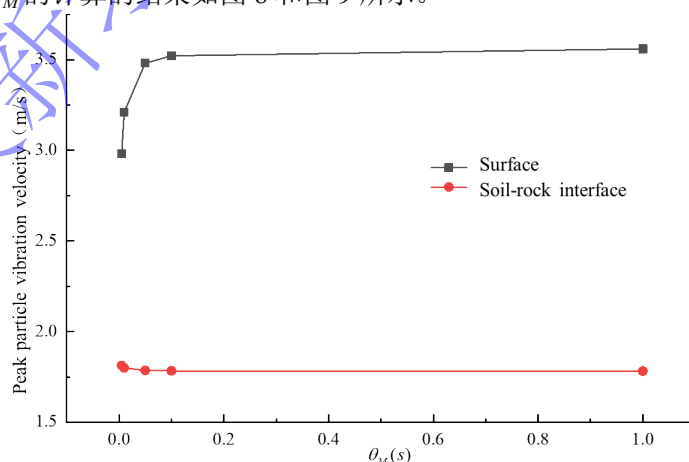


图 8 不同松弛时间地表和土岩界面上质点峰值振速

Fig.8 Peak particle velocity on the surface and soil-rock interface at different relaxation time

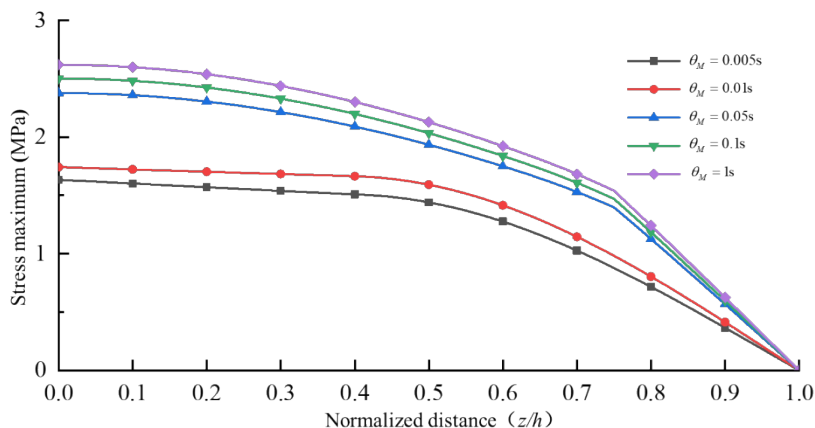


图 9 不同松弛时间应力波峰值随传播距离的变化

Fig.9 The change of stress wave peak with propagation distance at different relaxation time

根据图 8 可知,土-岩界面的峰值质点振速基本不随松弛时间的变化而改变,而地表则不同,随着松弛时间的增加峰值呈现出先增大后趋于稳定的规律。由图 9 可知,应力峰值的衰减总体上均满足随着传播距离的增加而衰减的规律,且随着松弛时间的增加,应力波峰值也在逐渐增加。为了进一步明晰松弛时间对地表质点振速影响,提取地表振速在不同松弛时间下的时程曲线如图 9 所示。

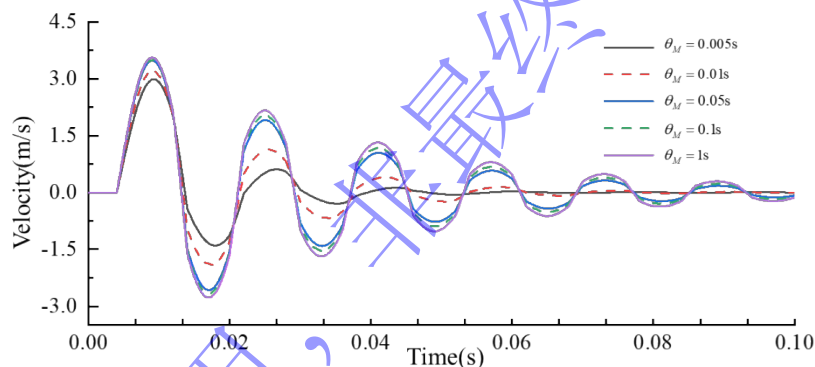


图 10 不同松弛时间地表质点的振速时程曲线

Fig.10 Vibration velocity time history curves of surface particles with different relaxation time

根据图 10 分析可知,松弛时间的变化不仅影响着地表质点的振动速度峰值,还对振动的持时有影响,具体来说,随着松弛时间的增加,振动的持续时间也越长,波形收敛越慢,这表明松弛时间的增加会增加地表受扰动的时间。

类似地提取出不同等效模量下的计算结果如图 11 和图 12 所示。根据图 11 的结果可以看出,地表和土-岩界面上的峰值振速随等效模量的变化而基本保持不变,也就是说等效模量几乎不影响质点的峰值振速。根据图 12 可知,随着等效模量的增加,应力波在同一归一化距离上的峰值逐渐减小。对比分析图 11 和图 12 可知,在速度波入射的情况下,应力场相对于速度场对波阻抗的变化更敏感。

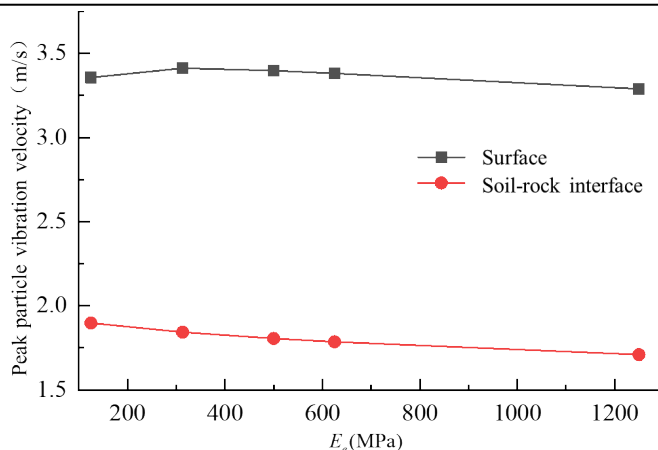


图 11 不同等效模量下地表和土岩界面上质点峰值振速

Fig.11 Peak particle velocity on the surface and soil-rock interface under different equivalent moduli

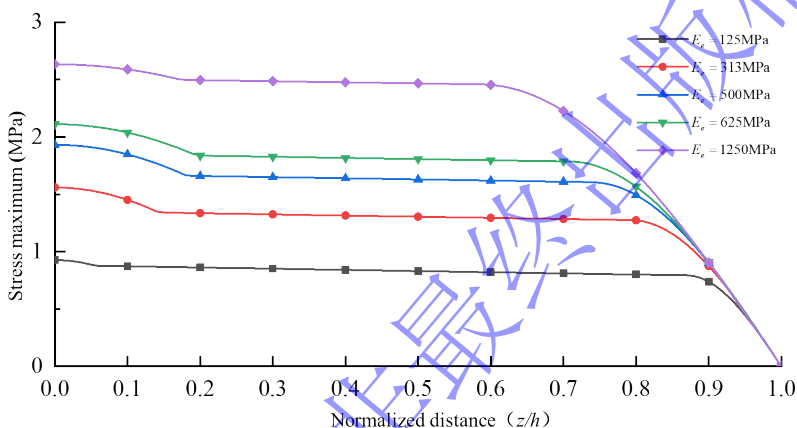


图 12 不同等效模量下地表和土岩界面上应力波峰值随传播距离的变化

Fig.12 The variation of the peak value of stress wave on the surface and soil-rock interface with propagation distance under different equivalent moduli

3.3 土岩地层的频谱分析

实际工程中往往通过双指标（频率和振速）控制地表质点的振动水平，因此为了进一步明晰土岩地层中受瞬态波作用时的动力响应规律，有必要对土岩地层进行频谱分析。提取出利用特征线法计算得到的地表质点的振速时程曲线，根据傅里叶变换等方法将时域信息转换为频域信息进行分析，其结果如图 13 所示。从图中可以看出，不同无量纲土层厚度下地表振速频谱均呈现出明显的多峰特征，随着无量纲厚度的变化，频谱主峰位置和峰值幅度均发生明显变化。从整体频谱分布可以看出，地表响应能量主要集中在低频和中低频范围内，而较高频率段的频谱幅值总体较小。相比之下，低频或中低频成分波长较长，对局部反射和黏滞耗散的敏感性相对较弱，因此在地表响应中更容易保留下来。

基于上述分析可知，随着无量纲土层厚度变化，地表响应的主振频率成分发生明显迁移，高频成分总体呈衰减趋势，地表振动能量逐渐向低频范围集中。这说明土体覆盖层对瞬态波具有明显的高频滤波作用。

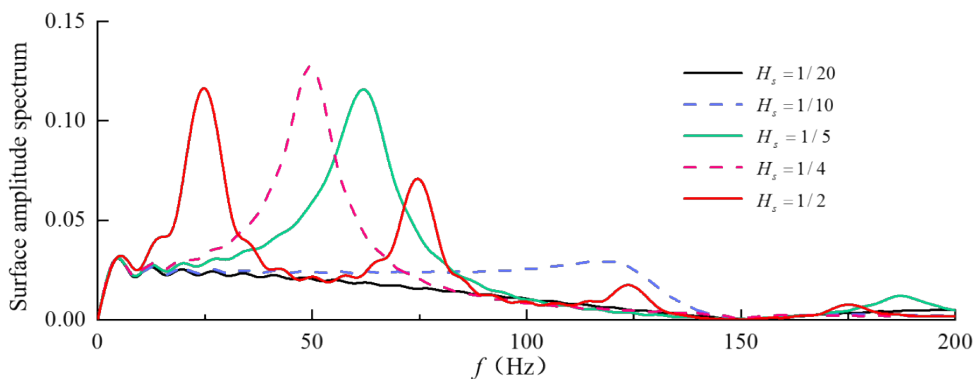


图 13 不同土体无量纲厚度下地表质点的频谱分布

Fig. 13 The spectrum distribution of surface particles under different dimensionless thickness of soil.

另一方面，由于地震与爆破扰动诱发的振动频率范围不同，需要进一步明确不同频率的入射波作用下，土岩地层频谱分布的变化规律。根据上述分析可知，当土体的无量纲厚度为 1/4 时，土岩地层的固有共振频率基本与入射波相同，因此在保持土体的无量纲厚度为 1/4 不变的条件下，改变入射波频率，计算得到地表的振动频谱分布，其计算结果如图 14 所示。

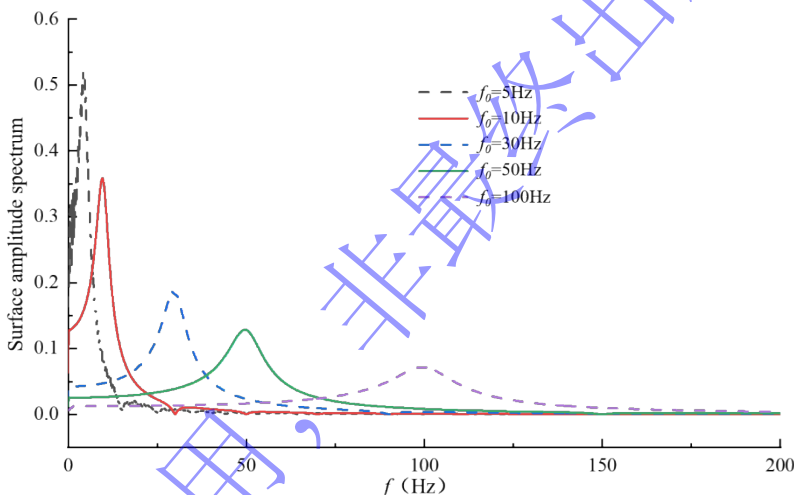


图 14 不同入射波频率下地表质点的频谱分布

Fig. 14 Spectral distribution of surface particles under different incident wave frequencies

由图 14 分析可知，不同入射波频率条件下，地表质点速度响应的频谱分布存在明显差异。总体上，地表主振频率在无量纲厚度为 1/4 时均与入射波的频率基本相同。随着入射波频率的增加，地表主振频率也增加，但其频谱幅值降低，这也进一步体现了覆盖土层对高频成分具有较强的滤波和衰减作用。

3.4 土岩地层的动刚度差异对放大效应的影响分析

在实际工程中，覆盖层的场地条件差异较大。根据建筑抗震设计规范（GB 50011-2010）对场地类别的划分，选取 I₁类（坚硬土）、II类（中硬土）、III类（中软土）至 IV类（软弱土）典型物理参数，利用前节构建的特征线解析数学模型进行求解得到放大效应系数。同时为了体现动刚度差异对放大效应的影响，利用可以表征动刚度的波阻抗进行讨论，引入：

$$\zeta = Z_s / Z_r \quad (24)$$

式中， Z_s 与 Z_r 分别为土体和岩石的波阻抗。

根据建筑抗震设计规范（GB 50011-2010），覆盖层四类场地条件界限对应的剪切波速分别为 800m/s、500 m/s、250m/s、150m/s，对应的密度可根据工程经验分别取 2100 kg/m³、1900

kg/m^3 、 1800 kg/m^3 、 1700 kg/m^3 ，岩体参数保持不变，计算结果如图 15 所示。由图 15 可知，随着覆盖层与基岩动刚度差异的变化，土岩地层的放大效应也不同，总体上呈现出随着动刚度差异越大（波阻抗之比越小），覆盖层越软，其放大效应越明显的规律。根据图 15 进一步整理可得，在本文的参数取值下，四类场地的放大系数取值范围如表 1 所示。

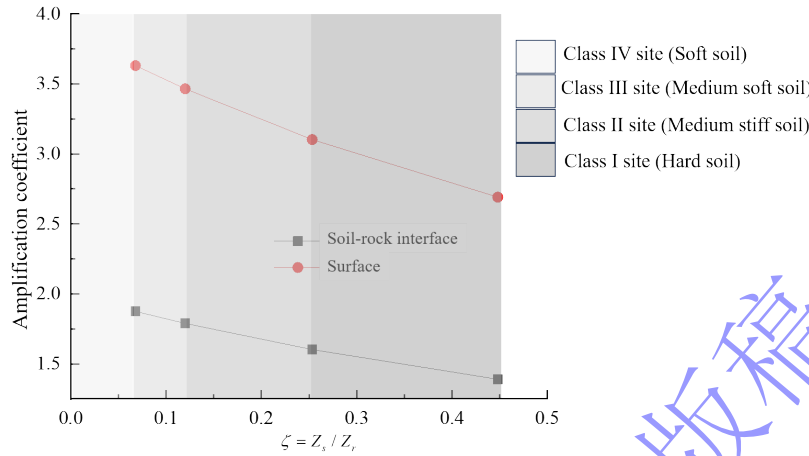


图 15 动刚度的差异对放大系数的影响

Fig.15 The influence of the difference of dynamic stiffness on the amplification factor

表 1 四类场地的放大系数取值范围

Table 1 The range of amplification factor of four types of site types

Site classification	Amplification coefficient of soil-rock interface	Surface amplification coefficient
I ₁	1.39~1.60	2.69~3.10
II	1.60~1.79	3.10~3.47
III	1.79~1.88	3.47~3.63
IV	>1.88	>3.63

实际工程中，可根据表 1 中的取值范围对不同场地类型地层的放大效应进行初步评估，其具体数值可以根据地层波阻抗比进行插值计算得到，从而预先在实际工程提出相关安全保障措施。

4. 结论与讨论

本文土-岩地层为研究对象，基于特征线法构建了求解瞬态波在土-岩地层中传播的数学模型，并以此为基础讨论了具有黏弹性性质土体的厚度和相关黏弹性参数对应力波衰减效应与场地放大效应的影响，具体的结论可归纳如下：

- (1) 相比于线弹性模型考虑黏弹性的土体本构模型时，其地表振动的场地放大效应偏小。
- (2) 土层厚度的改变，直接影响着波的干涉效应从而影响界面和地表的振速放大效应。对于土-岩界面而言，当无量纲厚度较小时，即 $H < 1/5$ 时，满足无量纲厚度越小其振速放大效应越大的规律，但当 $H > 1/5$ 时，放大效应基本不变，其应力波的峰值随着无量纲厚度 H 的增大呈现先增大后减小的趋势。对于地表而言，总体上满足随着无量纲厚度的增加，振速放大效应呈现出先增大再减小的规律。
- (3) 随着松弛时间的增加，土-岩界面的振速放大效应基本不发生改变，而地表上的放大效应呈现出先增大后趋于稳定的规律，且地表振动的持续时间也越长。应力波的峰值随着松弛时间的增加也在逐渐增加。
- (4) 随着等效模量的增加，地表和界面处振速的放大效应几乎不变，但应力波的峰值在逐渐减小，在速度波入射的条件下，应力场相对于速度场对波阻抗的变化更敏感。

(5) 覆盖土层具有高频滤波性。随着入射波频率和土层厚度的增加, 都会使得地表的高频振动的幅值减小, 主频在无量纲厚度 $1/4$ 是幅值最大, 产生共振。

(6) 随着覆盖层与基岩动刚度差异的变化, 土岩地层的放大效应也不同, 总体上呈现出随着动刚度差异越大(波阻抗之比越小), 覆盖层越软, 其放大效应越明显的规律。

需要说明的是, 本文的研究仍存在一定的局限性, 例如只考虑了瞬态波从基岩入射到覆盖土层这一种场地条件, 事实上基岩中可能存在软弱结构面、节理等情况, 此时波将不再是从硬介质入射到软介质, 可能出现软介质入射到硬介质等复合的复杂工况。另外本研究中没有考虑波入射角的影响, 对土体中的三相存在也没有深入考虑, 下一步地研究可就本文上述的局限性进行拓展、优化, 例如考虑从软弱地层侧入射到较硬地层的情况, 以使理论计算更接近于工程实际。

5. 参考文献

- [1] 蒙贤忠,夏宇馨,周传波,等.土-岩地层水平孔爆破诱发振动传播特征及预测[J].岩石力学与工程学报,2025,44(03):737-751.
Meng Xianzhong, Xia Yuqing, Zhou Chuanbo, et al. The Propagation Characteristics and Prediction of Vibration Induced by Horizontal-Hole Blasting in Soil-Rock Strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(03): 737-751.
- [2] Michael Schoenberg. Elastic Wave Behavior across Linear Slip Interfaces[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1980, 68(5): 1516-1521.
- [3] Miller, R. K. An Approximate Method of Analysis of the Transmission of Elastic Waves through a Frictional Boundary[J]. ASME J. Appl. Mech., 1977, 44(4): 652-656.
- [4] 张茂晨,路世伟,周传波,等.上土下岩地层中柱面 SH 波的传播特性分析[J].工程爆破, 2023,29(04):35-42.
Zhang Maochen, Lu Shiwei, Zhou Chuanbo, et al. Analysis of Propagation Characteristics of Cylindrical SH Waves in Upper Soil and Lower Rock Strata[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(4): 35-42.
- [5] 周俊,石文革,董玉飞,等.上土下岩地层中平面 SH 波的传播特性分析[J].高压物理学报, 2022,36(06):46-53.
Zhou Jun, Shi Wenge, Dong Yufei, et al. Analysis of Propagation Characteristics of SH Waves in Upper Soil and Lower Rock Strata [J]. Physics of high pressure, 2022,36 (06) : 46-53.
- [6] 李伟华,胡叶尘,赵成刚,等.非饱和土成层场地波动问题的解析解及应用[J].岩土工程学报, 2018,40(10):1790-1798.
Li Wei-hua, Hu Ye-chen, Zhao Cheng-gang, Zhen Jie. Analytic Solution for Wave Propagations in Layered Unsaturated Soil and Its Application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1790-1798.
- [7] Zhao X B, Zhao J, Cai J G. P-wave transmission across fractures with nonlinear deformational behaviour[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30(11): 1097-1112.
- [8] Li X F, Li H B, Li J C, Li Z W. Research on transient wave propagation across nonlinear joints filled with granular materials[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51: 2373-2393.
- [9] Cai J, Zhao J. Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2000,37(4):661-682.
- [10] Zhao J, Zhao X, Cai J. A further study of P-wave attenuation across parallel fractures with linear deformational behaviour[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2006,43(5):776-788.

- [11] Zhao B X, Zhu B J, Zhao J, et al. Study of wave attenuation across parallel fractures using propagator matrix method[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2012, 36(10): 1264-1279.
- [12] Li C J, Ma W G, Zhou X Y. Analytical Study of Underground Explosion-Induced Ground Motion[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(6): 1037-1046.
- [13] 俞缙,关云飞,肖琳,等.弹性纵波在不同非线性法向变形行为节理处的传播[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2007, (06): 589-594.
Yu Jin, Guan Yunfei, Xiao Lin, et al. Propagation of Elastic Longitudinal Waves at Joints with Different Nonlinear Normal Deformation Behaviors[J]. *Journal of PLA University of Technology (Natural Science Edition)*, 2007(6): 589-594.
- [14] 俞缙,赵晓豹,赵维炳,等.改进的岩石节理弹性非线性法向变形本构模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, (09): 1316-1321.
Yu Jin, ZHAO Xiaobao, ZHAO Weibing, LI Xiaozhao, GUAN Yunfei. Improved nonlinear elastic constitutive model for normal deformation of rock fractures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(9): 1316-1321.
- [15] 俞缙,钱七虎,林从谋,等.纵波在改进的弹性非线性法向变形行为单节理处的传播特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(08): 1156-1164.
Yu Jin, QIAN Qi-hu, LIN Cong-mou, ZHAO Xiao-bao. Transmission of elastic P-wave across one fracture with improved nonlinear normal deformation behaviors[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(8): 1156-1164.
- [16] Gui Y. L., Zhao Z. Y., Jayasinghe L. B., et al. Blast Wave Induced Spatial Variation of Ground Vibration Considering Field Geological Conditions[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2018, 101: 63-68.
- [17] Fan, L., Wang, M. & Wu, Z. A Split Three-Characteristics Method for Stress Wave Propagation through a Rock Mass with Double-Scale Discontinuities[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2020, 53: 5767-5779.
- [18] Wang, M., Shang, J.L. & Fan, L.F. Combined Static-Dynamic Loading Effect on the Wave Transmission Properties in Rock Masses with Macrojoint and Microdefect[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2022, 55: 7747-7764.
- [19] Wang M., Shang J., Fan L. Effective Wave Velocity in Rock Masses with Double-Scale Discontinuities under In-Situ Stresses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2024, 174: 105628.
- [20] 周传波,吕国鹏,蒋楠.爆破振动效应研究若干进展[J]. *工程爆破*, 2024, 30(05): 61-74.
Zhou Chuanbo, Lv Guopeng, Jiang Nan. Some Progress in the Study of Blasting Vibration Effect[J]. *Engineering Blasting*, 2024, 30(5): 61-74.
- [21] 张继奎,蒋楠,周传波,朱斌,蔡忠伟,周文斌.爆破振动影响下人体舒适度振动台试验及其评价体系构建[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(02): 326-335.
ZHANG Ji-kui, JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, ZHU Bin, CAI Zhong-wei, ZHOU Wen-bin. Vibrating table test of human comfort under blasting vibration and its evaluation system construction[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(2): 326-335.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 6722—2014 爆破安全规程. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, People's Republic of China. GB 6722 —2014 Blasting Safety Code. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [23] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 工程场地地震安全性评价: GB 17741-2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.

State Administration for Market Supervision and Administration, National Standardization Administration. Evaluation of seismic safety for engineering sites : GB 17741-2025 [S].Beijing : China Standards Publishing House, 2025.

[24] Deng-How Tsaur, Ming-Sheng Hsu, SH waves scattering from a partially filled semi-elliptic alluvial valley, Geophysical Journal International, Volume 194, Issue 1, July 2013, Pages 499–511.

最新录用，
非最终出版稿

Study on dynamic response characteristics of soil-rock strata induced by transient waves

Liu Weiwei, Jia Lei, Fu Yanqing, Wang Teng

(Jinan Institute of Surveying and Mapping, Jinan 250101, China)

Abstract: Clarifying the dynamic response characteristics of soil-rock strata under transient waves is of great significance for accurately evaluating and controlling the dangerous effects of dynamic effects such as blasting or earthquake. Aiming at the typical soil-rock stratum structure, the standard linear solid is introduced to describe the soil constitutive, and the physical analysis model of soil-rock stratum under transient wave action is constructed. Based on the characteristic line method and the displacement continuity method, the explicit mathematical description of transient wave propagation in soil-rock stratum is established. Finally, through parameter analysis, the influence of dimensionless thickness, relaxation time and equivalent dynamic modulus of soil on the propagation characteristics and site amplification effect of transient wave in soil-rock stratum is systematically discussed. The results show that: (1) when considering the viscoelasticity of soil, the amplification effect of surface site is small; (2) With the increase of dimensionless thickness, the particle velocity amplification effect of soil-rock interface decreases first and then stabilizes, the peak value of stress wave increases first and then decreases, and the surface velocity amplification effect increases first and then decreases. (3) With the increase of relaxation time, the amplification effect of interface vibration velocity is basically unchanged, the surface amplification effect increases first and then stabilizes, and the peak value of stress wave increases gradually. (4) With the increase of equivalent modulus, the amplification effect of surface and interface vibration velocity is almost unchanged, and the peak value of stress wave decreases gradually. (5) The soil layer has high frequency filtering. (6) The greater the difference in dynamic stiffness, the more obvious the amplification effect of the stratum.

Keywords: transient wave ; soil-rock strata ; dynamic response ; characteristic line method