

DOI: 10.11779/CJGE201909003

软硬交互横向不均匀场地地震反应分析

梁建文^{1, 2, 3}, 吴孟桃¹, 巴振宁^{1, 2, 3}

(1. 天津大学土木工程系, 天津 300354; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350; 3. 中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室(天津大学), 天津 300350)

摘要: 软硬交互横向不均匀场地十分常见, 其在强震作用下的地震反应对工程结构的安全有着重要影响, 然而目前还很少有针对该场地地震反应分析的研究。基于精确动力刚度矩阵和均布荷载动力格林函数的间接边界元方法, 经快速傅里叶逆变换, 在时域内求解了层状半空间中软硬交互横向不均匀场地的地震反应问题。求解中将模型分解为含较硬介质的层状半空间域和较软介质域, 同时将总波场分解为自由波场和散射波场两部分, 通过在相应边界上施加斜线和水平线虚拟均布荷载, 进而求解动力格林函数以模拟散射波场, 自由波场可由直接刚度法方便求得。验证了方法的正确性, 检验了求解模型的收敛性, 进而开展了相应的数值计算分析, 着重讨论了介质参数和软硬交界面倾角对场地地震反应的影响。研究表明: 软硬交互场地中, 较大的地表地震响应发生在较软介质侧; 软硬界面的存在使得场地地表加速度响应发生突变, 突变程度受介质参数和交界面倾角的影响显著; 随着介质参数差异和交界面倾角的增大, 地表加速度峰值增大, 反应谱曲线显示短周期成分变得更为丰富, 对基岩地震动的放大作用增强; 软硬交界面对场地地表地震反应的影响主要在交界面外的两倍介质层厚度范围。

关键词: 软硬交互; 横向不均匀场地; 地震响应; 格林函数; 间接边界元

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)09-1599-10

作者简介: 梁建文(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地震工程与工程波动方面的研究。E-mail: liang@tju.edu.cn。

Seismic response analysis of lateral uneven sites with soft-hard connected media

LIANG Jian-wen^{1, 2, 3}, WU Meng-tao¹, BA Zhen-ning^{1, 2, 3}

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of the Ministry of Education, Tianjin 300350, China; 3. Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience of China Earthquake Administration (Tianjin University), Tianjin 300350, China)

Abstract: The lateral uneven site with soft-hard connected media is very common, and its seismic response under strong earthquakes has an important impact on the safety of engineering structures. However, studies have seldom been reported to investigate the seismic response of soft-hard connected sites. Based on the indirect boundary element method combined with the exact dynamic stiffness matrix and Green's functions of uniformly distributed loads, the seismic response of soft-hard connected sites in a layered half-space is solved in time-domain via the fast Fourier inverse transform. In the solution, the model is divided into a harder medium of layered half-space region and a softer medium region, while the wavefield is classified into two parts: free field and scattered field. The diffraction response can be simulated by the Green's function of inclined and horizontal fictitious distributed loads acting on corresponding boundaries, and the free field response can be easily solved by the direct stiffness method. The accuracy of the proposed method is verified, and the convergence of the solution model is tested. Numerical calculations are performed to analyze the influences of medium parameters and soft-hard interface dip angles in the seismic response. The results show that in the soft-hard connected site, the stronger ground motion response occurs in the softer medium region. The existence of an soft-hard interface leads to a sudden change in acceleration response, and its sensitivity is significantly affected by medium parameters and interface dip angles. With the increase of difference in the medium parameters and interface dip angles, the peak ground acceleration increases, the response spectrum curve shows more abundant short-period components, and the amplification effect on bedrock motion is enhanced. The influences of soft-hard interface on the surface seismic response of the site are mainly within twice the thickness of the medium layer outside the interface.

Key words: soft-hard connected medium; lateral uneven site;
seismic response; Green's function; indirect boundary element

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778413, 51578372)

收稿日期: 2018-12-24

0 引言

软硬交互横向不均匀场地十分常见，在隧道洞口段、破碎围岩或软弱夹层段，一般都存在着软质土岩和硬质土岩的软硬结合面。而大量震害调查表明，软硬交界处工程结构破坏往往比较严重，如汶川地震震害调查显示^[1-2]，软硬岩交界地质地段是隧道震害主要发生区段，多条公路隧道在软硬交界段严重损坏、结构衬砌开裂变形等。鉴于软硬介质在刚度和天然重度等力学参数上存在着较大差异，在强烈地震动作用下会产生不同的位移和加速度等动力响应，十分有必要阐明这种场地的地震反应机理。

然而，目前场地地震响应研究多集中在水平层状场地^[3-5]，对软硬交互横向不均匀场地地震响应特征的研究较少，而随着隧道建设的高速发展和地下空间的大规模开发，软硬交互场地中隧道结构的动力响应问题逐渐引起关注与研究，采用方法包括震害调查、数值计算和振动台模型试验。Wang 等^[6]对大量震后隧道灾害调查指出，洞口软硬交接段强制位移促使隧道结构纵向或横向发生剪切破坏；王维^[7]建立盾构隧道穿越软硬突变场地的三维有限元模型，研究了不同地震波、波入射角和软硬交界面倾角对隧道结构及地层动力响应的影响；殷允腾等^[8]采用有限元和有限差分耦合方法，探讨了均质岩体和软硬岩交界地段地震响应规律；申玉生等^[9]建立龙溪隧道软硬岩交界段地震响应力学模型，指出强震作用下软硬岩交界段隧道所受强制位移显著。振动台试验方面，王帅帅等^[10]以汶川地震中受损严重的龙洞子隧道为原型，开展隧道洞口段振动台模型试验，对比分析了均质仰坡及含软弱夹层仰坡的破坏特征；何川等^[11]以粉质砂土-泥质粉砂岩为软硬交互场地介质材料，开展盾构隧道纵向力学性能模型试验，研究了隧道纵向沉降与弯矩的变化规律；张景等^[12]通过振动台试验，对穿越软硬突变地层盾构隧道纵向地震动力响应进行研究，探讨了软硬突变地层加速度以及隧道结构加速度、应变响应频谱特性等；王道远等^[13]基于相似理论，模拟了高烈度区典型软岩-硬岩交界场地隧道结构振动台试验，指出软硬岩交界地质条件下隧道震害以强制位移为主，地层惯性力次之。可见，上述研究重点关注了软硬场地中隧道结构的响应，且多采用数值模拟或模型试验方法，对软硬交互场地本身地震反应机理的研究鲜有报道。其次，已有文献均以有限边界进行求解，然而实际场地上土（岩）体介质是无限延伸的，因此目前方法在求解精度上也有待提高。众所周知，场地地震反应是地震工程、岩土工程和地球物理等领域中的重要研究课题，而软硬交互场地作为典型的横向不均匀场地对

地震动必然有重要影响，同时，软硬交互场地地震反应分析，也是开展穿越软硬工程研究的基础，因而开展本研究有着重要的理论意义和工程应用价值。

基于以上分析，本文将对以精确动力刚度矩阵和斜线均布荷载动力格林函数为基础的间接边界元方法（IBEM）进行拓展^[14-15]，引入水平荷载格林函数处理无限边界问题，并在时域内研究软硬交互横向不均匀场地的地震响应。文中验证了方法的正确性，检验了求解模型的收敛性，进而开展了相应的数值计算分析，着重讨论了介质参数和软硬交界面倾角对场地地震反应的影响，得到了一些有益的结论。

1 模型与计算方法

1.1 计算模型及其求解

软硬交互场地如图 1 所示，假定左侧为较硬介质，右侧为较软介质，软硬介质下方是相同的层状半空间，软硬交界面（OA）倾角为 α ($0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$)，较软介质与其下的层状半空间的交界面为半无限边界（实际上场地任意一侧介质均可取为无限）。软硬介质均可水平成层（所用格林函数为层状半空间格林函数），考虑到后文分析方便，假定软硬介质均为均一材料，软硬交互层总厚度为 H 。所有材料参数包括剪切波速 c 、泊松比 ν 、阻尼比 ξ 以及质量密度 ρ 。入射地震波与 x 轴成夹角 θ 的方向由基岩面入射。

图 1 所示问题本质上是场地横向不均匀性对地震波的散射，这其中包含了倾斜交界面（OA）和无限水平交界面（AC, $C \rightarrow +\infty$ ）对地震波的散射。本文采用 IBEM 方法求解该无限边界散射问题。值得指出的是这里的无限边界与采用有限元法（FEM）截取有限域进行分析是不同的，事实上本文 IBEM 方法相较 FEM，有着降维和自动满足无穷远辐射条件的优点。

具体求解步骤包括：① 将整体模型（图 1 (a)）分解为含较硬介质的层状半空间域（图 1 (b)）和较软介质域（图 1 (c)），同时将总波场分解为自由波场和散射波场两部分，进而为方便求解，将自由波场全部划归到含较硬介质域。② 在 OA 和 AC 边界上分别施加两组虚拟均布荷载于边界线单元上，求解动力格林函数，以分别模拟含较硬介质域和较软介质域内的散射波场。自由波场可由直接刚度法方便求得。③ 引入位移和应力连续边界条件，确定虚拟荷载密度，进而可确定散射波场；时域结果可由快速傅里叶逆变换叠加频域结果求得。

该问题求解的难度在于无限边界时域动力问题的求解，求解难度具体表现如下：

(1) 无限边界的处理。本文在满足精度的要求下将水平半无限边界截取到 C 点，C 点的位置通过数

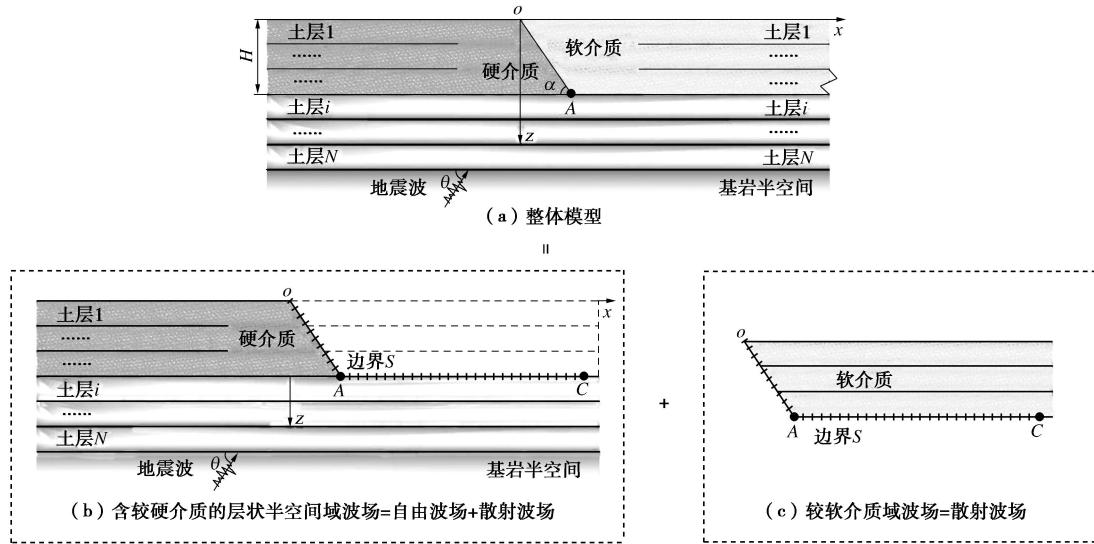


图 1 软硬交互横向不均匀场地模型

Fig. 1 Model for lateral uneven site with soft-hard connected media

值试验确定(具体见第3节)。需要指出的是, 截断边界(以波长表示)与入射频率相关: $\lambda = 2\pi c_s / \omega$, 因此不同频率下的C点是不同的, 进而导致求解上十分困难。

(2) 边界单元的离散与求解精度。不同的频率, 对应的单元尺寸是不同的, 单元的尺寸也将通过数值试验确定(具体见第3节)。关键在于, 对于低频入射, 离散距离要尽量小, 对于高频入射, 单元尺寸要足够密。因此要保证求解精确须进行合理的单元划分及满足动力格林函数的精度(取决于积分精度), 而过大的积分区间及过小的积分间隔将大大增大计算量和存储量, 使求解效率降低。

1.2 平面内精确动力刚度矩阵及自由波场求解

自由波场可由直接刚度法求解得到, 求解方程为

$$\mathbf{Q} = \mathbf{S}_{\text{PSV}} \mathbf{U}, \quad (1)$$

式中, \mathbf{S}_{PSV} 为层状半空间整体动力刚度矩阵, 可通过集整层刚度矩阵 $\mathbf{S}_{\text{PSV}}^L$ 和半空间刚度矩阵 $\mathbf{S}_{\text{PSV}}^R$ 得到, $\mathbf{S}_{\text{PSV}}^L$ 和 $\mathbf{S}_{\text{PSV}}^R$ 具体元素见文献[16]。而 $\mathbf{Q} = \{P_i, iR_i, P_2, iR_2, \dots, P_{N+1}, iR_{N+1}\}^T$ 为由层交界面上外荷载幅值组成的向量, $\mathbf{U} = \{u_1, iw_1, u_2, iw_2, \dots, u_{N+1}, iw_{N+1}\}^T$ 为相对应的位移幅值向量。对于由基岩面入射地震波情况(露头选在基岩面), \mathbf{Q} 的最后二个元素由下式确定(其余元素为零):

$$\begin{Bmatrix} P_b \\ iR_b \end{Bmatrix} = \mathbf{S}_{\text{PSV}}^R \begin{Bmatrix} u_0 \\ iw_0 \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

式中, P_b 和 R_b 分别为 x 、 z 向的基岩面处荷载幅值, u_0 和 w_0 分别相对应的位移幅值。将式(2)代入式(1), 可求得层交界面上的位移幅值, 进而可得到边界上任意点 $\mathbf{x} = (x, z)$ 的位移 $u^f(\mathbf{x})$ 、 $w^f(\mathbf{x})$ 和牵引力 $t_x^f(\mathbf{x})$ 、 $t_z^f(\mathbf{x})$, 上标 “f” 表示自由波场。

1.3 较软介质域波场表达(仅含散射波场)

如前所述, 假定较软介质域仅含散射波场, 通过施加虚拟均布荷载于边界单元产生动力响应模拟。如图1(c)所示, 假定软介质边界为 S , $S = S_1 + S_2$, S_1 表示斜线交界面, S_2 表示无限水平交界面。将边界 S_1 离散为有限 K_1 个线单元, 每个单元的长度为 ΔS_l ($l \in [1, K_1]$), 边界 S_2 理论上有无限个线单元, 为在求解上进行合理简化, 引入截断点 C , 同时, 将截取后的边界离散为有限 K_2 个线单元, 每个单元的长度为 ΔS_m ($m \in [1, K_2]$)。较软介质域(以“F”表示)内任意点 $\mathbf{x} = (x, z)$ 处沿 i 方向的位移和牵引力可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{i,F}^t(\mathbf{x}) = u_{i,F}^{s_1}(\mathbf{x}) + u_{i,F}^{s_2}(\mathbf{x}) \\ \quad = \sum_{l=1}^{K_1} g_{ij}^F(\mathbf{x}, \xi_l) \phi_j(\xi_l) + \sum_{m=1}^{K_2} g_{ij}^F(\mathbf{x}, \xi_m) \phi_j(\xi_m), \\ t_{i,F}^t(\mathbf{x}) = t_{i,F}^{s_1}(\mathbf{x}) + t_{i,F}^{s_2}(\mathbf{x}) \\ \quad = \sum_{l=1}^{K_1} t_{ij}^F(\mathbf{x}, \xi_l) \phi_j(\xi_l) + \sum_{m=1}^{K_2} t_{ij}^F(\mathbf{x}, \xi_m) \phi_j(\xi_m), \end{array} \right. \quad (3)$$

式中, 上标 “t” 表示总波场, 上标 “ s_1 ” 和 “ s_2 ” 表示散射波场。 $g_{ij}^F(\mathbf{x}, \xi_l)$ 和 $t_{ij}^F(\mathbf{x}, \xi_l)$ 分别为与域 F 相应的斜线均布荷载的位移和牵引力动力格林函数, $g_{ij}^F(\mathbf{x}, \xi_m)$ 和 $t_{ij}^F(\mathbf{x}, \xi_m)$ 分别为与域 F 相应的水平线均布荷载的位移和牵引力动力格林函数, 表示在边界 $S_1(S_2)$ 上第 $l(n)$ 个单元(中点为 $\xi_l(\xi_m)$)施加沿 j 方向的密度为 $\phi_j(\xi_l)$ ($\phi_j(\xi_m)$)的斜线(水平)均布荷载时, 点 \mathbf{x} 处产生的沿 i 方向的位移和牵引力。

本文采用的格林函数包括斜线均布荷载格林函数和水平线均布荷载格林函数。对于斜线格林函数, 文献[15]和文献[16]中已给出了详细的求解过程, 在此不再赘述。对于水平格林函数, 求解时只需将虚拟均布

荷载直接作用在水平边界单元上, 运用“直接刚度法”得出介质各层的动力响应。

1.4 含较硬介质域波场表达(散射波场+自由波场)

如前所述, 含较硬介质的层状半空间域波场包括散射波场和自由波场, 散射波场仍通过求解格林函数得到, 自由波场可由直接刚度法方便求得。如图 1(b)所示, 假定总波场边界为 S , 同样在边界 S_2 上引入截断点 C , 为方便代入边界条件, 令较硬介质边界的离散线单元数和单元长度与较软介质域一一对应。则含较硬介质的层状半空间域(以“ E ”表示)内任意点

$x=(x,z)$ 处沿 i 方向的位移和牵引力可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{i,E}^t(x) = u_{i,E}^f(x) + u_{i,E}^{s_1}(x) + u_{i,E}^{s_2}(x) \\ \quad = u_{i,E}^f(x) + \sum_{l=1}^{K_1} g_{ij}^E(x, \xi_l) \phi_j(\xi_l) + \sum_{m=1}^{K_2} g_{ij}^E(x, \xi_m) \phi_j(\xi_m), \\ t_{i,E}^t(x) = t_{i,E}^f(x) + t_{i,E}^{s_1}(x) + t_{i,E}^{s_2}(x) \\ \quad = u_{i,E}^f(x) + \sum_{l=1}^{K_1} t_{ij}^E(x, \xi_l) \phi_j(\xi_l) + \sum_{m=1}^{K_2} t_{ij}^E(x, \xi_m) \phi_j(\xi_m), \end{array} \right. \quad (i, j = x, z) \quad (4)$$

式中, $g_{ij}^E(x, \xi_l)$ 和 $t_{ij}^E(x, \xi_l)$ 分别为与域 E 相应的斜线均布荷载的位移和牵引力动力格林函数, $g_{ij}^E(x, \xi_m)$ 和 $t_{ij}^E(x, \xi_m)$ 分别为与域 E 相应的水平线均布荷载的位移和牵引力动力格林函数。有关斜线格林函数和水平格林函数的求解同 1.3 节。

1.5 边界条件

边界条件为边界 S (倾斜交界面 OA 和水平交界面 AC)上的位移和牵引力连续, 边界条件取为在每个单元上独立满足。

$$\left. \begin{array}{l} \int_{-\infty}^{\infty} u_{i,F}^t(x_n) dSx_n - \int_{-\infty}^{\infty} u_{i,E}^t(x_n) dSx_n = 0, \\ \int_{-\infty}^{\infty} t_{i,F}^t(x_n) dSx_n - \int_{-\infty}^{\infty} t_{i,E}^t(x_n) dSx_n = 0, \end{array} \right\} \quad (i=x, z) \quad (5)$$

式中, $\int_{-\infty}^{\infty} u_{i,F}^t(x_n) dSx_n$ 和 $\int_{-\infty}^{\infty} t_{i,F}^t(x_n) dSx_n$ 分别表示域 F 边界 S 上所有单元在边界 S 第 n 个单元上产生的沿 i 方向位移和牵引力之和, $\int_{-\infty}^{\infty} u_{i,H}^t(x_n) dSx_n$ 和 $\int_{-\infty}^{\infty} t_{i,H}^t(x_n) dSx_n$ 分别表示域 E 边界 S 上所有单元在边界 S 第 n 个单元上产生的沿 i 方向位移和牵引力之和。

将式(3)和式(4)代入式(5)得到域 F 边界上的虚拟均布荷载密度 $\{\phi_j^F\}$ 以及域 E 边界上的虚拟均布荷载密度 $\{\phi_j^E\}$, 进而可求得场地任意点的响应。

1.6 时域结果的求解

以上分析都是在频域内进行的, 本文利用快速傅里叶逆变换将离散的频域问题转换为时域问题。文献[17]给出了离散傅里叶变换及逆变换形式:

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{-i(2\pi km/N)} \quad (k=0, 1, 2, \dots, N-1), \quad (6)$$

$$x_m = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{i(2\pi km/N)} \quad (m=0, 1, 2, \dots, N-1), \quad (7)$$

式中, x_m 为时域中用离散值给出的时间函数(离散样本值), N 为样本数, C_k 为频域中的复傅里叶系数或复振幅。

若取样本点间隔为 Δt , 则第 m 个样本点的时刻 $t=m\Delta t$, 将 $m=t/\Delta t$ 代入有限傅里叶近似式^[24], 并引入 $f_k=k/(N\Delta t)$, 可得

$$\tilde{x}(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} [A_k \cos 2\pi f_k t + B_k \sin 2\pi f_k t] + \frac{A_{N/2}}{2} \cos 2\pi f_{N/2} t, \quad (k=1, 2, \dots, N-1), \quad (8)$$

式中, A_k , B_k 为有限傅里叶系数, 且定义复傅里叶系数 $C_k = (A_k - iB_k)/2$ 。由式(8)可将给定地震波分解为频率为 $f_1, f_2, \dots, f_{N/2-1}, f_{N/2}$ 共 $N/2$ 个成分波, 且满足 $f_1 < f_2 < \dots < f_{N/2-1} < f_{N/2}$ 。这样, 利用卷积公式可得到各个有效频率对应的地表计算点地震响应, 最后结合式(7)即可求得场地地震反应的时域解答。

2 方法验证

若软硬交界面两侧的介质参数取为相同, 则本文模型可退化为自由场。本节通过将模型退化结果与中国地震局工程力学研究所“新一代一维土层地震反应分析程序 SoilQuake”^[18]的计算结果比较来验证本文方法。以基岩半空间上双层土场地为例, 验证参数: 土层 1 厚度 $d_1=5$ m、剪切模量 $G_1=4.0 \times 10^6$ N/m², 土层 2 厚度 $d_2=5$ m、剪切模量 $G_2=4.0 \times 10^7$ N/m², 基岩半空间剪切模量 $G_R=4.0 \times 10^8$ N/m²; 土层和基岩密度 $\rho_1=\rho_2=\rho_R=2000$ kg/m³; 阻尼比 $\zeta_1=\zeta_2=\zeta_R=0.02$ 。选取 El Centro 波(0.1g)作为输入地震波作用于基岩露头。图 2 给出了波垂直入射时自由场地表加速度时程曲线, 从图中可以看出, 本文计算结果与 SoilQuake 给出的结果十分吻合。图 3 给出了相应的加速度反应谱曲线, 其中单自由度体系的阻尼比 $\zeta=0.05$, 从图中可以看出, 两者反应谱也吻合良好, 进一步验证了本文方法时域结果的正确性。

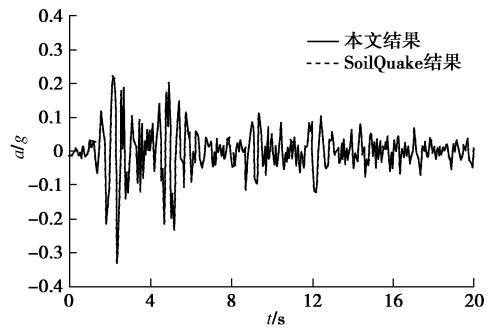


图 2 自由场地表加速度时程曲线

Fig. 2 Time histories of acceleration for surface of free field

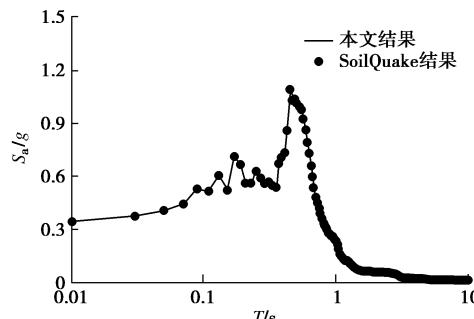


图3 自由场地表加速度反应谱曲线

Fig. 3 Response spectra of acceleration for surface of free field

3 收敛分析

本文给出了一种用于求解层状半空间中软硬交互横向不均匀场地地震响应的 IBEM，该方法通过对求解域边界进行离散，无需大量的单元和节点，在程序实现时可结合 OpenMP 并行技术，具有计算精度高、求解速度快的显著特点，非常适用于不均匀复杂介质场地的动力解答。

为检验所建立的间接边界元法求解模型的收敛性，本节对基岩半空间上单层土在地震波入射下地表响应的收敛情况进行分析。土层的计算参数：介质剪切波速比 $c_R : c_{\text{硬}} : c_{\text{软}} = 3 : 2 : 1$ ，密度 $\rho_R = \rho_{\text{硬}} = \rho_{\text{软}}$ ，阻尼 $\zeta_R = 0.02$ ， $\zeta_{\text{硬}} = \zeta_{\text{软}} = 0.05$ 。表 1 给出了不同入射频率下地表各位置点的位移幅值（无量纲化）随截断距离 D_{\max} 的变化。

表1 方法的收敛分析

Table 1 Convergence analysis for IBEM

x/H	$f=2.5 \text{ Hz}$				
	$D=3\lambda$	$D=5\lambda$	$D=7\lambda$	$D=10\lambda$	$D=12\lambda$
-2.00	2.1204	2.1210	2.0903	2.0760	2.0862
-1.00	2.1154	2.1093	2.0678	2.0752	2.0733
0.00	2.2840	2.2666	2.2312	2.2559	2.2434
1.00	3.4511	3.3852	3.3884	3.4721	3.4402
2.00	4.4887	4.3613	4.4353	4.5088	4.4921
x/H	$f=10 \text{ Hz}$				
-2.00	1.8629	1.8437	1.8319	1.8392	1.8454
-1.00	1.8826	1.8663	1.8820	1.8807	1.8827
0.00	1.4673	1.4731	1.4810	1.4717	1.4769
1.00	1.9223	1.8018	1.8377	1.8453	1.8422
2.00	2.0874	2.1720	2.1498	2.1436	2.1420
x/H	$f=20 \text{ Hz}$				
-2.00	1.4689	1.4628	1.4620	1.4627	1.4650
-1.00	1.6893	1.6910	1.6908	1.6905	1.6886
0.00	0.9916	1.0392	1.0269	1.0286	1.0266
1.00	1.5923	1.5896	1.6126	1.6065	1.5958
2.00	1.4228	1.4140	1.3612	1.3751	1.3710

从表 1 中可以看出，随着截断距离的增大，计算

结果逐渐趋于稳定，无论是低频率 ($f=2.5 \text{ Hz}$)、中频率 ($f=10 \text{ Hz}$) 还是高频率 ($f=20 \text{ Hz}$)，位移幅值随截断距离的增大均有较好的收敛性。后文计算中，取 $D_{\max}=10\lambda$ 来满足离散距离的精度要求。

其次，对于边界单元离散的精度和由波数域到空间域积分的精度保证，文献[15]已有详细的说明。本文经过验算，针对不同的入射频率，采用每波长 $10 \sim 20$ 个单元来离散，最大积分波数段为 $k_{\max}=200 \sim 500$ ，最小的积分间隔为 $\Delta k=0.00005 \sim 0.0001$ ，即可达到满意的计算精度。

4 算例与结果分析

实际场地中软硬交互介质分布特征较为复杂，本文选择软硬介质参数和软硬交界面倾角两个因素进行分析研究，给出了不同工况下场地地表加速度时程和反应谱结果。为了研究真实地震波作用下横向不均匀场地的时域地震反应问题，采用 El Centro 波作为入射地震波，输入波的最大加速度为 $0.2g$ ，持时为 40 s ，波入射角度为 $\theta=90^\circ$ （垂直入射）。为便于分析，以下算例均以基岩上单一土层场地为例进行计算，计算模型如图 4 所示。

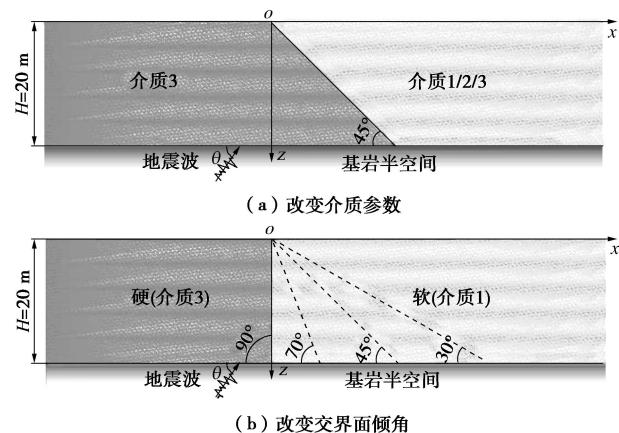


图4 基岩上单一土层中软硬交互介质模型

Fig.4 Soft-hard connected site in a single layered half-space

首先，研究交界面两侧介质参数（以剪切波速比值 $c_{\text{硬}}/c_{\text{软}}$ 表示）对场地地表运动特征的影响。假定软硬交互介质层的总厚度 $H=20 \text{ m}$ ，交界面倾角为 45° ，介质层下方为基岩半空间，坐标原点取在地表处的交界面起始点（下同）。考虑的工况：工况一，左侧为介质 3，右侧为介质 1；工况二，左侧为介质 3，右侧为介质 2；工况三，左侧为介质 3，右侧为介质 3。

其次，研究交界面倾角对场地地表运动特征的影响。假定交界面两侧介质参数不变（左侧为较硬的介质 3，右侧为较软的介质 1），考虑 4 种交界面倾角变化，4 种交界面倾角分别为 30° ， 45° ， 70° 和 90° 。

介质层和基岩半空间土体参数如表 2 所示。计算时, 在地表分别设置 13 个观测点, 其位置依次为 $x/H=-3.0, -2.0, -1.5, -1.0, -0.5, -0.25, 0.0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0$, 其中, 观测点 0.0, 0.25, 0.5, 1.0 位于交界面内, 其余观测点位于交界面外。

表 2 材料参数

Table 2 Parameters of materials

材料	$c/(m \cdot s^{-1})$	ζ	ν	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$
介质 1	200	0.05	1/3	1400
介质 2	300	0.04	1/3	1600
介质 3	400	0.03	1/3	1800
基岩	600	0.02	1/3	2000

4.1 软硬介质参数对地震反应的影响

图 5 给出了不同介质参数下场地地表加速度时程, 为便于分析, 将各测点相应的加速度峰值列于表 3, 限于篇幅, 仅给出代表性结果。由此可见:

(1) 与无交界面的均匀场地(工况三)相比, 交界面的存在使得场地两侧地表加速度响应产生较大差异。

(2) 介质参数对软硬交互场地地表加速度的影响显著, 且主要体现在软介质侧($x/H=1.0 \sim 3.0$), 不同介质参数下软介质侧对应的加速度峰值(PGA)差别较大, 而硬介质侧对应的 PGA 变化均很小。

(3) 软硬两侧介质参数差异越大, 软硬交互场地的地震反应越剧烈。如在观测点 $x/H=2.0$ 处, 剪切波速比为 2 时的 PGA 为 $0.3375g$, 大于剪切波速比为 $4/3$ 时的 $0.2634g$, 大于剪切波速比为 1 时的 $0.2036g$ 。

为更准确地体现地震波在介质中的传播和引起地

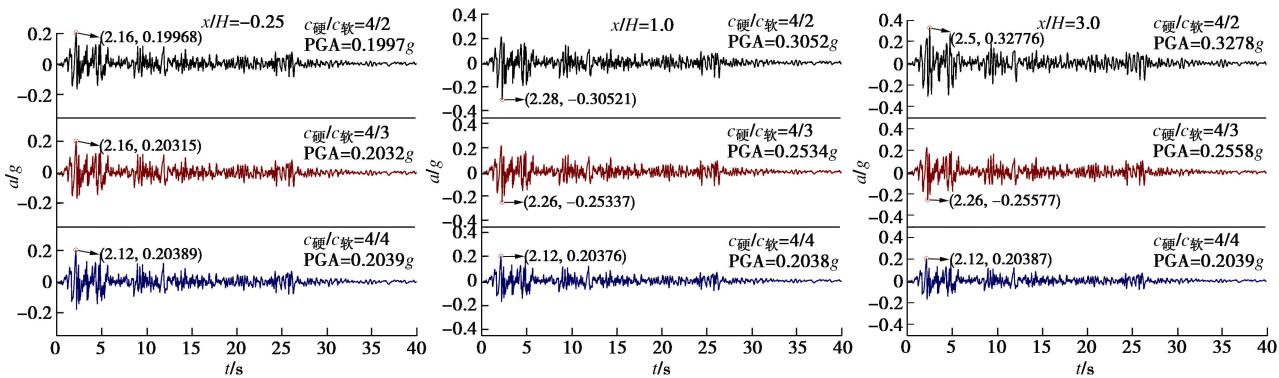


图 5 不同介质参数下场地地表加速度时程曲线

Fig. 5 Time histories of acceleration at surface of site under different medium parameters

表 3 不同介质参数下场地地表的加速度峰值

Table 3 Peak accelerations at surface of site under different medium parameters

(g)

介质参数	观测点位置							
	$x/H=-3.0$	$x/H=-2.0$	$x/H=-1.0$	$x/H=-0.25$	$x/H=0.25$	$x/H=1.0$	$x/H=2.0$	$x/H=3.0$
$c_{\text{硬}}/c_{\text{软}}=4/2$	0.1916	0.1910	0.1990	0.1997	0.2097	0.3052	0.3375	0.3278
$c_{\text{硬}}/c_{\text{软}}=4/3$	0.2026	0.2013	0.2026	0.2032	0.2066	0.2534	0.2634	0.2558
$c_{\text{硬}}/c_{\text{软}}=4/4$	0.2038	0.2036	0.2037	0.2039	0.2038	0.2038	0.2036	0.2039

表反应的放大影响, 以基岩入射地震波加速度为参考点, 定义不同工况下地表加速度放大系数 F_a , 即

$$F_a = (\text{PGA}_{\text{out}})/(\text{PGA}_{\text{in}}), \quad (9)$$

式中, $(\text{PGA})_{\text{out}}$ 为地表输出的加速度峰值, $(\text{PGA})_{\text{in}}$ 为基岩输入的加速度峰值。图 6 给出了介质参数不同时放大系数随观测点位置变化情况。由图 6 可见:

(1) 地震作用下, 软硬交互地形对由基岩入射的地震波有明显的放大影响, 3 种剪切波速比下地表产生放大作用最大值分别是入射波的 1.82, 1.34, 1.00 倍。

(2) 地表加速度响应在软硬介质交界面处发生突变, 对于非均匀场地, 相比交界面始端($x/H=0.0$), 不同剪切波速比下交界面末端($x/H=1.0$) 的放大系数均迅速增大。

(3) 随着观测点逐渐远离交界面, 软介质侧的放大系数呈现先增大后减小、并趋向于一定值的趋势(该定值为基岩上单一软介质土层的自由场响应); 随着两侧介质剪切波速比的增大, 放大系数逐渐增大, 同时其随观测点的变化趋势也更明显。

从图 6 还可以看出, 介质参数对地表加速度响应的最大影响程度发生在 $x/H=1.5$ 测点处, 得到最大加速度响应处放大系数随剪切波速比的线性变化关系为 $F_a = 0.801(c_{\text{硬}}/c_{\text{软}}) + 0.193$ ($R^2 = 0.9881$), 拟合结果可为后续分析研究提供参考。

图 7(a) 进一步给出了在 $x/H=1.5$ 测点处, 不同介质参数下地表的地震加速度反应谱。由图 7 可见: 介质参数对加速度反应谱有重要的影响, 且主要体现在反应谱中的短周期分量段($T=0 \sim 1$ s)。总体上, 随着剪切波速比的增大, 反应谱曲线逐渐上升, 显示短

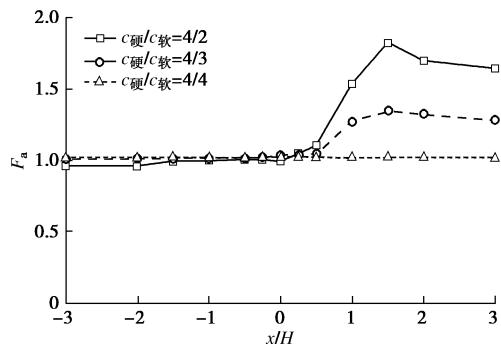


图 6 加速度放大系数随观测点位置变化曲线

Fig. 6 Variation of amplification factor of acceleration with observation points

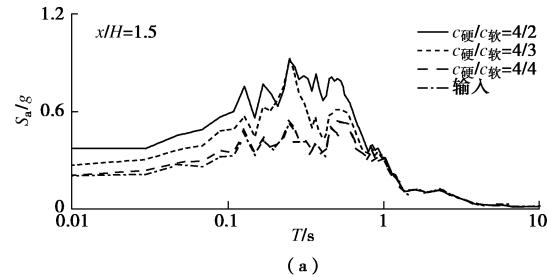
周期成分变得更为丰富, 这说明场地的横向不均匀性使得加速度反应谱特性发生改变, 相比无交界面存在的均匀场地, 含交界面场地的反应谱峰值放大多效应明显。其次, 输入 El Centro 波地震记录的加速度反应谱具有双峰、宽频带反应的特征, 而随着剪切波速比的增大, 地表反应谱的单峰特征逐渐显著, 这说明介质参数对反应谱形状也有明显影响。

为定量表示介质参数对加速度反应谱的影响大小, 定义反应谱差值比 δ_a , 来反映各相同周期点上场地地表对基岩地震波谱的动力放大作用:

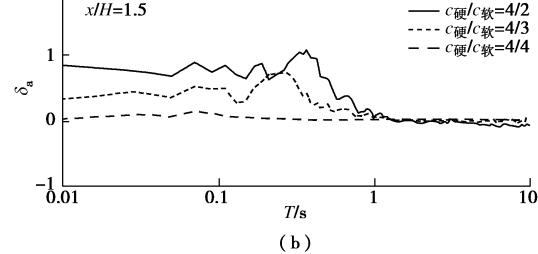
$$\delta_a = (S_{a,out} - S_{a,in}) / S_{a,in}, \quad (10)$$

式中, $S_{a,out}$ 为地表输出的谱加速度, $S_{a,in}$ 为基岩输入的谱加速度。图 7 (b) 给出了与加速度反应谱相对应的谱差值比曲线, 由图可见: 自由场地的反应谱差值比曲线在整个周期上基本为一条接近 0 的水平线。在短周期内, 场地的横向不均匀性对加速度反应谱影响明显, 软介质侧剪切波速越小, 反应谱差值比就越大, 当软介质侧剪切波速为硬介质侧一半时, 差值比最大可达 1.08, 即场地地震效应被放大的增幅超过 100%。另外, 为说明软硬介质对地震波放大多效应的差异, 将软硬两侧地表动力响应的比较结果示于图 8, 其中, 图 8 (a) 为剪切波速比相同时, 场地两测点 $x/H= -3.0$ 和 $x/H=3.0$ 处加速度反应谱的比较, 图 8 (b) 为相应位移幅值的比较。由反应谱结果可知, 场地中软介质侧的反应谱峰值较硬介质侧明显更大, 硬介质对应的峰值周期较短, 软介质对应的峰值周期较长。由位移幅值结果可知, 软介质侧的地表位移幅值较大, 其对应的固有频率(第一峰值频率)相较于硬介质侧向低频迁移。这是由于场地的横向不均匀性导致了介质层动力特性的改变, 使得软硬介质两侧产生不同的滤波和放大多效应, 进而产生不同的加速度响应和位移响应。其次, 软介质的剪切模量较小($G = \rho c^2$), 产生的土体剪应变幅值更大, 表现为软介质上下界面的相对位移更大。再者, 基岩上传的地震波穿过软介质层时, 振动加速度减小, 振动的高频分量被大幅削减, 而低频

分量由于共振效应得到增强, 表现为到达地表后引起动周期延长, 即地表加速度反应谱向长周期段偏移。



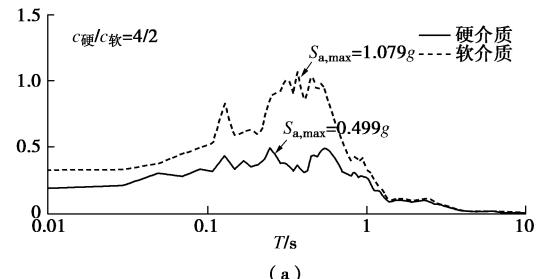
(a)



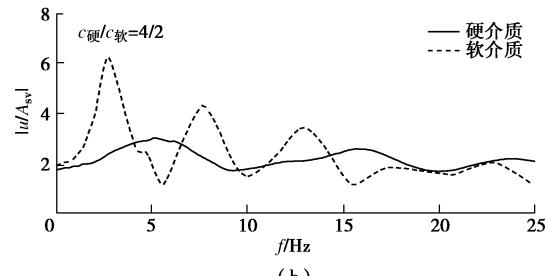
(b)

图 7 介质参数对地表加速度反应谱的影响

Fig. 7 Influence of medium parameters on acceleration response spectrum at the surface



(a)



(b)

图 8 场地两侧地表动力响应的比较

Fig. 8 Comparison of dynamic response at both sides of site

4.2 软硬交界面倾角对地震反应的影响

图 9 给出了不同软硬交界面倾角下场地地表的加速度时程, 为便于分析, 将各测点相应的加速度峰值列于表 4, 限于篇幅, 仅给出代表性结果。由此可见:

(1) 交界面倾角对软硬交互场地地表加速度也有明显影响, 且主要体现在软介质侧, 硬介质侧对应的PGA相差不大。

(2) 总体上, 交界面倾角越大, 软硬交互场地的地震反应越剧烈。如在观测点 $x/H=1.0$ 处, 倾角 90° 时的 PGA 为 0.3998g, 大于倾角 70° 时的 0.3608g, 大于倾角 45° 时的 0.3052g, 大于倾角 30° 时的 0.2402g。

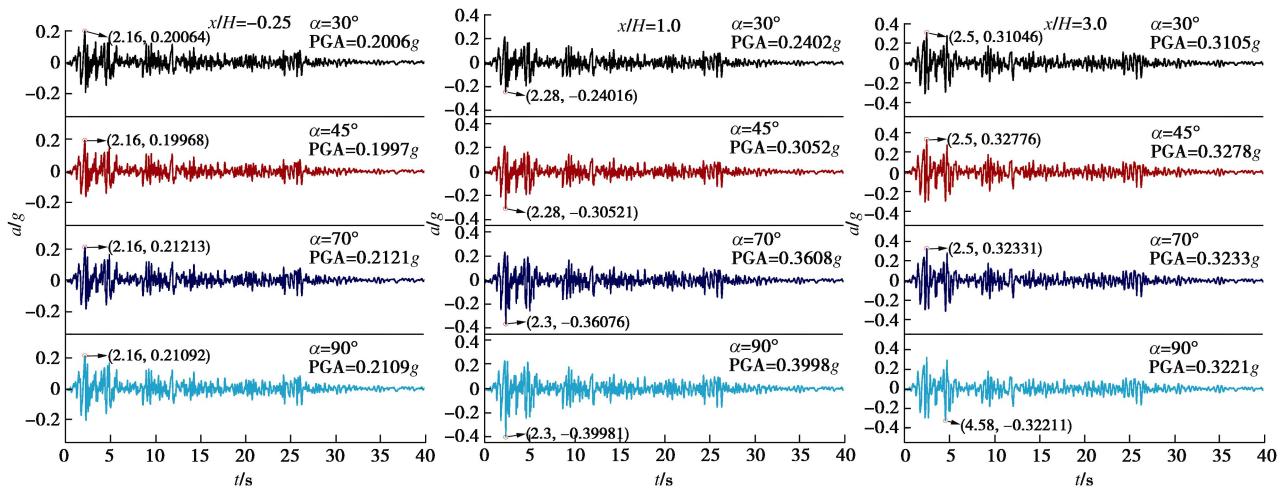


图 9 不同交界面倾角下场地地表加速度时程曲线

Fig. 9 Time histories of acceleration at surface of site under different interface dip angles

表 4 不同交界面倾角下场地地表的加速度峰值

Table 4 Peak accelerations at surface of site under different interface dip angles

(g)

交界面倾角	观测点位置							
	x/H=-3.0	x/H=-2.0	x/H=-1.0	x/H=-0.25	x/H=0.25	x/H=1.0	x/H=2.0	x/H=3.0
$\alpha=30^\circ$	0.2040	0.2028	0.2020	0.2006	0.1990	0.2402	0.3321	0.3105
$\alpha=45^\circ$	0.1916	0.1910	0.1990	0.1997	0.2097	0.3052	0.3375	0.3278
$\alpha=70^\circ$	0.2074	0.2062	0.2099	0.2121	0.2279	0.3608	0.3302	0.3233
$\alpha=90^\circ$	0.2071	0.2066	0.2066	0.2109	0.2441	0.3998	0.3193	0.3221

图 10 给出了交界面倾角不同时加速度放大系数随观测点位置变化情况。由图 10 可见：

不同交界面倾角下，地表加速度响应均在交界面处发生突变，在此之前，倾角变化对加速度放大系数的影响不明显；而在交界面范围内，地表的放大系数迅速增大，且随着倾角的增加，突变程度越显著；此后，随着观测点逐渐远离交界面，软介质侧放大系数呈现先增大后减小、并逐渐趋向于一定值的趋势（该定值为基岩上单一软介质土层的自由场响应），同时，倾角越大，放大系数峰值点位置越靠近交界面。这说明软硬交互场地中更大的倾角将使得交界面产生的放大作用更明显，从而导致地表不同测点处的加速度响应差异较大，相较于介质参数的影响，倾角的影响产生的地震反应更加复杂。同样给出交界面倾角对地表加速度响应影响最大处的观测点位置 ($x/H=1.0$)，该测点下最大加速度响应放大系数随倾角的线性变化关系为： $F_a = 0.013\alpha + 0.877$ ($R^2 = 0.9703$)，拟合结果可为后续分析研究提供参考。

为便于和介质参数的影响相比较，仍以 $x/H=1.5$ 为例，图 11 给出了不同交界面倾角对应的地震加速度反应谱及其差值比的变化情况。由图 11 可见：交界面倾角对加速度反应谱有重要的影响，且对反应谱中的短周期 ($T=0 \sim 1$ s) 分量影响显著。值得指出的是，与介质参数影响不同处在于，倾角的影响主要体现在谱的幅值方面，对谱的形状影响不大。在短周期段，

不同倾角下反应谱峰值出现于同一周期内 ($T=0.25$ s)，相应的反应谱差值比随倾角的增加而增大，当交界面为垂直面时，反应谱差值比达到最大 1.47，即场地地震效应被放大的增幅近 150%。

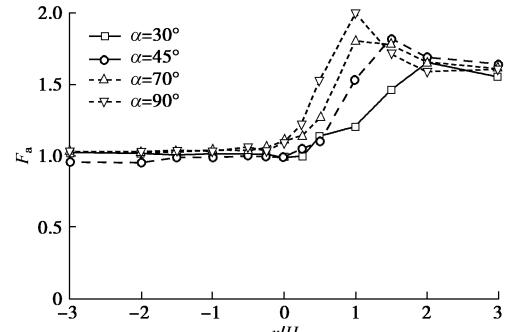


图 10 加速度放大系数随观测点位置变化曲线

Fig. 10 Variation of amplification factor of acceleration with observation points

4.3 地表地震响应的分布特征

以上分析显示，软硬交互横向不均匀场地中软介质的地震动响应十分剧烈，图 12 进一步给出了不同工况下软介质侧的地表地震响应的分布情况。由图 12 可见：

(1) 同一倾角下 (图 12 (a), (b), (d))，硬介质波速为 400 m/s，软介质波速分别为 400, 300, 200 m/s 时，对应的自由场反应谱峰值逐渐增大，峰值周期向低频移动，剪切波速比越大，地表加速度反应谱与自由场差别越明显。

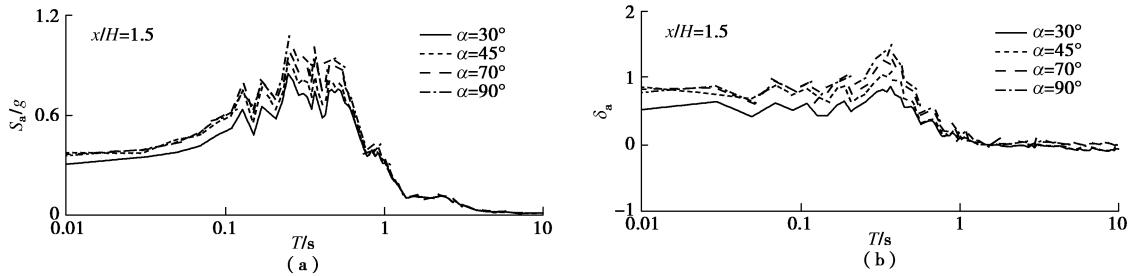


图 11 交界面倾角对地表加速度反应谱的影响

Fig. 11 Influences of interface dip angles on response spectrum of acceleration at surface

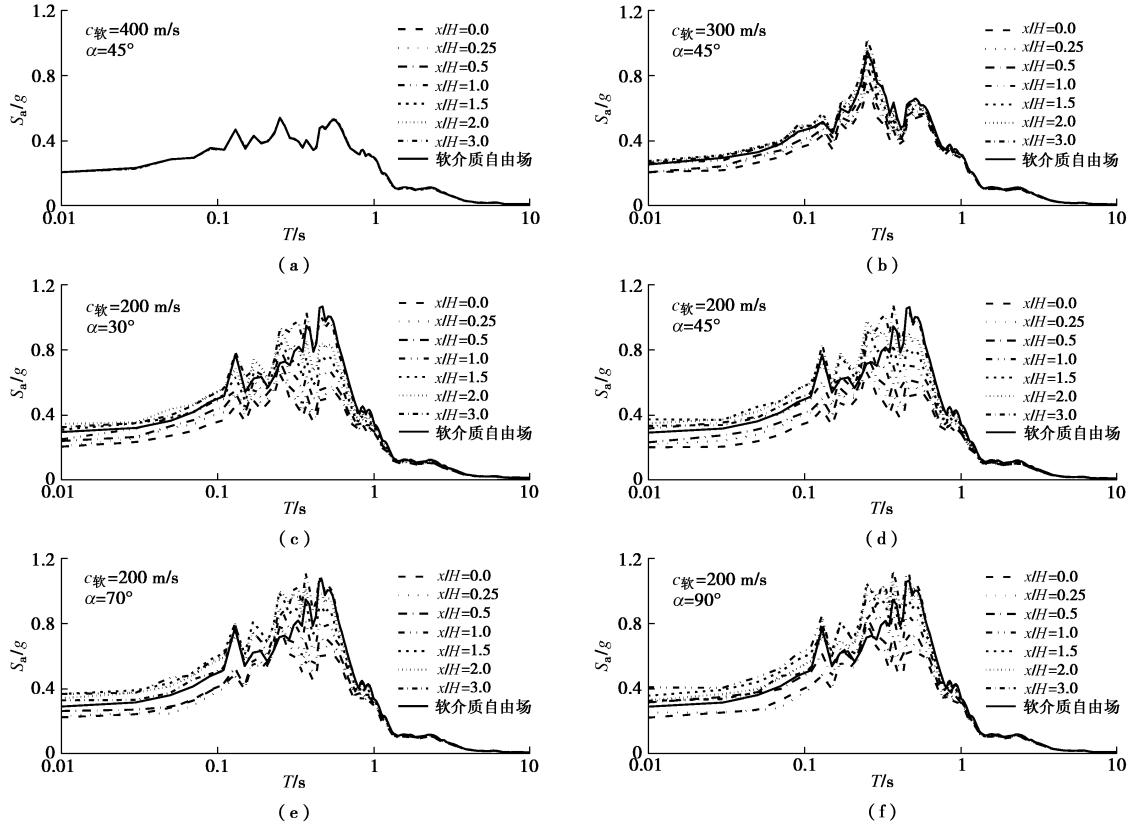


图 12 地表地震动响应的分布特征

Fig. 12 Distribution characteristics of seismic response at surface of site

(2) 同一介质参数下(图 12(c), (d), (e), (f)), 倾角越大, 地表加速度反应谱与自由场差别越明显。

(3) 两侧介质相同时, 不同观测点下的反应谱峰值及谱形均与介质自由场一致(再次说明了本文方法的正确性)。两侧介质不同时, 地表地震动的响应范围在交界面外的两倍介质层厚度范围内($x/H=3.0$, 软硬交界面对地表的地震动影响减小, 反应谱峰值已接近自由场)。

5 结 论

(1) 软硬交互横向不均匀场地对地表运动有明显的放大作用, 对比两侧响应情况, 较大的地表地震动反应发生在较软介质侧, 且随着观测点逐渐远离交界面, 加速度放大系数呈现先增大后减小、并趋向于一定值的趋势。

(2) 软硬介质交界面的存在使得场地地表加速度响应发生突变, 突变程度受介质参数和交界面倾角的影响显著, 这种突变也使得地表的最大加速度响应位置不同。

(3) 随着介质参数差异和交界面倾角的增大, 地表加速度峰值增大, 反应谱曲线逐渐升高, 显示短周期成分变得更为丰富, 对地震动的放大效应更明显。此外, 介质参数的改变对反应谱谱形也有重要影响。

(4) 软硬交界面对地表地震动影响主要在交界面外两倍介质层厚度范围内, 而后逐渐接近场地自由场。

在本文研究基础上, 可进一步开展隧道穿越软硬场地的分析, 对此笔者也将继续深入研究并另文发表。

参考文献:

- [1] 崔光耀, 王明年, 于丽, 等. 汶川地震公路隧道洞口结构震害分析及震害机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6):

- 1084 – 1091. (CUI Guang-yao, WANG Ming-nian, YU Li, et al. Analysis of seismic damage and mechanism of portal structure of highway tunnel in Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1084 – 1091. (in Chinese))
- [2] SHEN Y, GAO B, YANG X, et al. Seismic damage mechanism and dynamic deformation characteristic analysis of mountain tunnel after Wenchuan earthquake[J]. Engineering Geology, 2014, **180**: 85 – 98.
- [3] KAUSEL E, ROESSET J M. Stiffness matrices for layered soils[J]. Bulletin of the seismological Society of America, 1981, **71**(6): 1743 – 1761.
- [4] 尤红兵, 赵凤新, 荣棉水. 地震波斜入射时水平层状场地的非线性地震反应[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(2): 234 – 240. (YOU Hong-bing, ZHAO Feng-xin, RONG Mian-shui. Nonlinear seismic response of horizontal layered site due to inclined wave[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(2): 234 – 240. (in Chinese))
- [5] LIU Z, LIANG J, WU C. The diffraction of Rayleigh waves by a fluid-saturated alluvial valley in a poroelastic half-space modeled by MFS[J]. Computers and Geosciences, 2016, **91**: 33 – 48.
- [6] WANG Z Z, GAO B, JIANG Y J, et al. Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, **52**(2): 546 – 558.
- [7] 王维. 软硬突变地层盾构隧道地震响应特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015. (WANG Wei. The study of seismic response of shield tunnel crossing interface of soft and hard strata[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [8] 殷允腾, 李廷春. 土岩软硬结合部隧道结构的震害机理分析及抗震研究[J]. 现代隧道技术, 2013, **50**(4): 84 – 91. (YIN Yun-teng, LI Ting-chun. Analysis and study of the seismic failure mechanism and aseismic measures of a tunnel structure in the rock-soil interface area[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, **50**(4): 84 – 91. (in Chinese))
- [9] 申玉生, 邹成路, 靳宗振, 等. 穿越软硬交界面隧道结构动力响应特性研究[J]. 现代隧道技术, 2015, **52**(3): 95 – 102. (SHEN Yu-sheng, ZOU Cheng-lu, JIN Zong-zhen. A study of the dynamic response characteristics of a tunnel structure through an interface of soft and hard rock[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, **52**(3): 95 – 102. (in Chinese))
- [10] 王帅帅, 高波, 隋传毅, 等. 不同地质条件下隧道洞口仰坡地震破坏特性研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(增刊 1): 278 – 284. (WANG Shuai-shuai, GAO Bo, SUI Chuan-yi, et al. Shaking table test for seismic behavior of upward slope at tunnel entrance in different geological conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S1): 278 – 284. (in Chinese))
- [11] 何川, 郭瑞, 肖明清, 等. 铁路盾构隧道单、双层衬砌纵向力学性能的模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, **34**(3): 40 – 46. (HE Chuan, GUO Rui, XIAO Ming-qing, et al. Model test on longitudinal mechanical properties of single and double layered linings for railway shield tunnel[J]. China Railway Science, 2013, **34**(3): 40 – 46. (in Chinese))
- [12] 张景, 何川, 耿萍, 等. 穿越软硬突变地层盾构隧道纵向地震响应振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(1): 68 – 77. (ZHANG Jing, HE Chuan, GENG Ping, et al. Shaking table tests on longitudinal seismic response of shield tunnel through soft-hard stratum junction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(1): 68 – 77. (in Chinese))
- [13] 王道远, 袁金秀, 朱永全, 等. 高烈度区软硬岩交界段隧道震害机制及减震缝减震技术模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(增刊 2): 4113 – 4121. (WANG Dao-yuan, YUAN Jin-xiu, ZHU Yong-quan, et al. Mechanism of seismic damage and mode test on absorption joint damping technology of tunnel across junction of soft and hard rock in highly seismic area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(S2): 4113 – 4121. (in Chinese))
- [14] 梁建文, 冯领香, 巴振宁. 局部断层场地对 P 波的散射影响研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 244 – 252. (LIANG Jian-wen, FENG Ling-xiang, BA Zhen-ning. Diffraction of plane P waves around a local fault[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 244 – 252. (in Chinese))
- [15] BA Z, LIANG J, ZHANG Y. Scattering and diffraction of plane SH-waves by periodically distributed canyons[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, **15**(2): 325 – 339.
- [16] WOLF J P. Dynamic soil-structure interaction[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.
- [17] 大崎顺彦. 地震动的谱分析入门[M]. 北京: 地震出版社, 1980. (OHSAKI Y. Introduction to the spectral analysis of ground motion[M]. Beijing: Earthquake Press, 1980. (in Chinese))
- [18] 袁晓铭, 李瑞山, 孙锐. 新一代土层地震反应分析方法[J]. 土木工程学报, 2016, **49**(10): 95 – 102. (YUAN Xiao-ming, LI Rui-shan, SUN Rui. A new generation method for earthquake response analysis of soil layers[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(10): 95 – 102. (in Chinese))