

DOI: 10.7511/jslx20220324001

# 考虑半覆水圆弧相变场地特征的 地下多点地震动模拟方法与程序开发

李鑫洋<sup>1,2</sup>, 柳国环<sup>\*1,2</sup>, 费琦翔<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350)

**摘要:**建立了同时引入土壤介质相变和半覆水圆弧地形因素的场地模型,并给出了地下多点地震动模拟的理论框架,开发了依据本文理论的程序并予以可靠性验证。首先,基于探明的波场分布得到了SV波入射半覆水圆弧相变场地的频域解;其次,获得依据频域解的场地传递函数并求解出地下自功率谱,建立了基于所得到的地下相干函数的地下互功率谱,由此构建出地下功率谱矩阵;最后,实现频域模型向时域信号转化(即多点地震动时程曲线),进而基于上述理论进行可视化程序开发。通过数值算例进一步阐明了本研究的意义,结果表明,(1)地下与地表多点地震动在能量分布上存在显著差异,说明了研究的必要性;(2)生成地震动的拟合功率谱和拟合相干函数与理论值吻合较好,表明了结果的合理性;(3)可视化程序界面简洁,参数输入及调整方便,后处理结果显示清晰,反映出程序的便捷及适用性。

**关键词:**相变场地;地下相干函数;地下功率谱矩阵;地下多点地震动

**中图分类号:**P315;O242.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1007-4708(2023)01-0027-07

## 1 引言

长大结构工程具有纵向跨度大、基础埋置深和跨越复杂地质条件等特点,考虑到地震动的空间变异性,在进行地震响应分析时采用多点地震动作为输入已经得到广泛认可<sup>[1]</sup>。然而,现有实测地震动往往难以满足长大工程抗震分析的需求<sup>[2]</sup>,又由于缺少适合拟建工程场地处的地震记录<sup>[3]</sup>,因此,需要开展特定或适配目标场地特征的多点地震动模拟方法的研究。

由于场地土层的滤波作用和局部地形的放大效应,地下地震动在幅值和频率分布上与地表地震动相比呈现出较大的差异<sup>[4]</sup>。因此,采用地下地震动作为土-结构地震响应分析的输入更为合理。Liu等<sup>[5,6]</sup>分别针对多水平成层单相介质和饱和双相介质场地,推导了相应的传递函数,并以此为基础提出了模拟水平分层场地地下多点地震动的方法。针对不规则地形的影响,柳国环等<sup>[7,8]</sup>针对SH波入射多水平成层圆弧和V形凹陷地形,开发了相应的地下多点地震动模拟可视化程序并验证了其可靠性。鉴于地下地震动与地表地震动的不

同,文献<sup>[9,10]</sup>开展了考虑地下多点地震动输入时桥梁结构地震破坏模式的研究,并分析了其与地表地震动输入时破坏模式差异化的成因。

上述研究只关注了地震波在同类介质场地中的传播,根据Biot理论<sup>[11]</sup>,当地震波由单相介质传播至双相介质时,在双相介质中会产生新的慢纵波(P2波)。叶陈江等<sup>[12]</sup>推导了地震SV波由饱和介质入射单相介质时,波在介质转换界面上的反射和透射系数。丁伯阳等<sup>[13]</sup>实现了饱和与单相介质层应力-位移函数的退化,为相变场地研究奠定了基础。赵宇昕等<sup>[14]</sup>得到了饱和成层土体在地震波入射时的稳态反应,并指明地下水位以上采用干土模型,以下采用饱和土模型,更加符合实际场地特征。

本文考虑了场地土壤介质转变和局部圆弧地形部分覆水等因素建立了场地模型,充分考虑了场地土壤由双相过渡至单相介质的相变成层作用,同时兼顾了半覆水圆弧地形带来的影响。主要内容如下,(1)以SV波入射半覆水圆弧相变场地为例,给出了模型中各部分对应的地震波场分布情况,并得到了场地响应的频域解。(2)基于多点地震动模拟理论,结合求得的相变场地的传递函数和地下相干函数,构建了本场地模型多点地震动模拟所需的地下功率谱矩阵;进而开发了相应的地下多点地震动模拟程序并编写可视化GUI界面。(3)基于以上工作,生成了目标点处多点相关地下地震动并对

收稿日期:2022-03-24;修改稿收到日期:2022-07-10.

基金项目:国家自然科学基金(51978461)资助项目.

作者简介:柳国环\*(1980-),男,博士,副教授

(E-mail:liugh@tju.edu.cn).

比分析了 SV 波激励下场地多点(地表和地下)地震动的特征。最后,验证了模拟程序的合理性与可靠性。

## 2 场地模型及地震波场分布

### 2.1 半覆水圆弧相变场地模型

本文模型如图 1 所示,由半覆水层、圆弧覆盖层和半空间三个部分组成。由于介质转变界面(蓝色线)的存在,土体模型分为 4 个子区域,分别为单相介质区域  $u_1$  和  $u_2$  及双相介质区域  $v_1$  和  $v_2$ ; 该模型旨在填充半空间土体介质性质发生变化时的场地反应研究的空白,以服务于复杂介质场地条件下长大结构工程地震反应分析。其中,圆弧峡谷覆盖层及峡谷的圆心都在  $o_1$ , 相应的半径分别为  $b_1$  和  $b_2$ , 宽度分别为  $a_1$  和  $a_2$ , 底部距半空间表面的高度分别为  $h_1$  和  $h_2$ 。单相介质层的厚度为  $h$ , 圆弧峡谷中水的深度为  $h_w$ 。坐标系  $o_1$  到自由表面的距离为  $d$ , 坐标系  $o_2$  到自由表面的距离为  $R$ , 坐标系  $o_1 o_2$  之间的距离为  $D_{12}$ 。

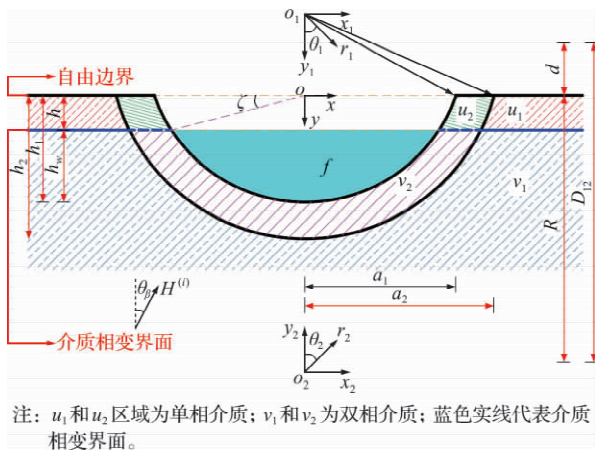


图 1 半覆水圆弧相变场地模型  
Fig. 1 Model of media-transition site with partly filled water

现考虑一列简谐 SV 波  $H^{(i)}$  入射如图 1 所示的半覆水圆弧相变场地,鉴于模型的复杂性,本部分将分为自由波场和散射波场进行讨论。

### 2.2 自由波场分析

自由波场是指不存在局部地形时的波场,如图 2 所示。当 SV 波传播至介质转换界面时,在  $v_1$  一侧,会有反射的 SV 波  $H^{(r)}$ , 反射 P1 波  $\Phi_1^{(r)}$  和反射 P2 波  $\Phi_2^{(r)}$  产生;在  $u_1$  一侧,会有透射的 SV 波  $\Psi^{(t)}$  以及透射的 P1 波  $\varphi^{(t)}$  产生。在  $u_1$  一侧,又会产生反射的 SV 波  $\Psi^{(r)}$  和 P 波  $\varphi^{(r)}$ 。本文假定介质转换界面透水,通过将上述波函数代入边界条件,自由波场各波势函数便可以求出,详细推导过程可参见文献[15]。

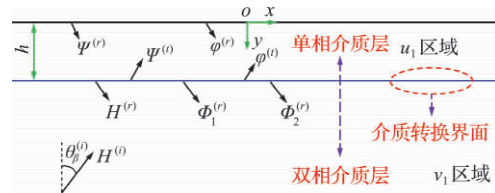


图 2 自由波场分布  
Fig. 2 Diagram of free wave field

### 2.3 散射波场分析

散射波场是指考虑局部地形影响下的波场分布。由于圆弧覆盖层凹陷地形及半覆水层的存在,入射 SV 波在凹陷地形交界面、介质转换界面以及自由表面处会产生散射波场,如图 3 所示。

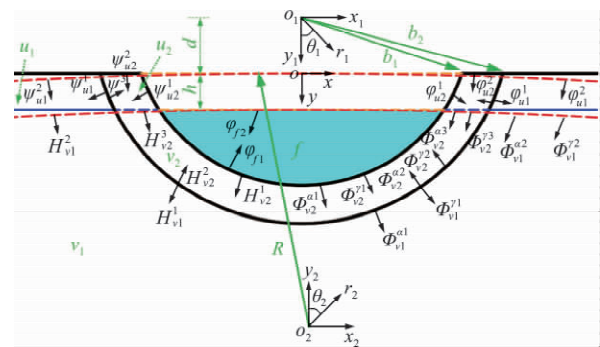


图 3 散射波场分布  
Fig. 3 Diagram of scattering wave field

联立自由波场,将总波势函数代入边界条件,即可得到散射波场的解。鉴于求解过程所占篇幅较大,具体求解过程详见文献[15]。

## 3 地下地震动模拟理论

### 3.1 传递函数

点  $i$  及  $i'$  间的传递函数  $TF_{i i'}(i\omega)$  表达式为

$$TF_{i i'}(i\omega) = |u_i(i\omega) / [u_{i'}(i\omega)]| \quad (1)$$

式中  $u_i(i\omega)$  和  $u_{i'}(i\omega)$  分别为地表及相应地下点的频域位移响应,可由第 2 节求得。

### 3.2 地下相干函数

依据文献[5]建立了地下相干函数  $\gamma_{i' j'}$  与地表相干函数  $\gamma_{ij}$  间的表达式,即

$$\gamma_{i' j'}(i\omega) = \gamma_{ij}(i\omega) e^{i\omega [(\tau_i - \tau_{i'}) - (\tau_j - \tau_{j'})]} \quad (2)$$

式中  $\tau$  为时间因子且  $\tau = k^* z / \omega = z \cdot \sqrt{\rho / G^*}$ ;  $\rho$  为土壤密度,  $z$  为距离地表的深度。

$$G^* = G(1 + 2i\xi), (k^*)^2 = \rho\omega^2 / G^* \quad (3)$$

式中  $G$  为土体的剪切模量,  $\xi$  为土体的阻尼比。

### 3.3 地下功率谱矩阵

在获得传递函数以及地下相干函数的基础上,式(4)给出了地下三点地下功率谱矩阵

$$S_u(i\omega) = \begin{bmatrix} S_{A'A'}(\omega) & S_{A'B'}(i\omega) & S_{A'C'}(i\omega) \\ S_{B'A'}(i\omega) & S_{B'B'}(\omega) & S_{B'C'}(i\omega) \\ S_{C'A'}(i\omega) & S_{C'B'}(i\omega) & S_{C'C'}(\omega) \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (4)$$

式中 对角线元素  $S_{i'i'}(\omega)$  为地下目标点的自功率谱矩阵,非对角线元素  $S_{i'j'}(i\omega)$  为地下两点间的互功率谱矩阵,其与地表功率谱间的关系为

$$S_{i'i'}(\omega) = |TF_{i'i'}(i\omega)|^2 \cdot S_{ii}(i\omega) \quad (5)$$

$$S_{i'j'}(i\omega) = TF_{i'i'}(i\omega) \cdot TF_{j'j'}(i\omega) \cdot S_{ij}(i\omega) \cdot \gamma_{i'j'} \quad (6)$$

式中  $TF_{i'i'}(i\omega)$  和  $TF_{j'j'}(i\omega)$  表示相应点间的传递函数; $\gamma_{i'j'}$  表示地下任意两点间的相干函数。

通过对地下功率谱矩阵进行分解<sup>[16]</sup>,可以生成时域平稳地下相干多点地震动,

$$S_u(i\omega) = L(i\omega)L^{H*}(i\omega) \quad (7)$$

$$a_j(t) = \sum_{m=1}^j \sum_{n=1}^N A_{jm}(\omega_n) \cos[\omega_n t + \beta_{jm}(\omega_n) + \varphi_{mn}(\omega_n)] \quad (8)$$

式中  $A_{jm}(\omega) = \sqrt{4\Delta\omega} |L_{jm}(i\omega)|$

$$\beta_{jm}(\omega) = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}[L_{jm}(i\omega)]}{\text{Re}[L_{jm}(i\omega)]} \right) (0 \leq \omega \leq \omega_N)$$

$\Delta\omega$  为频率步长,  $\varphi_{mn}(\omega_n)$  为  $[0, 2\pi]$  上随机分布的相位角,  $\omega_N$  为截止频率。

为生成具有非平稳特性的地震动,乘以包络函数  $\xi(t)$ ,

$$a_j(t) = \xi(t) \cdot a_j(t) \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

$$\xi(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & \text{for } (0 \leq t \leq t_1) \\ 1 & \text{for } (t_1 \leq t \leq t_2) \\ \exp[-c(t-t_2)] & \text{for } (t_2 \leq t) \end{cases} \quad (10)$$

式中  $t_1, t_2$  和  $c$  分别取 1.2, 9 和 0.155。

图 4 给出了本文详细的流程。

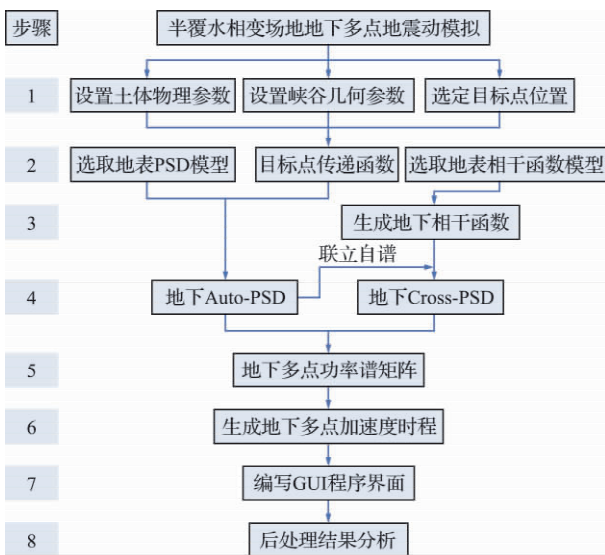


图 4 半覆水圆弧相变场地多点地下地震动模拟流程

Fig. 4 Flowchart of multi-support underground seismic motions in media-transition site with partly filled water

## 4 相变场地地下多点地震动模拟

### 4.1 可视化程序开发

根据以上理论,本文基于 MATLAB 软件开发了针对半覆水圆弧相变场地的地下多点地震动模拟程序(XBMSUMS),GUI界面如图 5 所示。

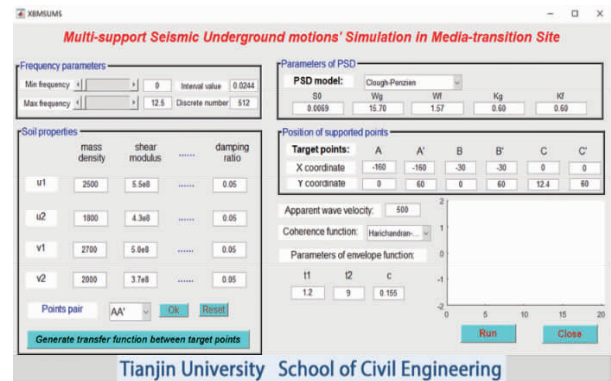


图 5 地下多点地震动模拟程序可视化界面

Fig. 5 GUI of multi-support underground seismic motions simulation

在程序中,截止频率取 12.5 Hz,地震动持时为 20.48 s,SV 波入射角度为  $15^\circ$ 。选取 Clough-Penzien 谱作为目标谱,其参数取为  $S_0 = 0.0069, \omega_g = 5\pi \text{ rad/s}, \omega_f = 0.1\omega_g, \xi_g = \xi_f = 0.6$ 。采用 Harichandran-Vanmarcke 相干模型,其参数  $A, \alpha, k, f_0$  和  $b$  分别取为 0.626, 0.022, 19700, 1.51 和 3.47;选取 Jennings 包络函数以生成非平稳地震动时程,其参数  $t_1, t_2$  和  $c$  分别取为 1.2, 9 和 0.155。选定如图 6 所示的参考点生成了相应的地表以及地下多点地震动,目标点位置及土体参数分别列入表 1 和表 2。

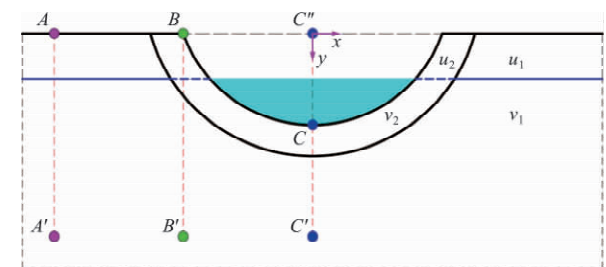


图 6 相变场地目标点位置

Fig. 6 Illustration of target points in the media-transition site

表 1 目标点坐标

Tab. 1 Coordinates of target points

	A	A'	B	
坐标/m	(-160, 0)	(-160, 60)	(-30, 0)	
	B'	C''	C	C'
	(-30, 60)	(0, 0)	(0, 12.4)	(0, 60)

表2 区域土体物理参数

Tab.2 Physical parameters of each subregion

区域	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	剪切模量 $G/\text{MPa}$	阻尼比	
单相介质	$u_1$	2500	550	0.05
	$u_2$	1800	430	0.05
双相介质	$v_1$	2700	500	0.05
	$v_2$	2000	370	0.05

## 4.2 地下多点地震动

图7给出了模拟得到的地表以及地下点的加速度;其中,PGA代表加速度最大值的绝对值(单位: $\text{m}/\text{s}^2$ ), $\sigma^2$ 代表方差。通过对比地表点以及相应地下点的加速度峰值,可以看出,地表加速度峰值由于分层以及地形放大效应的影响,均不同程度地大于地下峰值。

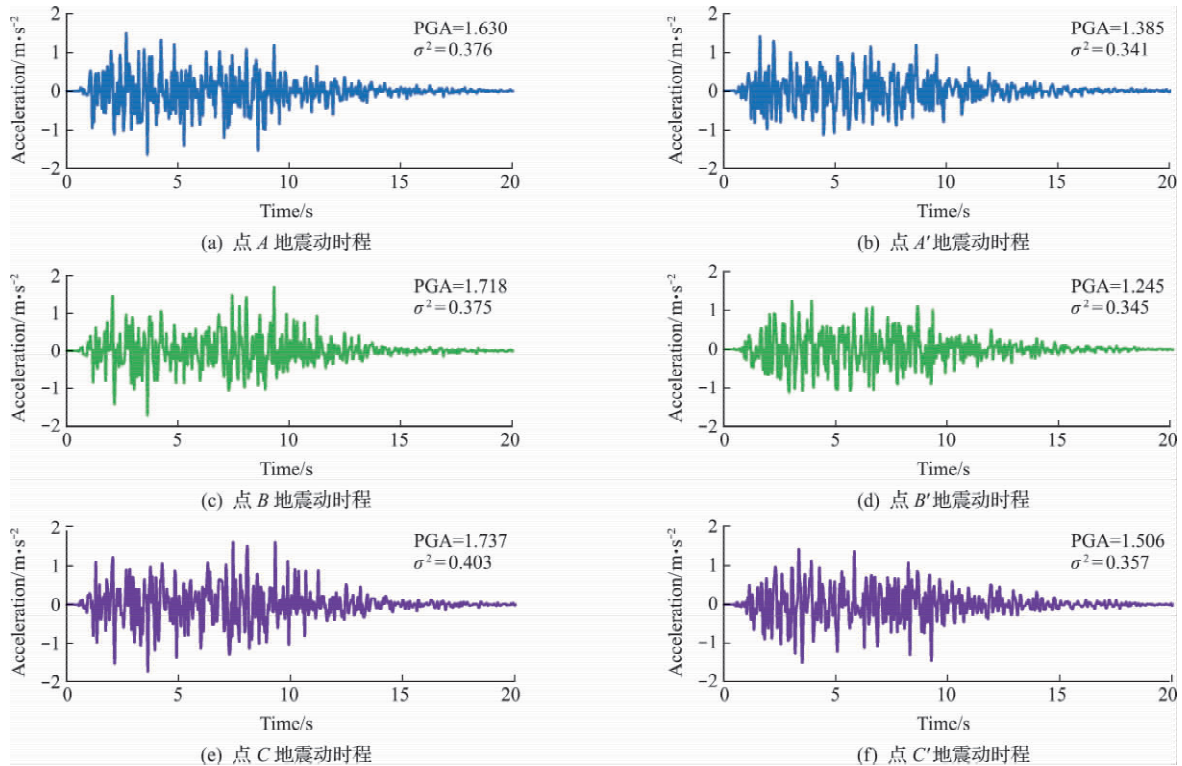


图7 地表及地下目标点加速度模拟时程

Fig.7 Simulation of ground and underground acceleration time history of target points

## 4.3 功率谱及相干函数拟合

图8给出了地表点和地下点间加速度时程的频谱图。可以看出,无论是地表点还是地下点功率谱模拟值,都与目标功率谱值拟合良好。与地表谱目标值相比,地下谱在高频范围(7.5 Hz~12.5 Hz)出现了明显的波动,表明地下加速度在频域分布上与地表加速度有明显的差异。

为验证生成的多点地震动间的相关性,图9给出了地表和地下点间模拟相干函数与目标值之间的拟合情况。就地表相干函数的拟合而言,在低频范围(0 Hz~7.5 Hz)内,相干函数与目标值拟合较好;而在高频范围(7.5 Hz~12.5 Hz)内,相干函数模拟值开始出现波动,随着两点间距离的增加( $d_{BC} < d_{AB} < d_{AC}$ ),相干函数值的波动幅度增大。对于地下相干函数而言,由于场地条件的影响,使得不同区域地下目标点间的相干性变得更加复杂。从图9(b,d,f)可以看出,地下相干函数在高频与低频范围内都在理论值附近上下波动,但波动幅度

略大于地表相干函数值。但总体而言,模拟相干函数以目标值为中线上下波动,呈现出良好的空间相关性。

依据式(2),图10给出了三点对地下与地表目标相干函数的对比图。随着距离的增加,水平场地地下点 $A'B'$ 间以及峡谷地形地下点 $B'C'$ 间的相干函数值总体呈下降趋势,与地表相干函数走向一致。但在较高频率范围内(7.5 Hz~12.5 Hz),峡谷地下点 $B'C'$ 间的相干函数值下降较快,且小于峡谷地表值;而水平地下点 $A'B'$ 间的相干函数值在相同频率范围内略有增加,且大于水平地表点 $AB$ 间的相干函数。可以看出,峡谷地形的存在会在一定程度上影响相干函数。对于地下点 $A'C'$ (点 $A'$ 和 $C'$ 分别在水平和峡谷地下)间的相干函数 $\gamma_{A'C'}$ 而言,则兼有 $\gamma_{B'C'}$ 和 $\gamma_{A'B'}$ 的特征,具体表现为在低频范围其值小于目标值,在高频范围内其值大于目标值。上述分析结果表明,地下与地表相干函数有较大的差异。

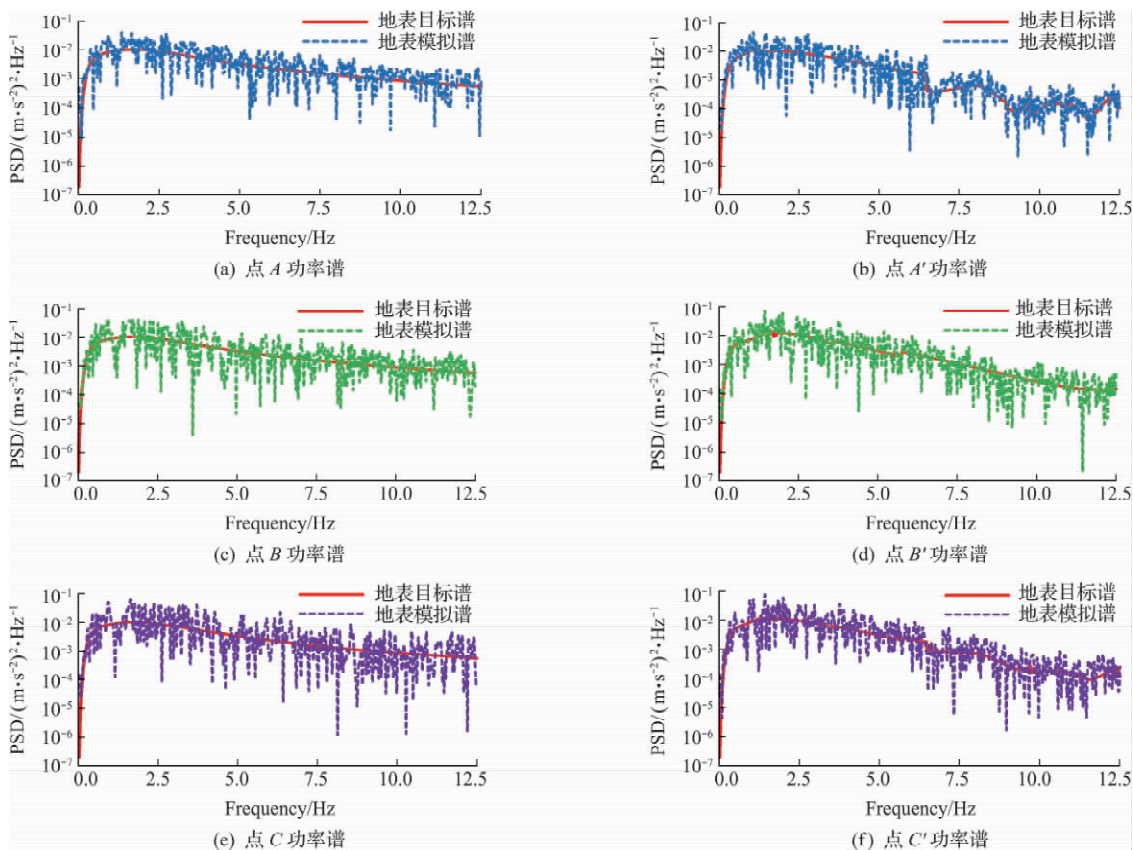


图8 目标点功率谱拟合

Fig. 8 PSD compatibility of target points

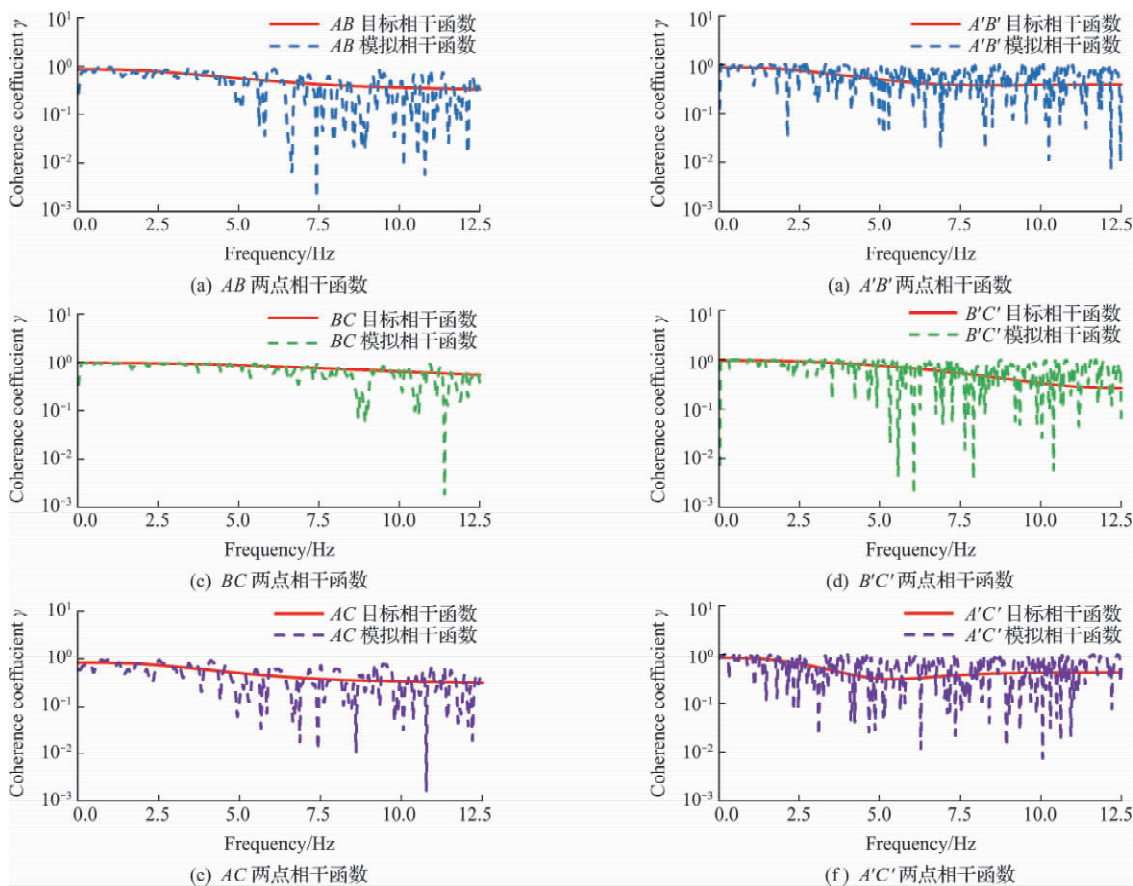


图9 地表及地下相干函数拟合

Fig. 9 Fitting of ground and underground coherence functions

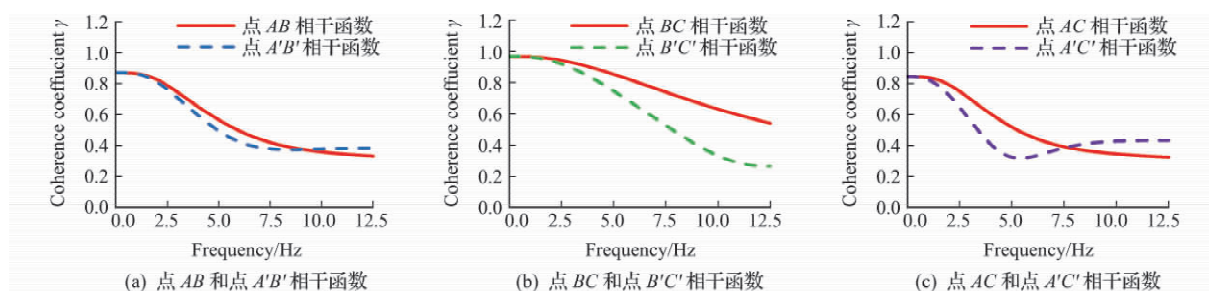


图10 地表及地下目标相干函数比较

Fig. 10 Comparison of ground and underground coherency functions

## 5 结论

(1) 突破了传统单相介质或双相介质场地模型的假定,建立了半覆水圆弧相变场地模型。模型同时考虑了地震波散射效应以及场地半覆水因素,在获得场地响应理论解的基础上,构建了地下功率谱矩阵,编写了代码并进行可视化开发,最终生成了目标场地处的地下多点地震动。

(2) 数值结果表明,受场地放大效应的影响,地下地震动峰值普遍小于地表地震动。对比地下和地表加速度功率谱及相干函数,可知地下与地表地震动的能量分布在频域内存在显著差异,其原因在于介质相变成层产生的滤波作用和局部地形的散射效应影响到了传递函数以及地下相干函数,并进一步影响了生成的地下多点地震动。

(3) 编写的可视化程序界面简洁,参数输入方便且后处理结果显示清晰,可便捷地生成目标场地的多点相关地震动。此外,功率谱及相干函数拟合表明,生成的地下多点地震动具有良好的谱兼容性和空间相关性。

## 参考文献(References):

- [1] Zerva A. *Spatial Variation of Seismic Ground Motions: Modeling and Engineering Applications* [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.
- [2] Harichandran R S, Vanmarcke E H. Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1986, **112** (2): 154-174.
- [3] Wu Y X, Gao Y F, Li D Y. Simulation of spatially correlated earthquake ground motions for engineering purposes [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2011, **10** (2): 163-173.
- [4] Li C, Li H N, Hao H, et al. Simulation of multi-support depth-varying earthquake ground motions within heterogeneous onshore and offshore sites [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2018, **17** (3): 475-490.
- [5] Liu G H, Lian J J, Liang C, et al. An effective approach for simulating multi-support earthquake underground motions [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017, **15** (11): 4635-4659.
- [6] Liu G H, Liu Y Q, Han B, et al. Theoretical and numerical approach for simulating spatially variable seismic underground motions in layered saturated media [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2020, **24** (4): 601-627.
- [7] 柳国环, 马杰, 冯啸. 多水平成层的非均匀介质圆形峡谷地下多点地震动模拟 [J]. *计算力学学报*, 2018, **35** (4): 473-479. (LIU Guo-huan, MA Jie, FENG Xiao. Simulation of spatially variable underground seismic motions in circular-arc canyons with horizontally-layered inhomogeneous medium [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2018, **35** (4): 473-479. (in Chinese))
- [8] 柳国环, 冯啸. 跨越V形峡谷的桥梁抗震分析: 多水平成层非均匀介质V形峡谷多点地震动模拟 [J]. *中国公路学报*, 2017, **30** (12): 150-158. (LIU Guo-huan, FENG Xiao. Analysis of seismic response for bridges located on a V-shaped canyon: Simulation of multi-support seismic motions in a V-shaped canyon with inhomogeneous multi-layer topography [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, **30** (12): 150-158. (in Chinese))
- [9] 柳国环, 冯啸, 江大来. 跨越V形峡谷桥梁多层介质效应的多点激励破坏模式 [J]. *中国公路学报*, 2019, **32** (8): 101-113. (LIU Guo-huan, FENG Xiao, JIANG Da-lai. Failure mode of bridges under multi-support excitation in a V-shaped canyon with multi-layer topography [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, **32** (8): 101-113. (in Chinese))
- [10] 柳国环, 江大来, 刘中宪, 等. 分层圆弧峡谷SV波地震震动模拟理论与桥梁破坏模式 [J]. *中国公路学报*, 2021, **34** (11): 129-141. (LIU Guo-huan, JIANG Da-lai, LIU Zhong-xian, et al. Theory of SV-wave multi-support seismic excitations by a layered circular-arc canyon and study on the damage mode of bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, **34** (11): 129-141. (in Chinese))

- [11] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid—I: Low-frequency range [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, **28**(2):168-178.
- [12] 叶陈江,史焱永,蔡袁强. S波由饱和土入射于弹性土时在界面上的反射与透射[J]. *振动与冲击*, 2005, **24**(2):41-45,147. (YE Chen-jiang, SHI Yan-yong, CAI Yuan-qiang. Reflection and refraction at the interface when S waves propagate from saturated soil to elastic soil[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, **24**(2):41-45,147. (in Chinese))
- [13] 丁伯阳,陈樟龙,徐庭. 两相饱和和介质层与单相介质层应力-位移函数的传递与退化[J]. *应用数学和力学*, 2014, **35**(2):162-180. (DING Bo-yang, CHEN Zhang-long, XU Ting. Degeneration and transfer of the displacement-stress functions from poroelastic layered media to elastic layered media[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, **35**(2):162-180. (in Chinese))
- [14] 赵宇昕,陈少林. 关于传递矩阵法分析饱和成层介质响应问题的讨论[J]. *力学学报*, 2016, **48**(5):1145-1158. (ZHAO Yu-xin, CHEN Shao-lin. Discussion on the matrix propagator method to analyze the response of saturated layered media[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, **48**(5):1145-1158. (in Chinese))
- [15] 李鑫洋. 半覆水相变场地 SV波入射下地震差动模拟理论与方法[D]. 天津大学, 2021. (LI Xin-yang. Simulation Theory and Method of Spatially Variable Seismic Motions for Media-transition Site with Partly-filled Water Subjected to SV-Waves[D]. Tianjin University, 2021. (in Chinese))
- [16] Hao H, Oliveira C S, Penzien J. Multiple-station ground motion processing and simulation based on smart-1 array data[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1989, **111**(3):293-310.

## Method and program for simulating multi-support underground seismic motions in media-transition circular-arc site with partly filled water

LI Xin-yang<sup>1,2</sup>, LIU Guo-huan<sup>\*1,2</sup>, FEI Qi-xiang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** A model was established by simultaneously considering the influencing factors of media transition and circular-arc terrain with partly filled water. The corresponding theoretical scheme for the simulation of multi-support underground seismic motions of the target site was presented and a program based on the above methodology was developed with its reliability verified. Firstly, the seismic scattering wavefields special for the site subjected to SV waves are illustrated in detail and the solution of ground response in frequency domain is obtained. Then, the transfer functions based on the solution are calculated and the underground auto-PSD can be expressed subsequently; the underground cross-PSD is given by the underground coherency model and the underground auto-PSD. Thus, the underground PSD matrix is assembled by combining the auto-PSD and cross-PSD. Finally, the multi-support underground accelerations in time domain are achieved by decomposing the underground PSD matrix. The GUI for the generation of multi-support underground seismic motions is further compiled. Numerical examples are conducted to highlight the significance of this study and the results show: (1) There exists a significant difference between the underground and ground seismic motions in frequency domain, which illustrates the necessity for the study. (2) The compatibility of simulating PSD and coherency function with corresponding target values is well expected, which demonstrates the rationality of the results. (3) GUI with flexible and adjustable parameter input is concise and the post-processing results are clear, which reflects the convenience and applicability of the program.

**Key words:** Media-transition site; underground coherency function; underground PSD matrix; multi-support underground seismic motions

引用本文/Cite this paper:

李鑫洋,柳国环,费琦翔. 考虑半覆水圆弧相变场地特征的地下多点地震动模拟方法与程序开发[J]. *计算力学学报*, 2023, **40**(1):27-33.

LI Xin-yang, LIU Guo-huan, FEI Qi-xiang. Method and program for simulating multi-support underground seismic motions in media-transition circular-arc site with partly filled water[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, **40**(1):27-33.