

# 覆水效应的地下相干函数与相变 V 形峡谷 多点地震动模拟及其特征规律

柳国环<sup>1,2</sup>, 陈欣宇<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:** 引入覆水效应和相变特征地下相干函数模型并导出其显式表达式, 探讨归纳了其相干性的变化规律, 并从物理本质上予以解释。依据场地散射频域理论解, 得到目标场地的传递函数, 联立本文提出的地下相干函数, 构造出半覆水相变 V 形峡谷场地的地下功率谱矩阵, 生成地下多点地震动时程, 通过功率谱和相干函数拟合验证了模拟结果的可靠性与合理性, 分别对比分析了本文提出的相干函数与覆水深度对地震动的影响。以一座连续刚构桥为例, 重点分析了地下相干函数与峡谷覆水深度对结构内力的影响。结果表明: 引入覆水效应后, 多点地震动间相干性表现增强, 覆水区地震动减小, 其原因在于对应 P 波的部分能量被传递至水中; 覆水深度与地震动和地震响应大小呈负相关, 即距覆水区越远受到覆水深度的影响越小。本文方法可为半覆水 V 形峡谷多点地震动模拟及相应长大结构的地震响应分析提供参考。

**关键词:** 覆水效应; 相变; 地下相干函数; 地下多点地震动; V 形峡谷

**中图分类号:** TU311.3

**文章编号:** 1004-4523(XXXX)XX-0001-09

**DOI:**

## 引 言

受行波效应、相干效应和局部场地效应的影响, 地震动表现出复杂的时空变化特性。地震动的空间变异性对大坝、长距离隧道和大跨桥梁等长大结构的影响不可忽视, 因此预测并模拟空间变化的多点地震动对长大结构的抗震分析具有重要意义。俞瑞芳等<sup>[1]</sup>合成了多点非平稳地震动并进行了大跨结构地震响应分析, 重点关注了包线函数的影响。研究表明地表地震动和地下地震动在幅值和频率分布上均表现出明显差异<sup>[2]</sup>, 结构基础深埋于地下, 输入地表地震动将错估结构响应。为此, Liu 等<sup>[3]</sup>提出了地下相干函数, 结合场地传递函数, 构建了地下功率谱矩阵, 生成了空间变化的地下多点地震动。利用此方法, Liu 等<sup>[4-5]</sup>进一步模拟了层状饱和介质有无上覆水时的地下多点地震动, 这一系列研究揭示了介质属性和覆水因素对地下多点地震动具有显著影响。

针对地形和场地条件对地震动的影响, 学者们开展了广泛研究。Wu 等<sup>[6]</sup>利用水平地表到峡谷表面的传递函数模拟了 V 形峡谷表面的多点地震动, 但其未进一步探究地下地震动; 韩森等<sup>[7]</sup>开展了近断层地震动下的结构响应分析, 重点比选出了相关

性强、能表征近断层地震动破坏作用的主要参数; Liu 等<sup>[8]</sup>利用水平地表到峡谷表面再到地下的两步传递函数法模拟了 U 形峡谷场地的地下多点地震动。柳国环等<sup>[9-12]</sup>陆续获得了分层圆弧峡谷和 V 形峡谷的地下多点地震动, 分析了其上桥梁在超大地震下的破坏模式。

现有研究所关注的场地普遍为单相介质或饱和多孔介质(双相介质), 而天然场地往往是由单相介质过渡至双相介质的相变场地, 因此对相变场地开展地下多点地震动模拟方法的研究是必要的。近期, 李鑫洋等<sup>[13]</sup>合成了半覆水相变圆弧形峡谷在 SV 波入射下的地下多点地震动, 这是首次对相变场地多点地震动的研究, 但该文献仅针对圆弧形峡谷, 尚缺乏在其他地形中引入介质相变的研究。此外, 现有地下地震动模拟方法均采用了文献[3]基于单相介质场地提出的地下相干函数, 文献[13]未能考虑覆水效应对地下相干函数的影响。因此, 尚需推导一种引入覆水效应的新地下相干函数。

基于此, 本文将“介质相变”和“峡谷覆水”两大因素引入 V 形峡谷场地, 提出适用于半覆水相变 V 形峡谷的“覆水效应地下相干函数”。基于此相干函数和场地特征, 模拟地下多点地震动, 探究“覆水效应地下相干函数”和“覆水深度”对多点地震动、进而对结构响应的影响。高山峡谷的地震动特征与平原

收稿日期: 2022-10-22; 修订日期: 2022-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978461)。

地区存在很大差异,而合理的地震动输入对结构抗震分析的可靠性至关重要。本文方法及结论可为相变 V 形峡谷多点地震动模拟及相应长大结构的抗震分析与安全评价提供参考。

## 1 覆水效应地下相干函数

当地表两点  $j$  和  $k$  均位于无覆水区时,对应地下两点  $j'$  和  $k'$  间的相干函数可按文献[3]计算:

$$\gamma_{j'k'}(\omega) = \gamma_{jk}(\omega) e^{i\omega[(\tau_j - \tau_j') - (\tau_k - \tau_k')]} \quad (1)$$

式中  $\tau$  为时间因子且  $\tau = k^* z / \omega = z \sqrt{\rho / G^*}$ ;  $\rho$  为目标点处土壤的密度,  $z$  为目标点距离地表的深度,  $G^*$  和  $k^*$  分别代表复波数和复剪切模量,其表达式为:

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

式中  $G$  为土体的剪切模量,  $\zeta$  为土体的阻尼比。

当  $j, k$  两点位于覆水区时,文献[3]未考虑 P 波在水中的传播,本文针对该缺陷,在地下相干函数中引入覆水效应。此时点  $k$  的振动可以用具有相位差的点  $j$  的振动来表示:

$$k^{(\omega)}(t + \Delta\tau_1) = \frac{A_{(\omega)}^{(k)}}{A_{(\omega)}^{(j)}} j^{(\omega)}(t + \tau_j + \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{wj} - \tau_k - \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{wk} + \Delta\tau_2) \quad (3)$$

式中  $A$  为谐波运动的振幅,  $\tau_j$  和  $\tau_k$  为常数,计算方法同上,  $\rho_w$  为水的密度,  $K_w^*$  为水的复体积模量,  $h_{wj}$  为  $j$  点距离覆水水面的深度,  $h_{wk}$  为  $k$  点距离覆水水面的深度。等式右边括号内增加的第 3 和 5 项分别表示  $j, k$  两点处由于 P 波在水中传播而产生的附加相位角。

根据一维黏弹性波动方程,复体积模量  $K_w^*$  可以由下式计算:

$$K_w^* = K_w + i\omega\eta = K_w + i\frac{\omega}{\omega_0}\omega_0\eta \quad (4)$$

式中  $K_w$  为水的体积模量;研究表明,在黏弹性波动方程中,除了存在剪切黏滞性,还存在一种与体积变化有关的黏滞性<sup>[14]</sup>,本文将水视作理想流体,不承受剪力,故略去剪切黏度,  $\eta$  代表与体积变化有关的黏度;  $\omega_0$  代表介质固有的过渡频率<sup>[14]</sup>。过渡频率  $\omega_0$ 、黏度  $\eta$  和体积模量  $K_w$  之间存在如下关系<sup>[14]</sup>:

$$\omega_0\eta = K_w \quad (5)$$

文献[15]指出,当  $\omega/\omega_0 \ll 1$  (实际地震波传播情况)时,  $1 + i\omega/\omega_0 \approx e^{-\frac{\pi}{2}i}$ , 故式(4)变为:

$$K_w^* = K_w(1 + \frac{i\omega}{\omega_0}) \approx K_w e^{-\frac{\pi}{2}i} =$$

$$K_w[\cos(-\frac{\pi}{2}) + i\sin(-\frac{\pi}{2})] = -K_w i \quad (6)$$

根据随机振动理论,地表两点  $j$  和  $k$  间的互功率谱密度函数可以表示为:

$$S_{jk}(i\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{jk}(\Delta\tau_1) e^{-i\omega\Delta\tau_1} d\Delta\tau_1 \quad (7)$$

式中  $R_{jk}(\Delta\tau)$  为  $j, k$  两点运动的互相关函数。

将式(3)代入式(7)并注意到积分区间趋于无穷大时,最终结果不受初始相位差的影响,得到:

$$S_{jk}(i\omega) = \frac{A_{(\omega)}^{(k)}}{2\pi A_{(\omega)}^{(j)}} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{jj'}(\Delta\tau_2) e^{-i\omega\Delta\tau_2} \cdot e^{i\omega(\tau_k + \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{wk} - \tau_j - \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{wj})} d(\Delta\tau_2) = \frac{A_{(\omega)}^{(k)}}{2\pi A_{(\omega)}^{(j)}} e^{i\omega(\tau_k + \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{wk} - \tau_j - \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{wj})} S_{jj'}(\omega) \quad (8)$$

相似地,地下两点  $j'$  和  $k'$  间的互功率谱密度函数可以表示为:

$$S_{j'k'}(i\omega) = \frac{A_{(\omega)}^{(k')}}{2\pi A_{(\omega)}^{(j')}} e^{i\omega(\tau_{k'} + \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{w_{k'}} - \tau_{j'} - \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{w_{j'}})} S_{j'j'}(\omega) \quad (9)$$

地面和地下运动的两个相干函数之间的关系可以表示为:

$$\frac{\gamma_{j'k'}(i\omega)}{\gamma_{jk}(i\omega)} = \frac{S_{j'k'}(i\omega) \sqrt{S_{jj}(\omega) S_{kk}(\omega)}}{S_{jk}(i\omega) \sqrt{S_{j'j'}(\omega) S_{k'k'}(\omega)}} = \frac{S_{j'k'}(i\omega)}{S_{jk}(i\omega)} |TF_{j'j'}(\omega)| |TF_{kk'}(\omega)| \quad (10)$$

式中  $\gamma_{jk}(i\omega)$  和  $\gamma_{j'k'}(i\omega)$  分别为地表和地下相干函数,  $TF_{j'j'}(\omega)$  和  $TF_{kk'}(\omega)$  为地表到地下的传递函数。

将式(8)和(9)代入式(10)可以得到:

$$\frac{\gamma_{j'k'}(i\omega)}{\gamma_{jk}(i\omega)} = \frac{e^{i\omega(\tau_{k'} + \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{w_{k'}} - \tau_{j'} - \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{w_{j'}})} |TF_{j'j'}(\omega)| |TF_{kk'}(\omega)|}{e^{i\omega(\tau_k + \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{wk} - \tau_j - \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{wj})} |TF_{jj'}(\omega)| |TF_{kk'}(\omega)|} = \frac{e^{i\omega(\tau_{k'} + \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{w_{k'}} - \tau_{j'} - \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{w_{j'}})} e^{-i\omega(\tau_j + \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{wj} - \tau_k - \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} h_{wk})}}{e^{i\omega[(\tau_j - \tau_j') - (\tau_k - \tau_k') + \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} (h_{wk} - h_{wj})]}} \quad (11)$$

综上,对于局部覆水的场地,地下相干函数与地表相干函数的关系为:

$$\gamma_{j'k'}(i\omega) = \begin{cases} \gamma_{jk}(i\omega) e^{i\omega[(\tau_j - \tau_j') - (\tau_k - \tau_k')]} & (\text{目标点位于无覆水区}) \\ \gamma_{jk}(i\omega) e^{i\omega[(\tau_j - \tau_j') - (\tau_k - \tau_k') + \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} (h_{wk} - h_{wj})]} & (\text{目标点位于覆水区}) \end{cases} \quad (12)$$

## 2 半覆水相变 V 形峡谷地下多点地震动模拟

### 2.1 目标点地震动模拟结果

采用文献[10]提出的两步传递函数法(水平自由表面  $\rightarrow$  V 形峡谷表面  $\rightarrow$  峡谷地下),传递函数由半覆水相变 V 形峡谷散射频域理论解得到。联立本文的地下相干函数构造地下功率谱矩阵,通过

Cholesky 分解生成了相变 V 形峡谷场地的多点地震动。目标点的选取如图 1 所示,各点坐标已在图中注明,地震动持时取为 20.48 s。选取 Clough-Penzien 功率谱<sup>[16]</sup>作为水平地表的目标功率谱,其参数取为  $S_0=0.0069$ ,  $\omega_g=5\pi$  rad/s,  $\omega_f=0.1\omega_g$ ,  $\xi_g=\xi_f=0.6$ 。地表相干函数模型采用 Hao 等的模型<sup>[17]</sup>,参数采用 SMART-1 台阵 45 条地震记录的统计参数<sup>[16]</sup>,其值  $\beta_1, a, b$  和  $c$  分别取为  $1.109 \times 10^{-4}$ ,  $3.853 \times 10^{-3}$ ,  $-1.811 \times 10^{-5}$  和  $1.177 \times 10^{-4}$ 。选取 Jennings 包络函数<sup>[16]</sup>进行调幅,其参数  $t_1, t_2$  以及  $c$  分别取为 1.2, 9 和 0.155。覆水深度取为峡谷深度的一半,水的体积模量取  $2.2 \times 10^9$  Pa,密度取  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,土体物理参数如表 1 所示。

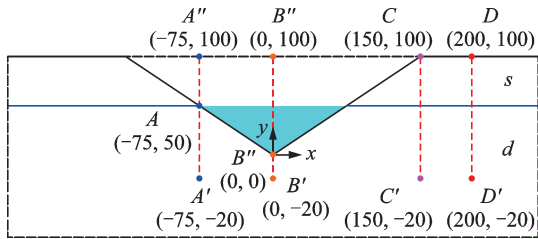


图 1 目标点示意图

Fig. 1 Illustration of target points

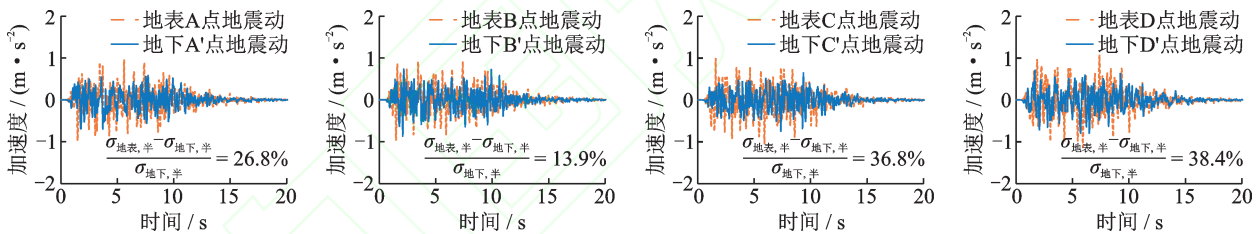


图 2 地表及地下目标点模拟加速度时程

Fig. 2 Ground and underground acceleration time histories of target points

## 2.2 功率谱及相干函数拟合

图 3 给出了目标点加速度时程的频谱关系,限于篇幅,本文仅以地表 A 点、B 点、地下 A' 点和 B' 点为例。各点目标功率谱的谱密度主要集中在频率小于 4 Hz 的低频区间,受传递函数随频率波动的影响,地表目标谱和地下目标谱均表现出了波动性,且地下目标谱的总面积小于地表目标谱。模拟谱按  $S(\omega)=F(\omega)F^*(\omega)/\Delta\omega$  计算,其中  $F(\omega)$  为单条加速度时程的傅里叶谱,  $\Delta\omega$  为频率步长。结果表明,各目标点的模拟功率谱均与目标功率谱拟合良好。图 4 给出了相干函数的拟合情况,限于篇幅,仅以 AB(A'B')和 BC(B'C')间的相干函数为例。结果表明,尽管相干函数的模拟值出现了一定程度的波动,但总体上模拟值仍围绕目标值变化,故所模拟地震动表现出了良好的空间相关性,证明了本文所模拟

表 1 各层土体物理参数

Tab. 1 Physical parameters of soil

层	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	剪切模量 $G/\text{MPa}$	阻尼比
s	2500	380	0.05
d	2650	320	0.05

图 2 给出了各目标点的模拟加速度时程,图中标注的  $\sigma$  代表所模拟加速度时程的标准差。结果表明,各地下目标点的加速度峰值和标准差均小于相应的地表目标点,这是由土体的滤波作用和放大效应导致的,而地表目标点和地下目标点的最大距离仅 120 m,衰减阻尼可以忽略不计。地表 A, B, C 和 D 点的标准差放大幅度分别为 26.8%, 13.9%, 36.8% 和 38.4%,表明土体的放大效应与土层厚度呈正相关。此外,点 C 和 C' 与点 D 和 D' 间跨越了相变界面,相变界面使土体产生了分层,层效应会加剧土体的放大效应<sup>[10]</sup>。一系列实测数据和理论研究表明,河谷地形存在放大效应,峡谷两侧壁有明显的地震放大现象,并且随高程的增高地震放大系数越来越大,谷顶地震动大于谷底<sup>[18]</sup>。本文模拟结果表明,谷顶 C 点地震动大于谷底 B 点地震动,与已有研究成果结论一致。

地震动的合理性。

## 2.3 改进前后地下相干函数的对比

覆水效应的地下相干函数乘以一个代表水影响的复指数函数,即:

$$\gamma_{jk'}^{\text{改进}}(i\omega) = \gamma_{jk'}^{\text{未改进}}(i\omega) \times e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_w}{K_w^*}} (h_{jk} - h_{j'})} \quad (13)$$

由式(6)可知,复体积模量  $K_w^*$  是虚数,则  $\sqrt{\rho_w/K_w^*} (h_{jk} - h_{j'})$  必然是复数,假设其为  $a + bi$ ,则式(13)中的复指数函数可以表示为  $e^{i\omega(a+bi)} = e^{\omega(ai-b)} = e^{-b\omega} e^{a\omega i}$ ,其模的大小  $e^{-b\omega}$  决定了引入覆水效应前后地下相干函数的变化,而  $e^{a\omega i}$  仅影响相位,不影响地下相干函数的值。

图 1 给出了各目标点的位置和坐标,以峡谷半覆水为例,目标点 A'B', A'C' 和 A'D' 间的相干性变化如图 5 所示,由于 Hao 等的模型<sup>[17]</sup>对百米以上距离

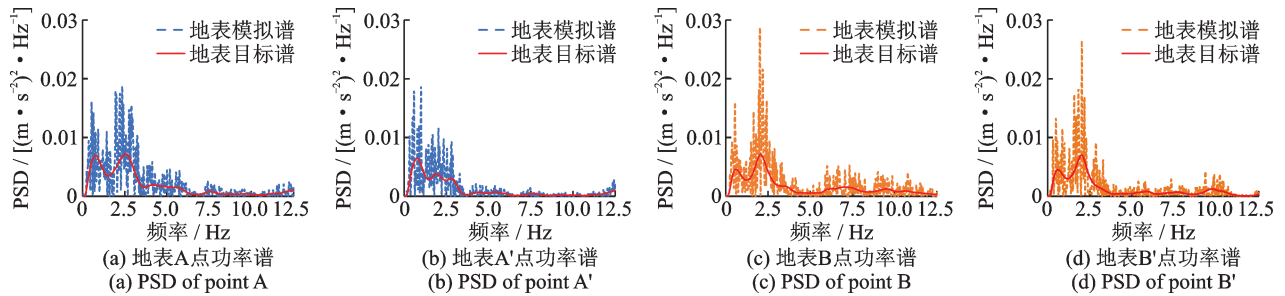


图3 目标点功率谱拟合

Fig. 3 PSD compatibility of target points

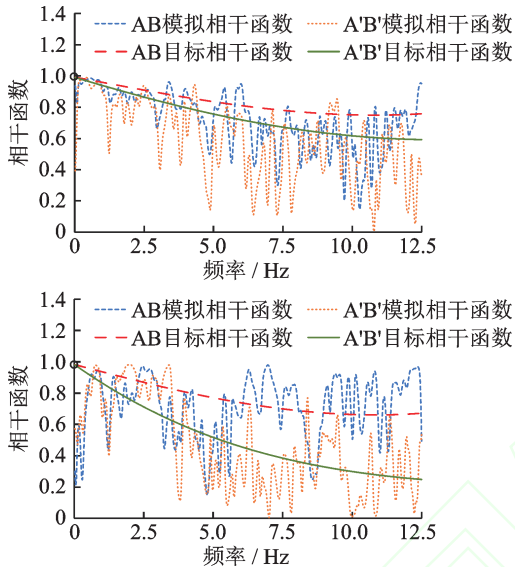


图4 地表及地下相干函数拟合

Fig. 4 Fitting of ground and underground coherence functions

拟合效果较好,故地表相干函数模型采用Hao等的模型<sup>[17]</sup>,其参数 $\beta_1, a, b$ 和 $c$ 分别取为<sup>[16]</sup> $1.109 \times 10^{-4}$ ,  $3.853 \times 10^{-3}$ ,  $-1.811 \times 10^{-5}$ 和 $1.177 \times 10^{-4}$ 。结果表明,引入覆水效应后,多点地震动间相干性表现增强。

该现象的物理本质是:引入覆水效应后,P波可以在水中传播,与周边土介质中波动的相互影响增强,波动连续性更强,由此导致地震动间相干性表现增强。

#### 2.4 本文提出的地下相干函数对地下多点地震动的影响

图6给出了引入覆水效应前后地下多点地震动的对比。结果表明,引入覆水效应后位于覆水区的A'点和B'点地震动减小(二者的标准差分别为改进前的0.94和0.97),而位于无覆水区的C'点和D'点地震动增大(二者的标准差分别为改进前的1.04和1.11)。原因在于对应P波的部分能量被传递至水中,导致A'点和B'点地震动减小。

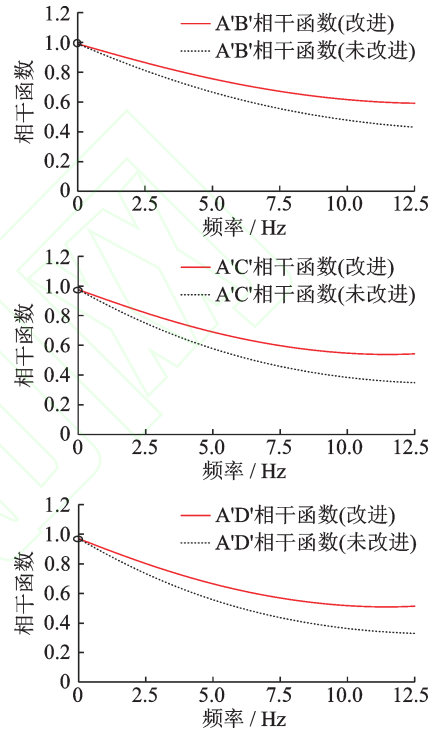


图5 改进前后各地下目标点间的相干函数

Fig. 5 Coherence comparison between before and after improvement model

#### 2.5 覆水深度对地震动的影响

为了进一步探究覆水深度对地下多点地震动的影响,图7分别给出了无覆水和满覆水时各点处地震动放大幅度的对比(半覆水时的地震动已在图2给出)。图中注明了地表地震动的放大百分比。结果表明,土体对地震动的放大作用随着覆水深度的增大而减小(负相关),原因在于对应P波的部分能量被传递至水中,且覆水深度越大,传递至水中的能量越多,土体中的地震动随之越小。其中在A(A')点处,无覆水与满覆水相比,土体放大百分比的差值为10.7%,该数值在B,C和D点处分别为15.8%,5.6%和3.3%,这表明距离覆水越远,受覆水深度的影响越弱。此外,土层厚度相同的C(C')点和D(D')点相比,C(C')点处地震动放大幅度小,原因在于C(C')点距离覆水较近,受覆水影响更大。

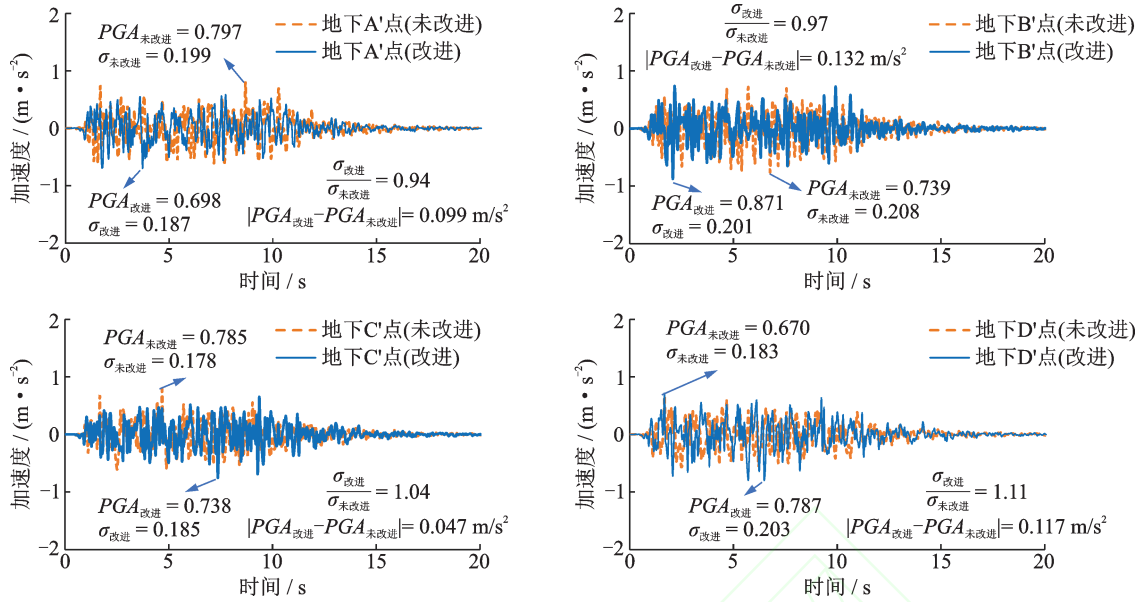


图6 本文提出的地下相干函数对地震动的影响

Fig. 6 Influence of the proposed underground coherence function on seismic motions

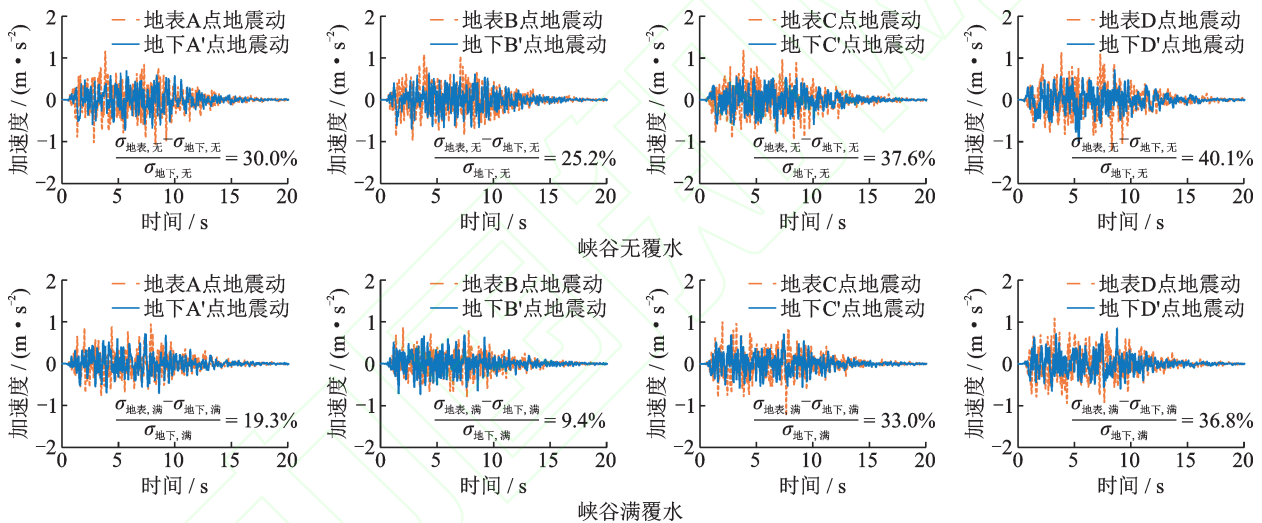


图7 覆水因素对各点地震动的影响

Fig. 7 Influence of overlying water on seismic motions

### 3 算例分析

#### 3.1 工程概况与有限元模型

如图8所示,某预应力混凝土连续刚构桥跨越半覆水V形峡谷,峡谷宽300m,深100m,地基弹性模量为1.5GPa,泊松比为0.22。刚构桥全长300m,跨径组合为75m+150m+75m,采用变截面箱梁,截面尺寸如图9所示。左墩高41m,墩底埋深21m,右墩高47m,墩底埋深18m。混凝土采用C50,纵筋和箍筋均采用HRB400。

采用有限元软件ABAQUS建立桥梁的数值计算模型,进行弹性时程分析,如图10所示。箱梁、桥墩、桩基和土体均采用C3D8R实体单元,共12588

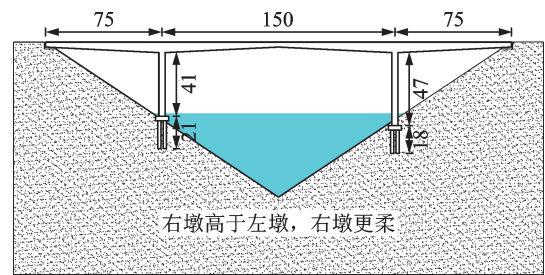


图8 某连续刚构桥立面图(单位:m)

Fig. 8 Elevation of a continuous rigid frame bridge (Unit: m)

个单元,钢筋采用T3D2桁架单元,共6732个单元。墩梁绑定约束,钢筋嵌入混凝土,由于本文不关注桩土相互作用,桩土采用共节点简化处理。梁体两侧只施加竖向位移约束及绕桥向转动约束( $U_3=UR_1=UR_2=0$ )。截取的地基周围施加接地的弹簧和阻尼器以建立黏弹性人工边界,模拟无限地基的辐射阻尼。黏

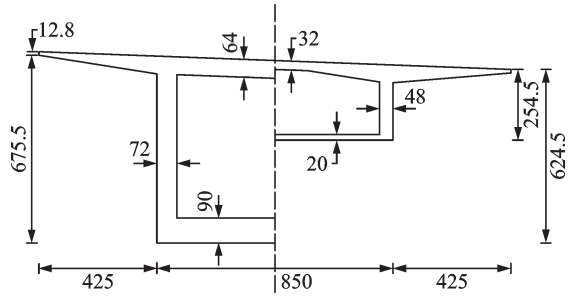


图9 主梁墩顶(左)及跨中(右)截面(单位:cm)

Fig. 9 Section of beam at pier top and midspan (Unit: cm)

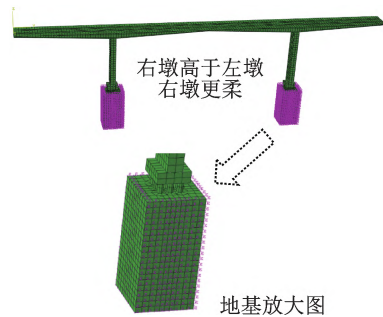


图10 桥梁有限元模型

Fig. 10 Finite element model of bridge

弹性人工边界的刚度系数和阻尼系数按文献[19]计算。

### 3.2 工况设置及地震动输入

本文共设置4种工况,设置目的与详细设置方式列于表2。地震动采用多点输入方式,依据前文

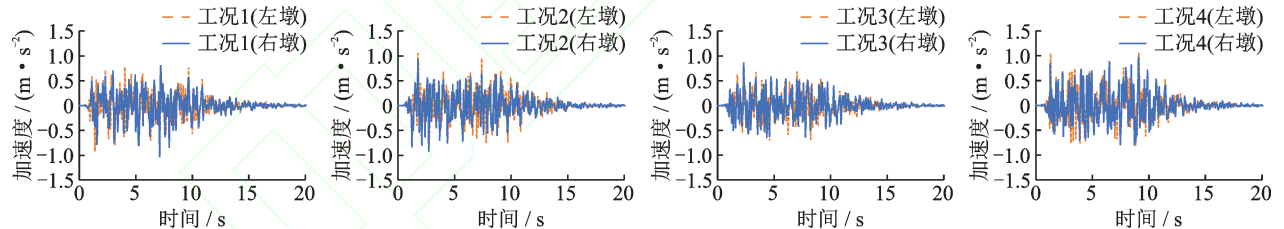


图11 输入的多点地震动

Fig. 11 Multi-support seismic excitations

### 3.3 跨越半覆水相变V形峡谷桥梁地震响应的对比与分析

本节计算了桥梁在各工况下的地震响应,表3给出了工况1下各观测点处的最大内力和位移。内力结果表明,多点输入时桥梁左右两侧的表现出了明显的非对称性,其中右跨跨中的剪力和弯矩均远大于左跨跨中;中跨跨中的轴力远大于左右两跨,但剪力和弯矩却小于左右两跨,其原因是梁体左右两端进行了竖向位移约束和绕桥向转动约束,导致左右两跨自由度减小,其剪力弯矩响应随之增大。位移结果表明,尽管顺桥向施加的地震动大于横桥向,但横桥向的最大位移更大(右跨跨中处),这是由于两桥墩顺桥向激励方向相反时,二者产生的位移

方法模拟得到各组工况的地震动,如图11所示。选取每一跨的跨中,以及左右两桥墩的墩顶和墩底作为观测点。输入地震动前首先对各组地震动进行归一化处理,即对每一组地震动数据除以该组数据中的最大值,再对归一化后的数据分别按加速度峰值为 $0.2g$ 和 $0.4g$ 进行输入( $g$ 为重力加速度)。采用三向激励,各方向的地震动按顺桥向:横桥向:竖向=1:0.85:0.65进行设置。黏弹性边界上采用文献[20]的方法将地震动以等效节点力的方式输入。等效节点力的计算公式如下:

$$F_b = (K_b u_b^f + C_b \dot{u}_b^f + \sigma_b^n) A_b \quad (14)$$

式中  $u_b^f$  为自由场位移向量,  $\dot{u}_b^f$  为自由场速度向量,  $\sigma_b^n$  为自由场应力张量,  $n$  为边界外法线方向余弦向量,  $K_b$  为黏弹性边界的弹簧刚度矩阵,  $C_b$  为黏弹性边界的阻尼系数矩阵,  $A_b$  为边界节点的影响面积。

表2 工况设置

Tab. 2 Analysis cases

工况序号	分析内容	实现方式
1	此工况为以下各组工况的对照组	黏弹性人工边界,峡谷半覆水,使用本文提出的覆水效应地下相干函数
2	探讨本文提出的覆水效应地下相干函数对结构地震反应的影响	使用未改进的地下相干函数,其他同工况1
3	探讨峡谷覆水深度对结构地震反应的影响	峡谷满覆水,其他同工况1
4	峡谷无覆水,其他同工况1	峡谷无覆水,其他同工况1

被部分抵消。

表4,5和6分别给出了工况2,3和4的最大剪力和弯矩及其与工况1的对比。结果表明,引入覆水效应后本文刚构桥的响应普遍减小,且响应与覆水深度呈负相关,原因在于对应P波的部分能量被传递至水中,且覆水深度越大,传递至水中的能量越多,传递到结构上的能量随之越小。前文分析表明,引入覆水效应前后地震动差值不足10%,而多点激励下结构响应最大差值达到79.4%(左跨跨中在 $0.4g$ 峰值下的弯矩),这表明本文提出的覆水效应地下相干函数对结构地震响应影响显著,在实际工程中不可忽视。工况3中左跨跨中的剪力弯矩以及两墩顶部的弯矩反而增大,工况4中少数观测点的内力反而减小,原因是在多点激励差动输入的复

表 3 工况 1 的最大内力和位移

Tab. 3 Maximum internal force and displacement of case 1

观测点	轴力/(10 <sup>2</sup> kN)		剪力/(10 <sup>2</sup> kN)		弯矩/(10 <sup>2</sup> kN·m)		顺桥向位移/m		横桥向位移/m		竖向位移/m	
	0.2g	0.4g	0.2g	0.4g	0.2g	0.4g	0.2g	0.4g	0.2g	0.4g	0.2g	0.4g
左跨跨中	70.6	96.2	172.3	271.4	3805.9	7387.0	0.129	0.257	0.168	0.337	0.063	0.123
中跨跨中	281.8	649.0	133.7	267.0	3451.4	5324.7	0.131	0.262	0.126	0.251	0.154	0.268
右跨跨中	72.5	98.9	351.2	631.1	10233.4	20312.8	0.131	0.261	0.236	0.471	0.079	0.160
左墩顶部	723.9	843.6	392.4	831.8	10157.1	22090.0	0.136	0.271	0.145	0.289	0.103	0.201
左墩底部	1162.5	1180.7	421.2	890.4	6620.9	13164.5	0.149	0.297	0.133	0.267	0.104	0.202
右墩顶部	1008.2	1415.4	385.2	816.8	11255.3	24400.2	0.131	0.259	0.181	0.362	0.093	0.193
右墩底部	1396.5	1830.1	428.9	903.1	7619.0	15319.1	0.147	0.293	0.135	0.270	0.093	0.192

表 4 工况 2 的最大剪力弯矩及其与工况 1 的对比

Tab. 4 Maximum shear and moment of case 2 and comparison between case 1 and 2

观测点	0.2g				0.4g			
	剪力		弯矩		剪力		弯矩	
	工况 2/ (10 <sup>2</sup> kN)	[(工况 2-工况 1)/ 工况 1]/%	工况 2/ (10 <sup>2</sup> kN·m)	[(工况 2-工况 1)/ 工况 1]/%	工况 2/ (10 <sup>2</sup> kN)	[(工况 2-工况 1)/ 工况 1]/%	工况 2/ (10 <sup>2</sup> kN·m)	[(工况 2-工况 1)/ 工况 1]/%
左跨跨中	278.7	61.8	6535.2	71.7	430.0	58.4	13250.0	79.4
中跨跨中	111.1	-16.9	5169.2	49.8	221.6	-17.0	8795.8	65.2
右跨跨中	280.2	-20.2	12806.1	25.1	630.8	0	25722.1	26.6
左墩顶部	606.5	54.6	16949.9	66.9	1165.2	40.1	32096.8	45.3
左墩底部	627.9	49.1	5777.1	-12.7	1208.2	35.7	11583.7	-12.0
右墩顶部	576.1	49.6	18342.6	63.0	1105.6	35.4	34755.0	42.4
右墩底部	589.0	37.3	6968.9	-8.5	1132.2	25.4	13830.4	-9.7

表 5 工况 3 的最大剪力弯矩及其与工况 1 的对比

Tab. 5 Maximum shear and moment of case 3 and comparison between case 1 and 3

观测点	0.2g				0.4g			
	剪力		弯矩		剪力		弯矩	
	工况 3/ (10 <sup>2</sup> kN)	[(工况 3-工况 1)/ 工况 1]/%	工况 3/ (10 <sup>2</sup> kN·m)	[(工况 3-工况 1)/ 工况 1]/%	工况 3/ (10 <sup>2</sup> kN)	[(工况 3-工况 1)/ 工况 1]/%	工况 3/ (10 <sup>2</sup> kN·m)	[(工况 3-工况 1)/ 工况 1]/%
左跨跨中	208.2	20.8	5889.1	54.7	388.8	43.3	10966.2	48.5
中跨跨中	123.0	-8.0	2559.2	-25.9	245.3	-8.1	4558.9	-14.4
右跨跨中	163.5	-53.4	7518.0	-26.5	397.8	-37.0	15186.5	-25.2
左墩顶部	362.5	-7.6	13064.3	28.6	716.6	-13.8	28310.4	28.2
左墩底部	371.1	-11.9	6058.3	-8.5	773.8	-13.1	12143.1	-7.8
右墩顶部	312.6	-18.8	13696.1	21.7	657.0	-19.6	28449.6	16.6
右墩底部	360.7	-15.9	6830.5	-10.3	713.3	-21.0	12512.2	-18.3

表 6 工况 4 的最大剪力弯矩及其与工况 1 的对比

Tab. 6 Maximum shear and moment of case 4 and comparison between case 1 and 4

观测点	0.2g				0.4g			
	剪力		弯矩		剪力		弯矩	
	工况 4/ (10 <sup>2</sup> kN)	[(工况 4-工况 1)/ 工况 1]/%	工况 4/ (10 <sup>2</sup> kN·m)	[(工况 4-工况 1)/ 工况 1]/%	工况 4/ (10 <sup>2</sup> kN)	[(工况 4-工况 1)/ 工况 1]/%	工况 4/ (10 <sup>2</sup> kN·m)	[(工况 4-工况 1)/ 工况 1]/%
左跨跨中	230.6	33.8	6052.2	59.0	372.7	37.3	12295.7	66.5
中跨跨中	204.3	52.8	4191.6	21.4	387.6	45.2	5808.0	9.1
右跨跨中	229.7	-34.6	10861.7	6.1	529.1	-16.2	21843.1	7.5
左墩顶部	503.7	28.4	15299.6	50.6	958.4	15.2	28764.7	30.2
左墩底部	528.4	25.5	5365.5	-19.0	1005.1	12.9	10747.6	-18.4
右墩顶部	463.8	20.4	15925.9	41.5	877.8	7.5	29889.0	22.5
右墩底部	487.9	13.8	5793.1	-24.0	927.9	2.7	11439.4	-25.3

杂情况下,结构不同位置的位移不同步,导致部分位置的内力相对增大或减小。多点输入更符合真实情况。

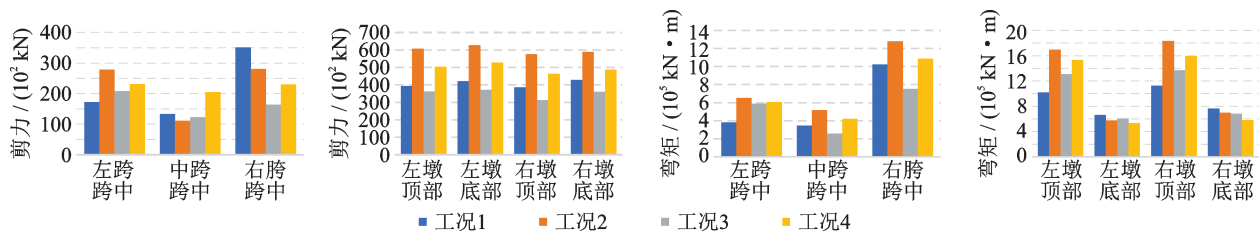


图12 最大剪力弯矩的柱状图

Fig. 12 Histogram of maximum shear and moment

## 4 结 语

本文提出了覆水效应地下相干函数,模拟了半覆水相变V形峡谷场地地下多点地震动,验证了其合理性,分析了覆水深度与相干性的影响。简要总结如下:

(1)提出并推导出了覆水效应的地下相干函数模型,模拟了基于该地下相干函数的半覆水相变V形峡谷多点地震动,所生成的多点地震动具有良好的谱兼容性和空间相关性;

(2)引入覆水效应的多点地震动间相干性表现增强,原因在于P波可以在水中传播,进而与周边土介质中波动的相互影响增强,波动连续性更强。

(3)覆水效应导致覆水区地震动减小;土体的放大作用随覆水深度增大而减小,且距覆水越远受覆水影响越弱。

(4)以3跨连续刚构桥为例,探讨了“覆水效应地下相干函数”及“峡谷覆水深度”对结构地震响应的影响,覆水效应降低了结构响应且结构响应随覆水深度的增大而减小。

### 参考文献:

- [1] 俞瑞芳,曲国岩,张冬锋.空间相关多点非平稳地震动合成及其对大跨结构响应的影响[J].振动工程学报, 2020,33(5):1013-1023.  
Yu Ruifang, Qu Guoyan, Zhang Dongfeng. Simulation of spatially correlated multipoint non-stationary ground motion and its influence on the response of long-span structures[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(5):1013-1023.
- [2] 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.
- [3] Liu G H, Lian J J, Liang C, et al. An effective approach for simulating multi-support earthquake underground motions [J]. Bulletin of Earthquake Engineer-

为了直观地展示各种工况的内力对比,图12给出了0.2g峰值下各观测点剪力和弯矩的柱状图。

ing, 2017, 15(11): 4635-4659.

- [4] 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.
- [5] Liu G H, Yu H T, Liu Y Q, et al. An approach for predicting multi-support seismic underground motions in layered saturated soil under surface water[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 104-118.
- [6] Wu Y X, Gao Y F, Zhang N, et al. Simulation of spatially varying ground motions in V-shaped symmetric canyons[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2016, 20(6): 992-1010.
- [7] 韩森,段燕玲,孙欢,等.近断层地震动特征参数对基础隔震结构地震响应的影响分析[J].土木工程学报, 2013,46(6):8-13.  
Han Miao, Duan Yanling, Sun Huan, et al. Influence of characteristics parameters of near-fault ground motions on the seismic responses of base-isolated structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2013,46(6):8-13.
- [8] Liu G H, Feng X, Lian J J, et al. Simulation of spatially variable seismic underground motions in u-shaped canyons[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2019, 23(3): 463-486.
- [9] 柳国环,马杰,冯啸.多水平成层的非均匀介质圆弧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 Guohuan, 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.
- [10] 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形场地多点地震动模拟[J].中国公路学报, 2017, 30(12): 150-158.  
Liu Guohuan, 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.
- [11] 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 Guohuan, Feng Xiao, Jiang Dalai. 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.
- [12] 柳国环,江大来,刘中宪,等. 分层圆弧峡谷 SV 波地震差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 Guohuan, Jiang Dalai, Liu Zhongxian, 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.
- [13] 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/OL]. 计算力学学报:1-8[2023-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1373.O3.20220916.1641.074.html>.
- Li Xinyang, Liu Guohuan, Fei Qixiang. 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: 1-8[2023-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1373.O3.20220916.1641.074.html>.
- [14] Ricker, N H. Seismic Waves in Viscoelastic Media [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1981.
- [15] 杨复生,钱绍新. 一维粘弹性波动方程散射反演——小波变换应用[J]. 地球物理学报, 1995(S1): 94-106.
- Yang Fusheng, Qian Shaoxin. 1-D viscoelastic wave equation inversion—application of wavelet transform [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995(S1): 94-106.
- [16] 杨庆山,田玉基. 地震地面运动及其人工合成[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- Yang Q S, Tian Y J. Seismic Ground Motions and Its Artificial Synthesis[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [17] 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.
- [18] 高玉峰,代登辉,张宁. 河谷地形地震放大效应研究进展与展望[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(4): 734-752.
- Gao Yufeng, Dai Denghui, Zhang Ning. Progress and prospect of topographic amplification effects of seismic wave in canyon sites[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 734-752.
- [19] 谷音,刘晶波,杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007(12): 31-37.
- Gu Yin, Liu Jingbo, Du Yixin, 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element[J]. Engineering Mechanics, 2007(12): 31-37.
- [20] 何建涛,马怀发,张伯艳,等. 黏弹性人工边界地震动输入方法及实现[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 960-969.
- He Jiantao, Ma Huaifa, Zhang Boyan, et al. Method and realization of seismic motion input of viscous-spring boundary [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 960-969.

## An underground coherence function considering water-covered effect and the simulation of multi-support seismic motions of media-transition V-shaped canyon and its characteristics

LIU Guo-huan<sup>1,2</sup>, CHEN Xin-yu<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:** An underground coherence function considering water-covered effect and suitable for simulating the seismic motions of media-transition V-shaped canyon is derived in this paper. The variation law and physical meaning is further investigated and summarized in detail. Then, the underground PSD matrix is constructed by combining the derived coherence function, the transfer function and obtained theoretical solution of scattering in media-transition V-shaped canyon with partly filled water. Subsequently, the multi-support underground seismic motions are generated by decomposing the underground PSD matrix, and the reliability and rationality is further verified. Finally, the effects of the proposed coherence function and the depth of water on the seismic motions and the responses of a continuous rigid frame bridge are compared and analyzed. Results show that: The coherence due to water effect is obviously enhanced. Moreover, the amplitude of seismic motions in the water-covered areas is reduced because the part of energy from P waves is transferred to the water. The amplitudes of ground motions and structural seismic responses correlate negatively with the depth of overlying water. In another word, the effect of water decreases with the increasing distance from water areas. The work in this paper is valuable for the simulation of multi-support seismic motions and dynamic analysis of those long-span structures located at the media-transition V-shaped canyon with partly filled water.

**Key words:** water-covered effect; media-transition; underground coherence function; multi-support seismic underground motions; V-shaped canyon

作者简介: 柳国环(1980—),男,博士,副教授。电话: 18698009097; E-mail: liugh@tju.edu.cn。