

文章编号:1001-7372(2017)12-0150-09

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

柳国环,冯 啸

(天津大学 建筑工程学院,天津 300072)

摘要:为了解峡谷地形对地震波场分布的特殊影响,重点发展和实现了 V 形非均匀多层介质峡谷的多点地震动场模拟,其理论依据是在长期假设均匀介质峡谷场地的基础上引入分层效应模型,其优点在于考虑了地下土层分布不均匀对地震动的影响。具体理论包括:稳态波场被分为封闭区和开放区,同时引入波函数展开法和大圆弧法,经推导得到了 V 形峡谷在 SH 波入射激励下稳态波场的分布频域解析解,进而得到分布于 V 形峡谷表面的频域谱;然后,简述导出的基于 V 形峡谷地形的“平-凹”相干函数模型;进而,利用两步骤传递函数法(水平自由表面→V 形峡谷表面→峡谷地下)推导得到地下频域谱;由此,形成并阐明了非均匀多层介质 V 形峡谷表面和地下的多点地震动具体模拟方法;最后,开发了依据上述途径的 V 形场地多点地震动模拟程序并实现其可视化,验证了计算结果的合理性和可靠性。分析结果表明:波场幅值在峡谷两侧水平场地与峡谷底部具有明显差异,峡谷效应的多点相干性因各土层分界面与峡谷边界稳态波场中的散射成分存在而被降低。**关键词:**桥梁工程;V 形峡谷;地震动模拟;波函数;多点地震动;非均匀介质

中图分类号:U447 文献标志码:A

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

LIU Guo-huan, FENG Xiao

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to investigate the specific effect of canyon topography on the seismic wave field, a simulation approach of multi-support seismic motions was proposed and developed based on the theory of spatial variable seismic motions in a multi-layered V-shaped canyon with inhomogeneous media. The homogeneous-media canyon model was improved by introducing the layer model, and the effects of inhomogeneous media were taken into account. Firstly, the steady-state wave field was separated into two regions, namely, the open region and the enclosed region. The wave function expansion method and big-arc boundary method were adopted to obtain the analytical solution of seismic wave field in the V-shaped canyon by a train of plane SH waves. A flat-sunken coherence function model of a V-shape canyon was illuminated. Moreover, the underground power spectral density functions were deduced by a two-step transfer function method (horizontal free surface→V-shaped canyon surface→underground canyon). Then the

收稿日期:2017-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51408409,51778414);天津市应用基础与前沿技术研究计划(15JCQNJC07400);
华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金项目(2017ZB21)

作者简介:柳国环(1980-),男,天津市人,副教授,工学博士,E-mail:liu_guohuan@sina.com。

simulation approach of spatially variable seismic motions in a multi-layer V-shaped canyon was illuminated. Finally, a visual program of multi-support seismic motions in a V-shaped canyon was developed for the simulation, whilst the rationality of calculation results was verified. The results show that there are great differences of the wave displacement amplitudes between flat terrain and canyon bottom. Influenced by the scattering wave components in the steady-state wave field of the layer interface boundary and the canyon surface boundary, the coherence of canyon effect decreases correspondingly.

Key words: bridge engineering; V-shaped canyon; seismic motion simulation; wave function; multi-support seismic motion; inhomogeneous medium

0 引言

结构抗震分析中,当结构模型和边界条件确定后,合理的地震动输入便成为决定结构响应的关键因素之一。中国中西部地区地幅辽阔,多见山谷、高原、大河和平原等复杂地形。其中大跨桥梁结构凭借优越的跨越功能得到广泛应用,其工作环境多为峡谷或河谷。此时,由于场地不规则引起的地形效应无法被忽视^[1-6],能够反映峡谷场地特性的空间多点地震动输入成为桥梁结构抗震分析的一个至关重要的因素。

基于场地效应的地震波场研究一直是地震理论的一个重要研究方向^[7]。Trifunac^[8]和 Wong 等^[9]分别提出了半圆形峡谷和半椭圆形峡谷在 SH 波激励下的二维散射场解析解;Lee^[10]利用抛物线坐标给出了半抛物线形峡谷的散射波场解;何钟怡等^[11]利用波函数展开法研究了界面圆孔的散射问题;Tsaur 等^[12-13]先后给出了浅层和深层均匀介质对称 V 形峡谷的 SH 波场解析方法;Wu 等^[14]利用 2 种经验方法给出了均匀介质峡谷的地震动模拟方法。对于峡谷场地效应,笔者根据均质 U 形峡谷场地提出了一种地下多点地震动模拟方法^[15],此后在考虑土层折射效应的基础上分析了双地层圆弧形峡谷(层数为 2)和 U 形峡谷的地下地震动波场解析解。然而,对于峡谷场地地震动波场研究所使用的峡谷模型假定较为理想化,而实际的土层具有明显的多分层现象^[16](层数不小于 3)。多层不规则地形大大增加了散射波的形成机制,而散射波在传播过程中经过层间分界面时会产生反射与折射,由此导致波场中散射波的成分随层数呈几何倍数增加。笔者在本文中给出并推导了 V 形分层峡谷的频域解析解,并依据此解进行多点地震动模拟程序的开发和理论验证。

根据随机理论模拟地震动需要考虑以下 3 个主

要因素:自功率谱函数、相干函数和行波效应。本文首先采用波函数展开法严格考虑 V 形峡谷的所有边界条件,考虑峡谷地下土层分层效应。引入大圆弧法将水平边界改为直接契合以汉克尔函数为基础的柱面波函数的弧形边界,并得到波场解析解,在此基础上推导了峡谷场地相干函数模型。利用两步骤传递函数法推导得到峡谷地下功率谱模型和地下反应谱模型,并在此基础上得到 V 形峡谷的模拟多点地震动。基于 V 形峡谷场地得到的模拟多点地震动可作为地震输入,用于建于山区或峡谷地区的桥梁结构抗震分析。

1 V 形峡谷非均匀多层场地空间多点地震动模拟方法

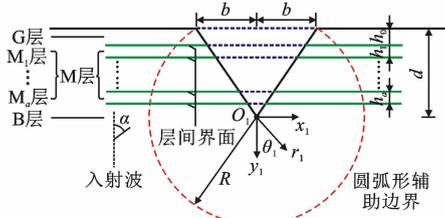
1.1 V 形峡谷模型与边界设定

图 1 为 V 形峡谷场地示意,其中图 1(b)为 V 形非均匀峡谷模型截面,峡谷下方半空间水平分层,包括 3 类土层:具有水平自由表面的上部层(G 层),连接无限半空间的下部层(B 层)以及处于 G 层和 B 层之间的中间层(M 层,共 a 层)。土层总数为 $a+2$,高度为 d 。整个峡谷截面通过一个辅助圆弧边界分为 2 个区域:开放区和封闭区。在峡谷 V 形底部定义坐标系 O_1 ,该坐标系包含直角坐标系和极坐标系, y 轴正轴竖直向下,极轴转动以 y 轴正轴向 x 轴正轴方向为正。地震激励为一组入射角为 α 的单位平面 SH 波。图 1 中, h_0 为 G 层厚度, h_1, h_2, \dots, h_a 为 M_1, M_2, \dots, M_a 层厚度。

通过引入一个半径为峡谷壁长 R 的辅助圆弧,将整个峡谷截面分为 2 个区域:开放区和封闭区(图 2)。对于开放区,其波场组成包含两部分(平面波场和散射波场);对于封闭区的有限空间,平面波的表达形式意义不大,故将其中的波场视为驻波,在辅助边界上与开放区波场连续。对于 2 种区域中的波函数将分别根据各自的边界条件进行推导,最终代入区域连续条件(即在辅助圆弧上位移与切应力连续)



(a) 跨越V形峡谷的桥梁



(b) 多层非均匀介质V形峡谷模型断面(层数不小于3)

图1 V形峡谷场地

Fig. 1 V-shaped Canyon Topography

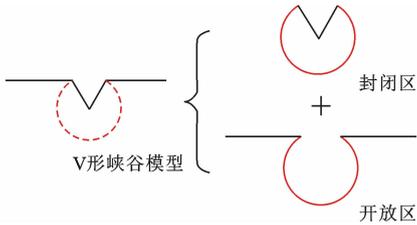


图2 分区示意

Fig. 2 Sketch of Regions

解得所有未知参数。

模型全部边界条件为：

水平自由边界

$$\tau_{free} = \mu \frac{\partial u_{free}}{\partial r_1} + \frac{\mu}{r_1} \frac{\partial u_{free}}{\partial \theta_1} = 0 \quad (1)$$

式中：下标 free 表示平面自由波场； u 为波场幅值； τ 为介质剪应力； μ 为切变模量； r_1 和 θ_1 为坐标自变量。

层间连续条件

$$u_{la} - u_{lb} = 0 \quad (2)$$

式中：下标 la, lb 表示相邻层。

$$\tau_{la} - \tau_{lb} = \left(\mu_{la} \frac{\partial u_{la}}{\partial r_1} + \frac{\mu_{la}}{r_1} \frac{\partial u_{la}}{\partial \theta_1} \right) - \left(\mu_{lb} \frac{\partial u_{lb}}{\partial r_1} + \frac{\mu_{lb}}{r_1} \frac{\partial u_{lb}}{\partial \theta_1} \right) = 0 \quad (3)$$

峡谷表面边界

$$\tau_{canyon} = \frac{\mu}{r_1} \frac{\partial u_{canyon}}{\partial \theta_1} = 0 \quad (4)$$

式中：下标 canyon 表示峡谷表面。

无限远边界

$$u_{\infty} = 0, r_1 = \infty \quad (5)$$

1.2 峡谷波场

关于平面波的反射与折射已有完善的理论成果，本文仅给出关于散射场的具体推导过程。由于V形边界的存在，平面波在到达地表后将产生圆柱形散射波场；同时由于层间边界的存在，散射波场进一步发生反射与折射现象，形成较为复杂的复合波场。SH波引起的散射波场具有平面性质，满足Helmholtz方程

$$\nabla^2 u + k^2 u = 0 \quad (6)$$

式中： ∇^2 为拉普拉斯算子； k 为波数； u 为波场幅值，对应时域表达式为 $u(r, \theta)e^{-i\omega t}$ ， i 为虚数单位。

由于散射波场函数描述的是圆柱形波，与各水平边界无法很好匹配，因此，引入大圆弧法对水平边界进行处理。大圆弧边界见图3。首先，在原坐标原点 O_1 下方建立第2极坐标系 O ，该坐标系包含直角坐标系和极坐标系， y 轴正轴竖直向上，极轴转动以 y 轴正轴向 x 轴正轴方向为正；以各水平边界与峡谷壁交点为参考点将各水平边界替换为以第2坐标原点为圆心的同心圆圆弧，考虑到大径圆弧与水平线的竖向误差，水平取代距离取辅助圆弧边界半径的100倍，这个距离足以忽略峡谷地形对整体开放区的影响。下文中所有波函数首先定义在第2坐标系上。

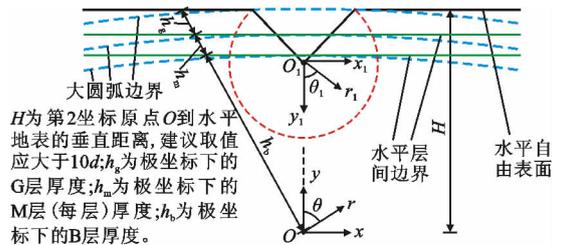


图3 大圆弧边界

Fig. 3 Large-arc Boundary

首先进行开放区的波场求解。为了严格考虑所有的边界条件，引入波函数展开法将波场表示为基于汉克尔函数的级数形式。满足式(6)及Sommerfeld辐射条件的解只能是第1类汉克尔函数与三角函数的乘积形式^[17]

$$u^s = \sum_{n=0}^{+\infty} \{ [A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)] H_n^{(1)}(kr) \} \quad (7)$$

式中：上标 s 表示散射波； A_n, B_n 为待定常数，由边界条件确定； $H_n^{(1)}$ 为第1类 n 阶汉克尔函数。

前文中已提到，我们将波函数展开式定义在第2坐标系上。此时部分边界条件将被修改，其中包括：

水平自由边界

$$\tau_{\text{free}} = \mu \frac{\partial u_{\text{free}}}{\partial r} = 0 \quad (8)$$

层间连续条件

$$\tau_{\text{la}} - \tau_{\text{lb}} = \mu_{\text{la}} \frac{\partial u_{\text{la}}}{\partial r} - \mu_{\text{lb}} \frac{\partial u_{\text{lb}}}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

式(8)、(9)中: $r=r_0$, r_0 为各层大圆弧半径。

开放区所包含的边界条件为式(2)、(5)、(8)和(9)。将开放区散射波函数展开式分别代入上述各边界条件,将获得一个包含所有 n 阶待定常数的方程组,此方程组的方程个数由土层数确定。由于边界条件不完善,缺少辅助圆弧边界,该方程组并不满秩,暂时无法求解,需要同封闭区波场解联立。

接下来考虑封闭区波场解。封闭区与开放区最大的不同之处在于其并没有无限远边界,即不符合 Sommerfeld 辐射条件,因此无法用式(7)表示。对于封闭区波场,满足式(6),利用分离变量法,并考虑峡谷表面边界条件,其解可表示为

$$u^c = \sum_{n=0}^{+\infty} \{ C_n J_{2n}^{(1)}(kr) \cos(2n\nu\theta) + D_n J_{(2n+1)\nu}^{(1)}(kr) \sin[(2n+1)\nu\theta] \} \quad (10)$$

式中:上标 c 表示驻波; C_n, D_n 为待定常数,由边界条件确定; $J_n^{(1)}$ 为第 1 类 n 阶贝塞尔函数; $\nu = \pi/(2\beta_0)$, $\beta_0 = \tan^{-1}(-d/b)$ 。

根据峡谷表面边界条件,该函数为非整数阶贝塞尔函数,故不包含第 2 类贝塞尔函数。将封闭区波函数展开式代入层间连续条件,也可获得一个包含所有 n 阶待定常数的方程组,其方程个数由土层数决定。

此时分别获得了关于开放区和封闭区波场待定常数的方程组,其波场组成可简单表示为

$$u_{\text{open}} = u^f + u^s \quad (11)$$

$$u_{\text{close}} = u^c \quad (12)$$

式中:上标 f 表示平面自由波场。

最后,2 种区域应在辅助边界满足衔接条件,即辅助边界上同一点两侧的位移和切应力分别相等

$$u_{\text{open}} = u_{\text{close}} \quad (13)$$

$$\tau_{\text{open}} = \tau_{\text{close}} = \mu_{\text{open}} \frac{\partial u_{\text{open}}}{\partial r_1} = \mu_{\text{close}} \frac{\partial u_{\text{close}}}{\partial r_1} \quad (14)$$

由于辅助边界衔接条件定义在第 1 坐标系上,故需引入坐标转换公式^[18]

$$J_x(kr) \begin{cases} \cos(x\theta) \\ \sin(x\theta) \end{cases} = \sum_{p=-\infty}^{+\infty} J_{x+p}(kr_1) J_p(kh) \cdot \begin{cases} \cos[(x+p)\theta_1] \\ \sin[(x+p)\theta_1] \end{cases} \quad (15)$$

式中: J 为贝塞尔函数或汉克尔函数。

将经过坐标变换的式(7)、(10)代入式(13)、(14),并联立开放区和封闭区的待定常数方程组,即可得到考虑所有条件的波场解总方程组。为确保各边界条件限制范围,对方程组各式分别乘上积分项 $\cos(m\theta)$ [或 $\cos(m\theta_1)$], 并在其角度取值范围(自变量均为角度)内进行一次积分以确保范围收敛。

由于波函数展开法本身是无穷级数,但作为工程应用,为对总方程组求解,需使方程组系数矩阵满秩。前文已提到,方程个数由边界条件个数和积分项 m 决定,而未知数为 A_n, B_n, C_n 和 D_n , 共 $4n$ 个。为实现满秩,需截取 n, p 和 m 使方程个数与未知数个数相等。至此得到满秩的波场解方程组,可利用矩阵进行求解,得到所有待定常数的解,将其分别代入各区波场展开式, V 形峡谷场地的地震波场分布显式解 $u_V(i\omega)$ 即可得。

1.3 峡谷相干函数

空间相关的多点地震动通常是由理论或半经验功率谱密度函数和相干函数模拟。本节基于文献[15]给出基于 V 形峡谷地形的峡谷表面相干函数模型。

首先,本文第 1,2 节中已得到了波场的频域显式解 $u_V(i\omega)$, 考虑时间项,将频域解转为时域表达式

$$U_V(t) = \sum_{\omega=\omega_0}^{\omega_u} u_V(i\omega) e^{-i\omega t} \quad (16)$$

式中: ω_0, ω_u 分别为截断频率的下限和上限值。

根据相干函数的定义,其表达式 ρ 可根据功率谱密度函数得到

$$\rho_{a_0 b_0}(i\omega) = \frac{S_{a_0 b_0}^V(i\omega)}{\sqrt{S_{a_0 a_0}^V(\omega) S_{b_0 b_0}^V(\omega)}} \quad (17)$$

式中: $S_{a_0 a_0}^V(\omega), S_{b_0 b_0}^V(\omega)$ 分别为峡谷表面相异两点 a_0 和 b_0 时程的理论自功率谱密度函数; $S_{a_0 b_0}^V(i\omega)$ 为两点的理论互功率谱密度函数。

对于互功率谱密度函数,其表达式可根据 a_0, b_0 两点时程求得

$$S_{a_0 b_0}^V(i\omega) = \frac{(\Delta t)^2 \tilde{S}_{a_0 b_0}(i\omega)}{L} = \frac{(2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} E[U_{a_0}(t) U_{b_0}(t + \Delta t)] e^{i\omega \Delta t} d\Delta t}{L} = \frac{(\Delta t)^2 F(U_{a_0}(t)) \overline{F(U_{b_0}(t))}}{2\pi L} \quad (18)$$

式中: $\tilde{S}_{a_0 b_0}(i\omega)$ 为互功率谱函数; t 为时间长度; F 为

傅里叶变换。自功率谱密度函数也可根据式(18)求得。

将各功率谱密度函数表达式代入式(17),即可得到基于V形峡谷地形的峡谷相干函数,此相干函数充分考虑了峡谷地形所引起地形效应。

1.4 峡谷地下传递与地震动模拟

由于震源到地表的距离通常远大于结构物的尺寸,因此可以假设基岩处的地震动是具有相同烈度和频率成分的零均值平稳随机过程。对于平原场地,地表处亦可视为零均值平稳随机过程。本文中采用Clough-penzien模型作为基本自功率谱密度函数 $S_0(\omega)$ ^[19]。然而对于峡谷地形,由于其与平原地形的差别,需引入传递函数。

文献[15]给出了U形峡谷地形的传递函数计算方法,其对本文中的V形分层场地也适用。对于平原场地,由于水平边界不引起入射波散射,故其地表波场幅值可视为定值。当入射波幅值为1时,地表幅值为2。假定峡谷表面地震动与其正上方的“假定水平场地”存在垂直传递关系,则传递函数 H_c 可表示为

$$\frac{u_c(\omega)}{u_f(\omega)} = \frac{u_c(\omega)}{2} = H_c(\omega) \quad (19)$$

式中: u_c 、 u_f 分别为峡谷表面和假定水平场地表面的地震动解析解。

相应地,峡谷表面与其正下方的峡谷地下存在传递关系 H_u

$$\frac{u_u(\omega)}{u_c(\omega)} = H_u(\omega) \quad (20)$$

式中: u_u 为峡谷地下的地震动解析解。

文献[14]假定V形峡谷表面各点间具有同其正上方的“假定水平场地”相同的相干性,利用一次传递函数法(水平自由表面→V形峡谷表面)求得峡谷表面的功率谱矩阵。本文在此基础上,改进并提出了两步骤传递函数法(水平自由表面→V形峡谷表面→峡谷地下),其中峡谷地下的自功率谱密度 S_c 可表示为

$$S_c(\omega) = |H_c(\omega)|^2 |H_u(\omega)|^2 S_0(\omega) \quad (21)$$

对于地下相干函数,首先应计算峡谷表面相干函数,然后根据地表与地下之间的相干函数相位差求得地下相干函数。相干函数相位差计算方法可参考文献[20]、[21]。

此时峡谷地下 N 个平稳随机时间历程可用 $N \times N$ 阶功率谱密度矩阵来描述

$$\mathbf{S}(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & \cdots & S_{1\psi}(\omega) & \cdots & S_{1N}(\omega) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{\psi 1}(\omega) & \cdots & S_{\psi\psi}(\omega) & \cdots & S_{\psi N}(\omega) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{N1}(\omega) & \cdots & S_{N\psi}(\omega) & \cdots & S_{NN}(\omega) \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中:对角线元素 $S_{\psi\psi}(\omega)$ ($\psi=1,2,\dots,N$)为自功率谱密度函数,其他元素 $S_{\psi\varphi}(\omega)$ ($\psi,\varphi=1,2,\dots,N$)为互功率谱密度函数,且有

$$S_{\psi\varphi}(\omega) = S_{\varphi\psi}^*(-\omega) = S_{\varphi\psi}^*(\omega) \quad (23)$$

式中: $*$ 表示共轭函数。

因此,功率谱密度矩阵 $\mathbf{S}(\omega)$ 是正定埃尔米特矩阵,通过Cholesky分解,可得

$$\mathbf{S}(\omega) = \mathbf{L}(\omega) [\mathbf{L}^*(\omega)]^T \quad (24)$$

其中

$$\mathbf{L}(\omega) = \begin{bmatrix} L_{11}(\omega) & & & & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \\ L_{\psi 1}(\omega) & \cdots & L_{\psi\psi}(\omega) & & \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \\ L_{N1}(\omega) & \cdots & L_{N\psi}(\omega) & \cdots & L_{NN}(\omega) \end{bmatrix} \quad (25)$$

根据原型谱表示法,所需模拟的地下地震动任意一点的时程 $U_j(t)$ 可表示为

$$U_j(t) = \sum_{q=1}^j \sum_{i=1}^N A_{jq}(\omega_i) \cos[\omega_i t + \theta_{jq}(\omega_i) + \varphi_{qi}(\omega_i)] \quad (26)$$

式中: $A_{jq}(\omega) = 2 \sqrt{\Delta\omega} |\mathbf{L}_{jq}(\omega)|$ 为模拟幅值, $\Delta\omega = \frac{\omega_u}{N}$; $\theta_{jq}(\omega) = \arctan \left[\frac{\text{Im}\mathbf{L}_{jq}(\omega)}{\text{Re}\mathbf{L}_{jq}(\omega)} \right]$ 为模拟相位角; $\varphi_{qi}(\omega)$ 为 $[0, 2\pi]$ 范围的独立随机相位角。

通过上述方法,即可获得V形场地的空间地下多点地震动模拟平稳时程。考虑到实际地震动是非平稳随机时程,将所得平稳随机时程乘上一个包络函数得到非平稳时程

$$x(t) = f(t)U(t) \quad (27)$$

式中: $f(t)$ 为强度包络函数,常用形式为三段分段函数^[22],具体为

$$f(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & t \leq t_1 \\ 1 & t_1 < t \leq t_2 \\ e^{-c(t-t_2)} & t > t_2 \end{cases} \quad (28)$$

式中: c 为衰减系数; t_1 、 t_2 分别为主振平稳段的首、末时间。式(28)与地震场地条件有关。

2 软件研发与模拟结果的可靠性验证

由于上述理论涉及矩阵求逆等数值运算,为此开发了V形场地多点地震动模拟软件。本节阐明了软件的设计流程,并选取算例进行了数值分析与

验证。

图 4 为软件开发流程,程序运行的关键在于频域解的计算。

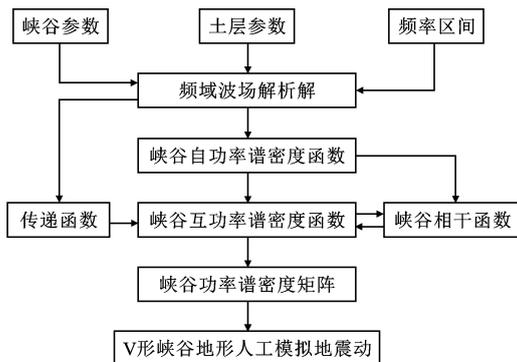


图 4 软件开发流程

Fig. 4 Program Development Flow

本节以相同土层情况的平原场地作为对比,通过算例验证软件的可靠性。2 种场地的参考点取相同水平坐标,平原场地采用 Hao 等^[23]给出的相干函数模型。峡谷算例模型参数见表 1,2。图 5 所示峡谷模型自由表面可分为中部的 V 形峡谷表面和两侧的水平地表。图 6 分别为平原场地和 V 形峡谷场地对应的模拟地震动加速度。图 6 中: P_{GA} 为加速度时程的峰值; σ^2 为方差值。

表 1 峡谷几何参数

Tab. 1 Geometric Parameters of Canyon

峡谷参数项	峡谷半宽/m	峡谷深度/m	入射角/(°)
数值	25	45	30

表 2 土层参数

Tab. 2 Soil Parameters

参数	G 层	M ₁ 层	M ₂ 层	M ₃ 层	B 层
模量比 k	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
厚度 h /m	10	10	10	10	
密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 200	2 300	2 400	2 500	2 600

注:模量比 k 为各层模量 u 与标准层模量 u_0 之比,标准层模量 u_0 为 20 MPa。

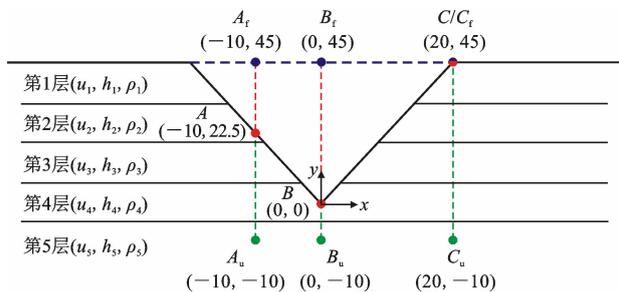


图 5 参考点

Fig. 5 Reference Points

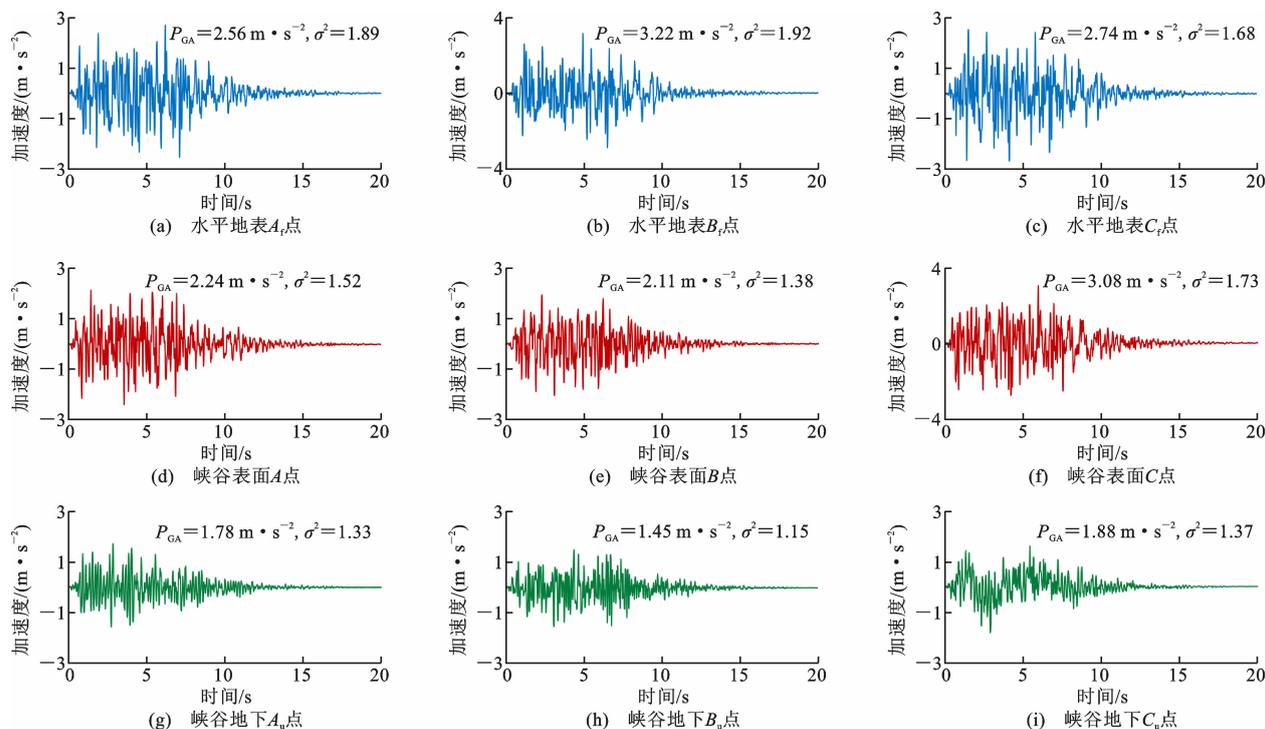


图 6 模拟加速度时程

Fig. 6 Simulated Acceleration Time Histories

通过对比可以明显看到,峡谷底部的加速度时程峰值明显小于其他情况,这是由于峡谷 V 形部分

缺失减弱了地层传递放大效应;而峡谷壁靠近水平地表的参考点处的加速度时程峰值接近水平地表的

对应结果。此外峡谷表面C点峰值反而超过水平场地C_f点,这是因为除平面波场外,峡谷场地中大量分布的散射波成分对地震动幅值产生影响,在某

些特殊点由于波峰干涉形成加强区,出现较大幅值。

图7为不同场地下各点的目标功率谱密度,图8为峡谷地表和地下A点的目标-模拟功率谱密度对比。

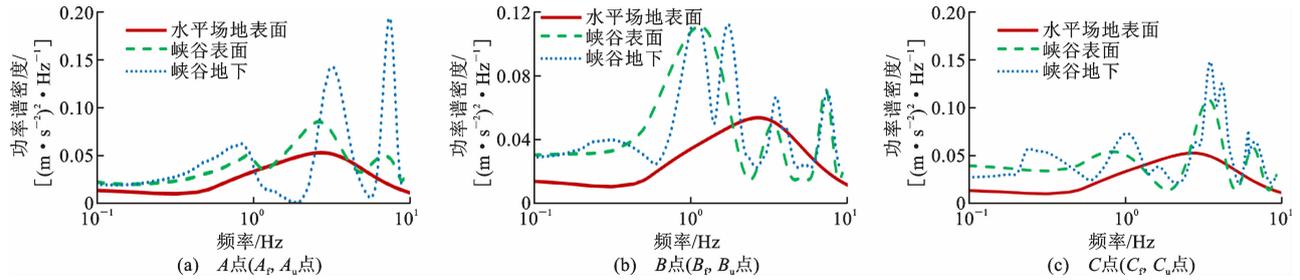


图7 各点目标功率谱对比

Fig. 7 Comparisons of Target Power Spectral Density of Points

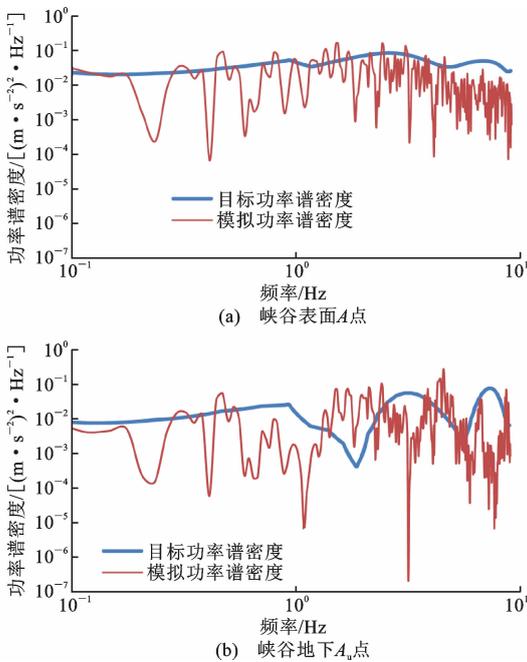


图8 A点目标功率谱与模拟功率谱对比

Fig. 8 Comparisons of Target and Simulated Power Spectral Density of Point A

从图7,8可以看出:同平原场地相比,峡谷表面或峡谷地下的功率谱密度曲线具有明显的振荡趋势,这是因为散射波场的复杂组成使得模拟地震时程中各频率分布差异较大,在某些频率点显现出波峰(或波谷);分层场地土吸收了地震波传递时的部分能量,一些高频成分在传播过程中被土层过滤,曲线峰值向低频移动。模拟功率谱密度同原目标功率谱密度契合较好。

图9显示了峡谷地表和地下各参考点之间的模拟相干系数。由图9可见:峡谷场地的地震动相干性剧烈震荡,相干曲线存在多个波峰(波谷)。这说明V形峡谷的地震波场中包含大量散乱分布的各频段的散射波成分,且随着参考点间距的增加,这种

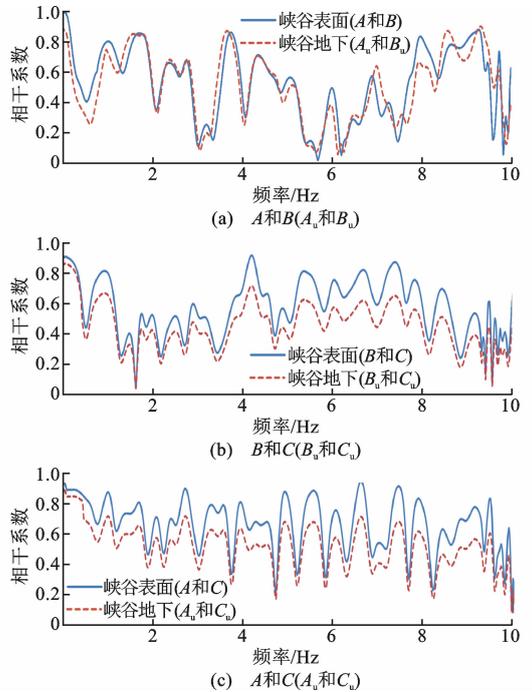


图9 峡谷表面和峡谷地下各点相干系数对比

Fig. 9 Comparisons of Coherence Coefficients of Points on Canyon Surface and Underground Canyon

曲线振荡更加剧烈(相干曲线波峰、波谷数量增加)。散射波的传播方式不同于平面波,根据惠更斯原理,球形波面上的每一点(面源)都是一个次级球面波的子波源,因此最终稳定波场的各频率成分远远复杂于仅考虑平面波的波场相干性,这一方面体现出包括V形峡谷在内的不规则场地对地震波场的影响,另一方面也说明了地震研究的复杂性。

图10为各点在不同场地的目标反应谱对比。对于水平场地,以《公路工程抗震规范》(JTGB02—2013)中的设计加速度反应谱为目标反应谱,峡谷目标反应谱根据式(29)、(30)计算

$$\frac{R_c(\omega, \xi)}{R_f(\omega, \xi)} = |H_c(\omega)| \quad (29)$$

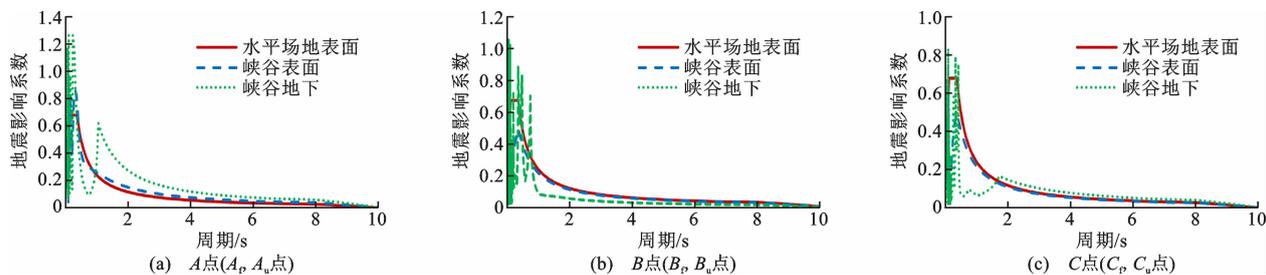


图 10 不同场地的参考点目标反应谱对比

Fig. 10 Target Response Spectrum Comparisons of Reference Points at Different Topography

$$\frac{R_u(\omega, \xi)}{R_c(\omega, \xi)} = |H_u(\omega)| \quad (30)$$

式中: R 为目标反应谱; H 为传递函数; 下标 f, c, u 分别表示水平场地表面、峡谷表面和峡谷地下。

水平场地反应谱为多条反应谱拟合而成, 曲线光滑平稳; 而峡谷表面和峡谷地下的反应谱曲线在传递函数的影响下出现振荡, 且越靠近地下振荡越

剧烈。由图 10 可见, 峡谷反应谱出现多个极值点, 这些频率点对应的影响系数远大于标准谱平台值, 当结构自振频率接近这些极值点时, 可能产生较大的结构响应。

图 11 为峡谷地下各点的目标反应谱和模拟反应谱对比。由图 11 可见, 模拟反应谱与原目标谱曲线契合。

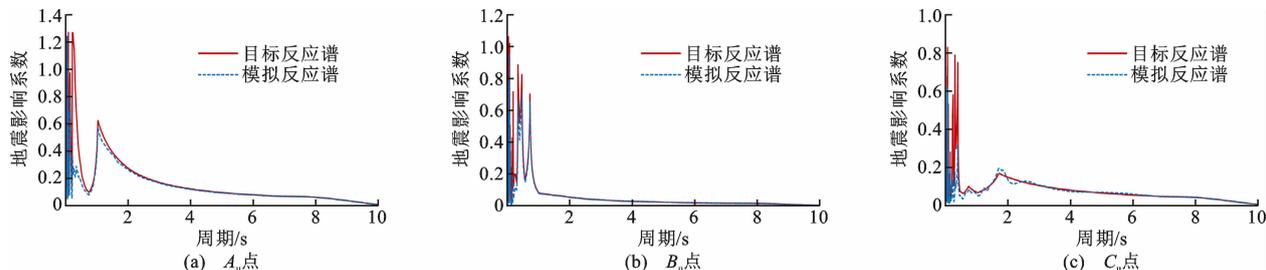


图 11 峡谷地下各点目标反应谱与模拟反应谱拟合验证

Fig. 11 Fitting Verification of Underground Canyon Points Between Target and Simulated Response Spectra

3 结 语

(1) 发展并开发了 V 形多分层峡谷多点地震动模拟可视化程序, 验证了其合理性和可靠性, 实现了非均匀多层介质(层数不小于 3) V 形峡谷场地的空间多点地震动模拟, 促进其理论依据和方法的推广应用。

(2) 分析结果表明: 两侧平整场地模拟得到的地震动幅值大于峡谷场地得到的地震动幅值, 峡谷底部模拟得到的地震动幅值低于两侧边。还发现 2 个现象: ① 基于 V 形峡谷得到的非平整区域(峡谷壁表面及下方土层)的相干系数具有明显的振荡特性, 且振荡剧烈性随距离增加而加强, 这是因为非均匀分层场地的波场中含有更大量的散射波成分, 使得波场中频分组成更加丰富和复杂, 即影响相干函数振荡特性的同频率但不同相位的频分增加; ② 对于峡谷表面和峡谷地下而言, 地下比地表相干系数小, 说明峡谷区域散射波场的复杂性对不同点之间的地震动的相干性具有不同程度的抵消功能。

(3) V 形峡谷场地多点地震动模拟软件能够较

好地模拟该地形下的地震动时程, 其模拟结果可为坐落于场地类型大跨桥梁等结构的抗震分析提供参考。

(4) 科学的结构地震反应研究依赖于合理的地震动输入。各种典型地貌场地的多点地震动值得系统性研究, 并需要逐步克服传统研究的基本假设, 发展和完善基本理论, 日趋忠于实际情况, 从而为相应场地的长大结构地震反应研究提供合理的地震动输入。

参考文献:

References:

- [1] BOORE D M. The Effect of Simple Topography on Seismic Waves: Implications for the Accelerations Recorded at Pacoima Dam, San Fernando Valley, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1973, 63(5): 1603-1609.
- [2] ÇELEBI M. Topographical and Geological Amplifications Determined from Strong-motion and Aftershock Records of the 3 March 1985 Chile Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77(4): 1147-1167.

- [3] 邱燕玲,姚令侃. 峡谷地形隔震效应及减灾选线对策[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(11): 1-4.
QIU Yan-ling, YAO Ling-kan. Effect of Valley on Ground Motion and Disaster Reduction in Route Selection [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(11): 1-4.
- [4] 王笃国,赵成刚. 地震波斜入射下考虑场地非线性、地形效应和土结动力相互作用的大跨连续刚构桥地震响应分析[J]. 工程力学, 2017, 34(4): 32-41.
WANG Du-guo, ZHAO Cheng-gang. Seismic Analysis of Long-span Continuous Rigid Frame Bridge Considering Site Non-linearity, Topography Effect and Soil Structure Dynamic Interaction Under Oblique Incidence [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(4): 32-41.
- [5] 周国良,李小军. SH波入射下河谷地形对连续刚构桥地震反应影响[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增2): 42-48.
ZHOU Guo-liang, LI Xiao-jun. Canyon Topography Effects of Seismic Response of Continuous Rigid Frame Bridge Under SH Incident Waves [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S2): 42-48.
- [6] 谷音,江梦霞,卓卫东,等. 考虑地震波斜入射下河谷地形的大跨桥梁动力反应研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2013, 41(4): 517-522.
GU Yin, JIANG Meng-xia, ZHUO Wei-dong, et al. Seismic Response Analysis of Long-span Bridges Subjected to Spatially Non-uniform Seismic Ground Motions [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2013, 41(4): 517-522.
- [7] 赵密,杜修力,刘晶波,等. P-SV波斜入射时成层半空间自由场的时域算法[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 84-90.
ZHAO Mi, DU Xiu-li, LIU Jing-bo, et al. Time-domain Method for Free Field in Layered Half Space under P-SV Waves of Oblique Incidence [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 84-90.
- [8] TRIFUNAC M D. Scattering of Plane SH Waves by a Semi-cylindrical Canyon [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1972, 1(3): 267-281.
- [9] WONG H L, TRIFUNAC M D. Scattering of Plane SH Waves by a Semi-elliptical Canyon [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1974, 3(2): 157-169.
- [10] LEE V W. Scattering of Plane SH-waves by a Semi-parabolic Cylindrical Canyon in an Elastic Half-space [J]. Geophysical Journal International, 1990, 100(1): 79-86.
- [11] 何钟怡,樊洪明. 用波函数展开法求解界面圆孔的SH波散射问题[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(3): 1-7.
HE Zhong-yi, FAN Hong-ming. Application of Wave Functions Expansion Method to Scattering Problems of SH-wave by an Interface Circular Cavity [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(3): 1-7.
- [12] TSAUR D H, CHANG K H. An Analytical Approach for the Scattering of SH Waves by a Symmetrical V-shaped Canyon: Shallow Case [J]. Geophysical Journal International, 2008, 174(1): 255-264.
- [13] TSAUR D H, CHANG K H, HSU M S. An Analytical Approach for the Scattering of SH Waves by a Symmetrical V-shaped Canyon: Deep Case [J]. Geophysical Journal International, 2010, 183(3): 1501-1511.
- [14] WU Y, GAO Y, 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.
- [15] LIU G, FENG X, LIAN J, et al. Simulation of Spatially Variable Seismic Underground Motions in U-shaped Canyons [J/OL]. Journal of Earthquake Engineering, 2017, DOI: 10.1080/13632469.2017.1326427.
- [16] 潘旦光,楼梦麟. 河谷地形对土层地震反应的影响[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(11): 1217-1222, 1248.
PAN Dan-guang, LOU Meng-lin. Effect of Valley Topography on the Seismic Responses of Soil Sites [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(11): 1217-1222, 1248.
- [17] WATSON G N. A Treatise on the Theory of Bessel Functions [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1922.
- [18] ABRAMOWITZ M, STEGUN I A. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables [M]. New York: Dover, 1972.
- [19] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of Structures [M]. Berkeley: Computers & Structures, Inc, 1995.
- [20] LIU G, LIAN 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.
- [21] 柳国环,赵大海. 地震差动与结构非线性输出——方法、程序开发及实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
LIU Guo-huan, ZHAO Da-hai. Method, Program Development and Practice for Spatially Variable Earthquake Motions and Structural Nonlinear Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [22] 杜修力,陈厚群. 地震动随机模拟及其参数确定方法 [J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(4): 1-5.
DU Xiu-li, CHEN Hou-qun. Random Simulation and Its Parameter Determination Method of Earthquake Ground Motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(4): 1-5.
- [23] 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.