

频率相关等效线性山谷交错场地多点地震动模拟

何颖^{1,2}, 陈雅^{1,2}, 尹奔驰^{1,2}, 刘中宪^{1,2}, 刘旭^{1,2}

(1. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津城建大学 天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室, 天津 300384)

摘要: 基于频率相关等效线性化模型, 提出了一种考虑局部场地效应的空间相关多点地震动模拟方法。采用有限元-边界元耦合方法计算局部场地非线性地震波散射效应, 对山谷交错场地的地震动放大效应进行模拟分析, 并与传统等效线性化方法做对比。其中, 与频率相关的等效剪切模量和阻尼比可由标准应变谱拟合得到。结果表明: 频率相关等效线性化方法与传统等效线性化方法的结果在总体趋势上具有一定相似性, 均体现了山间谷地地震动空间分布的显著差异; 与线性条件相比, 均显示出地面运动加速度峰值降低, 反应谱卓越周期延长。但频率相关方法引入了等效剪切模量和阻尼比的频率相关性, 有效弥补了传统方法在高频反应估计上的不足, 其所得地震动加速度和反应谱峰值显著高于传统方法, 增幅可达23%以上, 同时反应谱峰值位置向短周期方向移动, 更合理地反映了土层地震动的高频特性。该方法能合理优化场地反应高频段结果, 从而提高工程结构安全性。

关键词: 地震动模拟; 频率相关等效线性化; 局部场地效应; 有限元-边界元耦合方法; 山谷交错场地

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2025)10-3280-09

Multi-point ground motion simulation at mountain-valley coupled sites using frequency-dependent equivalent linearization method

HE Ying^{1,2}, CHEN Ya^{1,2}, YIN Ben-chi^{1,2}, LIU Zhong-xian^{1,2}, LIU Xu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: This study proposes a method to simulate spatially correlated multi-point ground motions, incorporating local site effects using a frequency-dependent equivalent linearization model. The finite element-boundary element coupling method is employed to calculate the nonlinear seismic wave scattering effects in complex sites. Additionally, the amplification effects of ground motions in mountain-valley coupled sites are simulated and analyzed. The results are compared with those obtained from the traditional equivalent linearization method. The frequency-dependent equivalent shear modulus and damping ratio are determined from a standard strain spectrum. The results indicate that the frequency-dependent equivalent linearization method and the conventional equivalent linearization method exhibit similar overall trends. Both reflect significant spatial variations in ground motion within the mountain valley site. Furthermore, compared to linear conditions, both methods show a reduction in the peak ground acceleration and an extension of the predominant period of the response spectrum. However, the frequency-dependent method accounts for the frequency dependence of equivalent shear modulus and damping ratio, effectively improving the high-frequency response estimation that conventional methods often underestimate. Results show that the ground motion accelerations and response spectrum peaks derived from the frequency-dependent approach are markedly higher compared to those from the conventional method, by more than 23%. Additionally, the response spectrum peak shifts toward shorter periods, which better reflects the high-frequency behavior of seismic waves in soil layers. This method can reasonably optimize the high-frequency segment of site response, thereby enhancing the safety of engineering structures.

Keywords: ground motion simulation; frequency-dependent equivalent linearization; local site effect; finite element-boundary element coupling method; mountain-valley coupled sites

收稿日期: 2025-02-28

录用日期: 2025-05-15

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(No.U2139208); 国家自然科学基金青年基金(No.51908401)。

This work was supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U2139208) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (51908401).

第一作者简介: 何颖, 女, 1983年生, 博士, 副教授, 主要从事地震工程与工程波动方面的研究。E-mail: he114@126.com

通讯作者: 刘中宪, 男, 1982年生, 博士, 教授, 主要从事地震工程与工程波动方面的研究。E-mail: zhongxian1212@163.com

1 引 言

在大型基础设施建设中,长大桥隧、管渠等工程穿越山体、谷地等复杂地形的情况十分普遍,一致输入难以满足长大结构多点地震动输入的需要,必须充分考虑地震动的空间相关效应以及局部场地条件的影响。在工程场地的地震安全性评价中,土层地震反应分析是一项关键工作。该分析能确定上部结构所需的地震动输入参数,从而为建筑物的抗震设防提供重要的技术支撑。由于山丘与谷地交错的局部场地地形复杂,地震动会出现显著的局部放大效应,其空间变化也更为明显。对非线性特征显著的山谷交错场地进行空间相关多点地震动模拟研究具有重要的理论与工程价值。

当前,复杂场地地震响应分析的主要途径大致可归为解析法与数值法两大类,后者在工程上应用更加广泛,如间接边界元法^[1]、间接边界积分方程法^[2]、有限元边界元耦合算法^[3]等。景立平等^[4]利用结合人工边界的有限元法研究了不同介质下的盆地与复杂交错地形的地震反应。刘中宪等^[5-6]采用边界元法分析了三维复杂形状沉积盆地的地震反应,基于等效线性模型,采用有限元-间接边界积分方程耦合方法分析了二维非线性沉积谷地的地震反应。

在场地空间相关多点地震动模拟领域,Hao 等^[7]以格林公式为基础,推导了空间相关多点地震动模型。李忠献等^[8]基于一维场地传递函数,提出了一种模拟复杂场地空间相关多点多维地震动的方法。He 等^[9]进一步提出了利用二维场地传递函数考虑地形影响的沉积谷地空间相关多点地震动模拟方法。刘中宪等^[10]基于间接边界元法进行了近断层沉积河谷地震动模拟。Cui 等^[11]利用中国台湾地震记录与 S 变换构建时频相干模型,用于模拟非平稳地震动。Wang 等^[12]基于 NGA-West2 数据库,开发并应用频率相关空间相关模型,得到低频特性等结果。

目前,等效线性化方法是进行场地非线性地震对反应分析的一种主流计算方法,被广泛应用于工程实践。传统方法^[13]将土壤的非线性行为近似为等效的线性响应,将等效剪应变取为剪应变时程反应极值的 0.65 倍,迭代计算的稳定性相对良好。廖振鹏^[14]在此基础上对地表土层地震反应进行了深入研究,并开发了配套的计算程序。然而,在广泛的研究与工程实践中,传统等效线性化方法的局限性日益凸显。李小军等^[15]指出,该方法难以准确表征土体非线性动力特性对地震反应的影响,并提出了

一种新的物理模型,通过 3 种关键效应描述了土体的应力-应变关系。Kausel 等^[16]发现标准方法计算得到的结果显示地表地震动反应值略低,未能准确地展现地表地震动的频谱特征。薄景山等^[17]基于前人的研究成果,从地形地貌、活动断层、覆盖土厚度以及土层结构 4 个方面进行研究,提出基岩输入地震动幅值较大时,等效线性化方法会增大非线性化计算效应。为了改善这一问题,Furumoto 等^[18]考虑到频率相关性对于土体力学参数的影响,优化了等效线性化方法,并得到了 FDEL 程序。蒋通等^[19]将几种应变谱进行对比后,进行平滑处理,基于拟合标准化应变谱提出了更新、更适用的等效剪应变计算公式,并与实测地震记录对比,证明所提方法的合理性和有效性。王伟等^[20]提出土体刚度和阻尼是与频率相关的这一假设,对传统等效线性方法原理进行探索和证明,得出基于假设的方法能更合理地考虑震动输入高频成分的影响。孙锐等^[21]提出全局等效剪应变(holistic equivalent shear strain,简称 HESS)方法,结合土层非线性特性与输入地震动强度,构建半经验公式并进行了 KiK-net 实测数据验证。王永光等^[22]构建了基于修正阻尼的不规则加卸载准则,解决了编程动剪切模量曲线拟合的问题。Sinha^[23]对一维等效线性场地响应分析(equivalent linear site response analysis,简称 EQLSRA)中应变比计算问题展开研究,提出了新计算方法并进行验证和对比。Andreotti^[24]围绕非线性动力场地响应分析展开研究,提出了一种新的短时频域真非线性近似方法并进行了验证。

本文针对常见的山谷交错场地多点地震动模拟进行研究,提出一种适用于非线性河谷场地的多点地震动模拟方法。该方法通过采用频率相关等效线性化(frequency-dependent equivalent linear,简称 FD-EQL)考虑土体非线性,耦合有限元-间接边界法计算局部场地效应,融合相干函数与谱表示法考虑空间相关性。为提升计算效率,实现快速求解,应用网格动态离散和高效时频域转换等对算法进一步优化。计算典型山谷交错场地空间多点地震动,并与线性和传统等效线性结果进行对比分析,定量考察新方法的影响。研究成果不仅能深化对复杂场地地震响应的理论认知,还可为重大工程的抗震设计提供科学依据,从而提升其地震安全性。

2 计算模型与计算方法

2.1 模型

如图 1 所示,一任意形状山谷交错场地由基岩

域 (DE) 和沉积域 (DI) 构成, 其边界定义为 L_1 、 L_2 和 L_3 。为了分析局部场地效应, 在沉积场地地表任意选取 3 点 i 、 j 、 k , 并定义它们在作为参考的水平均质半空间场地 Q 上的对应点 i' 、 j' 、 k' 。假定 SV 波从基岩半空间斜入射。

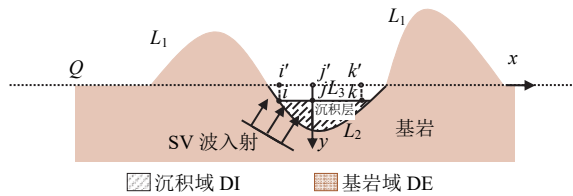


图 1 计算模型
Fig.1 Computational model

2.2 方法

方法流程图如图 2 所示。采用分域模拟策略, 对基岩域与沉积域分别用间接边界元法和有限元法进行模拟。采用频率相关等效线性法对沉积层非线性 (剪切模量与阻尼比) 进行处理。耦合计算效率则应用网格动态细化和基于非均匀高斯积分的高效时域-频域转换提升。

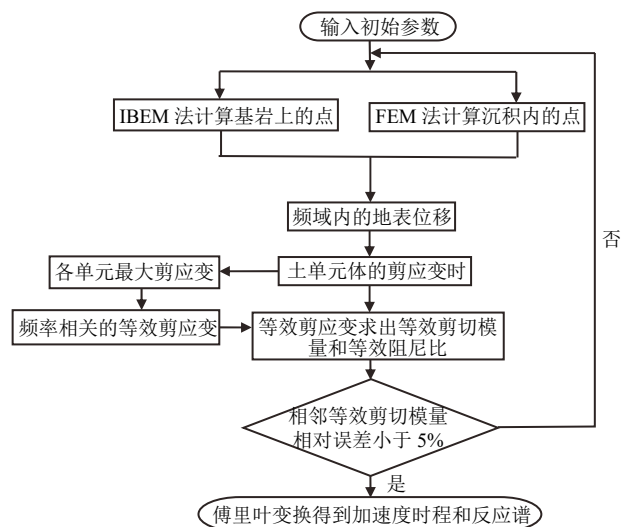


图 2 流程图
Fig.2 Flow chart

2.2.1 有限元-间接边界元耦合分析

本文采用边界元法模拟基岩域 (DE), 结合有限元法对沉积域 (DI) 进行离散与求解。基于山谷场地与基岩半空间交界面处的应力与位移连续性条件, 实施边界耦合, 进而完成求解过程^[6]。步骤如下:

(1) 网格动态离散沉积层, 计算频域内各单元刚度矩阵、质量矩阵、应力等效转换矩阵。

(2) 集成系统总刚度矩阵和总质量矩阵, 假设地震动输入通过将交界面设为荷载施加面来实现,

即仅将地震动作外部荷载作用于交界面节点上, 沉积土体内部节点无外部荷载作用。系统总运动方程可写为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{II} & \mathbf{K}_{ID} \\ \mathbf{K}_{DI} & \mathbf{K}_{DD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_I \\ \mathbf{U}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{II} & \mathbf{R}_{ID} \\ \mathbf{R}_{DI} & \mathbf{R}_{DD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\sigma}_I \\ \boldsymbol{\sigma}_D \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; $\mathbf{U}$ 为位移矩阵; $\mathbf{R}$ 为应力等效转换矩阵; $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力矩阵; 下标表示节点位置, I 代表沉积内部, D 代表交界面。

(3) 基岩半空间内的总波场可分解为自由场与散射波场之和。其位移 $\mathbf{U}$ 和应力 $\boldsymbol{\sigma}$ 表达如下:

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}^f + \mathbf{G}_u \mathbf{A} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^f + \mathbf{G}_t \mathbf{A} \quad (3)$$

式中: 上标 f 表示自由场; $\mathbf{G}_u$ 为位移格林函数矩阵; $\mathbf{G}_t$ 为应力格林函数矩阵; $\mathbf{A}$ 为波源密度矩阵, 可由交界面处的应力与位移连续性条件计算。

2.2.2 针对频率相关等效线性化分析

在频域内计算各节点位移后, 可进行各单元的剪应变计算, 并应用高效时频转换方法在时域中求得各单元最大剪应变。

$$\boldsymbol{\varepsilon}(x, y) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N(x, y) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B(x, y) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q^e \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}(x, y)$ 为节点应变矩阵; ε_{xx} 为 x 方向的正应变; ε_{yy} 为 y 方向的正应变; γ_{xy} 为 xy 平面内的切应变; $[\partial]$ 为偏导数矩阵; $N(x, y)$ 为形函数矩阵; q^e 为节点位移列阵; B 为几何矩阵。

可应用下式求得等效剪应变:

$$\bar{\gamma} = \left| \frac{\gamma(\omega)}{\gamma_0} \right| \max |\gamma_{\max}(t)| \quad (5)$$

$$\left| \frac{\gamma(\omega)}{\gamma_0} \right| = \begin{cases} \Gamma_1 + \frac{(1-\Gamma_1)\omega_{i-1}}{\omega_F - \Delta\omega} & (\omega_i \leq \omega_F) \\ 1.0 & (\omega_F < \omega_i \leq \omega_0) \\ \frac{1}{2n+1} \sum_{k=i-n}^{i+n} \left| \frac{\gamma(\omega_k)}{\gamma_0} \right| & (\omega_0 < \omega_i) \end{cases} \quad (6)$$

$$\gamma_0 = \frac{\int_0^{\omega_0} \gamma(\omega) d\omega}{\omega_0} \quad (7)$$

$$\omega_0 = \frac{\int_0^{\infty} \omega \gamma(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} \gamma(\omega) d\omega} \quad (8)$$

式中: $\bar{\gamma}$ 为等效剪应变; γ_0 为在零频率与平均频率 ω_0 区间内的剪应变平均值; $\gamma_{\max}$ 为最大应变; $\gamma(\omega)$ 为应变幅值谱; Γ_1 为非零最小频率对应的标准化应变谱值; $\Delta\omega$ 为频率步长; ω_i 为角频率; ω_0 为平均频率; ω_c 为标准化应变谱值首次超过 1.0 时的频率^[19]。

图 3 给出了标准应变谱、传统等效线性化法剪应变系数和频率相关等效线性化法剪应变系数的比较。如图所示, 传统等效线性化法低频时与标准应变谱较为一致, 但高频时差距较大, 高估了场地的非线性化水平, 等效剪切模量减小, 等效阻尼比增大, 对地震动高频组分造成压制; 频率相关的等效线性法则与标准应变谱较为一致, 剪切模量和阻尼随频率的变化曲线合理, 改善了传统对地震动高频组分的压制, 更接近于实际地震动。

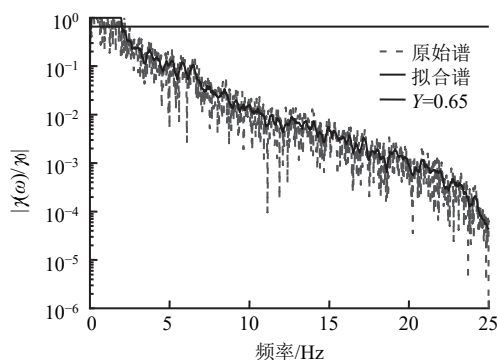


图 3 应变谱及拟合曲线

Fig.3 Strain spectrum and fitting curve

2.2.3 空间相关多点地震动模拟

考虑空间相关效应和局部场地效应, 空间相关多点地震动模拟步骤如下。详细内容参见文献[25]。

(1) 应用 Sobczyk 模型^[26]生成计算点 i 、 j 和 k 间的相干函数。

(2) 计算场地中实际地表沉积面上计算点 i 、 j 和 k 点处与其正上方的参考点 i' 、 j' 和 k' (假定水平均质半空间场地) 的地震动位移幅值比。

(3) 选取合适的基岩功率谱密度函数, 结合相干函数和位移幅值比生成空间功率谱密度矩阵并进行 Cholesky 分解。

(4) 利用三角级数法, 引入随机相位角, 生成空间地震动场中各点的加速度时程。

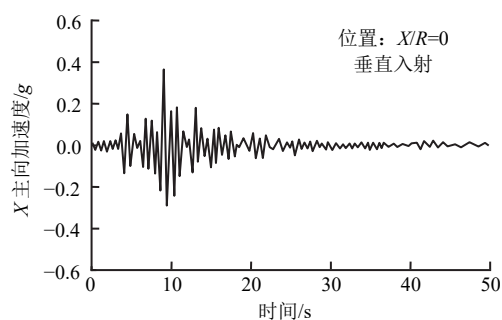
(5) 乘以一个适当的确定性时间密度函数实现

非平稳化^[27]。

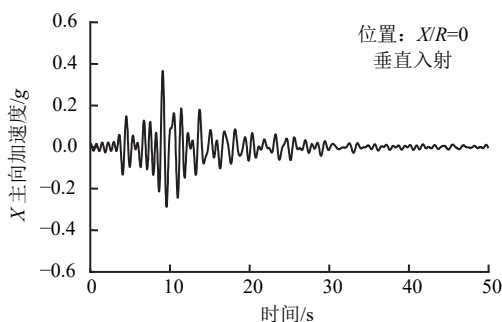
3 方法验证

为检验本文方法的合理性, 将本研究退化后的结果, 与文献[6]中河谷半径 $R=200$ m 的半圆形沉积河谷场地沉积中心 ($X/R=0$, X 为点坐标, R 为河谷半径) 的计算结果进行对比 (见图 4)。模型参数具体参见文献[6]。两者拟合良好, 证明了频率相关等效线性化法在本研究中的可行性。

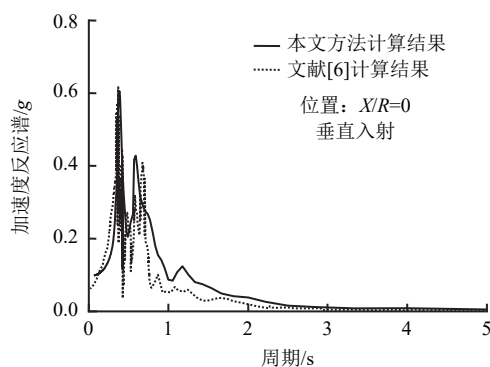
进一步与文献[21]所构造的简化水平层状场地模型结果进行对比 (见图 5)。模型参数具体参见文献[21]。输入波为峰值为 $0.25g$ 的 El Centro 波, 本文方法计算地表峰值加速度为 $0.37g$, 与文献[21]中 $0.36g$ 的结果吻合良好, 证明了频率相关等效线性化法处理的可行性。



(a) 文献[6]时程 (等效线性)



(b) 本文时程 (等效线性)



(c) 反应谱结果

图 4 本文结果与文献[6]对比

Fig.4 Comparison of results with those from reference [6]

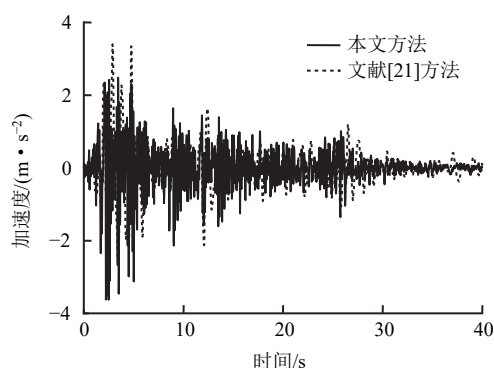


图5 加速度时程本文结果与文献[21]对比

Fig.5 Comparison of acceleration time histories obtained by the proposed method with those from reference[21]

4 算例分析

4.1 计算模型

本研究模型为一个半圆形沉积谷地-圆形山地交错场地。模拟工况为 SV 波以 30° 从基岩半空间入射。于水平地表依次布设 A、B、C 3 个计算点，并定义了它们在同一水平基准面上的投影点 A'、B' 和 C'。场地详细尺寸见图 6。沉积域土体的动力特性曲线参考图 7。计算参数见表 1。

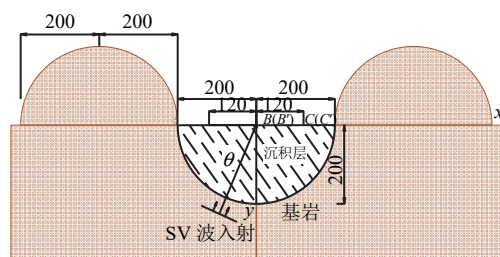


图6 半圆形场地模型图(单位: m)

Fig.6 Model diagram of semi-circle site (unit: m)

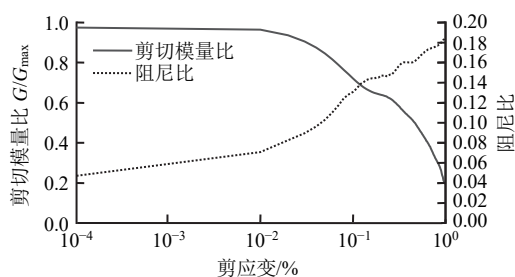
图7 沉积域土体动力参数曲线^[25]Fig.7 Dynamic parameter curves of sedimentary valley soil^[25]

表1 土层物理参数

Table1 Physical parameters of soil layers

土层性质	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	剪切波速 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
基岩	2 000	900
沉积层	1 600	300

4.2 算例分析

本文对线弹性、传统等效线性化、频率相关等效线性化 3 种模型场地的 A、B、C 3 点进行空间相关多点地震动模拟。图 8 展示了 3 种模型得到的 3 个随机样本地震动反应谱的对比结果。

整体来讲, 图 8 表现出场地具有显著的地震动特性空间差异性。B 点反应谱幅值最大, A、C 点较小, 表明在两侧山体影响下, 河谷中部的地震响应最大。另外 A、B、C 3 点的卓越周期也有较大不同, 反映了山谷交错地形场地反应的复杂性。

针对 3 种模型之间的差别, 与线性模型相比, 传统等效线性化模型和频率相关等效线性化模型在 A、B、C 3 点处的地震波反应谱均呈现整体向长周期区段偏移的趋势, 卓越周期增加, 谱峰值强度衰减, 这与土体非线性影响的规律一致。而频率相关等效线性化模型的反应谱相较于传统等效线性化模型整体上向短周期方向偏移, 谱峰值强度增加。这与考虑了频率相关等效线性化对地震动模拟的影响规律一致^[19]。

图 9~11 对比了 3 种模型生成的地震动模拟样本时程, 因篇幅所限, 每点仅选取 3 条。结果显示, 相对于线性模型, 传统等效线性化和频率相关等效线性化模型下各点的加速度时程峰值均有所降低。此外, 频率相关等效线性化模型的加速度峰值比传统等效线性化模型增加, 符合前述规律。

表 2 和表 3 进一步给出了 A、B、C 3 点的样本峰值加速度 PGA 和峰值反应谱 PRS 的均值与对比结果, 其中 1、2、3 分别对应线性、传统等效线性化和频率相关等效线性化的结果。线性结果 PGA₁ 在 B 点处达到最大值 5.26 m/s^2 , 与 A、C 两点差距最大可达 28.3%, 传统线性化结果和频率相关等效线性化的结果空间分布差距分别为 39.9% 和 28.7%。PRS 结果与 PGA 结果规律基本一致, 3 种模型空间分布差距分别为 30.1%、35.3% 和 29.9%, 进一步反映了山谷交错地形场地反应的复杂性。

表 2、3 同时给出了频率相关等效线性化的各点地震动模拟结果对于线性结果和传统等效线性化结果的变化幅度。总体来说, 频率相关等效线性化结果与传统等效线性化结果更为接近, 前者 PGA 和 PRS 相较于后者均有不同程度的增加, 反应谱峰值明显向短周期方向偏移。这是由于传统等效线性化法的等效剪应变与实际偏离较大, 高估了土体的非线性程度。土体等效剪切模量的减小会压制地震输入中的高频成分, 导致反应谱在短周期段的幅值降低; 另一方面, 等效阻尼比的增大则会造成地震

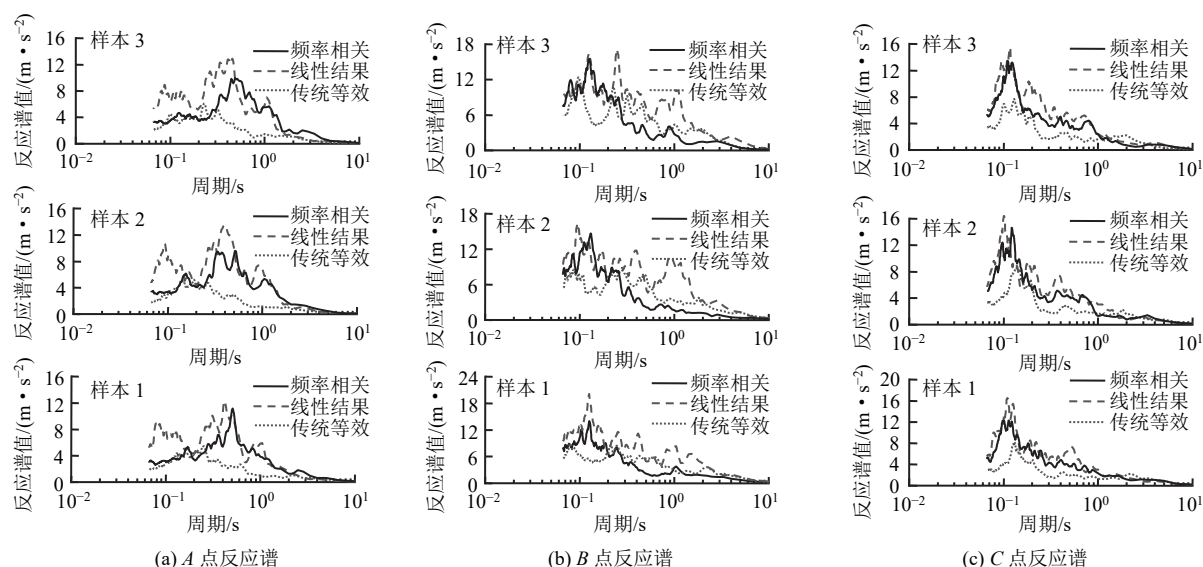


图 8 地震动反应谱对比 (3 种模型结果)

Fig.8 Comparison of ground motion response spectra (three models)

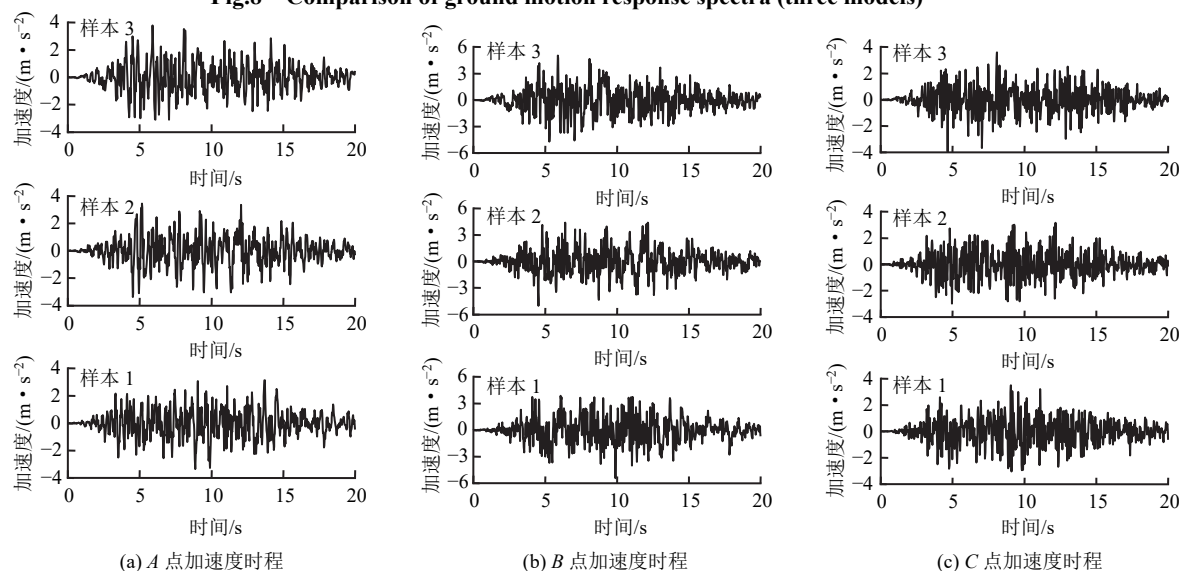


图 9 不同取样点地震动模拟的加速度时程 (线性模型)

Fig.9 Acceleration time histories of simulated ground motions at selected locations (linear model)

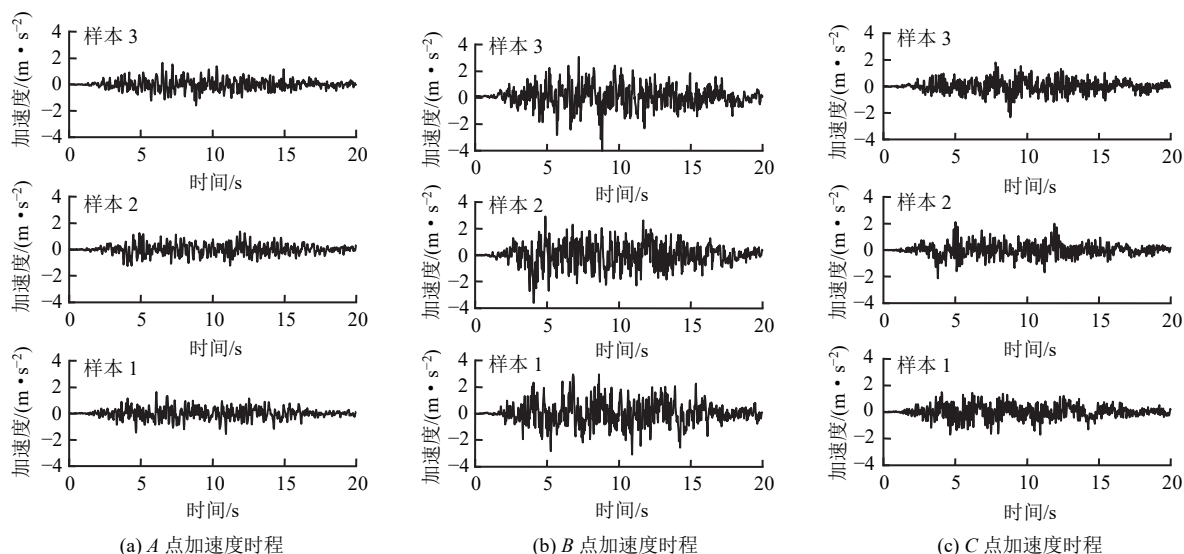


图 10 不同取样点地震动模拟的加速度时程 (传统等效线性模型)

Fig.10 Acceleration time histories of simulated ground motions at selected locations (equivalent-linearization model)

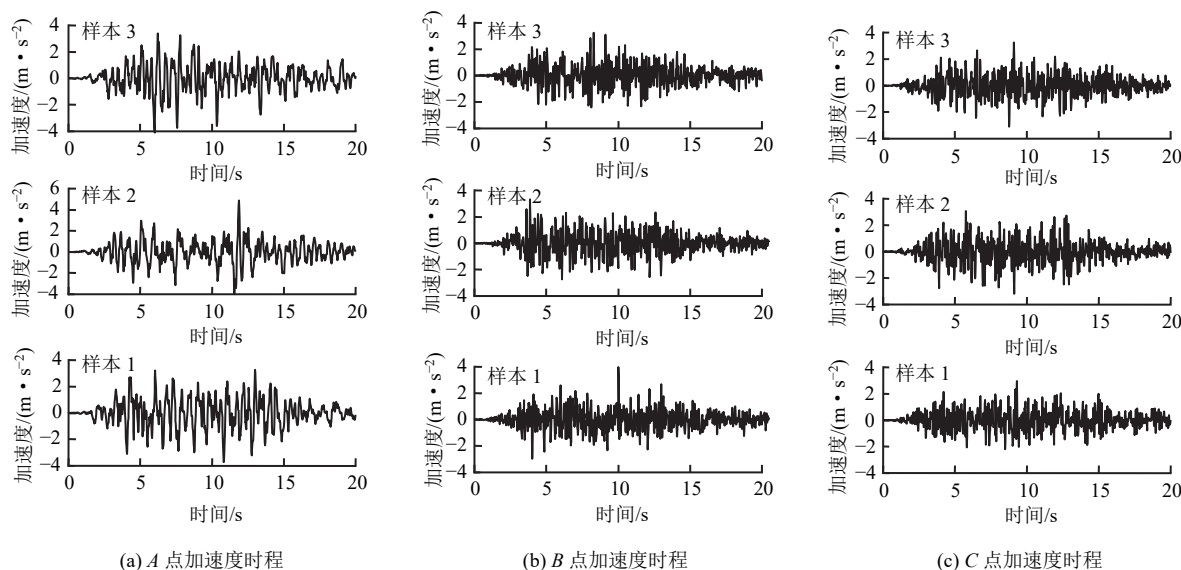


图 11 不同取样点地震动模拟的加速度时程 (频率相关等效线性化模型)

Fig.11 Acceleration time histories of simulated ground motions at selected locations (frequency-dependent equivalent linearization model)

表 2 3 种模型下地震动峰值加速度对比

Table2 Comparison of ground motion peak acceleration (PGA) under three models

计算点	PGA	样本均值 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	均值相对比值/%	
			$\frac{\text{PGA3}-\text{PGA1}}{\text{PGA3}}$	$\frac{\text{PGA3}-\text{PGA2}}{\text{PGA3}}$
A	PGA1	3.81		
	PGA2	1.94	35.6	31.0
	PGA3	2.81		
B	PGA1	5.26		
	PGA2	3.06	-39.9	18.6
	PGA3	3.76		
C	PGA1	3.77		
	PGA2	1.84	-40.7	31.3
	PGA3	2.68		

表 3 3 种模型下地震动峰值反应谱对比

Table3 Comparison of earthquake peak response spectrum (PRS) under three models

计算点	PRS	样本均值 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	均值相对比值/%	
			$\frac{\text{PRS3}-\text{PRS1}}{\text{PRS3}}$	$\frac{\text{PRS3}-\text{PRS2}}{\text{PRS3}}$
A	PRS1	13.51		
	PRS2	6.70	-43.1	29.0
	PRS3	9.44		
B	PRS1	19.34		
	PRS2	10.35	-43.6	23.2
	PRS3	13.47		
C	PRS1	15.91		
	PRS2	7.47	-37.7	35.3
	PRS3	11.55		

动幅值被整体低估。频率相关等效线性化法的采用与频率相关的等效剪应变,改善了传统方法在高频

段的不足,更符合土体强震下的实际反应。

进一步研究表明,二者的差距呈现出显著的空间差异性。对于河谷边沿的 A 点和 C 点,频率相关等效线性化的结果比传统等效线性化结果增加的幅度较大,峰值加速度增幅超过 30%,反应谱峰值增幅最大为 35.3%;对于谷内 B 点,增幅相对较小,但仍达到了 18.6% (PGA) 和 23.2% (PRS),影响不容忽视。分析可知,由于沉积层厚度不均匀,河谷边沿地震动高频成分较多,在传统等效线性化方法中更容易被压制,从而被低估的程度更大。

5 结 论

本文通过频率相关等效线性化方法对山谷交错沉积场地进行空间多点地震动模拟,并与线性及传统等效线性化方法结果进行对比。得出以下结论:

(1) 在进行山谷交错沉积场地的空间相关多点地震动模拟时,频率相关等效线性化结果表现出与传统等效线性化结果相似的特征,即在强震激励下,土体呈现非线性响应,表现为各点卓越周期显著延长,反应谱峰值发生向长周期的频段迁移。

(2) 鉴于传统等效线性化方法存在过度压制高频成分的局限性,本研究通过考虑剪切模量与阻尼比的频率相关性,使其对高频地震动组分的模拟得以显著改善。频率相关等效线性化方法得到的地震动模拟值明显高于传统等效线性化方法结果,各点反应谱的峰值位置向短周期移动,有效改善了传统方法在高频段的不足,模拟结果与实际场地观测数据更为吻合,尤其在高频段,能更精确地反映地震

动的真实响应。这一点也被相关文献^[9, 21]利用千叶场地等实际地震记录所验证。

(3) 频率相关的等效线性化方法充分考虑了土层材料性质随着频率的变化趋势, 结合复杂场地地震波散射效应的准确计算, 使得空间多点地震动模拟更符合实际, 能更合理地估计河谷场地的地震动特征周期与放大效应, 对实际工程抗震设计等均具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] WONG H L. Effect of surface topography on the diffraction of P, SV and Rayleigh waves[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1982, 72(4): 1167-1183.
- [2] SESMA F J, MARTINEZ J, CAMPILLO M. An indirect boundary element method applied to simulate the seismic response of alluvial valleys for incident P, S and Rayleigh waves[J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 1993, 22(4): 279-295.
- [3] GATMIRI B. HYBRID a powerful boundary element finite element method (BEM/FEM) software for analysis of seismic response of multiphase porous media[J]. **The International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences**, 2007, 4(3): 159-165.
- [4] 景立平, 卓旭炀, 王祥建. 复杂场地对地震波传播的影响[J]. **地震工程与工程振动**, 2005, 25(6): 16-23.
JING Li-ping, ZHUO Xu-yang, WANG Xiang-jian. Effect of complex site on seismic wave propagation[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2005, 25(6): 16-23.
- [5] 刘中宪, 张征, 王少杰, 等. 基于快速多极子间接边界元法的城市区域沉积盆地三维地震响应宽频模拟[J]. **岩土力学**, 2019, 40(10): 4101-4110.
LIU Zhong-xian, ZHANG Zheng, WANG Shao-jie, et al. 3D seismic response broadband-simulation of the alluvial basin in urban region based on the FMM-IBEM[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(10): 4101-4110.
- [6] 刘中宪, 陈頔, 黄磊, 等. 沉积谷地二维非线性地震反应 FEM-IBIEM 耦合分析[J]. **防灾减灾工程学报**, 2021, 41(2): 287-293.
LIU Zhong-xian, CHEN Di, HUANG Lei, et al. Nonlinear seismic response analysis of sedimentary valley based on the coupled FEM-IBIEM[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2021, 41(2): 287-293.
- [7] 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.
- [8] 李忠献, 李笑穹, 李宁. 空间相关多点多维地震动的模拟[J]. **地震工程与工程振动**, 2014, 34(4): 64-72.
LI Zhong-xian, LI Xiao-qiong, LI Ning. Simulation of multi-point and multi-dimension spatially correlated earthquake ground motions[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2014, 34(4): 64-72.
- [9] HE Y, LIU Z X, YU Q, et al. Simulation of the spatially correlated multiple-station earthquake ground motions of the coupled alluvial valley-hill terrain[J]. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, 2020, 118: 41-53.
- [10] 刘中宪, 刘英, 孟思博, 等. 基于间接边界元法的近断层沉积谷地地震动模拟[J]. **岩土力学**, 2021, 42(4): 3-14.
LIU Zhong-xian, LIU Ying, MENG Si-bo, et al. Near-fault ground motion simulation of alluvial valley based on indirect boundary element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(4): 3-14.
- [11] CUI X Z, HONG H P. A time-frequency dependent coherence model for seismic ground motions[J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 2020, 50: 955-973.
- [12] WANG N, OLSEN K B, DAY S M. A frequency-dependent ground-motion spatial correlation model of within-event residuals for Fourier amplitude spectra[J]. **Earthquake Spectra**, 2021, 37(3): 2041-2065.
- [13] IDRIS I M, SEED H B. Seismic response of horizontal soil layers[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1968, 94(4): 1003-1031.
- [14] 廖振鹏. 地震小区划-理论与实践[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
LIAO Zhen-peng. Seismic microzonation theory and practice[M]. Beijing: Seismological Press, 1989.
- [15] 李小军, 廖振鹏. 土应力应变关系的黏-弹-塑模型[J]. **地震工程与工程震动** 1989, 9(3): 65-72.
LI Xiao-jun, LIAO Zhen-peng. Visco-elasto-plastic model of soil stress-strain relationship[J]. **Earthquake Engineering and Engineering**, 1989, 9(3): 65-72.
- [16] KAUSEL E, ASSIMAKI D. Seismic simulation of inelastic soils via frequency-dependent moduli and damping[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2002, 128(1): 34-47.
- [17] 薄景山, 李秀领, 李山有. 场地条件对地震动影响研究

- 的若干进展[J]. 世界地震工程, 2003, 19(2): 11-15.
- BO Jing-shan, LI Xiu-ling, LI Shan-you. Some progress of study on the effect of site conditions on ground motion[J]. **World Earthquake Engineering**, 2003, 19(2): 11-15.
- [18] FURUMOTO Y, SUGITO M, YASHIMA A. Frequency dependent equivalent-linearized technique for FEM response analysis of ground[C]//12th WCEE. Auckland: [s. n.], 2002.
- [19] 蒋通, 邢海灵. 水平土层地震反应分析考虑频率相关性的等效线性化方法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 218-224.
- JIANG Tong, XING Hai-ling. An equivalent linear method considering frequency-dependent soil properties for seismic response analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(2): 218-224.
- [20] 王伟, 刘必灯, 周正华, 等. 刚度和阻尼频率相关的等效线性化方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3928-3933.
- WANG Wei, LIU Bi-deng, ZHOU Zheng-hua, et al. Equivalent linear method considering frequency dependent stiffness and damping[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 3928-3933.
- [21] 孙锐, 袁晓铭. 全局等效线性化土层地震反应分析方法[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 603-612.
- SUN Yue, YUAN Xiao-ming. Holistic equivalent linearization approach for seismic response analysis of soil layers[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(4): 603-612.
- [22] 王永光, 梁建文, 巴振宁. 基于修正阻尼的土体非线性模型及其在 Abaqus 中的实现[J]. 岩土力学, 2023, 44(8): 2287-2296.
- WANG Yong-guang, LIANG Jian-wen, BA Zhen-ning. A dynamic nonlinear constitutive model for soil based on modified damping and its implementation in Abaqus[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(8): 2287-2296.
- [23] SINHA R. An IMPROVED notion for the computation of strain ratio in equivalent linear site response[J]. **Bulletin of Earthquake Engineering**, 2024, 23(1): 1-30.
- [24] ANDREOTTI G. Short-time frequency-domain method for truly nonlinear dynamic ground response analysis: the equivalent-nonlinear approach[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2024, 176: 108266.
- [25] 何颖, 丁晓凡, 刘中宪, 等. 考虑沉积河谷非线性放大效应的空间相关多点地震动模拟[J]. 工程力学, 2023, 40(10): 4-12.
- HE Ying, DING Xiao-fan, LIU Zhong-xian, et al. Spatial correlated multi-point ground motion simulation in sedimentary valley considering soil non-linearity[J]. **Engineering Mechanics**, 2023, 40(10): 4-12.
- [26] SOBCZKY K. Stochastic wave propagation[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [27] 霍俊荣, 胡聿贤, 冯启民. 地面运动时程强度包络函数的研究[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(1): 1-12.
- HUO Jun-rong, HU Yu-xian, FENG Qi-min. Study on envelope function of acceleration time history[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1991, 11(1): 1-12.