



论 文

近断层工程场地强震-位错耦合地震动输入方法

禹海涛^{1*}, 许桦霖², 袁勇¹

1. 同济大学土木工程防灾减灾国家重点实验室, 上海 200092;

2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092

* E-mail: yuhaitao@tongji.edu.cn

收稿日期: 2024-03-04; 接受日期: 2024-06-06; 网络版发表日期: 2024-11-12

国家重点研发计划项目(编号: 2022YFE0128400)、国家自然科学基金(批准号: 42177134, 42477141)和中央高校基本科研业务费专项资金资助

摘要 精细的强震-位错耦合荷载输入是保证近断层工程结构地震响应分析准确性的重要前提, 然而目前研究工作对近断层工程场地的地震动输入假设条件过于简化, 难以合理表征地震与断层错动之间的同震同错耦合作用。为此, 本文提出了一种面向近断层工程场地的强震-位错耦合地震动输入方法。首先, 将震源尺度全局域划分为工程场地所在的内域以及工程场地以外的外域; 其次, 通过运动学震源模型模拟发震断层的破裂过程并获取地震波场; 随后, 建立一种适用于含活动断层非连续内域模型的扩展缩减域方法, 将传播至内域的地震波场转化为动力荷载输入至内域模型的断层边界及内域截断边界, 从而实现近断层工程场地在强震-位错耦合作用下的地震响应分析; 最后, 设计了平地、山体以及河谷3种地形工况算例以检验该方法的可靠性。结果表明: 扩展缩减域方法计算结果与运动学震源模型吻合度较好, 具有较高精度, 且本文方法能够合理表征近断层地震动的强震-位错耦合分布特征以及速度脉冲、上盘效应、竖向效应等近断层效应。通过不同地形特征工程场地的地震响应分析及对比, 验证了本文方法的广泛适用性, 能够为实际工程抗震设计分析提供科学依据。

关键词 近断层, 强震-位错作用, 地震动输入方法, 缩减域方法, 地震响应分析

1 引言

随着“交通强国”和“西部大开发”的持续推进, 我国西南地区交通基础设施建设增长迅速。然而, 该地区活动断裂带分布密集, 长线状结构形式的隧道工程等交通基础设施难以避免傍行甚至跨越活动断层。近断层工程结构的震害主要源于断层破裂引起的地层错动和近断层地震动的共同作用。除位错引起的剧烈剪切作用外, 近断层地震动一般还具有速度脉冲、上盘

效应、方向性效应、竖向地震效应等复杂特征, 其对结构的影响也明显超过远场地震动^[1~5]。历史震害表明, 紧邻或穿越活动断层区域的工程结构损坏尤为严重。例如, 2008年汶川地震中, 北川-映秀断裂带影响区域内的建筑物几乎全部倒塌或遭到结构性损坏^[3]; 2022年门源地震中, 穿越冷龙岭活动断裂带的大梁隧道发生严重错断, 衬砌结构水平错台量高达2 m左右, 且隧道衬砌沿纵向的数百米范围内均发生较大损毁^[4]。由此可见, 近断层工程结构的抗震设计和分析至关重要。

引用格式: 禹海涛, 许桦霖, 袁勇. 近断层工程场地强震-位错耦合地震动输入方法. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 2206–2220

Yu H T, Xu H L, Yuan Y. Seismic input method coupling ground motion and fault dislocation for near-fault engineering sites (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 2206–2220, doi: 10.1360/SST-2024-0073

要, 而如何构建合理的近断层工程场地地震动输入方法则是其关键前提。

目前, 国内外学者采用数值模拟方法针对近断层工程结构的地震动响应特征开展了大量研究工作。但由于缺乏对含断层场地模型边界效应的深入研究, 模型人工边界处的近断层地震动输入普遍存在过度简化的问题。其中, 大部分近断层地震动处理方法与远场地震动输入模式基本一致, 即选取具有典型近断层效应的地震动输入至模型底部边界, 这在地上建筑物^[5]、桥梁^[6,7]以及隧道^[8-10]的地震响应分析中均有应用。以隧道工程为例, Sun等人^[11]通过对比近断层地震动以及远场地震动下隧道结构的地震易损性曲线, 发现近断层地震动对拱形输水隧道构成更大威胁; Mei等人^[12]基于二维地层-隧道模型沿基岩面输入近断层人工拟合脉冲地震动, 并采用增量动力分析(IDA)方法开展了隧道结构抗震性能研究, 分析了地震动脉冲效应对隧道结构的影响规律。然而, 由于近断层地震动具有斜入射特性及非一致特征, 所以此类沿模型底部的一致地震动输入方法通常不适用于如隧道、管线的跨断层线状工程结构。

鉴于目前对近断层地震动非一致特征的认识仍有不足, 穿断层线状工程往往采用拟静力方法对断层两侧上盘或下盘施加强制位移边界来实现断层位错模拟^[13-15]。由于此类方法忽略了断层错动速率以及地震动传播效应, 因此存在低估结构震害的可能。针对该问题, 一些学者在拟静力分析方法的基础上, 采用断层位错与地震动分步施加的方式来研究断层错动及地震动联合作用对隧道结构响应的影响^[16,17]。例如, 陈之毅和郭远鹏^[18]通过在模型底部输入垂直入射地震波以及上盘施加滑动速度的方式分析了隧道结构的损伤情况, 结果表明地震动对隧道结构响应的影响同样不容忽视。总体而言, 目前研究工作对近断层地震动输入存在过度简化的假设, 未考虑地震动与断层错动之间的同震同错耦合关系, 因此难以合理表征实际强震-位错耦合作用。

针对类如近断层地震动等非一致输入问题, 需模拟地震动在震源尺度下的传播路径和行波效应。Bielak等人^[19]提出了缩减域方法(DRM), 以解决同时涉及震源和局部精细结构的有限元问题, 通过震源尺度的粗网格快速计算和局部尺度细化计算, 显著减轻了计算负担。目前DRM已成为多尺度地震动模拟的重要数

值技术之一, 例如, Wang等人^[20]基于DRM研究了层状地基斜入射地震动输入问题; 随后, DRM应用被进一步拓展, 为提高大尺度震源模型的计算效率及精度, 部分学者通过谱元方法(SEM)或边界元方法(BEM)替代了有限元方法(FEM)下的震源尺度地震动模拟, 开发了SEM-FEM^[21,22]及BEM-FEM^[23]耦合方法; Zhang和Zhang^[24]提出了基于傅里叶插值的高精度插值方法, 以完成DRM内域边界波场的粗网格至细网格过渡, 进一步提高了DRM在多尺度模型计算下的效率和准确性。DRM对于近断层工程场地的强震-位错地震动输入尤为适用。

本文旨在建立面向近断层工程场地的强震-位错耦合地震动输入方法, 为近断层工程结构地震动响应分析提供理论依据。该方法从震源尺度出发, 通过运动学震源模型获取强震-位错耦合地震波场, 并依据传统DRM, 扩展其应用至含发震断层非连续内域场地, 建立了扩展缩减域方法(XDRM), 将传播至近断层工程场地的运动信息转化为地震荷载, 实现震源尺度至工程场地尺度的空间域缩减。本文将该方法应用于平整场地、河谷以及山体地形条件下的近断层工程场地地震响应分析, 并分析了不同地形条件对工程场地地震响应的影响规律。

2 原理与方法

由于近断层工程场地的强震-位错耦合地震动具有强非一致性, 因此需从震源尺度出发模拟发震断层的破裂过程, 由此获取传播至近断层工程场地的地震动运动特征, 随后通过将其转化为动力荷载输入至工程场地, 即可实现近断层工程场地动力响应分析。本节将针对上述步骤的具体原理和方法展开介绍。

2.1 震源模型

由于近断层工程场地的强震-位错耦合地震动具有强非一致性, 因此需从震源尺度出发模拟断层的破裂过程及地震动, 而合理的震源模型是近断层地震动模拟的关键环节。

通常, 运动学震源模型因其深入的研究以及与工程地震学的紧密关联而被广泛采用^[25-28]。运动学震源模型最早由Haskell^[25]提出, 后续逐渐被改进和完善。该模型认为地震动由预定断层的破裂过程激发, 其将

整个断层划分为多个子断层, 通过计算各子断层的破裂时刻、滑移量及上升时间等破裂参数, 设定断层破裂的预定路径, 并将滑移时程转化为动力边界条件施加至相应子断层节点, 从而模拟断层破裂过程, 进而得到断层破裂激发的地震动。

Graves和Pitarka^[28]通过整合前人相关研究以及实际观测规律, 进一步完善了运动学震源模型。参考该模型, 若已知断层破裂的滑移分布, 模型中所需要的断层破裂参数计算方法如下。

首先, 确定子断层破裂到达时刻。考虑到子断层破裂到达时刻、地震矩和局部滑移之间的相关性, 采用式(1)计算破裂到达时刻:

$$T_{iF} = T_{i0} - 1.8 \times 10^{-9} \times M_0^{1/3} \times \left[\frac{\log(s_i) - \log(s_A)}{\log(s_M) - \log(s_A)} \right], \quad (1)$$

式中, T_{iF} 为子断层 i 的破裂到达时刻, T_{i0} 为子断层 i 破裂到达时刻的初始估计, 该值根据破裂传播速度 V_r 计算得到; M_0 为地震矩; s_i 为子断层 i 的滑移量, s_M 和 s_A 分别是整个断层面上最大滑移和平均滑移。该式使得传播速度与滑移量相关联, 与Day和Bradley^[29]提出的断层破裂行为保持一致。

其次, 确定子断层滑移上升时间。考虑子断层上升时间与局部滑移之间的相关性, 以及波速结构随深度变化的情况, 通过在5~8 km深度间引入线性过渡, 采用式(2)计算子断层上升时间:

$$\tau_i = \begin{cases} 2 \times k \times \sqrt{s_i}, & z < 5 \text{ km}, \\ k \times \sqrt{s_i}, & z > 8 \text{ km}, \end{cases} \quad (2)$$

式中, τ_i 为子断层 i 的破裂上升时间, z 为深度, k 为缩放系数。系数 k 根据断面上的平均上升时间进行缩放, 整个断面的平均上升时间根据式(3)确定:

$$\tau_A = \alpha_T \times 1.6 \times 10^{-9} \times M_0^{1/3}, \quad (3)$$

式中, 系数 α_T 与断层倾角 δ 相关, 引入该系数旨在反映上升时间随断层倾角减小而减少的观察趋势, α_T 在倾角45°到60°间采用线性过渡, 根据式(4)计算:

$$\alpha_T = \begin{cases} 1, & \delta > 60^\circ, \\ 0.82, & \delta < 45^\circ. \end{cases} \quad (4)$$

最后, 确定子断层滑移时程函数。

该运动学震源模型可应用于不同数值计算方法, 不同数值方法差异、不同的网格精度及时间步长对模

拟地震动的频谱范围也略有不同。通常运动学震源模型可实现地震动的中低频率模拟(0~5 Hz)。

本文模拟采用有限元方法, 通过对时间离散, 将滑移时程转化为动力边界分段施加至有限元模型中, 实现断层破裂过程模拟, 以此从震源尺度获取所需的地震波场。

2.2 扩展缩减域方法

Bielak等人^[19]提出的DRM可实现震源尺度地震动至局部场地地震动的荷载等效。然而, 传统DRM不能直接用于含发震断层内域问题。基于此, 本文提出了一种适用近断层工程场地地震动输入的XDRM。

如图1所示, 震源尺度模型全局细分为两个部分: 工程场地代表的内域 Ω 和工程场地外部的域 Ω^+ 。将两域交界处定义为虚拟边界 Γ , 发震断层穿过边界 Γ 且同时存在于内外域中。

震源尺度模型全局域的有限元格式动力学方程如式(5)所示:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ii}^\Omega & \mathbf{M}_{ib}^\Omega & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{bi}^\Omega & \mathbf{M}_{bb}^\Omega + \mathbf{M}_{bb}^{\Omega^+} & \mathbf{M}_{be}^{\Omega^+} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{eb}^{\Omega^+} & \mathbf{M}_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_i \\ \ddot{\mathbf{u}}_b \\ \ddot{\mathbf{u}}_e \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ii}^\Omega & \mathbf{K}_{ib}^\Omega & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{bi}^\Omega & \mathbf{K}_{bb}^\Omega + \mathbf{K}_{bb}^{\Omega^+} & \mathbf{K}_{be}^{\Omega^+} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{eb}^{\Omega^+} & \mathbf{K}_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_i \\ \mathbf{u}_b \\ \mathbf{u}_e \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_i \\ \mathbf{P}_b \\ \mathbf{P}_e \end{Bmatrix}, \quad \text{在 } \Omega \cup \Omega^+ \text{ 内}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{K}$ 表示质量矩阵和刚度矩阵, $\mathbf{u}_i$, $\mathbf{u}_b$ 和 $\mathbf{u}_e$ 以及 $\mathbf{P}_i$, $\mathbf{P}_b$ 和 $\mathbf{P}_e$ 分别为内域 Ω 、边界 Γ 以及外域 Ω^+ 上节点位移向量与断层破裂荷载向量, 加速度向量由位移向量对时间的二阶导数表示($\ddot{\mathbf{u}}_i$, $\ddot{\mathbf{u}}_b$ 及 $\ddot{\mathbf{u}}_e$)。断层破裂荷载向量 $\mathbf{P}_i$, $\mathbf{P}_b$ 和 $\mathbf{P}_e$ 可由第2.1节提出的方法确定, 断层破裂荷载全部施加于断层面上。

基于上述问题, 引入另一种自由场模型, 即去除原问题中的特殊地质或工程结构后的模型, 如图2所示。

在该自由场模型中, 外域 Ω^+ 与原问题(非自由场)外域 Ω^+ 的地质结构完全相同, 而自由场内域 Ω^0 不包含原问题(非自由场)内域 Ω 中的复杂地形或工程结构。为

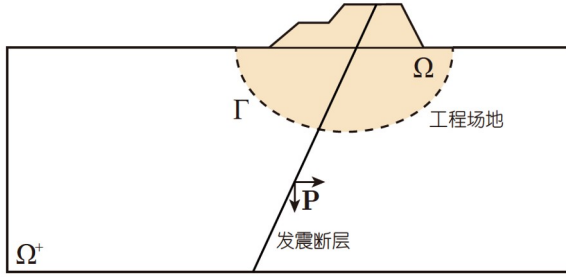


图 1 (网络版彩图)含特殊地质或工程结构的震源尺度全局场地模型

Figure 1 (Color online) Diagram of the source-scale global model with special geological or engineering structures.

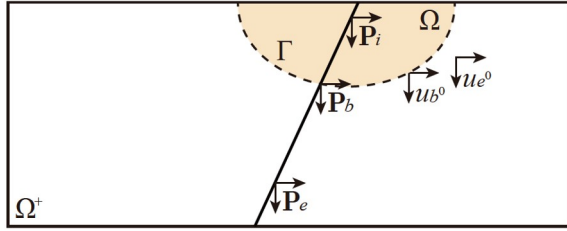


图 2 (网络版彩图)自由场震源尺度全局场地模型

Figure 2 (Color online) Diagram of free-field source-scale global model.

明确区分, 采用上标0代表自由场模型中不同的力学参数. 由此, 可以得到自由场问题下的有限元格式的弹性动力学方程, 如式(6)所示:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ii}^{\Omega^0} & \mathbf{M}_{ib}^{\Omega^0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{bi}^{\Omega^0} & \mathbf{M}_{bb}^{\Omega^0} + \mathbf{M}_{bb}^{\Omega^+} & \mathbf{M}_{be}^{\Omega^+} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{eb}^{\Omega^+} & \mathbf{M}_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_i^0 \\ \ddot{\mathbf{u}}_b^0 \\ \ddot{\mathbf{u}}_e^0 \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ii}^{\Omega^0} & \mathbf{K}_{ib}^{\Omega^0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{bi}^{\Omega^0} & \mathbf{K}_{bb}^{\Omega^0} + \mathbf{K}_{bb}^{\Omega^+} & \mathbf{K}_{be}^{\Omega^+} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{eb}^{\Omega^+} & \mathbf{K}_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_i^0 \\ \mathbf{u}_b^0 \\ \mathbf{u}_e^0 \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_i^0 \\ \mathbf{P}_b^0 \\ \mathbf{P}_e^0 \end{Bmatrix}, \quad \text{在 } \Omega^0 \cup \Omega^+ \text{ 内.} \end{aligned} \quad (6)$$

由此可得

$$\mathbf{P}_e = \mathbf{M}_{be}^{\Omega^+} \ddot{\mathbf{u}}_b^0 + \mathbf{M}_{ee}^{\Omega^+} \ddot{\mathbf{u}}_e^0 + \mathbf{K}_{be}^{\Omega^+} \mathbf{u}_b^0 + \mathbf{K}_{ee}^{\Omega^+} \mathbf{u}_e^0 \quad (7)$$

假设原始问题中的外域位移 \$\mathbf{u}_e\$ 表示为由自由场外

域位移 \$\mathbf{u}_e^0\$ 和原始问题中局部地质特征引起的残余位移 \$\mathbf{w}_e\$ 之和, 即

$$\mathbf{u}_e = \mathbf{u}_e^0 + \mathbf{w}_e \quad (8)$$

将式(7)和(8)代入式(5), 可得到如下动力学方程:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ii}^{\Omega} & \mathbf{M}_{ib}^{\Omega} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{bi}^{\Omega} & \mathbf{M}_{bb}^{\Omega} + \mathbf{M}_{bb}^{\Omega^+} & \mathbf{M}_{be}^{\Omega^+} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{eb}^{\Omega^+} & \mathbf{M}_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_i \\ \ddot{\mathbf{u}}_b \\ \ddot{\mathbf{w}}_e \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ii}^{\Omega} & \mathbf{K}_{ib}^{\Omega} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{bi}^{\Omega} & \mathbf{K}_{bb}^{\Omega} + \mathbf{K}_{bb}^{\Omega^+} & \mathbf{K}_{be}^{\Omega^+} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{eb}^{\Omega^+} & \mathbf{K}_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_i \\ \mathbf{u}_b \\ \mathbf{w}_e \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_i \\ \mathbf{P}_b - \mathbf{M}_{be}^{\Omega^+} \ddot{\mathbf{u}}_e^0 - \mathbf{K}_{be}^{\Omega^+} \mathbf{u}_e^0 \\ \mathbf{M}_{eb}^{\Omega^+} \ddot{\mathbf{u}}_b^0 + \mathbf{K}_{eb}^{\Omega^+} \mathbf{u}_b^0 \end{Bmatrix}, \quad \text{在 } \Omega \cup \Omega^+ \text{ 内.} \end{aligned} \quad (9)$$

对于方程左侧而言, 式(9)与(5)相比仅外域位移发生变化, 原问题的外域位移 \$\mathbf{u}_e\$ 被替换为残余位移 \$\mathbf{w}_e\$. 该残余位移由内域的非自由场特征引起, 仅存在于内域周围, 而远离内域的外域部分将几乎不存在运动与受力. 因此, 如图3所示, 可以缩减外域范围至 \$\Omega^+\$, 建立局部模型, 即可获得与原始问题相同的内域运动特征.

另外, 方程右侧即为等效地震荷载 \$\mathbf{P}^{\text{eff}}\$, 其中的 \$\mathbf{P}_i\$ 和 \$\mathbf{P}_b\$ 均为位于内域 \$\Omega\$ 和边界 \$\Gamma\$ 上的已知荷载. 如图3所示, 其涉及的质量及刚度子矩阵 \$\mathbf{M}_{be}\$, \$\mathbf{M}_{eb}\$, \$\mathbf{K}_{be}\$, \$\mathbf{K}_{eb}\$ 仅与外域中与含有边界 \$\Gamma\$ 部分的薄层单元相关. 记该薄层单元的另一侧边界为 \$\Gamma_e\$, 因此仅需在震源尺度的自由场模型中提取 \$\Gamma\$ 及 \$\Gamma_e\$ 节点位移, 即可计算出缩减域模型所需要的输入荷载 \$\mathbf{P}^{\text{eff}}\$.

综上, 本文提出的近断层工程场地强震-位错耦合地震动输入方法可总结为以下步骤, 其流程如图4所示.

第一步: 建立震源尺度自由场模型, 如图1所示, 根据运动学震源模型, 计算断层破裂路径, 将其以动力边界条件形式 (\$\mathbf{P}_i\$, \$\mathbf{P}_b\$ 及 \$\mathbf{P}_e\$) 施加, 合理模拟断层破裂过程并获取全局地震动;

第二步: 提取震源尺度自由场模型中边界 \$\Gamma\$ 及 \$\Gamma_e\$ 上的节点位移 \$\mathbf{u}_e^0\$ 及 \$\mathbf{u}_e^0\$ 时程, 确定内域 \$\Omega\$ 和边界 \$\Gamma\$ 上的断层破裂荷载 \$\mathbf{P}_i\$ 及 \$\mathbf{P}_b\$, 进而根据式(9)计算 \$\mathbf{P}^{\text{eff}}\$;

第三步: 建立缩减域模型, 如图3所示, 将 \$\mathbf{P}^{\text{eff}}\$ 输入

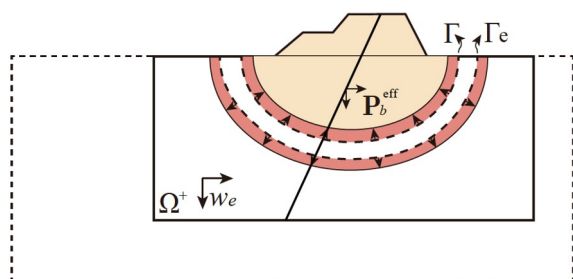


图 3 (网络版彩图)含特殊地质或工程结构的缩减域局部模型

Figure 3 (Color online) Diagram of DRM local model with special geological or engineering structures.

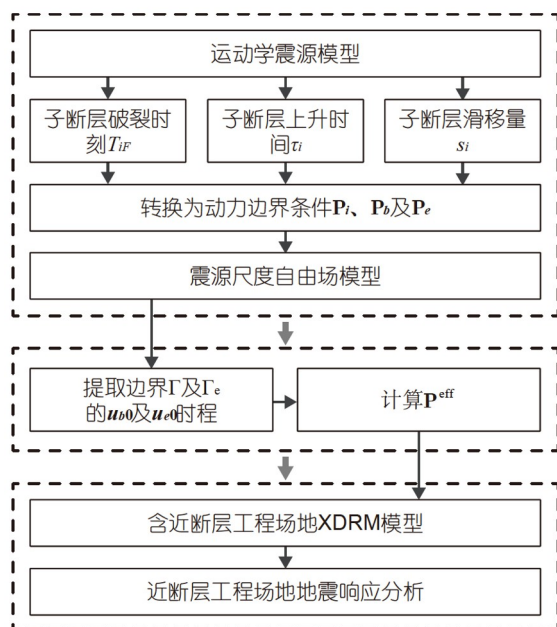


图 4 近断层工程场地强震-位错耦合地震动输入方法流程图

Figure 4 Flowchart of seismic input method coupling ground motion and fault dislocation for near-fault engineering sites.

至边界 Γ 和 Γ_e 以及断层上,从而实现近断层工程场地的地震响应分析.

3 方法验证

3.1 计算模型及参数

为验证本文方法的正确性,考虑如图5所示的二维弹性自由场模型。震源尺度下全局模型长度为27 km,深度为12 km。模型左右两侧及底部采用固定边界(设

置较大模型尺度以避免边界反射影响), 如图5(a)所示。该模型中地层分为3层, 地层的剪切波速及厚度已在图中注明, 其他材料参数如表1所示。假设模型中存在破裂长度为10 km的逆断层, 其震源深度为4.8 km, 倾角为53°, 断层破裂带厚度为200 m, 且滑动面位于破裂带中心(为简化问题, 破裂带厚度仅于0~0.8 km深度的近地表区域考虑, 更深区域仅设置滑动面)。图5(b)中边界 Γ 包围的近地表断层区域700 m $\times$ 400 m为本算例分析的工程场地。图中标注为深红色区域为等效节点力施加位置, 其中, 外域网格尺寸为10~500 m不等, 其尺寸随外域边界至内域边界而逐渐缩小; 内域网格尺寸为5~20 m不等, 其尺寸随内域边界至地表和断层而逐渐缩小。

需要注意的是, 本文模型内域位置及尺寸仅服务于下述算例分析. 实际应用中内域划分可根据工程问题的研究目的或研究对象等具体决定.

首先采用第2.1节提出的方法模拟断层破裂过程。其中, 断层各破裂位置滑移量如图5(c)所示, 滑移分布形式根据Mai和Beroza^[30]提出的随机震源模型生成(矩震级 $M_W = 6.0$)。算例假设同一破裂位置断层两侧滑移大小相等, 方向相反。断层滑移速度时程函数采用图6所示的Graves和Pitarka^[28]提出的三段式函数。破裂传播速度 V_r 按式(10)取值:

$$V_r = \begin{cases} 0.56 \times V_S, & z < 5 \text{ km}, \\ 0.8 \times V_S, & z > 8 \text{ km}, \end{cases} \quad (10)$$

式中, V_s 为剪切波速; z 为深度; 0.56 及 0.8 为缩减系数, 系数在深度为 5~8 km 之间线性过渡.

采用第2.2节提出的DRM实现近断层工程场地荷地震动等效及输入. 如图5(b)所示, 缩减域局部场地模型长度为1500 m, 深度为800 m. 内部域 Ω 为感兴趣的工程场地, 由边界 Γ 所包围. 动力荷载 $\mathbf{P}^{\text{eff}}$ 施加至边界 Γ 、边界 Γ_0 及断层节点.

表 1 断层破碎带及地层材料参数

Table 1 Material parameters of fault fracture zone and strata

位置	密度 ρ (kg/m ³)	弹性模量 E (MPa)	泊松比 ν
断层破碎带	2400	1035	0.35
地层1	2400	3500	0.30
地层2	2600	14625	0.25
地层3	2800	60480	0.20

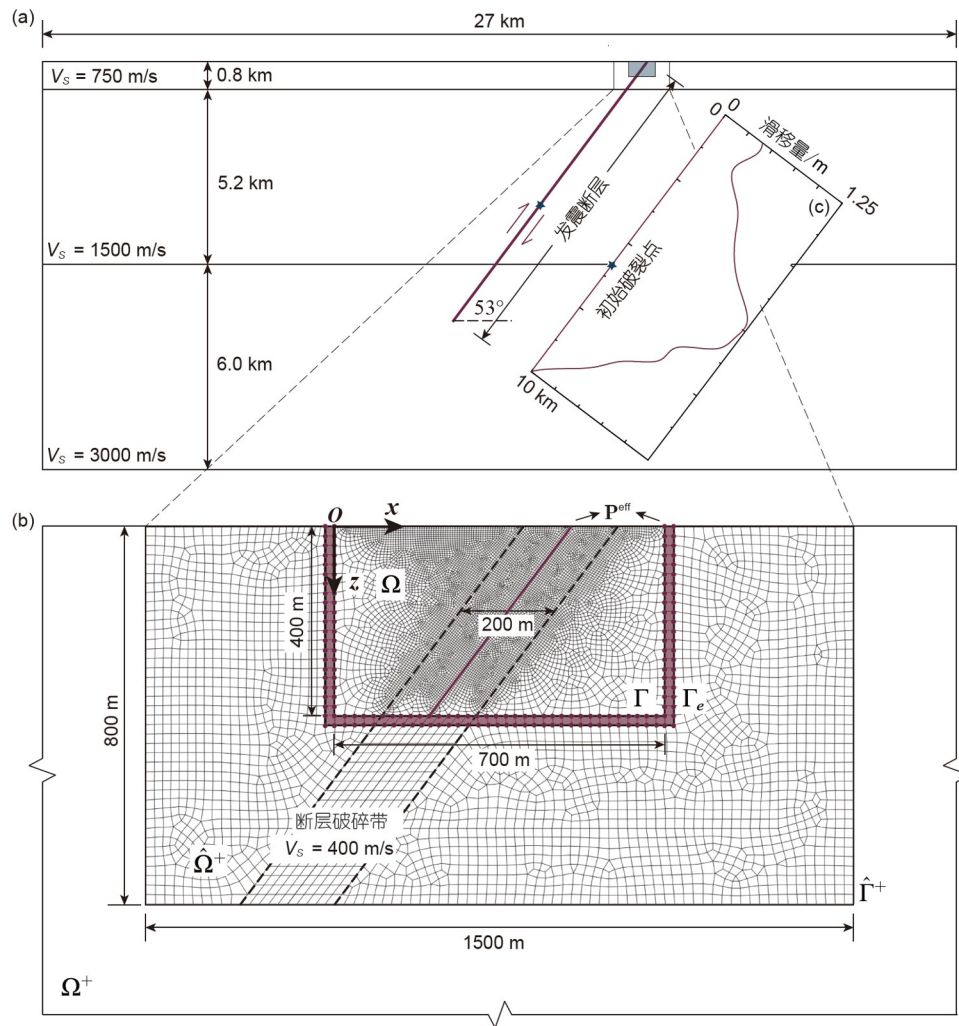


图 5 二维自由场模型示意图. (a) 震源尺度模型; (b) XDRM局部模型及网格划分; (c) 断层滑移分布曲线

Figure 5 Schematic diagram of 2D free field model. (a) Diagram of source scale model; (b) diagram of XDRM local model and grid division; (c) fault slip distribution curve.

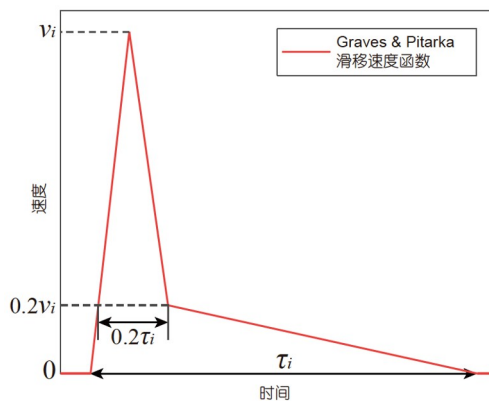


图 6 断层滑移速度时程函数形式

Figure 6 Form of fault slip velocity history function.

有限元计算平台为Abaqus CAE 2022, 震源尺度模型模拟从破裂起始计算至12 s; 缩减域局部模型从起始破裂后1.5 s计算至9.5 s. 二者时间步长均为0.0125 s.

3.2 结果分析及验证

图7给出了震源尺度模型中断层破裂过程, 其所示速度及位移均为各分量的方向和大小. 从图7(a)~(c)所示的地震动速度分布云图可见, 破裂在断层上由破裂起始点向断层两端传播, 地震波在地层中由震源向四周远处传播, 地震波在地表及各界面交界处会发生明显反射. 此外, 地震波存在明显集中性, 速度高值区范围较小, 主要集中于断层附近及破裂前端. 从图7(d)~(f)

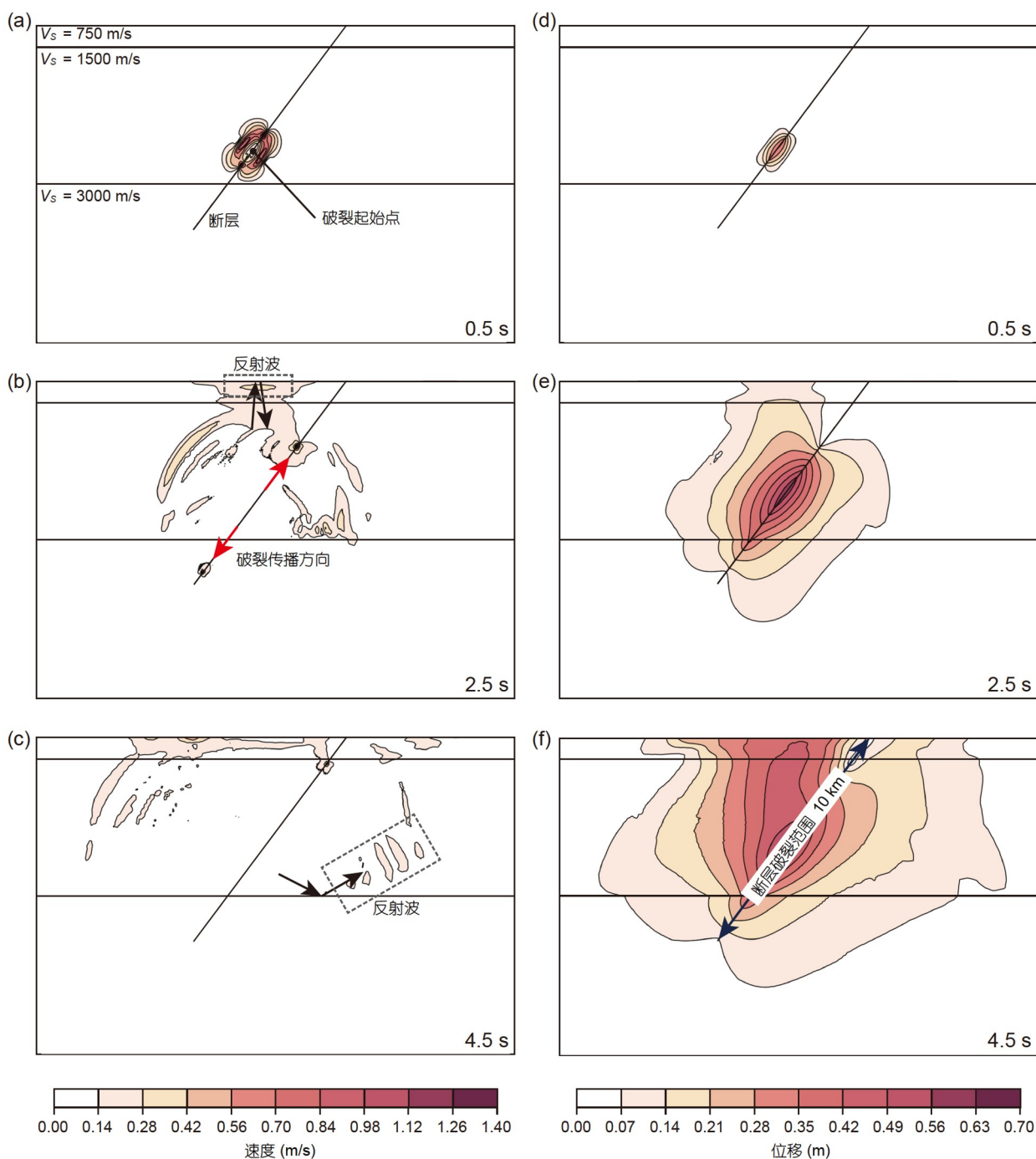


图 7 震源尺度地震动速度(合速度)及位移(合位移)空间分布云图。(a)~(c) 速度空间分布云图; (d)~(f) 位移空间分布云图

Figure 7 Contour map of earthquake motion velocity (resultant velocity) and displacement (resultant velocity) at the source scale. (a)~(c) Contour map of velocity; (d)~(f) contour map of displacement.

所示的位移分布云图可见, 大位移集中于断层中部较大滑移区周围, 位移向断层两侧逐渐衰减。此外, 由于本算例假定为亚剪切破裂(断层破裂速度 V_r 小于地层

剪切波速 V_s), 因此破裂端部位移晚于其两侧地层位移发生, 最终形成如图7(e)所示的“蝴蝶状”位移分布形式。

为验证本文所提出XDRM的正确性, 图8描述了DRM下工程场地局部模型及震源尺度全局模型(作为基准模型)两种模型的计算结果对比, 即地表各点速度时程对比, 其中各点峰值地表速度(PGV)在图8(b)列出, 横坐标0时刻为破裂起始时刻。由图可见, 在水平位置0~700 m的内域范围内, 两组波形之间具有极高一致性, PGV的最大差异仅为3%。值得注意的是, 计算结果在边界 Γ 位置处也保持一致, 而在其相邻边界 Γ_e 及以外的外域范围, XDRM模型的速度几乎为0。这说明边界 Γ 与其相邻边界 Γ_e 及其包围单元形成一定的吸收边界, 将地震波限制在内域, 使得运动几乎仅在内域发生。该现象与第2.2节提出的残余位移假设保持一致, 即残余位移假设为XDRM模型中外域残余位移 w_e 由内域的非自由场特征引起, 由于本文算例两模型均为具有相同地质特征的自由场模型, 因此残余位移 w_e 为0。

将上述速度时程通过快速傅里叶变换转换为频域内的傅里叶幅值谱, 图9展示了DRM下工程场地局部模型及震源尺度全局模型(作为基准模型)两种模型的计算结果在频域上的对比情况。从图中可以看出, 其对

比结果与时域对比保持一致。此外, 傅里叶谱显示模拟的地震动频率范围主要为0~5 Hz的中低频率。

由此可见, 本文提出的DRM可实现震源尺度至工程场地尺度的尺度缩减, 且计算结果与原始震源模型吻合度良好, 从而表明可用于近断层工程场地的强震-位错耦合地震动荷载作用下的动力响应分析。

4 算例分析

4.1 模型及参数

为进一步说明本文方法在复杂场景的应用效果, 本节针对具有局部复杂地质特征内域的河谷及山体算例展开分析。河谷地形算例示意图如图10(a)所示, 将一梯形河谷嵌入第3.1节模型的内部域中。河谷最大深度为80 m, 长度为360 m, 河谷侧面坡度为53°。山体地形算例示意图如图10(b)所示, 将一梯形山体增加至地层顶部, 山体底部长为540 m, 高为180 m, 侧面坡度为37°, 山体及其内部破裂带的地质特征与其下方地层一致。

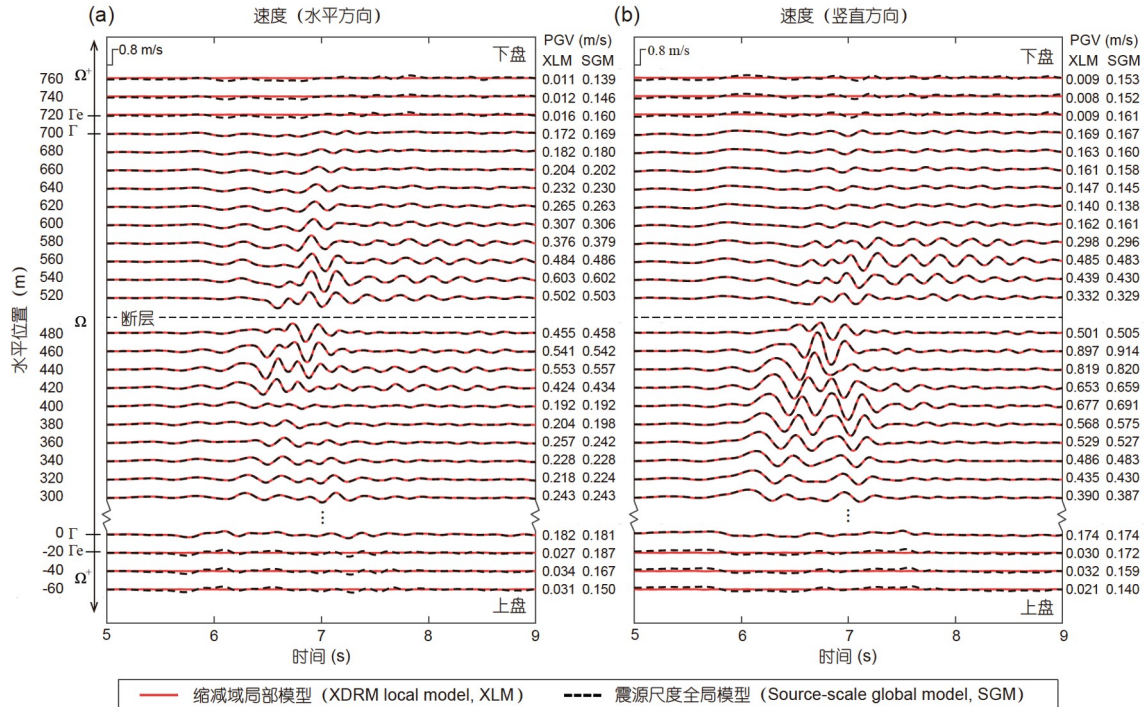


图8 (网络版彩图)XDRM局部模型与震源尺度全局模型速度时程对比。(a) 水平方向速度时程对比图; (b) 竖直方向速度时程对比图

Figure 8 (Color online) Velocity time history comparison between XDRM local model and source-scale global model. (a) Horizontal velocity time history comparison; (b) vertical velocity time history comparison.

两算例中的其他参数均与第3.1节的自由场模型相同, 外部域地质特征以及荷载并不发生变化. 根据XDRM, 无需重新模拟震源尺度自由场模型断层破裂

过程, 因此边界 Γ 及 Γ_e 上的输入荷载将与第3节相同. 河谷地形模型中与其他两模型相比缺少的部分断层破裂荷载不再考虑. 图中标注为深红色区域为等效节点

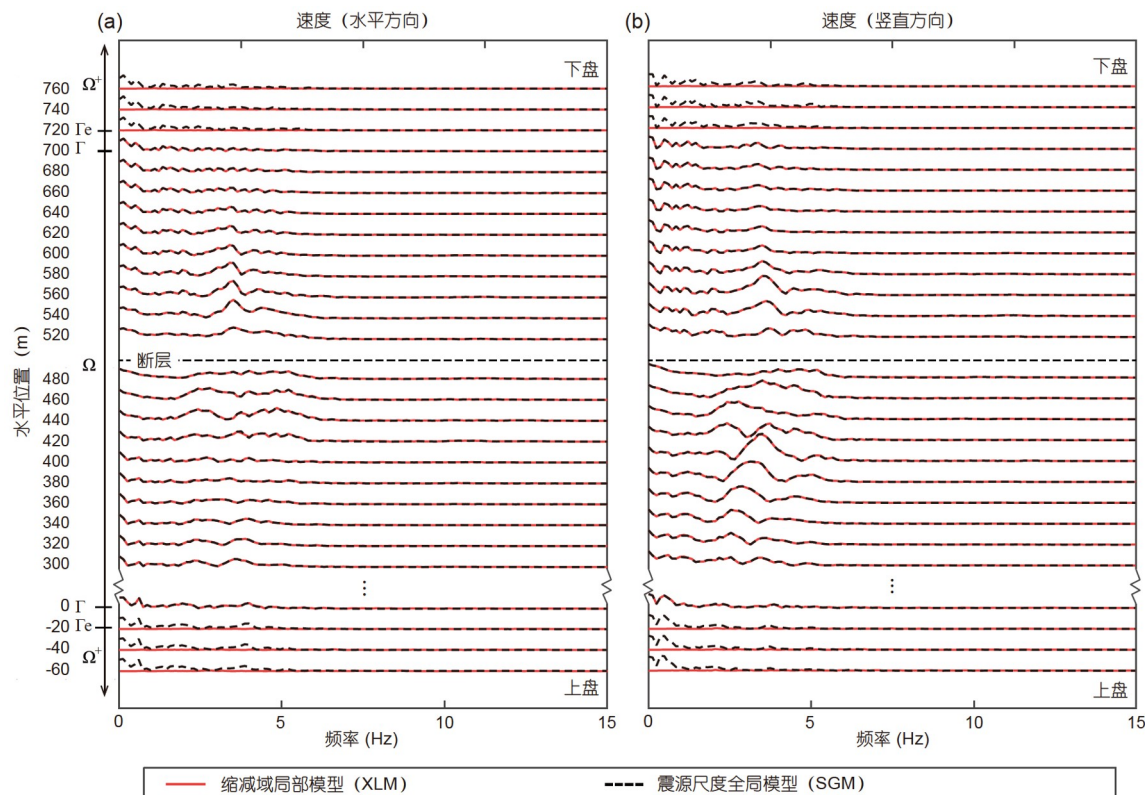


图9 XDRM局部模型与震源尺度全局模型速度傅里叶幅值谱对比. (a) 水平方向速度傅里叶幅值谱对比; (b) 竖直方向速度傅里叶幅值谱对比

Figure 9 Comparison of velocity Fourier amplitude spectrum between XDRM local model and source-scale global model. (a) Horizontal velocity Fourier amplitude spectrum comparison; (b) vertical velocity Fourier amplitude spectrum comparison.

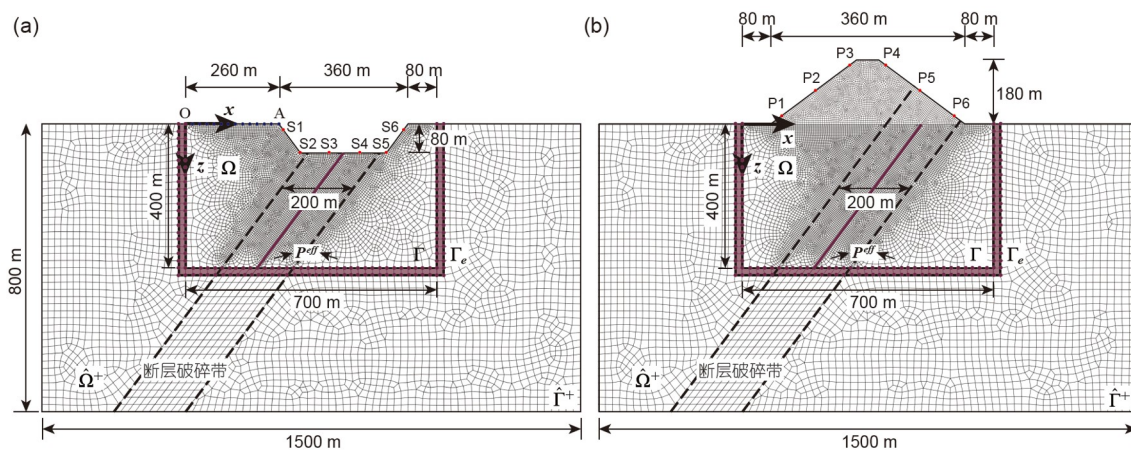


图10 河谷及山体场地局部模型及网格划分. (a) 河谷地形模型; (b) 山体地形模型

Figure 10 Schematic diagram of valley and mountain local models and grid division. (a) Diagram of valley model; (b) diagram of mountain model.

力施加位置.

4.2 分析与讨论

图11给出了平地、山体地形以及河谷地形3个算例在不同时刻的位移云图. 由图可见, 地震动几乎被限制在内域中发生, 位移在从边界 Γ 至其相邻边界 Γ_e 的单元内急剧衰减, 外域位移几乎为零, 这与残余位移假设

保持一致. 然而值得注意的是, 事实上只有平整场地模型的外域位移完全接近于0, 山体地形和河谷地形的外域会因局部地质几何特征的差异性而引起残余位移(如6.5 s时刻的河谷地形的位移云图), 但总体而言, 外域的残余位移依然很小, 由 Γ 与 Γ_e 组成的薄层边界吸收效果较为显著.

从图11还可看出, 由于输入的地震动荷载相同, 对

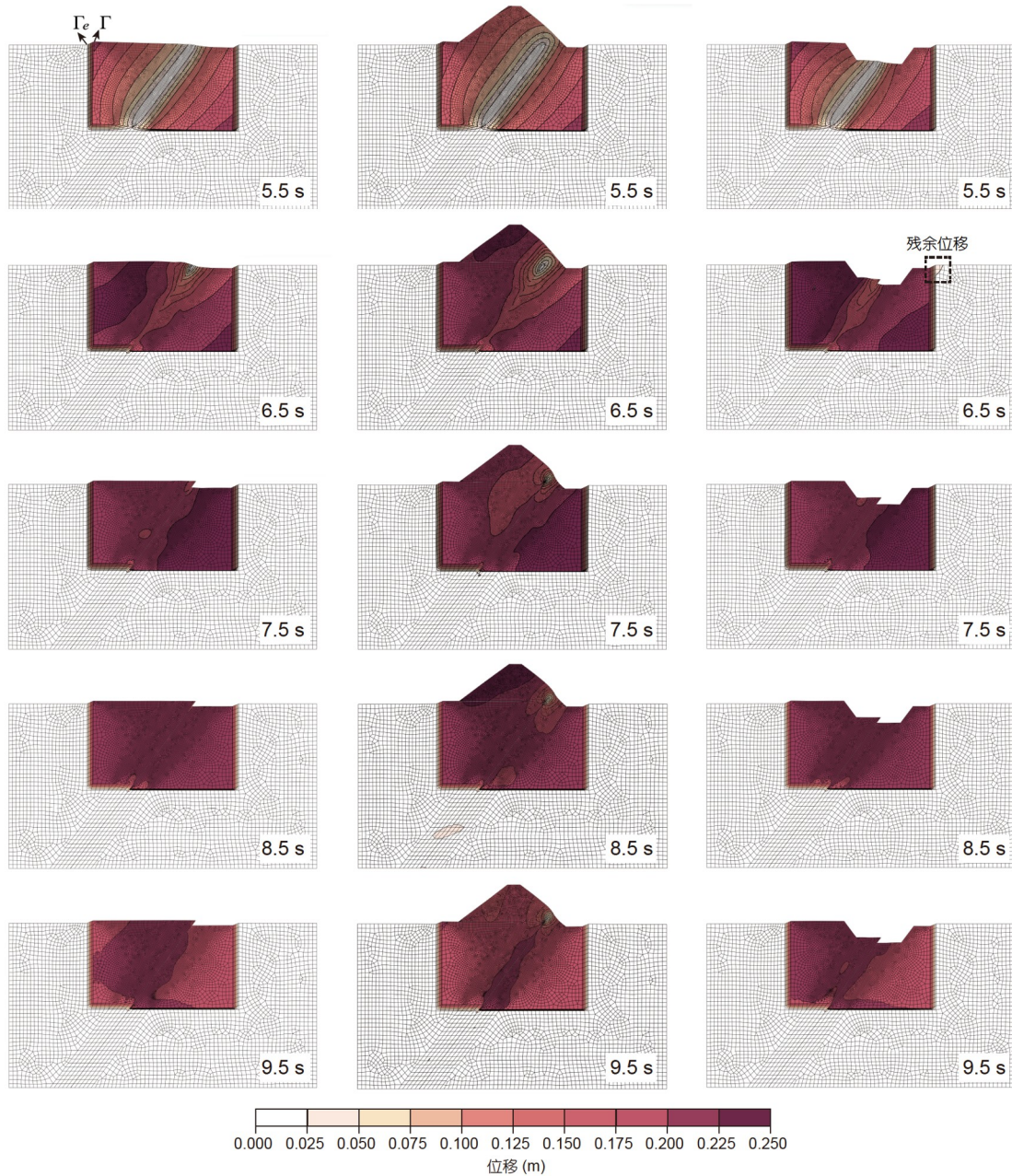


图 11 各地形近断层工程场地位移(合位移)空间分布云图

Figure 11 Displacement (resultant displacement) contour map of near-fault engineering sites in various terrains.

比同一时刻3种地形算例的位移云图可以看出位移分布具有较大的相似性. 5.5 s时刻, 3个模型均在远离断层的两侧存在较大位移, 这是由亚剪切破裂断层破裂速度小于地层剪切波速引起的. 此外, 由于3种算例中地震波在地层中的传播速度均保持一致, 所以6.5 s时刻河谷地形已发生地表破裂, 而平整场地地形仍未发生. 另外, 由于山体地形算例的荷载与平整场地地形算例相同, 山体断层面上并未施加破裂荷载, 因此山体地形模型并未发生地表破裂, 破裂至山体内部即

终止.

为进一步剖析近断层地震动特征, 针对算例中观测点的时程曲线开展分析(观测点位置见图10). 对于河谷地形而言, 图12(a)~(d)展示了S1~S6观测点速度及位移在水平及竖直方向的时程曲线. 从速度时程曲线可以看出, 观测点的速度时程呈现出明显的速度脉冲现象, 该现象对于S1~S4观测点尤为显著, 其速度时程曲线上均在某一方向上出现了较大的波峰. 此外, 由于断层倾滑作用, 其速度时程具有明显的竖向效应. 而

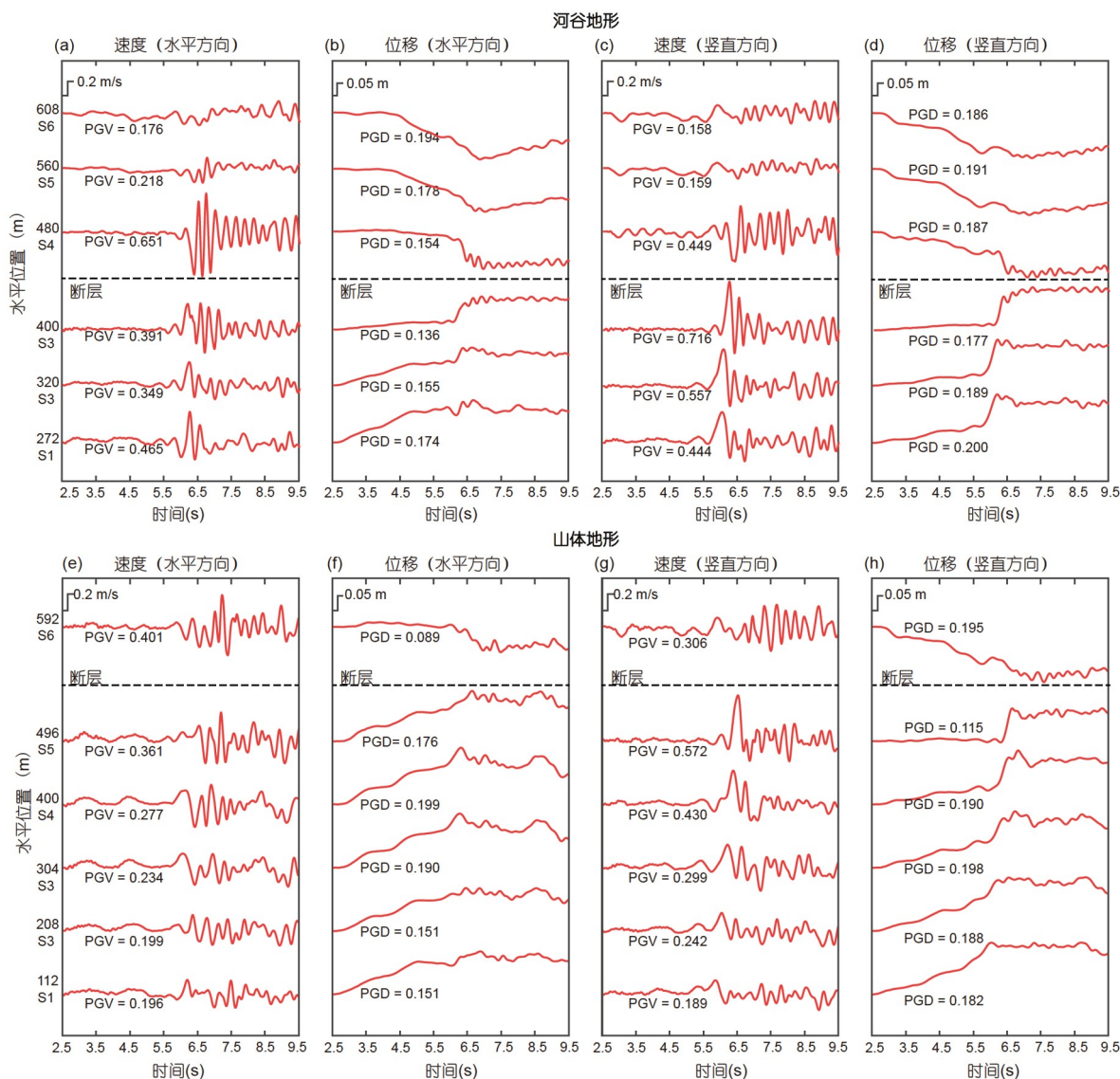


图 12 (网络版彩图)观测点速度及位移时程曲线. (a)~(d) 河谷地形模型速度及位移时程曲线; (e)~(h) 山体地形模型速度及位移时程曲线

Figure 12 (Color online) Velocity and displacement time history curves at observation points. (a)~(d) Velocity and displacement time history of the valley model; (e)~(h) velocity and displacement time history of the mountain model.

从位移时程曲线可以看出, 各观测点均存在一定的永久位移, 即呈现出滑冲现象。

相应地, 针对山体地形算例, 选取了图10(b)中P1~P6六个观测点, 并绘制其速度及位移时程曲线, 如图12(e)~(h)所示。图中可观察到山体地形的地表地震动呈现出类似的速度脉冲效应、竖向效应和滑冲效应。这些近断层效应在靠近断层的观测点表现尤为明显。

为深入分析河谷地形对工程场地地震动的影响, 选取该算例与自由场算例中存在重合的地表区域(图10(a)中O至A)绘制了两个算例的速度时程的对比曲线, 如图13所示。两模型的时程曲线在5.5 s之前几乎保持一致, 在此之后由于河谷反射作用, 河谷地形模型呈现出更剧烈的地震动及更高频的波形。水平方向的地震动放大效应尤为明显, 该方向PGV最高放大95%。这一放大效应随着与河谷距离的增加而逐渐衰减。此外, 随着断层距离的增加, 两模型中速度脉冲均呈现出减弱趋势。

图14为3种地形情景下的地表速度PGV分布曲线。图中表明, 具有较高PGV的强震主要集中在断层周围的破碎带附近, 且最高PGV并非一定出现在断层错动

面处。此外, 曲线显示出明显的上盘效应, 即PGV在上盘衰减更为缓慢, 且强地震动分布区域更大。进一步来看, 图14(b)的结果表明, 河谷地形对地震动产生了放大作用, 地表的强震范围更为广泛。相对而言, 对于图14(c)表示的山体地形, 由于断层破裂在山体内部即终止, 加之山体对地震波的传播产生一定的散射效应, 使得地震动到达山体表面时相对减弱, 因此其PGV则相对较小。此外, 对比水平方向及竖直方向PGV可观察到竖向PGV普遍高于水平方向, 呈现出明显的竖向效应。

5 结论

本文提出了一种近断层工程场地强震-位错耦合地震动输入方法, 从震源尺度出发模拟断层破裂过程, 通过研发的扩展缩减域方法(XDRM)计算近断层工程场地动力荷载, 并应用于不同类型地形场地, 进而深入分析了其对近断层地震动响应特征的影响。通过方法验证与算例分析, 得出主要结论如下。

(1) 本文提出的XDRM在近断层工程场地的地震动输入上表现出较高精度, 适用于不同地质地形条件

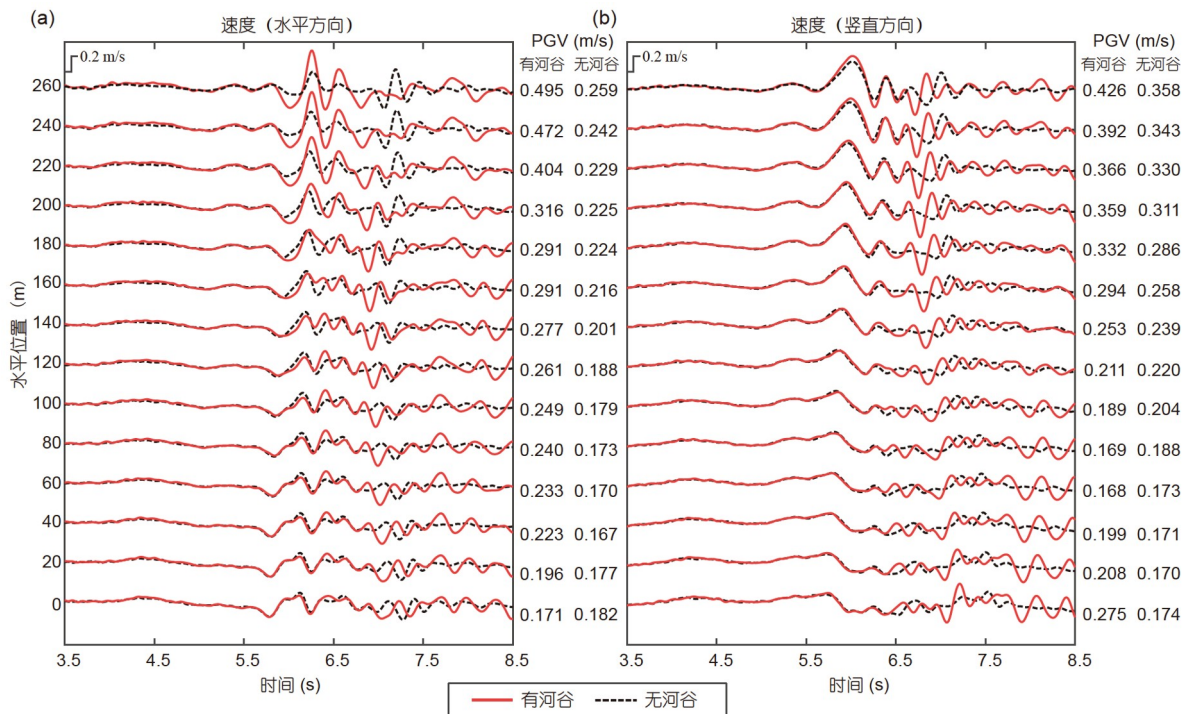


图13 (网络版彩图)河谷及平地模型在同一位置处的速度时程对比。(a) 水平方向速度时程对比; (b) 竖直方向速度时程对比。
Figure 13 (Color online) Velocity time history comparison between at the same location for models with and without a valley. (a) Horizontal velocity time history comparison; (b) vertical velocity time history comparison.

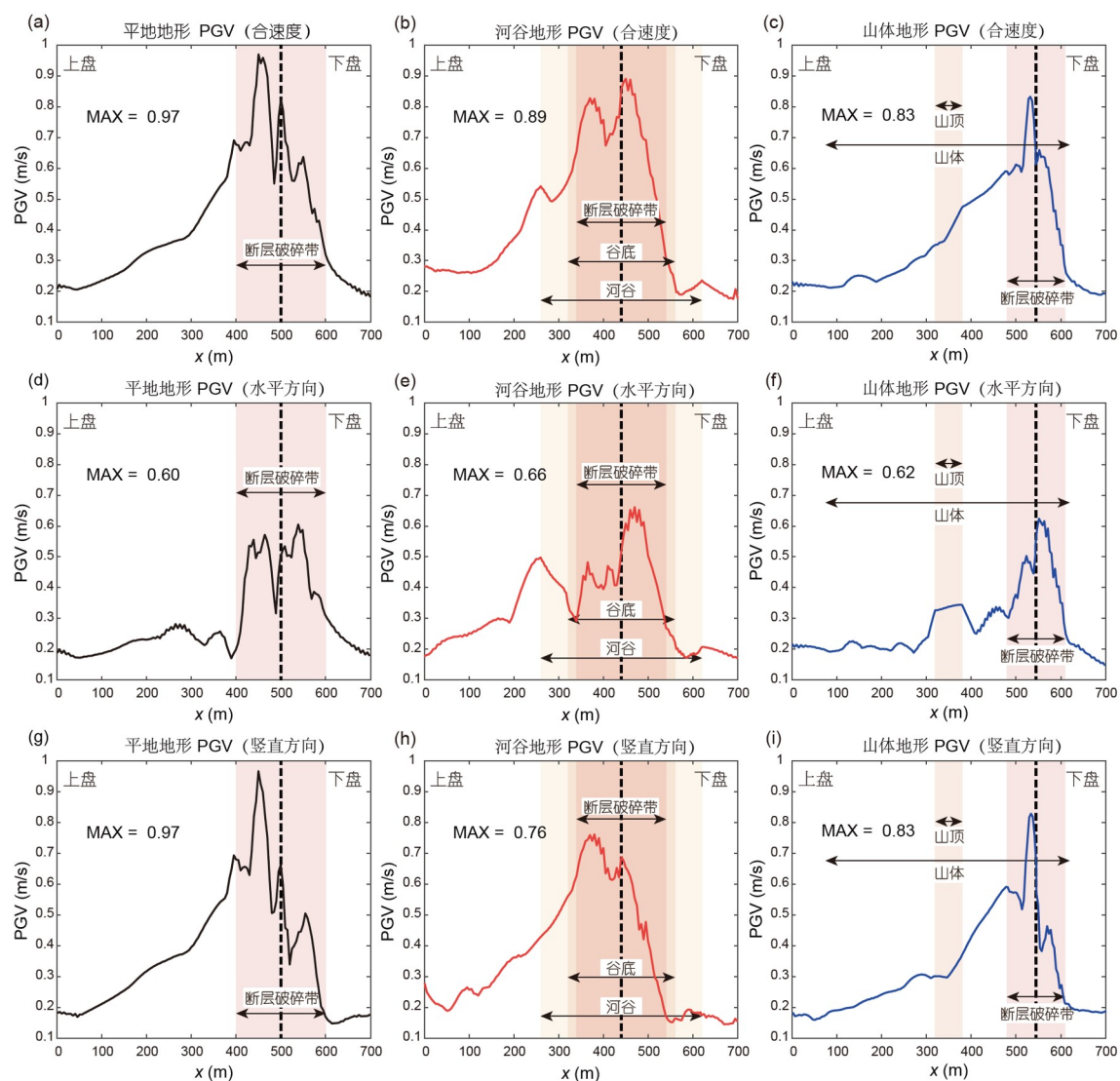


图 14 PGV分布曲线图。(a)~(c) 合速度PGV分布; (d)~(f) 水平方向PGV分布; (g)~(i) 竖直方向PGV分布

Figure 14 Distribution curve of PGV. (a)~(c) Resultant PGV; (d)~(f) horizontal PGV; (g)~(i) vertical PGV.

和工程场地形式, 为工程场地地震动响应分析提供了一种有效的跨尺度分析方法。

(2) 本文所提出的方法从震源尺度出发, 合理考虑了断层破裂过程的路径效应, 使得近断层工程场地响应分析能够准确模拟出近断层地震动的关键特征, 包括强地震动的集中性、地表破裂、滑冲效应、速度脉冲、竖向效应和上盘效应等。通过算例分析, 验证了本文方法在近断层工程场地强震-位错耦合模拟的合理性。

(3) 本文通过对比3种不同地形特性的工程场地地震响应分析, 得到了不同地形几何特征对近断层地震

动响应的影响规律, 进一步说明了本文方法具有广泛的适用性。需要注意的是, 本文算例旨在说明方法的合理性和适用性, 文中得到的分析结论仅适用于算例给出的特定场景和假定条件。然而, 本文方法为后续探究复杂地形特征对近断层工程场地的地震响应影响提供了重要的分析手段。

综上, 本文提出的近断层工程场地强震-位错耦合地震动输入方法, 适用于任意地形地质条件或包含工程结构的近断层工程场地的地震响应分析, 也可为实际近断层工程的抗震设计提供科学依据和分析手段。

参考文献

- 1 Yu Y X, Gao M T. Effects of the hanging wall and footwall on peak acceleration during the Chi-Chi earthquake, Taiwan (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 2001, 23: 615–621 [俞言祥, 高孟潭. 台湾集集地震近场地震动的上盘效应. *地震学报*, 2001, 23: 615–621]
- 2 Hu J J, Xie L L. Review of rupture directivity related concepts in seismology (in Chinese). *Earthq Eng Eng Dyn*, 2011, 31: 1–8 [胡进军, 谢礼立. 地震破裂的方向性效应相关概念综述. *地震工程与工程振动*, 2011, 31: 1–8]
- 3 Chen X Y, Wang D S, Fu J Y, et al. State-of-the-art review on pulse characteristics of near-fault ground motions (in Chinese). *Eng Mech*, 2021, 38: 1–14, 54 [陈笑宇, 王东升, 付建宇, 等. 近断层地震脉冲特性研究综述. *工程力学*, 2021, 38: 1–14, 54]
- 4 Ambraseys N N, Melville C P. *A History of Persian Earthquakes*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- 5 Sharma M L, Douglas J, Bungum H, et al. Ground-motion prediction equations based on data from the Himalayan and Zagros regions. *J Earthq Eng*, 2009, 13: 1191–1210
- 6 Fu B H, Shi P L, Wang P, et al. Geometry and kinematics of the Wenchuan earthquake surface ruptures around the Qushan Town of Beichuan County, Sichuan: Implications for mitigation of seismic and geologic disasters (in Chinese). *Chin Geophys*, 2009, 52: 485–495 [付碧宏, 时丕龙, 王萍, 等. 2008年汶川地震断层北川段的几何学与运动学特征及地震地质灾害效应. *地球物理学报*, 2009, 52: 485–495]
- 7 Zhang W, Li M, Ji Y P, et al. Analysis and enlightenment of typical failure characteristics of tunnels caused by the Menyuan M6.9 earthquake in Qinghai Province (in Chinese). *China Earthq Eng J*, 2022, 44: 661–669 [张威, 李明, 姬云平, 等. 青海门源M6.9地震典型隧道破坏特征分析与启示. *地震工程学报*, 2022, 44: 661–669]
- 8 Yang D X, Li G, Cheng G D. Seismic analysis of base-isolated structures subjected to near-fault pulse-like ground motions (in Chinese). *Earthq Eng Eng Dyn*, 2005, 25: 119–124 [杨迪雄, 李刚, 程耿东. 近断层脉冲型地震动作用下隔震结构地震反应分析. *地震工程与工程振动*, 2005, 25: 119–124]
- 9 Wang T N, Liu J X, Yu Y B. Spatial dynamic analysis of isolated bridges subjected to near-fault ground motion (in Chinese). *J Traffic Transp Eng*, 2009, 9: 20–25, 31 [王统宁, 刘健新, 于泳波. 近断层地震动作用下减隔震桥梁空间动力分析. *交通运输工程学报*, 2009, 9: 20–25, 31]
- 10 Shi Y, Wang D S, Sun Z G. Seismic isolation design for high speed railway bridge under near-fault ground motions (in Chinese). *China Railw Sci*, 2014, 35: 34–40 [石岩, 王东升, 孙治国. 近断层地震动下的高速铁路桥梁减震设计. *中国铁道科学*, 2014, 35: 34–40]
- 11 Sun B, Zhang S, Deng M, et al. Inelastic dynamic response and fragility analysis of arched hydraulic tunnels under as-recorded far-fault and near-fault ground motions. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2020, 132: 106070
- 12 Mei X, Sheng Q, Cui Z. Effect of near-fault pulsed ground motions on seismic response and seismic performance to tunnel structures. *Shock Vib*, 2021, 2021: 1–18
- 13 Wang L, Geng P, Chen J, et al. Machine learning-based fragility analysis of tunnel structure under different impulsive seismic actions. *Tunn Undergr Space Tech*, 2023, 133: 104953
- 14 Shahidi A R, Vafaeian M. Analysis of longitudinal profile of the tunnels in the active faulted zone and designing the flexible lining (for Koohrang-III tunnel). *Tunn Undergr Space Tech*, 2005, 20: 213–221
- 15 Liu X Z, Lin L L. Model experiment on effect of normal fault with 75° dip angle stick-slip dislocation on highway tunnel (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2011, 30: 2523–2530 [刘学增, 林亮伦. 75°倾角逆断层黏滑错动对公路隧道影响的模型试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30: 2523–2530]
- 16 Cui Z, Sheng Q, Zhou G X, et al. Experimental and numerical investigation for the rupture problem of a tunnel subjected to strike-slip fault. *IOP Conf Ser-Earth Environ Sci*, 2021, 861: 042001
- 17 Liu G, Zhang Y, Ren J, et al. Seismic response analysis of tunnel through fault considering dynamic interaction between rock mass and fault. *Energies*, 2021, 14: 6700
- 18 Chen Z Y, Guo Y P. Analysis of cross fault tunnel damage under combined action of fault dislocation and ground motion (in Chinese). *J Disaster Prev Mitig Eng*, 2022, 43: 132–137 [陈之毅, 郭远鹏. 断层错动和地震动共同作用下跨断层隧道的损伤分析. *防灾减灾工程学报*, 2022, 43: 132–137]
- 19 Bielak J, Loukakis K, Hisada Y, et al. Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions, Part I: Theory. *Bull Seismol Soc Am*, 2003, 93: 817–824
- 20 Wang H, Yang H, Feng Y, et al. Modeling and simulation of earthquake soil structure interaction excited by inclined seismic waves. *Soil Dyn*

- [Earthq Eng](#), 2021, 146: 106720
- 21 Zhang L, Wang J T, Xu Y J, et al. A procedure for 3D seismic simulation from rupture to structures by coupling SEM and FEM. [Bull Seismol Soc Am](#), 2020, 110: 1134–1148
- 22 Fares R, Cruz D, Foerster E, et al. Coupling spectral and finite element methods for 3D physic-based seismic analysis from fault to structure: Application to the Cadarache site in France. [Nucl Eng Des](#), 2022, 397: 111954
- 23 Yu H T, Wang Z K. Efficient hybrid simulation method for seismic response analysis of underground structures (in Chinese). [Chin J Geotech Eng](#), 2024, 46: 45–53 [禹海涛, 王治坤. 地下结构地震响应分析的高效混合模拟方法. [岩土工程学报](#), 2024, 46: 45–53]
- 24 Zhang L, Zhang J. Local wavefield refinement using Fourier interpolation and boundary extrapolation for finite-element method based on domain reduction method. [Geophysics](#), 2022, 87: T251–T263
- 25 Haskell N A. Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults. [Bull Seismol Soc Am](#), 1964, 54: 1811–1841
- 26 Aki K. Seismic displacements near a fault. [J Geophys Res](#), 1968, 73: 5359–5376
- 27 Madariaga R. Dynamics of an expanding circular fault. [Bull Seismol Soc Am](#), 1976, 66: 639–666
- 28 Graves R W, Pitarka A. Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach. [Bull Seismol Soc Am](#), 2010, 100: 2095–2123
- 29 Day S M, Bradley C R. Memory-efficient simulation of anelastic wave propagation. [Bull Seismol Soc Am](#), 2001, 91: 520–531
- 30 Mai P M, Beroza G C. A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip. [J Geophys Res](#), 2002, 107: ESE 10-1

Seismic input method coupling ground motion and fault dislocation for near-fault engineering sites

YU HaiTao¹, XU HuaLin² & YUAN Yong¹

¹ State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

² Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

Accurate seismic response analysis of near-fault engineering sites requires precise coupling loads of ground motion and fault dislocation. However, current studies tend to rely on excessive assumptions about fault movement behavior, leading to a failure in accurately representing the coupled effects of seismic activity and fault slip. To address this issue, this paper proposes a seismic input method considering the coupling of ground motion and fault slip in the near-fault engineering sites. Firstly, the seismic source scale global domain is divided into the internal domain where the engineering site is located, and the external domain beyond the site. Secondly, the seismic wave field is obtained at the source scale through the kinematic source model. Subsequently, an Extended Domain Reduction Method (XDRM) is established for models featuring non-continuous internal domains with active faults. This method transforms the seismic wave field propagating to the internal domain into dynamic loads, which are then applied to the fault boundaries and internal truncation boundaries. This achieves the seismic response analysis of near-fault engineering sites under the coupled effects of ground motion and fault dislocation. Finally, three topographical scenarios—flat terrain, mountainous terrain, and valley terrain—are designed to validate the reliability of this method. Results indicate that The XDRM calculation results exhibit a good agreement with the kinematic source model, demonstrating high accuracy. Moreover, the proposed method can effectively capture the coupling distribution features of ground motion and fault dislocation, as well as near-fault effects, including velocity pulses, hanging-wall effects, and vertical effects. Through the analysis and comparison of seismic responses in different terrain features, the broad applicability of the proposed method has been validated. This can provide a scientific basis for seismic design analysis in practical engineering.

near-fault, strong motion-dislocation action, seismic input method, domain reduction method, seismic response analysis

doi: [10.1360/SST-2024-0073](https://doi.org/10.1360/SST-2024-0073)