

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250215001

倾滑断层动态破裂下衬砌隧道动力响应 宽频高效模拟*

刘佳乔¹, 刘中宪^{2,3}, 孟思博²

(1. 天津大学土木工程系, 天津 300350; 2. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 3. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

摘要:与远场地震动相比,近断层地震动具有上盘效应、速度脉冲等特征,将加剧地下结构震害。提出一种可高效模拟倾滑断层动态破裂—隧道反应全过程的快速多极间接边界元—有限元混合方法(FMM-IBEM-FEM):采用快速多极间接边界元(FMM-IBEM)模拟断层破裂和大尺度场地地震动,发挥其求解精度高、计算存储量小的优势;采用有限元(FEM)精细化模拟隧道及周围近地表场地域,通过施加黏弹性人工边界,将断层错动激发的地震动转化为施加在边界节点上的等效节点力,实现FMM-IBEM计算域和FEM计算域的应力和位移传递。基于所建方法,研究了断层距和断层倾角对近倾滑断层衬砌隧道地震响应的影响。结果表明:地震响应水平分量作用下衬砌隧道环向应力峰值出现在拱肩和拱脚,地震响应竖向分量作用下衬砌隧道环向应力峰值出现在拱腰和拱顶,且存在较大残余应力。当断层距为2 000 m时,地震响应水平分量作用下隧道拱脚内壁环向应力峰值相较断层距为0 m对应结果降低54%;90°倾角断层产生的地震动对衬砌隧道影响最为显著,但同时要特别关注小于45°的倾滑断层场地中衬砌隧道的动力响应。

关键词:衬砌隧道; 动力响应; 倾滑断层; 边界元法; 有限元法

中图分类号: U451.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1042-10

Broadband and Efficient Simulation of Dynamic Response of Lined Tunnels under Dynamic Rupture of Dip-slip Faults

LIU Jiaqiao¹, LIU Zhongxian^{2,3}, MENG Sibao²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

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

3. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300384, China)

Abstract: Compared with far-field ground motions, near-fault ground motions exhibit characteristics such as hanging wall effects and velocity pulses, which can significantly exacerbate seismic damage to underground structures. The fast multipole method - indirect boundary element method-finite element method (FMM-IBEM-FEM) was proposed to simulate the entire process of dip-slip fault dynamic rupture and tunnel response. The FMM-IBEM was employed to simulate fault rupture and large-scale

* 收稿日期:2025-02-15;修回日期:2025-03-05

基金项目:国家自然科学基金项目(52278516)、天津市制造业高质量发展专项资金项目(23ZGCXQY00010)资助

作者简介:刘佳乔(1995—),女,博士研究生。主要从事地下结构抗震方面的研究。E-mail: liujiaqiao@tju.edu.cn

通信作者:刘中宪(1982—),男,博导,博士后。主要从事地震工程、工程防护等方面研究。

E-mail: zhongxian1212@163.com

site ground motions, leveraging its advantages of high solution accuracy and low computational storage requirements. The FEM was used for refined simulation of tunnels and surrounding near-surface domain. By applying viscoelastic artificial boundaries, the ground motions excited by fault dislocation were converted into equivalent nodal forces imposed on boundary nodes, enabling the stress and displacement transfer between the FMM-IBEM and FEM computational domains. Based on the proposed method, the effects of fault distance and fault dip angle on the seismic response of lined tunnels near dip-slip faults were investigated. The results showed that under the horizontal component of seismic response, peak circumferential stress in the tunnel lining occurred at the spandrel and arch foot, while under the vertical component, the peak appeared at the haunch and crown, with significant residual stress observed. When the fault distance was 2 000 m, the peak circumferential stress on the inner wall of the tunnel arch foot under the horizontal component of seismic response decreased by 54% compared to that at a fault distance of 0 m. Ground motions generated by faults with a dip angle of 90° had the most significant impact on the lined tunnel. However, special attention should also be paid to the dynamic response of lined tunnels in sites with dip-slip faults of less than 45°.

Keywords: lined tunnel; dynamic response; dip-slip fault; boundary element method; finite element method

0 引 言

近年来,随着公路、铁路的持续建设,大量衬砌隧道处于高地震烈度区,且位于近断层区域,如在建的川藏铁路。1995年大阪神户地震^[1]、2001年台湾集集地震^[2]、2008年汶川地震^[3]震害调查均显示,近断层衬砌隧道在强震中可能遭受严重破坏。因此,研究近断层地下衬砌隧道的地震反应和抗震性能具有重要工程意义^[4-5]。

活动断层达到基岩破坏强度时会发生错动,在造成一定错量的同时会释放能量,以地震波的形式通过周围介质向四周传播。在近断层区域,地震动具有上盘效应、速度脉冲等特性,进而影响甚至加剧断层场地附近衬砌隧道的地震响应^[6]。此外,由于衬砌隧道靠近断层带,其动力响应也受到岩体断裂的影响^[7]。

针对此问题,吴明等^[8]基于有限差分方法开展了平行于地裂缝的地铁隧道避让距离研究;陈之毅等^[9]运用有限元方法模拟了不同位置隧道在活动逆断层错动下的响应,并讨论了隧道的安全避让距离;王杰等^[10]通过建立有限元数值模型,模拟了逆断层错动对临近隧道结构的影响。上述研究采用静力或拟静力的计算方法模拟断层错动,无法反映

地震作用下隧道动态特性。黄胜^[11]提出一种基于无限元人工边界的地震动输入方法,研究了高烈度近场地震动下山岭隧道破坏特征及抗震措施;梅贤丞等^[12]基于有限差分方法开展隧道动力时程分析,依托工程场地特性选取了能够反应场地震动特性的近断层脉冲型地震动,开展了近断层地震动作用下隧道结构易损性研究;朱星宇等^[13]选取有代表性的地震动监测数据,建立三维动力有限元模型,分析了不同竖向峰值加速度地震动下隧道结构与地层的动力响应规律。上述研究采用实测记录作为近断层地震动输入,无法直接反映断层动态破裂过程。此外,崔臻等^[14]提出一种近断层地震动人工合成方法,应用于地下洞室群地震响应研究,但仅限于水平向地震动。

鉴于此,本文建立FMM-IBEM-FEM混合方法,以倾滑逆断层为例,开展断层动态破裂下位于上盘场地中的衬砌隧道动力响应宽频高效模拟。首先,基于运动学震源模型,采用FMM-IBEM模拟近断层场地地震动(0~10 Hz),提取隧道周围近地表场地的水平向和竖向地震动;其次,基于FEM求解衬砌隧道及周围场地地震响应,其中采用黏弹性人工边界实现消波,结合等效荷载输入施加场地边界地震动;最后,基于此方法,定量分析断层距、断层倾角对近倾滑断层衬砌隧道地震响应的影响规律。

1 倾滑断层动态破裂下衬砌隧道地震响应模拟方法建立

本文采用FMM-IBEM-FEM混合方法模拟近震断层动态破裂下隧道地震响应。IBEM通过减少计算域维度和自动满足无限远边界条件,保证高精度的同时降低计算资源消耗,适用于断层动态破裂和近场宽频地震波传播的模拟。结合FMM后,FMM-IBEM进一步提升计算效率并减少存储需求。FEM则能精细模拟隧道及临近土体的细部响应。该混合方法既能高效模拟断层动态破裂和大范围地震波传播,又能精确捕捉隧道及临近土体的精细动力响应,实现倾滑断层动态破裂—隧道反应全过程的准确高效模拟。需要指出的是,FMM-IBEM对于特别不均匀土体的处理较为困难,该情形会大幅降低FMM-IBEM的计算效率,对此需引入更为有效的预处理技术。

1.1 计算模型

如图1所示,弹性半空间中有一双向破裂的倾滑断层,由于上盘从断层面上辐射出的地震波经过断层与地表之间的多次反射将放大上盘地震动,本文考虑衬砌隧道位于上盘,隧道横截面为圆形,埋深为 d 。

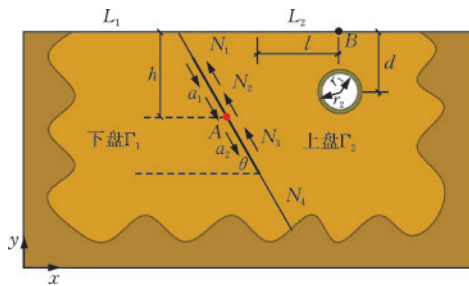


图1 近倾滑断层衬砌隧道示意图

Fig.1 Schematic diagram of lined tunnel near dip-slip fault

1.2 基于FMM-IBEM的近倾滑断层场地地震动模拟

1.2.1 传统IBEM基本原理

将半空间域划分为下盘 Γ_1 域和上盘 Γ_2 域两部分(图1),根据IBEM基本原理,基于单层位势理论,在离散的水平地表边界和断层上下盘的交界面上施加虚拟荷载,构造散射波场。波场由每个区域边界施加虚拟单位荷载产生,故弹性半空间中任意

一点位移和应力的积分表达式为:

$$u_i(x) = \int_S \varphi_j(y) G_{ij}(x, y) dS_j \quad (1)$$

$$\sigma_i(x) = \int_S \varphi_j(y) T_{ij}(x, y) dS_j \quad (2)$$

式中, x 和 y 分别表示场点和源点; $i, j=1, 2$,对应于坐标轴 x, y 方向; $\varphi_j(y)$ 为边界 S 上 y 点的虚拟荷载密度; $G_{ij}(x, y)$ 和 $T_{ij}(x, y)$ 分别为位移和应力格林函数,表达式为:

$$G_{ij}(x, y) = \frac{1}{4\pi\mu} \left\{ \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [H_0^{(2)}(k, x, y) - H_0^{(2)}(h, x, y) - \delta_{ij} H_0^{(2)}(k, x, y)] \right\} \quad (3)$$

$$T_{ij}(x, y) = \lambda \left(\frac{\partial G_{1j}}{\partial x_1} + \frac{\partial G_{2j}}{\partial x_2} \right) n_i + \mu \left(\frac{\partial G_{ij}}{\partial x_1} + \frac{\partial G_{1j}}{\partial x_i} \right) n_1 + \mu \left(\frac{\partial G_{ij}}{\partial x_2} + \frac{\partial G_{2j}}{\partial x_i} \right) n_2 \quad (4)$$

式中, $H_0^{(2)}(\cdot)$ 为0阶第二类Hankel函数; n_i 为场点 x 处边界单元单位法向量与 i 轴正方向夹角余弦; $k = \omega/c_{s1}$ 时为剪切波波数, $k = \omega/c_{p1}$ 时为压缩波波数; ω 为圆频率; c_{s1} 和 c_{p1} 分别表示剪切波和压缩波波速。

断层两侧产生平面内的恒定错动并且向外辐射地震波,错动方向如图1箭头所示。根据半空间地表的零应力边界条件和断层上下盘交界面位移和应力连续的边界条件建立方程,进而求解得到虚拟荷载密度。该计算模型求解的边界条件为:(1)自由地表零应力;(2)断层的上界、下界位移连续;(3)断层两侧应力连续;(4)断层两侧有平面内的位移差 d_0 。可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i^{(\Gamma_1)}(x) &= 0, x \in L_1 \\ \sigma_i^{(\Gamma_2)}(x) &= 0, x \in L_2 \\ u_i^{(\Gamma_1)}(x) &= u_i^{(\Gamma_2)}(x), x \in N_1 \cup N_4 \\ \sigma_i^{(\Gamma_1)}(x) &= \sigma_i^{(\Gamma_2)}(x), x \in N_2 \cup N_3 \\ u_i^{(\Gamma_1)}(x) - u_i^{(\Gamma_2)}(x) &= d_0 \cos \theta, x \in N_2 \cup N_3 \\ -u_j^{(\Gamma_1)}(x) + u_j^{(\Gamma_2)}(x) &= d_0 \sin \theta, x \in N_2 \cup N_3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, L_1, L_2 分别表示断层下盘和上盘对应地表的离散单元数; N_1, N_2, N_3, N_4 表示断层下盘区域 Γ_1 和上盘区域 Γ_2 交界面的离散单元数。

根据上述边界条件建立方程,得到各单元的虚拟荷载密度。将格林函数与虚拟荷载密度相乘得到散射波场。该方法的特点是将虚拟荷载直接施加到边界上,直接实现惠更斯原理。值得指出的是,上述求解的积分方程系数矩阵为非对称满秩矩阵,在进行大型方程组求解时,计算量庞大且需要

存储大型系数矩阵。为此,本文引入FMM算法,结合广义极小余量法(GMRES)大幅减少计算量和存储量,实现该问题的高效求解。

1.2.2 FMM-IBEM基本原理

FMM-IBEM以树结构作为主要运算和存储的对象,对格林函数进行展开和传递,借助GMRES迭代算法,在每一次迭代中以树结构取代系数矩阵,与迭代量相乘,进而通过迭代精度控制,得出结果。与常规IBEM一样,FMM-IBEM求解的第一步也是对所求计算域的边界进行离散,得到各离散单元的坐标。FMM-IBEM详细的传输过程如图2所示。其中, x_l, y_l 表示叶子细胞中心点, x_f, y_f 表示父细胞中心点。

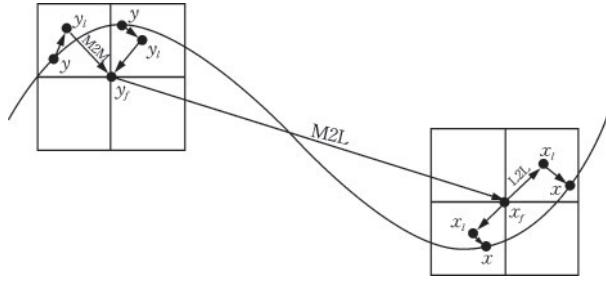


图2 快速多极算法原理图

Fig.2 Schematic diagram of fast multipole method principle

将源点 y 的信息传递到叶子细胞上(最小正方形的中点 y_l),并且要满足 $|\overrightarrow{y_l y}| < |\overrightarrow{y_l x}|$,该过程称为多极展开。不同的核函数将采用不同的展开方式,本文采用 Graf 加法定理^[15]对格林函数中核函数 $H_0^{(2)}(\cdot)$ 进行多极展开,表达式为:

$$H_0^{(2)}(k_r) = \sum_{n=-p}^p O_{-n}(k_i, y_l x) I_n(k_i, y_l y) \quad (6)$$

$$O_{-n}(k_i, y_l x) = H_{-n}^{(2)}(k_i |y_l x|) e^{-in\phi} \quad (7)$$

$$I_n(k_i, y_l y) = J_n(k_i |y_l y|) e^{in\varphi} \quad (8)$$

式中, $J_n(\cdot)$ 为第一类贝塞尔函数; ϕ, φ 分别为向量与 x 正方向的夹角(图3); p 为截断数,其经验公

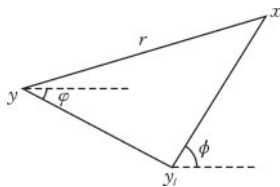


图3 Graf加法定理平面参数

Fig.3 Plane parameters of Graf's addition theorem

式为:

$$p = kL + c \lg(kL + \pi) \quad (9)$$

式中, L 为叶子或父细胞边长; c 为精度控制参数。

将式(6)代入式(1)可得积分式的多极展开,表达式为:

$$\int_S \varphi_j(y) G_{ij}(x, y) dS_y = \frac{1}{4\pi\mu} \sum_{n=-p}^p M_n(k, yy_l) N_{ij}^{O,k}(y_l x) + M_n(h, yy_l) N_{ij}^{O,h}(y_l x) \quad (10)$$

$$N_{ij}^{O,k}(y_l x) = \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2 C_n(k, y_l x)}{\partial x_i \partial x_j} + \delta_{ij} C_n(k, y_l x) \quad (11)$$

$$N_{ij}^{O,h}(y_l x) = -\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2 C_n(h, y_l x)}{\partial x_i \partial x_j} \quad (12)$$

式中, C_n 为 O_n 或 I_n , $M_n(q, yy_l)$ 称为关于点 y_l 的多极展开系数,即:

$$M_n(q, yy_l) = \int_S \varphi_j(y) I_n(q, yy_l) dS_y \quad (13)$$

从式(10)可以看出基本解已被分离成 x 和 y 独立的两部分,从而多极展开系数只需计算一次便可重复用于计算不同场点 x 。由关系式(4),积分式(2)可展开为:

$$\int_S \varphi_j(y) T_{ij}(x, y) dS_y = \frac{1}{4\pi\mu} \sum_{n=-p}^p \sum_{q=h,k} M_n(q, yy_l) \times \left[\lambda \left(\frac{\partial N_{1j}^{O,q}}{\partial x_1} + \frac{\partial N_{2j}^{O,q}}{\partial x_2} \right) n_1 + \mu \left(\frac{\partial N_{ij}^{O,q}}{\partial x_1} + \frac{\partial N_{ij}^{O,q}}{\partial x_i} \right) n_1 + \mu \left(\frac{\partial N_{ij}^{O,q}}{\partial x_2} + \frac{\partial N_{2j}^{O,q}}{\partial x_i} \right) n_2 \right] \quad (14)$$

式中, $N_{ij}^{O,q} = N_{ij}^{O,q}(y_l x)$,见式(11)、(12)。将点 y_l 移动到附近新的一点 y_f ,则式(13)可展开为:

$$M_n(q, yy_f) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} I_{n-l}(q, y_l y_f) M_l(q, yy_f) \quad (15)$$

式(15)即为多极展开系数传递式(M2M)。进而可逐一得到各层结点的多极展开系数。运用多极展开能够快速计算积分式(1)、(2)。为了更有效地计算积分式,可在快速多极中引入局部展开。如图2所示,设定一点 x_f 靠近场点 x ,且满足 $|\overrightarrow{x_f x}| < |\overrightarrow{x_f y}|$,对式(10)进行如下局部展开:

$$\int_S \varphi_j(y) G_{ij}(x, y) dS_y = \frac{1}{4\pi\mu} \sum_{n=-p}^p \sum_{l=-\infty}^{\infty} \left[L_n^l(k, yx_f) N_{ij}^{l,k}(x_f x) + \right]$$

$$L'_n(h, yx_f) N_{ij}^{l,h}(y_f, x) \quad (16)$$

$$L'_n(q, yx_f) = O_{n-l}(q, y_f, x_f) M_n(q, yy_f) \quad (17)$$

上式给出了多极展开向局部展开的传递关系(M2L)。同理可得:

$$\int_S \varphi_j(y) T_{ij}(x, y) dS_y = \frac{1}{4\pi\mu} \sum_{n=-p}^p \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{q=h,k} L'_n(q, yy_f) \times \left[\lambda \left(\frac{\partial N_{ij}^{l,q}}{\partial x_1} + \frac{\partial N_{2j}^{l,q}}{\partial x_2} \right) n_i + \mu \left(\frac{\partial N_{ij}^{l,q}}{\partial x_1} + \frac{\partial N_{ij}^{l,q}}{\partial x_i} \right) n_1 + \mu \left(\frac{\partial N_{ij}^{l,q}}{\partial x_2} + \frac{\partial N_{ij}^{l,q}}{\partial x_i} \right) n_2 \right] \quad (18)$$

式中, $N_{ij}^{l,q} = N_{ij}^{l,q}(x_f, x)$, 为式(11)、(12)所表达。将点 x_f 移动到附近新的一点 x_l , 则 $L(x, x_f)$ 可展开为:

$$L'_m(x_l) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} I_{l-m}(x_f, x_l) L'_n(x_f) \quad (19)$$

上式即为多极展开系数传递式(L2L)。在计算过程中, 采用GMRES进行迭代求解运算, 求得边界单元上施加的虚拟均布荷载密度, 即可利用式(1)、(2)求得空间域内任意一点散射场位移和应力频域解, 通过傅里叶逆变换可进一步获得时域结果。

1.2.3 运动学震源模型

断层错动激发地震的模型建立较复杂, 描述震源特性的断层模型主要分为两类: 动力学震源模型和运动学震源模型。与动力学震源模型相比, 运动学震源模型不需考虑上下盘断层面之间的摩擦本构关系便可实现近断层地震动数值模拟, 直接在离散的断层节点给出每一离散时刻的节点运动(位移、速度和加速度)作为输入荷载。本文采用Haskell在1964年首次提出运动学震源模型^[16], 其表达式为:

$$D(t) = D_{\infty} G(t - d_l/v) \quad (20)$$

$$G(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t/T & 0 \leq t \leq T \\ 1 & t > T \end{cases} \quad (21)$$

式中, d_l 为断层单元与震源点的距离; $D(t)$ 为在 t 时刻、距震源点 d_l 处断层单元的错动值; D_{∞} 为断层上、下盘的最终错动量; T 为上升时间; v 为断层破裂速度。

频域内, 各子断层破裂的时间差通过相应的相位差来实现。为了弥补高频缺陷, 通过生成均值为

0、方差为1的高斯白噪声, 并考虑一定的衰减系数, 近似表达由初始位移引起的自由振动 $G_0(t)$, 最终断层滑移函数表示为:

$$d(t) = D_{\infty} (G(t - d_l/v) + G_0(t)) \quad (22)$$

1.3 基于FEM的衬砌隧道及周围场地域动力响应模拟

1.3.1 有限元模型建立

如图4所示, 从二维弹性半空间截取有限范围土体, 建立衬砌隧道及周围场地域有限元模型, 土体和衬砌均采用四节点平面应变单元。

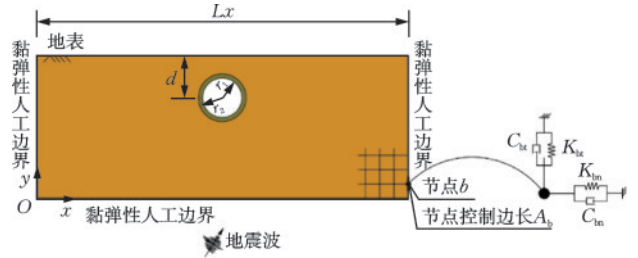


图4 地震波入射下的衬砌隧道模型

Fig.4 Lined tunnel model under seismic wave incidence

1.3.2 黏弹性人工边界及地震动输入

有限域数值模型中通常采用人工边界来吸收散射波的能量, 本文采用黏弹性人工边界, 通过在截断边界的节点 b 处建立并联的弹簧和阻尼器(图4), 有限元模型中采用弹簧和阻尼器单元实现。

对于给定的边界节点, 弹簧和阻尼器的参数为^[17]:

$$\left. \begin{aligned} K_{bt} &= \alpha_t \frac{G}{R} \times A_b, & C_{bt} &= \rho c_{s1} \times A_b \\ K_{bn} &= \alpha_n \frac{G}{R} \times A_b, & C_{bn} &= \rho c_{p1} \times A_b \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

式中, K_{bt} , K_{bn} 分别为切向弹簧和法向弹簧的弹性系数; C_{bt} , C_{bn} 分别为切向阻尼器和法向阻尼器的黏滞阻尼系数; G 为介质的剪切模量; c_{s1} , c_{p1} 分别为介质的横波波速和纵波波速; ρ 为介质的质量密度; R 为波源到人工边界点的距离; A_b 为边界节点的控制边长; α_t , α_n 分别为黏弹性边界的切向和法向修正系数, 二维情况下, $\alpha_t = 0.5$, $\alpha_n = 1$ 。

黏弹性人工边界中自由场由已知的人射波和边界产生的反射波共同组成, 而达到边界的反射波由黏弹性人工边界吸收, 倾滑断层破裂产生的能量传递至场地域边界为水平和竖向地震动, 通过等效节点力法输入。本研究采用等效节点力法, 通过将

地震动转化为人工边界上的等效节点力来实现地震动的输入。

模型底边界($y=0$),等效节点力表示为:

$$\begin{cases} F_{bx} = A_b [K_{bt} u_b + C_{bt} \dot{u}_b - \tau_{bx}] \\ F_{by} = A_b [K_{bn} v_b + C_{bn} \dot{v}_b - \sigma_{by}] \end{cases} \quad (24)$$

模型左边界($x=0$)和右边界($x=L_x$),等效节点力表示为:

$$\begin{cases} F_{bx} = A_b [K_{bn} u_b + C_{bn} \dot{u}_b \mp \sigma_{bx}] \\ F_{by} = A_b [K_{bt} v_b + C_{bt} \dot{v}_b \mp \tau_{bx}] \end{cases} \quad (25)$$

式中, u_b 和 v_b 为节点处自由场位移; \dot{u}_b 和 \dot{v}_b 为节点处自由场速度; τ_{bx} 、 σ_{bx} 和 σ_{by} 为节点处自由场应力。

2 方法精度与效率验证

为了检验FMM-IBEM模拟断层错动的计算精度,参考解析文献相同的计算模型及参数,将本文方法求解结果与H. F. Kara等^[18]给出的解析解结果进行对比(图5)。两组结果数据吻合良好,证明了FMM-IBEM模拟断层破裂过程的准确性。

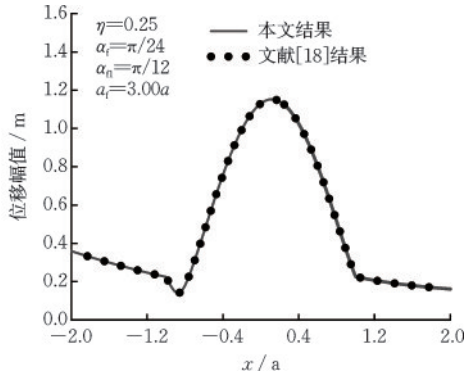


图5 FMM-IBEM结果精度验证

Fig.5 Accuracy verification of FMM-IBEM results

此外,针对图1所示模型,半空间剪切波速 c_{s1} 取 1 200 m/s,密度 ρ_1 取 2 000 kg/m³,断层倾角 θ 为 60°,断层错动量为 1 m,分别运用FMM-IBEM方法和传统IBEM方法求解了不同离散自由度模型计算时间和内存(图6)。从图6可以看出,与传统IBEM方法相比,FMM-IBEM方法计算成本显著降低。当自由度为 28 800 时,IBEM方法的CPU计算时间为 18 853 s(约 5.2 h),占用内存为 38 GB。而在相同情况下,FMM-IBEM方法的计算时间仅为 1 454 s,内存仅需 2.6 GB。

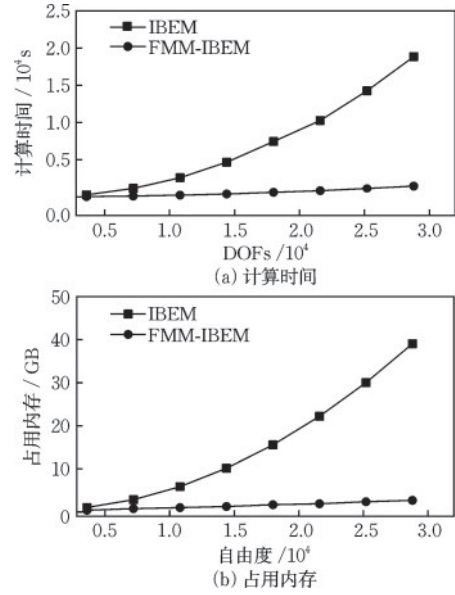


图6 FMM-IBEM和传统IBEM方法计算成本对比

Fig.6 Comparison of computational cost between FMM-IBEM and traditional IBEM

3 算例

本节针对图1所示模型,开展倾滑断层场地中衬砌隧道地震动力响应研究。将倾滑断层运动所激发的水平和竖向地震分量分别输入模型,考察水平、竖向地震分量作用下断层距和断层倾角对衬砌隧道地震响应的影响。地震作用下,衬砌隧道受到周围土体的挤压和摩擦作用而产生变形受力,应力分布可反映隧道的地震响应特征,因此,本节以应力为响应指标进行参数分析。

具体参数取值如下:震源深度为 $h=7$ km,断层长为 10 km(两侧各破裂 $a_1=a_2=5$ km),断层破裂速度为 $v=2\ 400$ m/s,断层两侧有一个平面内的恒定错动 $d_0=1$ m。有限元模型的计算区域为 100 m × 50 m,隧道内壁 $r_1=5$ m,外壁 $r_2=5.5$ m,埋深 $d=10$ m。基岩半空间泊松比 $\nu_1=0.3$,阻尼比 $\zeta_1=0.02$,剪切波速 $c_{s1}=1\ 200$ m/s,密度 $\rho_1=2\ 000$ kg/m³;衬砌隧道泊松比 $\nu=0.3$,阻尼比 $\zeta=0.02$,剪切波速 $c_s=2\ 400$ m/s,密度 $\rho=2\ 500$ kg/m³。设断层倾角为 θ ,地表任一观测点B的断层距为 l (图1)。

3.1 不同断层距下近倾滑断层衬砌隧道地震动力响应对比

本节分析不同断层距下近倾滑断层衬砌隧道地震响应,断层倾角 θ 为 60°,断层距 l 分别取 0、2 000、4 000 和 6 000 m。

3.1.1 近断层地震水平分量作用下断层距对隧道地震响应的影响分析

图7给出了倾滑断层破裂产生的水平向地震作用下不同断层距对应的隧道环向应力峰值。从图7可以看出,不同断层距下衬砌隧道环向应力峰值曲线分布趋势基本一致,衬砌隧道内壁环向应力峰值的最大值主要出现在拱脚,外壁环向应力峰值的最大值主要出现在拱肩。由于隧道内壁环向应力峰值远大于外壁,这里重点分析内壁。对于隧道内壁拱脚,与断层距 $l=0$ m (1.49 MPa)相比, l 为2 000 m (0.69 MPa)、4 000 m (0.46 MPa)、6 000 m (0.51 MPa)对应的隧道环向应力峰值分别降低54%、69%和66%。结果表明,随着断层距的增加,衬砌隧道的环向应力峰值逐渐减小,当断层距大于4 000 m后,隧道环向应力峰值变化有限。

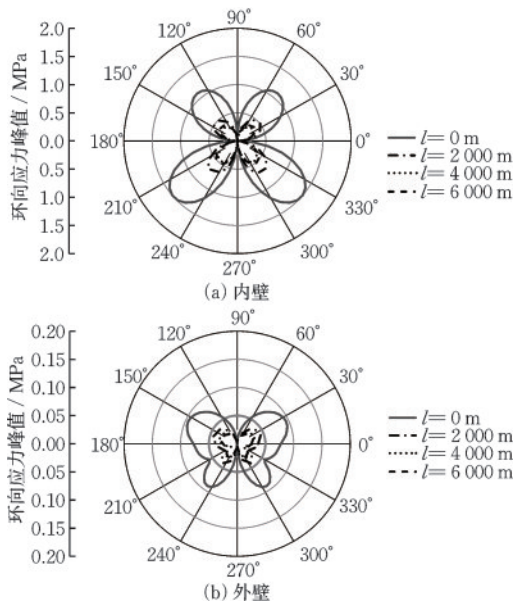


图7 近断层地震水平分量作用下隧道环向应力峰值(不同断层距 l)

Fig.7 Peak value of tunnel circumferential stress under horizontal component of near-fault ground motions(at different fault distances l)

图8给出了断层距对地震水平分量作用下隧道内壁拱肩、拱脚环向应力响应的影响。从图8可以看出,随着断层距的增加,环向应力曲线的振荡逐渐减弱,峰值逐渐减小,应力达到峰值点的时间有所延迟,且不同断层距下隧道拱肩和拱脚的环向应力达到峰值点的时间相同。当 $l=0$ m时,拱肩和拱脚的环向应力均在4.32 s处和5.32 s处达到峰值,拱肩峰值分别为1.09 MPa(受压)和1.49 MPa(受拉),拱脚峰值分别为0.76 MPa(受拉)和1.01 MPa(受压),表现出明显的双向大脉冲特性。

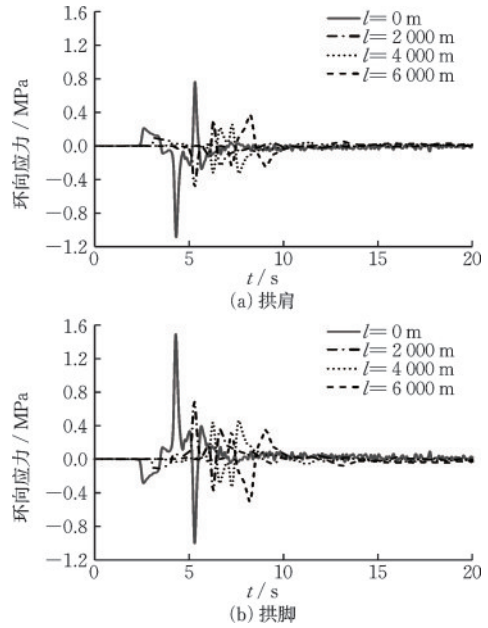


图8 近断层地震水平分量作用下隧道拱肩、拱脚环向应力响应时程(不同断层距 l)

Fig.8 Time histories of circumferential stress response of tunnel spandrel and arch foot under horizontal component of near-fault ground motions(at different fault distances l)

3.1.2 近断层地震竖向分量作用下断层距对隧道地震响应的影响分析

图9给出了竖向地震作用下不同断层距对应的

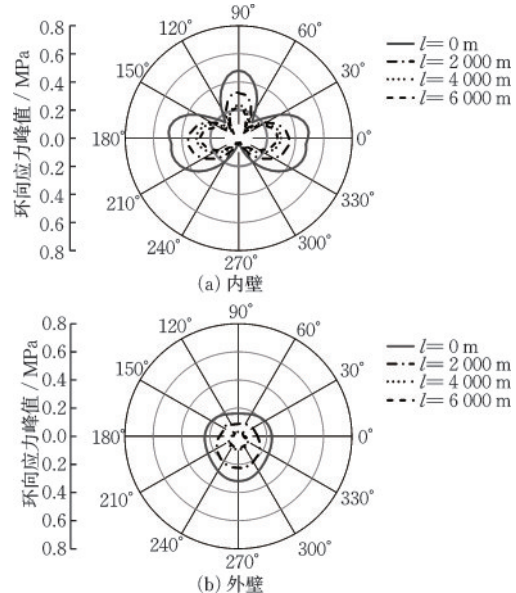


图9 近断层地震竖向分量作用下隧道环向应力峰值(不同断层距 l)

Fig.9 Peak value of tunnel circumferential stress under vertical component of near-fault ground motions(at different fault distances l)

隧道环向应力峰值。由图9可知,地震竖向分量作用下,环向应力峰值小于地震水平分量作用下的环向应力峰值,内壁环向应力峰值最大值主要出现在左右拱腰和拱顶处,外壁环向应力峰值最大值主要出现在拱底,近断层地震竖向分量同样具有较大的破坏性。与图7相比,水平向地震作用下内外壁应力相差一个数量级,而竖向地震作用下内外壁应力相差较小。

图10给出了断层距对地震竖向分量下隧道拱顶、拱腰内壁环向应力响应的影响。从图10可以看出,地震竖向分量作用下,拱顶环向应力略小于拱腰,且在隧道拱腰、拱顶均出现了残余应力,此特征与地震水平分量作用下结果不同。随着断层距的增加,隧道拱顶、拱腰环向应力响应逐渐减小,环向应力峰值、残余应力均逐渐减小,但达到峰值点所需时间增加。当断层距 $l=0$ m时,拱腰环向应力在5.28 s处达到峰值0.49 MPa。相比于 $l=0$ m, $l=2\ 000$ 、 $4\ 000$ 、 $6\ 000$ m时隧道拱腰环向应力峰值分别降低27% (5.38 s, 0.36 MPa), 39% (6.70 s, 0.30 MPa)和45% (8.20 s, 0.27 MPa)。

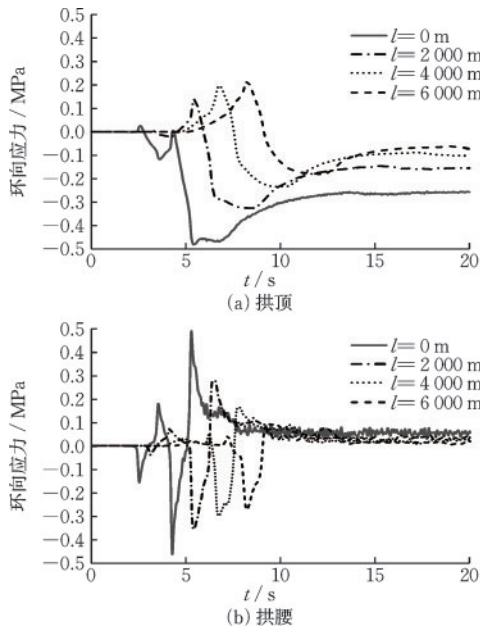


图10 近断层地震竖向分量作用下隧道拱顶、拱腰环向应力响应(不同断层距 l)

Fig.10 Circumferential stress response of tunnel crown and haunch under vertical component of near-fault ground motions (at different fault distances l)

3.2 不同断层倾角下近倾滑断层衬砌隧道地震动力响应对比

本节分析了断层倾角对近倾滑断层衬砌隧道

地震响应的影响,断层距 l 为2 000 m,断层倾角 θ 分别取为 30° 、 45° 、 60° 和 90° 。

3.2.1 近断层地震水平分量作用下断层倾角对隧道地震响应的影响分析

图11给出了水平向地震作用下不同断层倾角对应的隧道环向应力峰值。由图11可知,隧道内壁地震动力响应明显大于外壁(本节重点分析隧道内壁)。地震波传播方向显著影响衬砌隧道地震响应,且表现出非单调变化特征,整体来看,当倾角大于 45° 时,隧道动力响应随着断层倾角的增大而增大;当倾角小于 45° 时,隧道动力响应随着断层倾角的增大而减小。

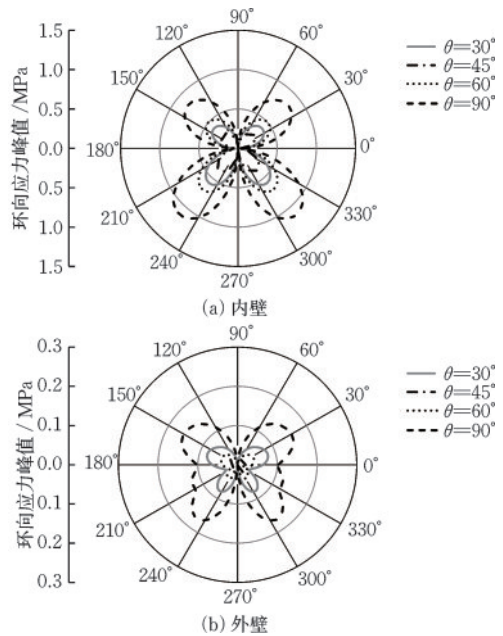


图11 近断层地震水平分量作用下隧道环向应力峰值(不同断层倾角 θ)

Fig.11 Peak value of tunnel circumferential stress under horizontal component of near-fault ground motions (at different fault dip angles θ)

3.2.2 近断层地震竖向分量作用下断层倾角对隧道地震响应的影响分析

图12给出了竖向地震作用下不同断层倾角对应的隧道环向应力峰值。由图12可知,整体来看, 90° 断层下衬砌隧道动力响应最大,此结论与水平地震作用下结果一致。不同倾角下隧道拱腰环向应力峰值关系为: 90° 断层 $>$ 30° 断层 $>$ 60° 断层 $>$ 45° 断层;隧道拱顶的环向应力峰值关系为: 90° 断层 $>$ 60° 断层 $>$ 30° 断层 $>$ 45° 断层。地震竖向分量作用下不同断层倾角对应的隧道外壁环向应力峰值最

大值分别为地震水平分量作用下的1.06倍(30°断层)、3.56倍(45°断层)、1.82倍(60°断层)和0.8倍(90°断层),结果表明:断层倾角是控制衬砌隧道地震响应的一个关键参数,这主要归因于近断层地震动中竖向效应与破裂方向性效应的共同作用。随着断层倾角的变化,隧道地震响应的最大值可能出现在结构的不同部位,因此在抗震设计中需充分考虑断层倾角的影响。

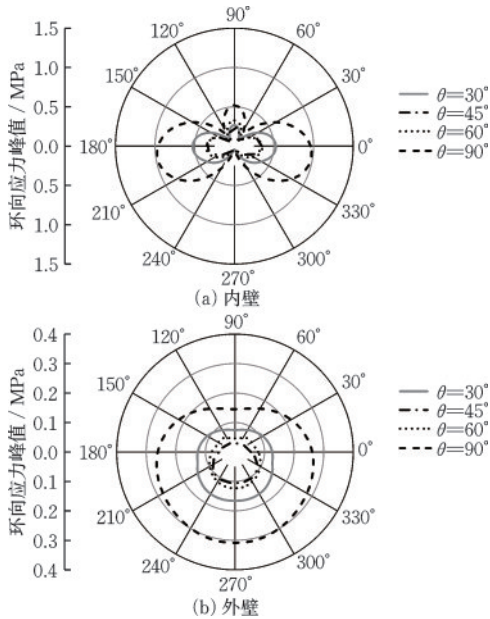


图12 近断层地震竖向分量作用下隧道环向应力峰值(不同断层倾角 θ)

Fig.12 Peak value of tunnel circumferential stress under vertical component of near-fault ground motions (at different fault dip angles θ)

4 结 论

采用FMM-IBEM-FEM混合法开展倾滑断层上盘场地中衬砌隧道的动应力响应模拟,以隧道环向应力为响应指标,定量分析了断层距和断层倾角对近倾滑断层衬砌隧道地震响应的影响。具体结论如下:

(1)水平向地震动作用下衬砌隧道环向应力的峰值主要出现在拱肩和拱脚,地震竖向分量作用下衬砌隧道环向应力峰值主要出现在拱腰和拱顶。近倾滑断层地震竖向分量作用同样引起隧道产生较大地震响应,并导致隧道拱腰出现环向残余应力。近倾滑断层隧道抗震设计时,需同时考虑水平和竖向地震分量作用。

(2)隧道内外壁不同位置环向应力变化趋势相似,但内壁的动力响应明显大于外壁,尤其是水平向地震作用下,隧道内壁环向应力大于外壁结果一个数量级,抗震设计时要重点考虑内壁,对内壁进行加固。

(3)随着断层距减小,衬砌隧道动应力响应加剧,所研究算例中,当断层距为0 m和2 000 m时,地震水平分量作用下隧道拱脚内壁应力相差54%,但断层距继续增大,隧道环向应力降低不明显。在衬砌隧道的选线设计中,需重点考虑断层距因素。90°倾角倾滑断层破裂产生的地震动对衬砌隧道影响最为显著,随着断层倾角的减小,衬砌的动力响应逐渐减小,但需特别注意小于45°的倾滑断层。

参考文献:

[1] 王瑞民, 罗奇峰. 阪神地震中地下结构和隧道的破坏现象浅析[J]. 灾害学, 1998(2): 63-66.
Wang R M, Luo Q F. Analysis on the destruction of underground structures and tunnels in the Kobe earthquake [J]. Disaster Science, 1998 (2): 63-66. (in Chinese)

[2] Wang W L, Wang T T, Su J J, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake[J]. Tunnelling and underground space technology, 2001, 16(3): 133-150.

[3] Yu H, Chen J, Bobet A, et al. Damage observation and assessment of the Longxi tunnel during the Wenchuan earthquake[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 54: 102-116.

[4] 党志颖, 曹泽林, 王可意, 等. 2023年2月6日土耳其MW7.8和MW7.5地震序列近断层速度脉冲变化特征及震源影响分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(2): 338-348.
Dang Z Y, Cao Z L, Wang K Y, et al. Analysis of near fault velocity pulse variation characteristics and source influence of Turkey MW7.8 and MW7.5 earthquake sequences on February 6, 2023 [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2025, 45(2): 338-348. (in Chinese)

[5] 赵旭, 袁昀, 黎若寒, 等. 山岭隧道衬砌-减震层体系动力响应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(2): 343-352.
Zhao X, Yuan Y, Li R H, et al. Research on dynamic response of lining damping layer system in mountain tunnel [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(2): 343-352. (in Chinese)

- [6] 刘启方,袁一凡,金星,等.近断层地震动的基本特征[J].地震工程与工程振动,2006,26(1):1-10.
Liu Q F, Yuan Y F, Jin X, et al. Basic characteristics of near fault ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 1-10. (in Chinese)
- [7] 陈智勇,苏国韶,黄小华,等.近场动力学研究进展与岩石破裂过程模拟[J].固体力学学报,2019,40(4):354-371.
Chen Z Y, Su G S, Huang X H, et al. Research progress in near-field dynamics and simulation of rock fracture process[J]. Journal of Solid Mechanics, 2019, 40(4): 354-371. (in Chinese)
- [8] 吴明,彭建兵,贺凯,等.地铁隧道受平行向地裂缝错动影响数值分析[J].工程地质学报,2015,23(5):1020-1029.
Wu M, Peng J B, He K, et al. Numerical analysis of subway tunnel affected by dislocation of parallel ground fissures[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 1020-1029. (in Chinese)
- [9] 陈之毅,赵耀.活动逆断层错动引起的隧道响应分析[C]//2019年全国工程地质学术年会论文集.上海:同济大学,2019:113-118.
Chen Z Y, Zhao Y. Analysis of tunnel response caused by dislocation of active reverse fault [C]//Proceedings of the 2019 National Annual Conference of Engineering Geology. Shanghai: Tongji University, 2019: 113-118. (in Chinese)
- [10] 王杰,盛俭,赵梦丹,等.康西瓦断裂错动对近断层隧道影响的数值模拟分析[J].地震工程与工程振动,2022,42(3):235-242.
Wang J, Sheng J, Zhao M D, et al. Numerical simulation analysis of the influence of Kangxiwa fault dislocation on near fault tunnels[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2022, 42(3): 235-242. (in Chinese)
- [11] 黄胜.高烈度地震下隧道破坏机制及抗震研究[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2010.
Huang S. Research on tunnel failure mechanism and earthquake resistance under high intensity earthquake [D]. Wuhan: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Geotechnical Mechanics), 2010. (in Chinese)
- [12] 梅贤丞,崔臻,盛谦.近断层/远场地震动作用下隧道结构易损性研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(2):344-354.
Mei X C, Cui Z, Sheng Q. Study on vulnerability of tunnel structure under near fault/far field seismic action [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 344-354. (in Chinese)
- [13] 朱星宇,谭富圣,王海彦,等.近断层地震动作用下地铁隧道动力响应分析[J].铁道建筑,2021,61(6):54-58.
Zhu X Y, Tan F S, Wang H Y, et al. Dynamic response analysis of subway tunnel under near fault ground motion[J]. Railway Building, 2021, 61(6): 54-58. (in Chinese)
- [14] 崔臻,盛谦,冷先伦,等.近断层地震动对大型地下洞室群地震响应的研究[J].岩土力学,2013,34(11):3213-3220,3228.
Cui Z, Sheng Q, Leng X L, et al. Study on the influence of near-fault ground motions on the seismic response of large underground caverns[J]. Geotechnical Mechanics, 2013, 34(11): 3213-3220, 3228. (in Chinese)
- [15] Sakuma T, Yasuda Y. Fast multipole boundary element method for large-scale steady-state sound field analysis. Part I: setup and validation[J]. Acta Acustica united with Acustica, 2002, 88(4): 513-525.
- [16] Haskell N A. Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1964, 54(6A): 1811-1841.
- [17] 刘晶波,杜义欣,闫秋实.粘弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[C]//第三届全国防震减灾工程学术研讨会论文集.北京:清华大学,2007:43-48.
Liu J B, Du Y X, Yan Q S. Implementation of visco-elastic artificial boundary and ground motion input in general finite element software[C]//Proceedings of the Third National Symposium on Earthquake Prevention and Disaster Reduction Engineering Department of Civil Engineering. Beijing: Tsinghua University, 2007: 43-48. (in Chinese)
- [18] Kara H F, Trifunac M D. Two-dimensional earthquake vibrations in sedimentary basins-SH waves[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 63: 69-82.
(本文编辑:赵霞)