

半平面问题远域辐射阻尼的时域边界元法 模拟研究

张梅¹, 唐波^{1,2}, 李宏军^{*1}, 郝文秀¹, 龚海天³

(1. 河北农业大学 城乡建设学院, 保定 071001; 2. 上海强劲地基工程股份有限公司, 上海 200233;

3. 新加坡清水建设株式会社, 新加坡 339509)

摘要: 辐射阻尼在岩石基坑爆破开挖、边坡稳定、结构抗震以及结构-地基动力相互作用等实际工程问题中具有重要意义。为了模拟半平面问题的远域辐射阻尼, 以时域边界元法(TD-BEM)理论为基础, 根据应力波在弹性介质中的传播特性, 在时域内提出了一种新的单元, 即自适应半无限边界单元, 专门用于离散远域半无限边界。该单元外侧节点是一个始终处于应力波波前位置的动态节点, 保证计算区域在任何情况下都恰好包含应力波的影响范围, 从而模拟远域辐射阻尼。最后, 分别采用近场和远场动力荷载作用下的弹性半平面算例进行验证, 并将结果与有限元法FEM和常规TD-BEM结果进行综合对比。结果表明, 采用自适应半无限单元的TD-BEM满足半无限域的辐射条件, 较好地解决了远域辐射阻尼的模拟问题, 且在计算时间成本与常规TD-BEM几乎相同的前提下, 具有更高的计算精度。

关键词: 辐射阻尼; 自适应半无限边界单元; 时域边界元法; 半平面问题; 应力波

中图分类号: O343.1; O242.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2021)02-0173-07

1 引言

当无限及半无限域受到动力荷载作用时, 应力波向远域介质传播, 能量发生逸散, 形成辐射阻尼。辐射阻尼对受力体的动力响应具有重要影响, 甚至较之受力体本身阻尼更为重要^[1], 但半无限域问题中远域辐射条件较难满足, 致使远域辐射阻尼的模拟尚没有较为完善的方案。实际工程中诸如岩石基坑爆破开挖、边坡稳定、结构抗震以及结构-地基动力相互作用^[2]等问题均会涉及到远域辐射阻尼。

目前处理远域辐射阻尼的方法主要有有限元法与边界元法。由于实际问题应力波的传播距离是有限的, 无论采用哪种数值方法, 都可以通过截取足够大区域(完全包含应力波的影响范围)进行计算, 从而避免辐射阻尼的处理, 其操作方法简单, 但是离散单元多, 计算量较大, 对于不同时间需求的问题往往需要多次改变模型, 计算繁复。对于有限元法, 若截取区域较小(未完全包含应力波的影响范围), 需要设置人工边界^[3]或直接采用比例边

界有限元法^[4,5], 以考虑远域辐射阻尼的影响。人工边界的引入可以很好地模拟各种无限域的辐射阻尼, 但也存在缺点, 即低阶边界精度低和高阶边界稳定性较差^[6]; 比例边界元法兼具有限元法和边界元法的优点, 是处理远域辐射阻尼的一种较为理想的方法, 但由于需要确定固定的比例中心, 在求解具有偏心域或平行侧边界的问题时较为困难。对于无限域问题, 采用全空间基本解的边界元法, 能够自动满足无穷远处的辐射条件, 目前国内外对于该问题的研究已经较为成熟^[7-10]。对于半无限域问题, 国内外学者通过采用基于半空间基本解的边界元法来满足无限长边界上的辐射条件, 并进行了较为深入的研究^[11-13], 然而动力学问题的半空间基本解较为复杂, 且边界不规则问题的基本解不易得到, 甚至不存在^[14,15], 使得该方法的通用性不强。在处理半无限域动力学问题时, 有较多学者采用基于较为成熟的全空间基本解的时域边界元法^[15,16], 但由于半无限边界的存在, 通常只能截取部分有限边界进行动力分析, 不能完全考虑辐射阻尼影响, 有些学者在边界离散的基础上采用无穷边界元模拟半无限边界^[15,17], 对半空间进行频域动力分析, 既保证了结果的准确性, 又提高了求解效率, 但该方法不能求解非线性问题, 且需要在频域和时域间多次转换, 计算繁复。综上, 目前国内外对于半无

收稿日期: 2020-03-29; 修改稿收到日期: 2020-08-13.

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究(QN2020135)

资助项目.

作者简介: 李宏军^{*} (1988-), 男, 硕士, 讲师

(E-mail: chjlhj@hebau.edu.cn).

限域辐射阻尼的模拟尚没有较为完善的方案。

本文以全空间基本解的 TD-BEM^[7-10]为基础,结合应力波的传播特性,在时域内提出了一种新的单元,即自适应半无限边界单元,专门用于离散远域半无限边界,以考虑远域辐射阻尼,近域边界及无限边界仍采用常规 TD-BEM 处理。该单元实质上是一个可随时间-空间参数自动调整单元大小的有限单元,因此,可以采用目前已经成熟的数值方法^[7,8]对该单元进行处理,理论上不具有困难。

2 半平面问题的时域边界积分方程

在分析半平面问题时,可将其边界划分为有限域边界 Γ_1 、无穷远边界 Γ_∞ 及一端延伸到无穷远处的半无限边界 Γ_2 和 Γ_3 ,如图 1 所示。由于 Γ_∞ 上的场点都位于无限远处,有限时间段内任意瞬时发出的应力波波前只能到达有限远处,对 Γ_∞ 上的场点无任何影响,因此在计算时无需考虑 Γ_∞ 。在初始条件为 0 和忽略体力的条件下,弹性动力学半无限平面问题的时域边界积分方程为

$$c_{ik} u_i(P, t) = \int_{\Gamma} \int_0^t u_{ik}^* p_k(Q, \tau) - p_{ik}^* u_k(Q, \tau) d\tau d\Gamma \quad (1)$$

式中 $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3$, c_{ik} 为与源点位置相关的系数^[9], t 和 τ 分别为计算时刻和应力波作用的时刻, $u_i(P, t)$ 为 t 时刻应力波源点 P 在 i 方向的位移, $u_k(Q, \tau)$ 和 $p_k(Q, \tau)$ 分别为 τ 时刻边界场点 Q 在 k 方向的位移和面力, u_{ik}^* 和 p_{ik}^* 分别为二维弹性动力学平面问题位移基本解和面力基本解,可分别表示为

$$u_{ik}^* = \frac{1}{2\pi\rho c_s} [(E_{ik} L_s + F_{ik}/L_s + J_{ik} L_s N_s) H_s - (c_s/c_d)(F_{ik}/L_d + J_{ik} L_d N_d) H_d] \quad (2)$$

$$p_{ik}^* = \frac{1}{2\pi\rho c_s} \left\{ A_{ik} \left[r L_s^3 H_s + L_s \frac{\partial H_s}{\partial(c_s \tau)} \right] + B_{ik} L_s N_s H_s + D_{ik} \left[r L_s^3 H_s + \frac{L_s N_s}{r^2} \frac{\partial H_s}{\partial(c_s \tau)} \right] - \frac{c_s}{c_d} D_{ik} \left[r L_d^3 H_d + \frac{L_d N_d}{r^2} \frac{\partial H_d}{\partial(c_d \tau)} \right] - \frac{c_s}{c_d} B_{ik} L_d N_d H_d \right\} \quad (3)$$

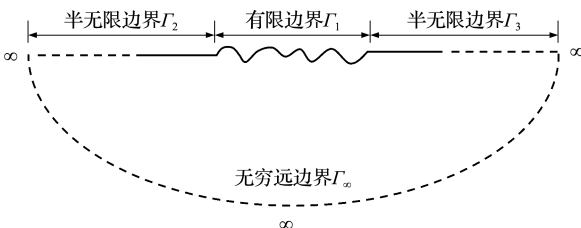


图 1 半无限平面边界

Fig. 1 Semi-infinite plane boundary

式中 $E_{ik} = \delta_{ik}$, $F_{ik} = \delta_{ik}/r^2$, $J_{ik} = -r_{,i} r_{,k}/r^2$

$$A_{ik} = \mu \left\{ \frac{\lambda}{\mu} r_{,i} n_{,k} + \delta_{ik} \frac{\partial r}{\partial \mathbf{n}} + r_{,i} n_{,k} \right\}$$

$$B_{ik} = -\frac{2\mu}{r^3} \left\{ \delta_{ik} \frac{\partial r}{\partial \mathbf{n}} + r_{,i} n_{,k} + r_{,k} n_{,i} - 4 \frac{\partial r}{\partial \mathbf{n}} r_{,i} r_{,k} \right\}$$

$$D_{ik} = -2\mu \left\{ \frac{\lambda}{2\mu} r_{,i} n_{,k} + \frac{\partial r}{\partial \mathbf{n}} r_{,i} r_{,k} \right\}$$

$$N_w = 2c_w^2 (t - \tau)^2 - r^2$$

$$L_w = [c_w^2 (t - \tau)^2 - r^2]^{-1/2}$$

$$H_w = H[c_w(t - \tau) - r]$$

式中 δ_{ik} 为克罗内克函数, μ 和 λ 为 Lamé 常数, ρ 为密度, r 为应力波作用源点 P 与边界场点 Q 之间的距离, $\mathbf{n}$ 为单元外法向量, $r_{,v} = \partial r / \partial x_v^Q$, $n_v = \partial x_v / \partial \mathbf{n}$, $v=1,2$, c_w 为应力波波速(w 取 s 和 d 时分别表示剪切波和压缩波), H 为单位阶跃函数。

3 远域边界的处理方法

有限时间段内的动力学问题,应力波传播距离亦为有限远,对于超过 Γ_1 范围的应力波,应考虑无限域的辐射阻尼,反之,始终处于 Γ_1 范围的应力波不需考虑此效应。实际工程中,涉及无限域的辐射阻尼问题较为常见,为了较好解决这一效应的模拟问题,本文将半无限边界 Γ_2 和 Γ_3 分别采用一个自适应半无限边界单元进行数值离散,半无限边界与有限边界公共点 A 和应力波的波前位置 B 分别作为自适应半无限边界单元的内外侧节点,构建自适应半无限边界单元,如图 2 所示, P 点为任意应力波源点, $c_d(t - \tau)$ 为 τ 时刻作用在源点 P 处的应力波在 t 时刻传播的最远距离。根据几何关系,节点 B 的坐标通式为

$$\begin{cases} x_1^B = x_1^P + \sqrt{c_d^2(t - \tau)^2 - (x_2^P - x_2^A)^2} \\ x_2^B = x_2^A \end{cases} \quad (4)$$

式中 x_1^i 和 x_2^i 分别为 i 节点的横坐标和纵坐标。

本文提出一种新的单元,即自适应半无限边界单元,专门用于离散远域半无限边界,该单元外侧节点 B 是一个始终处于应力波波前位置的动态节点,保证计算区域在任何情况下都恰好包含应力波的影响范围,从理论上为远域辐射阻尼的模拟提供保障。

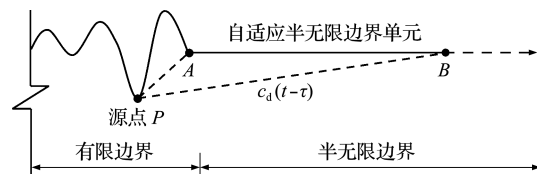


图 2 自适应半无限边界单元

Fig. 2 Adaptive semi-infinite boundary element

4 数值处理

首先将边界进行数值离散,再求出各单元的位移和面力影响系数,最后进行组装形成代数方程组并求解边界点位移。由于边界 Γ_1 为有限边界,其数值处理方法与常规 TD-BEM 的处理方法完全相同,不再赘述,本节着重介绍半无限边界单元的数值处理。

4.1 数值离散

空间上,根据应力波在弹性介质中的传播特性,将两侧的半无限边界转化为两个自适应半无限边界单元。假定面力和位移在半无限边界单元上线性变化,其插值函数表达式为

$$\begin{cases} N_1(\xi) = \frac{1}{2}(1 - \xi) \\ N_2(\xi) = \frac{1}{2}(1 + \xi) \end{cases} \quad (5)$$

式中 ξ 为自然坐标,取值范围为 $[-1, 1]$ 。

时间上,将时间域 $[0, t]$ 离散为 M 个步长为 $\Delta t = t/M$ 的时间单元。且令时间节点 $t_m = m\Delta t$, 其中 m 取值范围为 $0, 1, \dots, M$ 。假定在每一时间步上面力为常量,位移线性变化,对于任意时间单元,面力和位移的插值函数分别为

$$\phi^m = 1, \begin{cases} \Psi_1^m = (t_m - \tau)/\Delta t \\ \Psi_2^m = (\tau - t_{m-1})/\Delta t \end{cases} \quad (6, 7)$$

离散后,单元面力影响系数 g_{ik} 与位移影响系数 h_{ik} 表达式为

$$\begin{cases} g_{ik}^{(m, e, a)} = \int_{\Gamma_e} \int_{t_{m-1}}^{t_m} u_{ik}^* N_a d\tau d\Gamma \\ h_{ik}^{(m, b, e, a)} = \int_{\Gamma_e} \int_{t_{m-1}}^{t_m} p_{ik}^* y_b^m N_a d\tau d\Gamma \end{cases} \quad (8)$$

式中 $a, b = 1$ 或 2 。

4.2 影响系数的求解

通过数值离散,将边界积分方程的半无限边界部分转化为自适应半无限边界单元积分,积分中奇异性情况及求解方法如下。

(1) 无奇异性。采用高斯数值积分法计算。

(2) 波前奇异性。此时 $\tau \rightarrow t - r/c_w$, 奇异性的表现形式为 $L_w^n = [c_w^2(t - \tau)^2 - r^2]^{-n/2} \rightarrow \infty$ 。这类奇异性可通过计算奇异积分的 Hadamard 主值^[18]进行处理,可表示为

$$\int_0^t c_w r L_w^3 u_k H_w \Psi d\tau = \lim_{\tau \rightarrow t - r/c_w} \left\{ \int_0^\tau c_w r L_w^3 \Psi u_k d\tau - L_w \Psi u_k \right\} \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \int_0^t c_w r L_w^3 u_k H_w \Psi d\tau = \lim_{\tau \rightarrow t - r/c_w} \left\{ \int_0^\tau c_w \frac{\partial(r L_w^3)}{\partial r} u_k \Psi d\tau - 2r L_w^3 \Psi u_k + \frac{\Psi}{c_w} \left[L_w \frac{\partial u_k}{\partial \tau} + u_k \frac{\partial L_w}{\partial \tau} \right] \right\} \quad (10)$$

式中 $\int$ 表示 Hadamard 主值积分的计算符号。

(3) 空间奇异性。此时 $r \rightarrow 0$, 奇异性的表现形式为 $1/r^n \rightarrow \infty$ 。这类奇异性可通过考虑 P 波及 S 波的相互作用,将两种波对应的数学表达式进行代数求和,采用分子有理化的数学方法对奇异积分解析求解,可表示为

$$\begin{aligned} \frac{1}{r^2} (L_s^{-1} H_s - \frac{c_s}{c_d} L_d^{-1} H_d) &= \frac{1}{r^2} (L_s^{-1} - \frac{c_s}{c_d} L_d^{-1}) H(t - \tau) = \\ &= \frac{1}{r^2} \frac{c_d^2 L_s^{-2} - c_s^2 L_d^{-2}}{c_d^2 L_s^{-1} + c_s c_d L_d^{-1}} H(t - \tau) = \\ &= \left(1 - \frac{c_s^2}{c_d^2} \right) \frac{1}{2c_s(t - \tau)} H(t - \tau) \end{aligned} \quad (11)$$

(4) 双重奇异性。即同时具有波前和空间奇异性。这类奇异性需要在波前及空间奇异性处理的基础上,再通过空间上影响系数组装时,考虑变形协调条件联系奇异点两侧单元影响,将两侧单元相应表达式进行代数求和,即可解析互消。

按以上方法求解,可以得到各单元的影响系数。

4.3 组装

时间上组装。面力采用常量元进行离散,其影响系数 $g_{ik}^{(m)}$ 不需要对时间单元组装。而位移采用线性元离散,其影响系数 $h_{ik}^{(m)}$ 需要考虑所求时间节点 $\tau = t_m$ 前单元 $[t_{m-1}, t_m]$ 和后单元 $[t_m, t_{m+1}]$ 的影响,但 $\tau = t_m$ 时刻,仅取时间单元 $[t_{m-1}, t_m]$ 对 t_M 时间节点的位移影响系数。 $h_{ik}^{(m)}$ 组装可表示为

$$h_{ik}^{(m)} = \begin{cases} h_{ik}^{(m, 2)} + h_{ik}^{(m+1, 1)} & (m = 1 \sim M-1) \\ h_{ik}^{(m, 2)} & (m = M) \end{cases} \quad (12)$$

空间上组装。面力与位移均采用线性元,则面力影响系数 $g_{ik}^{(e)}$ 与位移影响系数 $h_{ik}^{(e)}$ 都需要进行组装。对于半无限边界单元与有限边界的公共节点(图2的A节点)的位移与面力影响系数需要考虑半无限边界单元及与其相邻有限边界单元的影响。而半无限边界单元最外侧节点(图2的B节点)的位移与面力均为0,因此无需对其影响系数进行计算和组装。设边界上共有 N_e 个单元(其中第1和 N_e 个单元为半无限边界单元),则影响系数组装表达式为

$$\begin{cases} g_{ik}^{(e)} = g_{ik}^{(e, 2)} + g_{ik}^{(e+1, 1)} \\ h_{ik}^{(e)} = h_{ik}^{(e, 2)} + h_{ik}^{(e+1, 1)} \end{cases} \quad (e = 2 \sim N_e - 1) \quad (13)$$

5 验证

5.1 算例描述

选取动力荷载作用下的半无限弹性地基算例进行分析,在该弹性地基上存在一条沿 y 轴方向较长的半圆柱形沟槽,沟槽半径 $r_0 = 1$ m;采用近场加载和远场加载两种加载方式,如图 3 所示。弹性半无限地基的材料参数如下,泊松比 $\nu = 0.25$,弹性模量 $E = 4 \times 10^{10}$ Pa,密度 $\rho = 3 \times 10^3$ kg/m³。径向动力荷载函数^[19]为 $p(t) = k p_0 (e^{-at} - e^{-bt})$,其中 $a = 1279/s$, $b = 12792/s$, $k = 1.435$, $p_0 = 100$ MPa,荷载与时间的关系如图 4 所示。计算时长为 0.012 s,则应力波的最大影响半径为 48 m。

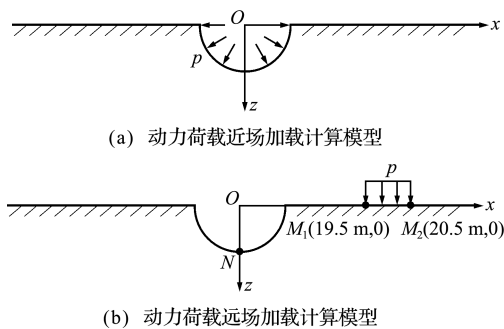


图 3 动力荷载作用下的弹性半平面计算模型
Fig. 3 Elastic half-plane computational model under dynamic loading

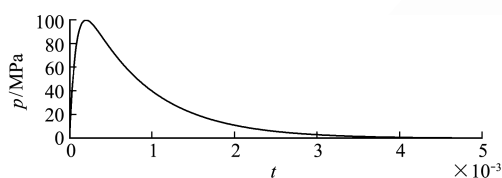


图 4 动力荷载函数图像
Fig. 4 Function graph of dynamic load

5.2 对比验证方案

采用 3 种方案对两种加载方式的算例进行求解,并将计算结果进行对比验证。

(1) 采用 FEM(ANSYS)计算,取距荷载 60 m 范围内的区域作为计算域,共离散了 44984 个 PLANE42 单元。

(2) 采用常规 TD-BEM 求解,取距原点 25 m 以内区域进行计算,共离散 500 个有限边界单元。

(3) 采用结合自适应半无限边界单元的时域边界元法求解(下称自适应 TD-BEM),与方案(2)相比,仅在有限边界两侧各添加了一个自适应半无限边界单元,其他处理保持不变。

此处需要说明,离散系数 $\beta^{[9]}$ ($\beta = c_d \Delta t / l_{\max}$, $l_{\max}$ 为最大单元长度)是影响 TD-BEM 计算精度的重要因素之一。对比半平面问题 $\beta = 0.5 \sim 3.0$ 时的计算结果,发现 $\beta = 1.5 \sim 2.5$ 时,较为理想。因此,方案(2,3)选取了 $\beta = 2$ 对有限域边界进行离散。

5.3 计算结果及讨论

近场加载选取地表 $r = 10$ m 和 20 m 处节点的位移响应进行比对,结果如图 5 和图 6 所示;远场加载选取沟槽底部 N 点进行比对,结果如图 7 所

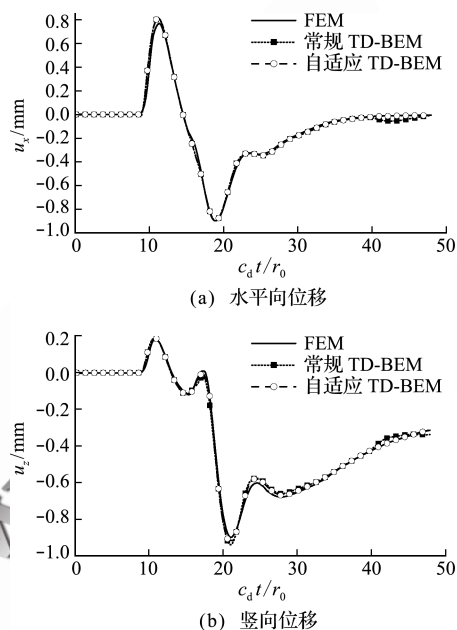


图 5 近场加载 $r = 10$ m 处计算结果
Fig. 5 Results at $r = 10$ m under near-field dynamic loading

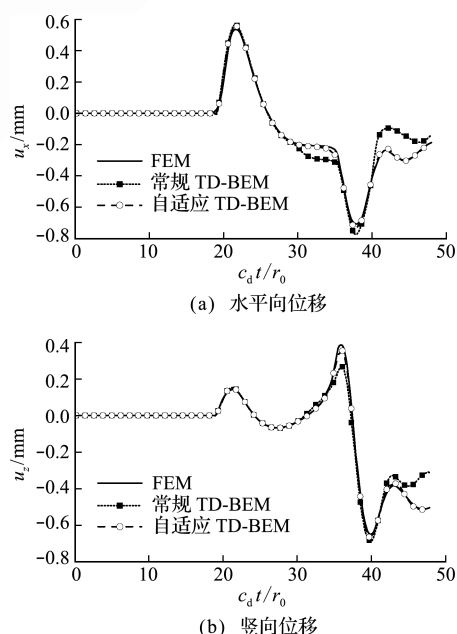


图 6 近场加载 $r = 20$ m 处计算结果
Fig. 6 Results at $r = 20$ m under near-field dynamic loading

示(注:图5~图7设置为每6个时间步显示一个结果点,并对横坐标时间变量进行了无量纲化处理)。

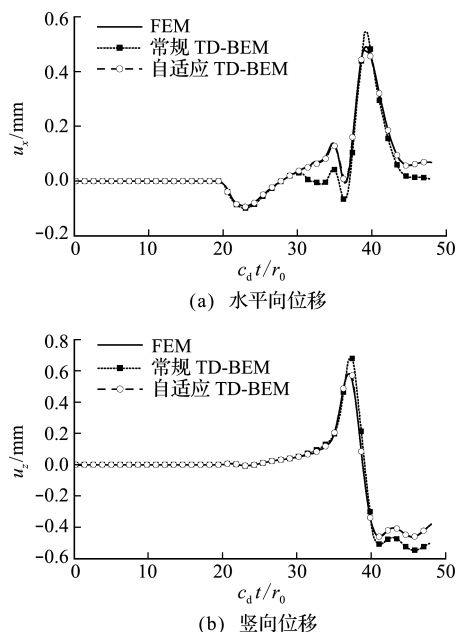


图7 远场加载节点N计算结果

Fig. 7 Results at node N under far-field dynamic loading

计算结果表明,常规 TD-BEM 由于仅截取了部分有限边界进行计算,不能考虑应力波在远域的辐射条件,应力波出现了回弹,近场入射 $r=10$ m 和 20 m 地表处以及远场入射的节点 N 处,分别在 $c_d t/r_0=40, 30$ 和 30 时,回弹应力波刚好到达计算点,节点在受到回弹应力波的影响后,其位移与 FEM 结果相比出现较大差异;而自适应 TD-BEM 得到的结果能够与 FEM 结果吻合良好,满足了应力波在半无限域上的辐射条件,较好地模拟了远域辐射阻尼效应。

如果想要通过常规 TD-BEM 得到更精确的结果,势必要扩大计算范围,离散更多的网格。而自适应 TD-BEM 仅在原有限边界的基础上添加两个自适应半无限边界单元,即可自动满足半无限域的辐射条件,在计算时间成本与常规 TD-BEM 几乎相同的情况下,得到了较高精度的计算结果。

6 结 论

本文根据应力波在弹性介质中的传播特性,将半无限边界转化为自适应半无限边界单元,该单元可根据具体的时间-空间参数自动调节单元大小,保证计算区域在任何情况下都恰好包含应力波的

影响范围,满足了应力波在半无限域上的辐射条件。采用自适应半无限边界单元的 TD-BEM 较好地解决了远域辐射阻尼的模拟问题,且在计算时间成本与常规 TD-BEM 几乎相同的前提下,具有更高的计算精度。

需要说明的是,本文以弹性动力学问题为切入点,重点研究远域辐射阻尼的模拟方法。对于非线性动力学问题,足够远域介质往往处于弹性阶段,因此,本文提出的基于 TD-BEM 的自适应半无限边界单元模拟远域辐射阻尼的方法和结论依然是适用的。对于近域非线性问题 TD-BEM 的详细介绍可参见文献[20,21]。

参考文献(References):

- [1] 廖振鹏,王 阜.论结构物的竖向地震输入[J].地震工程与工程振动,1983,3(2):74-88. (LIAO Zhen-peng, WANG Fu. Vertical seismic motion input to structures[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1983, 3(2): 74-88. (in Chinese))
- [2] 王峥峥,高 波.结构-地基系统静-动力联合分析模型[J].计算力学学报,2012,29(2):165-170. (WANG Zheng-zheng, GAO Bo. Unified model for static and dynamic analysis of structure-ground system[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, 29(2): 165-170. (in Chinese))
- [3] 杨正权,刘小生,董承山,等.土石坝动力分析人工边界处理方法[J].防灾减灾工程学报,2015,35(4):440-446. (YANG Zheng-quan, LIU Xiao-sheng, DONG Cheng-shan, et al. Artificial boundary processing method for dynamic analysis of earth-rock dam[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2015, 35(4): 440-446. (in Chinese))
- [4] Song C M, Wolf J P. The scaled boundary finite-element method—alias consistent infinitesimal finite-element cell method—for elastodynamics[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1997, 147(3-4): 329-355.
- [5] 李志远,李建波,林 皋.各向异性对半圆形河谷散射影响的数值分析[J].计算力学学报,2019,36(1): 117-123. (LI Zhi-yuan, LI Jian-bo, LIN Gao. Research of the influence of anisotropic media to the scattering of semi-circular canyon[J]. *Chinese Journal of Com-*

- putational Mechanics, 2019, **36**(1): 117-123. (in Chinese))
- [6] 雷晓燕, 徐斌, 徐满清. 半无限弹性空间中移动荷载动力响应的频域-波数域比例边界有限元法分析[J]. 振动工程学报, 2017, **30**(5): 798-805. (LEI Xiao-yan, XU Bin, XU Man-qing. Using the frequency-wave domain scaled boundary finite element method for the dynamic response of the elastic half space due to moving loads[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2017, **30**(5): 798-805. (in Chinese))
- [7] Lei W D, Li H J, Qin X F, et al. Dynamics-based analytical solutions to singular integrals for elastodynamics by time domain boundary element method[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, **56**: 612-625.
- [8] Lei W D, Ji D F, Li H J, et al. On an analytical method to solve singular integrals both in space and time for 2-D elastodynamics by TD-BEM[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, **39**(20): 6307-6318.
- [9] Mansur W J. A Time-Stepping Technique to Solve Wave Propagation Problems Using the Boundary Element Method[D]. University of Southampton, 1983.
- [10] Carrer J A M, Mansur W J. Stress and velocity in 2D transient elastodynamic analysis by the boundary element method[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 1999, **23**(3): 233-245.
- [11] Bode C, Hirschauer R, Savidis S A. Soil-structure interaction in the time domain using halfspace Green's functions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, **22**(4): 283-295.
- [12] 刘中宪, 梁建文, 张贺. 弹性半空间中衬砌隧道对瑞利波的散射[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(8): 1627-1637. (LIU Zhong-xian, LIANG Jian-wen, ZHANG He. Scattering of Rayleigh wave by a lined tunnel in elastic half-space[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(8): 1627-1637. (in Chinese))
- [13] 刘中宪, 琚鑫, 梁建文. 爆炸荷载作用下饱和半空间中衬砌隧道弹性动力响应 IBIEM 模拟[J]. 固体力学学报, 2018, **39**(5): 492-503. (LIU Zhong-xian, JU Xin, LIANG Jian-wen. IBIEM modeling of the elastic dynamic response of a lined tunnel under blast loading in a saturated poroelastic half-space[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2018, **39**(5): 492-503. (in Chinese))
- [14] 赵成刚, 张其浩. 边界元法在地震波动问题中的应用简介[J]. 世界地震工程, 1991(4): 31-38. (ZHAO Cheng-gang, ZHANG Qi-hao. Brief introduction of boundary element method in seismic wave problem[J]. *World Earthquake Engineering*, 1991(4): 31-38. (in Chinese))
- [15] 熊体凡, 钟伟芳. 近表面洞室对矢量波散射问题的边界元解[J]. 华中理工大学学报, 1998, **26**(4): 3-5. (XIONG Ti-fan, ZHONG Wei-fang. A BIE's solution to the problem about vector waves scattered by a cavity in half space[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1998, **26**(4): 3-5. (in Chinese))
- [16] 施景勋, 林建华. 重力坝与水、地基动力耦合系统地震反应的时域分析[J]. 工程力学, 1994, **11**(3): 99-108. (SHI Jing-xun, LIN Jian-hua. Earthquake response analysis of dam-reservoir-foundation dynamic coupling system in time domain[J]. *Engineering Mechanics*, 1994, **11**(3): 99-108. (in Chinese))
- [17] Zhang C H, Song C M, Pekau O A. Infinite boundary elements for dynamic problems of 3-D half space[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1991, **31**(3): 447-462.
- [18] Hadamard J. *Lectures on Cauchy's Problem in Linear Partial Differential Equations*[M]. New York: Dover Publications, 1952.
- [19] 雷卫东, 李宏军, 柳纯. 爆破荷载应力波在无限弹性介质中传播的特征线法解[J]. 岩土力学, 2016, **37**(10): 2979-2983, 3002. (LEI Wei-dong, LI Hong-jun, LIU Chun. Solution of blasting-induced stress wave propagation in an infinite elastic medium based on characteristics method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(10): 2979-2983, 3002. (in Chinese))
- [20] Israil A S M, Banerjee P K. Advanced development of boundary element method for two-dimensional dynamic elasto-plasticity[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1992, **29**(11): 1433-1451.
- [21] Banerjee P K, Raveendra S T. Advanced boundary element analysis of two-and three-dimensional problems of elasto-plasticity[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1986, **23**(6): 985-1002.

Simulation of the far-field radiation damping for half-plane problem by time domain boundary element method

ZHANG Mei¹, TANG Bo^{1,2}, LI Hong-jun^{*1}, HAO Wen-xiu¹, GONG Hai-tian³

(1. Urban and Rural Construction Institute, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China;

2. Shanghai Strong Foundation Engineering Co., Ltd., Shanghai 200233, China;

3. Shimizu Corporation Singapore, Singapore 339509, Singapore)

Abstract: The radiation damping is of great significance in practical engineering such as blasting excavation of rock foundation pit, slope stability, structural seismic and structure-ground dynamic interaction. In order to simulate the far-field radiation damping of the half-plane problem, a new kind of element, adaptive semi-infinite boundary element, is proposed in the time domain based on the theory of the time domain boundary element method (TD-BEM) and the propagation characteristics of stress wave in elastic medium, which is specially used for discrete far-field semi-infinite boundary. The outer node of the element is always in front of the stress wave, which ensures that the calculation field can exactly contain the influence range of the stress wave in any case, so as to simulate the far-field radiation damping. Finally, two elastic half-plane examples under far-field and near-field dynamic loading respectively are used for verification, and the results are compared with those of the finite element method (FEM) and the original TD-BEM. The results show that the semi-infinite radiation condition is satisfied and far-field radiation damping can be simulated well by the TD-BEM adopted by the adaptive semi-infinite boundary element, and a higher accuracy can be obtained than the original TD-BEM under the almost same time cost.

Key words: radiation damping; adaptive semi-infinite boundary element; TD-BEM; half-plane problem; stress wave

引用本文/Cite this paper:

张 梅,唐 波,李宏军,等.半平面问题远域辐射阻尼的时域边界元法模拟研究[J].计算力学学报,2021,38(2):173-179.

ZHANG Mei, TANG Bo, LI Hong-jun, et al. Simulation of the far-field radiation damping for half-plane problem by time domain boundary element method[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, 38(2): 173-179.