DOI: 10.7511/jslx20240102002

面向显式算法基于 Python 语言人工边界与 地震力可视化建模程序开发与验证

陈志超^{1,2}, 柳国环*^{1,2}, 费琦翔^{1,2}

(1. 天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室,天津 300350;2. 天津大学 建筑工程学院,天津 300350)

摘 要:成功自主开发了基于 Python 语言面向显式算法的可视化接口程序,与大型商业软件 ABAQUS 精准对接,可高效完成三维黏弹性人工边界建模与等效地震力自动施加。阐明了面向显式算法接口程序的意义及其与传统外挂式及隐式程序的本质区别,在此基础上提出两点式跟随行动线(轴向)弹簧-阻尼元件完全等效的方法, 解决了显式算法下接地弹簧-阻尼元件失效的固有问题,验证了其可行性和准确性,为后续程序开发奠定理论基础;推导了程序直接使用的 P,SV 及 SH 波垂直入射时等效节点力的时间迟滞效应解析解公式,公式推导过程物 理意义清晰且理论完备;阐明了程序的底层逻辑、开发流程及关键函数;最后,以自由场 P,SV 及 SH 波同时垂直 入射经典算例,验证了建模的黏弹性人工边界对散射波的吸收作用,与理论解吻合。本文成果可用于边界-土-结构相互作用的科学研究与工程实践。

关键词:黏弹性人工边界;地震动输入;显式算法;Python语言;ABAQUS二次开发 中图分类号:O242.21 文献标志码:A 文章编号:1007-4708(2025)03-0386-09

1 引 言

为了提高地震作用下边界-土-结构相互作用 分析的计算效率,常从无限域模型中截取近地有限 域模型^[1],并在截取的边界上引入人工边界,实现 约束和吸收散射场能量的双重作用,以此来模拟原 无限域连续介质的性质。作为应力-位移型边界, 黏弹性人工边界在科学研究与实际应用中得到了 不断发展完善并已得到广泛认可。黏弹性人工边 界可分为一致黏弹性人工边界^[2]与集中黏弹性人工 边界^[3],本文的研究对象为集中黏弹性人工边界。

黏弹性人工边界理论由 Deeks 等^[4]提出,并由 刘晶波等^[5]在其基础上推导并发展了二维和三维 时域黏弹性人工边界的基本解^[6],此项工作为解决 波动领域人工边界问题奠定了理论基础。之后,刘 晶波等^[7]又进一步推广得到了适用于同时解决静 力与动力问题的三维黏弹性静-动力统一人工边 界,由此扩展了黏弹性人工边界的适用范围。马笙 杰等^[8]研究并给出了一种提取复杂边界单元节点 控制面积的方法,同时阐明了外挂式程序逻辑流 程,完成了二维黏弹性人工边界及等效节点荷载在 ABAQUS隐式算法下的实现。求解动力问题时, 隐式算法需要在设置收敛标准后进行迭代运算。 对于非线性和介质非连续性问题而言,经常会出现 计算耗时长、收敛性差甚至无法收敛的情况。而显 式算法不需要迭代和求解联立方程组,同时在处理 动力学问题时也更具相应优势。因此,显式分析近 年来备受科研工作者的关注与广泛应用。然而目 前针对显式算法下集中黏弹性人工边界实现与验 证的研究较少,其与隐式算法下的实现也存在不 同,这是本文解决的首要重点问题。

在实际建模过程中,黏弹性人工边界与等效节 点荷载的实现,需要在人工边界位置设置各节点的 弹簧刚度、阻尼系数与等效集中力幅值。传统方式 流程为,(1)手动提取边界节点信息、节点控制面积 等前处理文件;(2)使用其他外挂式程序(如MAT-

CHEN Zhi-chao, LIU Guo-huan, FEI Qi-xiang. Development and verification of Python-based and explicit algorithm-oriented modeling program for viscous-spring boundary and seismic force [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2025, **42**(3): 386-394.

收稿日期:2024-01-02;修改稿收到日期:2024-03-07.

基金项目:国家自然科学基金(51978461)资助项目.

作者简介:柳国环*(1980-),男,博士,教授(E-mail:liugh@tju.edu.cn).

引用本文:陈志超,柳国环,费琦翔.面向显式算法基于 Python 语言人工边界与地震力可视化建模程序开发与验证[J].计算力学学报, 2025,42(3):386-394.

LAB,C语言等)对数据进行批量处理;(3)以人为 修改 INP 文件的方式输回 ABAQUS 内核进行计 算。此种方式自动化程度明显较低,不但耗时长、 占用计算机存储空间大,而且对 INP 文件进行修 改要求使用者具有较高的熟练度,否则极易出现因 人为操作失误导致黏弹性人工边界施加错误或失 败的情况,最终导致计算结果失真。

本文的出发点是实现集中黏弹性人工边界与 等效节点地震力在 ABAQUS 显式算法下的自动 化建模与验证。首先,为了解决显式算法下接地弹 簧-阻尼元件失效的问题,提出采用两点式轴向弹 簧-阻尼元件完全等效的方法,并通过算例对其进 行验证。为满足实际工程计算需要,详细推导并明 确给出了 P 波(longitudinal wave)、SV 波(vertically polarized transverse wave) 与 SH 波(horizontally polarized transverse wave)同时垂直入射 时等效节点地震力的时间迟滞效应理论解公式,供 程序使用。然后,阐明了可视化接口程序运行时的 建模流程,给出了程序所用关键函数。最后,以自 由场 P,SV 及 SH 波同时垂直入射经典算例,对推 导的等效节点地震力公式准确性及程序自动化建 模准确性进行了验证。将可视化接口程序和传统 MATLAB外挂式程序的建模耗时进行对比,对可 视化接口程序高效性进行了验证。验证结果表明, 开发的可视化接口程序兼具准确性与高效性。

2 面向显式算法的黏弹性人工边界 及等效地震力实现方法与验证

2.1 面向显式算法两点式轴向弹簧-阻尼元件 等效新方法的提出、意义与验证

传统隐式程序在人工边界处施加的是接地弹 簧-阻尼元件,但其在 ABAQUS 显式分析步下则 会失效。本节提出采用两点式轴向弹簧-阻尼元件 完全等效的解决方案,并通过算例对其进行验证。

采用有限元法对有限域模型进行离散处理时, 人工边界也随之离散。因此集中黏弹性人工边界 是在划分网格后的人工边界各节点处设置弹簧-阻 尼元件即黏弹性人工边界单元。

在 ABAQUS 有限元分析软件中,弹簧-阻尼 元件共有 SPRING1-DASHPOT1(接地弹簧-阻尼 元件)、SPRING2-DASHPOT2(两点式固定方向弹 簧-阻尼元件)与 SPRINGA-DASHPOTA(两点式 轴向弹簧-阻尼元件)三种类型,其中前两种类型的 元件仅可用于隐式算法,而两点式轴向弹簧-阻尼 元件在两种算法下均可使用(此为 ABAQUS 的固 有设定)。将两点式轴向弹簧-阻尼元件远地点的 六个自由度全部约束,元件的相对位移仅取决于近 地点的位移,此时元件的受力运动情况将与接地弹 簧-阻尼元件完全一致,通过以下算例对其进行 验证。





图 1 为同一模型下两个独立的弹簧-阻尼系统,系统 A 中质量点 MASS 在连接并联的 spring1 元件与 dashpot1 元件后直接接地,为接地系统;系统 B 为两点连接轴向系统,质量点 MASS1 在连接 并联的 springA 元件与 dashpotA 元件后连接到质 量点 MASS2 上,将质量点 MASS2 的六个自由度 全部约束,弹簧-阻尼元件方向为两质量点连线方 向。两系统的质量点质量、弹簧刚度及阻尼器系数 均相同(采用经典单自由度欠阻尼系统经无量纲化 的系数,系数不唯一):质量点质量均为 0.02588, 弹簧刚度均为 30.0,阻尼器系数均为 0.12。模型 分析步中边界条件与场输出设置列入表 1。

表 1 模型分析步设置

ſ	ab. 1 Analysis step	setting of model
分析步	边界条件	场输出
step1	所有节点 u _y =0, MASS, MASS1 所在节点 u _x =1	无
step2	所有节点 u _y =0	MASS, MASS1 的 a1, v1 与 u1

根据平衡条件可得到单自由度弹簧-阻尼系统 的二阶线性微分方程。设 *x* 为质量节点在横轴上 的位置,可得自由端质量点运动方程理论解为

$$m\ddot{\boldsymbol{x}} + c\,\dot{\boldsymbol{x}} + k\boldsymbol{x} = 0 \tag{1}$$

将
$$\mathbf{x}(0) = 1 与 \dot{\mathbf{x}}(0) = 0$$
代入可得

 $\mathbf{x}(t) = e^{-\xi \omega_n t} \left(A \sin \omega_d t + B \cos \omega_d t \right)$ (2)

式中 $\xi = 0.0681, \omega_n = 34.047, \omega_d = 33.9678, A = 0, B = 1.0$ 。

图 2 给出了两质量点位移时程曲线及理论解 时程曲线。可见虽两系统采用两种不同类型的弹 簧-阻尼元件,但其质量点的运动状态完全一致,均 符合理论解。

由此,可以得出以下结论,接地弹簧-阻尼元件 可由远地点固支的两点连接轴向弹簧-阻尼元件完





对于实际模型施加黏弹性人工边界时,人工边 界各节点的弹簧刚度与阻尼系数由地基土体材料 属性及节点与波源间距离决定(要求土体材料为线 弹性),具体公式为

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, C_{BT} = \rho C_S$$

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, C_{BN} = \rho C_P$$
(3)

式中 K_{BT} 与 K_{BN} 分别为弹簧切向、法向的刚度系数; C_{BT} 与 C_{BN} 分别为阻尼器切向、法向的阻尼系数; α_T 与 α_N 为黏弹性边界的修正系数,参见文献[9],取 α_T =0.67, α_N =1.33;R取波源至节点所在人工边界面的最短距离; ρ 与G分别为地基土体的密度和剪切模量; C_s 与 C_P 分别为地基土体的剪切波速和纵波波速,可表示为

$$G = \frac{E}{2(1+v)} \tag{4}$$

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+v)}} \tag{5}$$

$$C_{P} = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-v)}{\rho(1+v)(1-2v)}}$$
(6)

式中*E*与*v*分别为地基土体的弹性模量和泊松比, λ为拉梅常数。

由文献[10]可知,受黏弹性人工边界影响,人 工边界区域的稳定性条件比内部有限域更为严格。 然而在人工边界近地点节点施加附加质量后,人工 边界的数值积分稳定性反而会略宽于内部有限域, 整体模型的稳定性条件仍由内部有限域的积分稳 定性控制,即整体模型稳定性控制条件转化为临界 时间积分步长需满足

$$\Delta t \leqslant L/C_P \tag{7}$$

式中 L 为网格尺寸。

根据文献[10],人工边界近地点施加的附加质 量为相邻一个单元质量的一半,即

$$M_{\rm B} = \rho L/2 \tag{8}$$

式(3)与式(8)中节点控制面积为 1.0,实际计算时,将两式的系数乘以对应节点控制面积即可。

2.2 底面与侧面节点等效地震力公式的推导

在实际工程问题中,有限域底面垂直入射的地 震波常为 P,SV 及 SH 波中的一种或几种,现有单 一波型入射等效节点地震力公式显然无法满足实 际计算需要。因此,完全有必要推导并明确给出 P,SV 及 SH 波同时入射时的等效节点地震力 公式。

本文按照如下方式计算单种波型垂直入射时 等效节点地震力,并按照线性叠加原理得到三种波 型同时入射的地震力公式。首先根据自由场速度 响应,计算自由场运动引起的节点应变,之后由应 力与应变关系求出节点应力,再由边界节点平衡关 系得到计算弹簧-阻尼元件附加应力的边界节点应 力,将其乘以节点控制面积即可得到边界节点的等 效节点地震力。人工边界上任意节点 B 的等效节 点地震力为

 $F_B = (K_B u_B^{ff} + C_B \dot{u}_B^{ff} + \sigma_B^{ff} n) A_B$ (9) 式中 $K_B u_B^{ff}$ 为克服位移引起弹簧单元产生的节点 附加应力, $C_B \dot{u}_B^{ff}$ 为克服速度引起阻尼器产生的节 点附加应力, σ_B^{ff} 为自由场震动在边界产生的节点 应力张量, $u_B^{ff} [u_B v_B w_B]^T$ 为节点地震波位移 向量, $\dot{u}_B^{ff} [\dot{u}_B \dot{v}_B \dot{w}_B]^T$ 为节点地震波速度向 量, A_B 为节点控制面积, n 为节点所在边界面外法 线余弦向量, K_B 和 C_B 分别为黏弹性边界节点的 弹簧刚度系数矩阵和阻尼系数矩阵。

对式(9)进一步推导,得到给出入射波场后任 意节点位置 B 处的 u_B^{ff} , \dot{u}_B^{ff} 以及由此得到的 σ_B^{ff} 。

由底面垂直入射的 SV,SH 与 P 波,其位移向 量分别为 $u_0(t)$, $v_0(t)$ 和 $w_0(t)$,速度向量分别为 $\dot{u}_0(t)$, $\dot{v}_0(t)$ 和 $\dot{w}_0(t)$ 。设任意边界节点 B 距有限 域底面距离为 h (自变量本质为 z),其自由场位移 及速度向量为滞后的入射波与滞后的地表顶面反 射波的叠加,即

$$\begin{cases} u_{B} = u_{0} \left(t - \frac{h}{C_{s}} \right) + u_{0} \left(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \right) \\ v_{B} = v_{0} \left(t - \frac{h}{C_{s}} \right) + v_{0} \left(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \right) \\ w_{B} = w_{0} \left(t - \frac{h}{C_{P}} \right) + w_{0} \left(t - \frac{2H - h}{C_{P}} \right) \end{cases}$$
(10)

$$\begin{cases} \dot{u}_{B} = \dot{u}_{0} \left(t - \frac{h}{C_{S}} \right) + \dot{u}_{0} \left(t - \frac{2H - h}{C_{S}} \right) \\ \dot{v}_{B} = \dot{v}_{0} \left(t - \frac{h}{C_{S}} \right) + \dot{v}_{0} \left(t - \frac{2H - h}{C_{S}} \right) \\ \dot{w}_{B} = \dot{w}_{0} \left(t - \frac{h}{C_{P}} \right) + \dot{w}_{0} \left(t - \frac{2H - h}{C_{P}} \right) \end{cases}$$
(11)

式中 H 为有限域土体顶面与底面的距离, h/C 与 (2H-h)/C 分别为入射波与反射波到达节点 B 的 滞后时间。

由波动理论[11]知

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{C} \frac{\partial u}{\partial t} \tag{12}$$

式中C为S或P波的波速,即 C_S 或 C_P 。

由此可得

$$\begin{cases} \frac{\partial u_B}{\partial z} = -\frac{1}{C_S} \left[\dot{u}_0 \left(t - \frac{h}{C_S} \right) - \dot{u}_0 \left(t - \frac{2H - h}{C_S} \right) \right] \\ \frac{\partial v_B}{\partial z} = -\frac{1}{C_S} \left[\dot{v}_0 \left(t - \frac{h}{C_S} \right) - \dot{v}_0 \left(t - \frac{2H - h}{C_S} \right) \right] \\ \frac{\partial w_B}{\partial z} = -\frac{1}{C_P} \left[\dot{w}_0 \left(t - \frac{h}{C_P} \right) - \dot{w}_0 \left(t - \frac{2H - h}{C_P} \right) \right] \end{cases}$$
(13)

由于地震波从无限域入射,因此在截取出有限 域后,震源地震波不沿水平向或不考虑其在该方向 的变化。此时,自由场的应变可表达为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial z} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial z} \end{cases}$$
(14)

由应力-应变关系 $\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\}$ 可得



(15)

此时,将之前已得到的式(13)代入式(15),即 得到节点 B自由场应力为

$$\begin{cases} \sigma_{Bxx} \\ \sigma_{Byy} \\ \sigma_{Bzz} \\ \sigma_{Byz} \\ \sigma_{Bxy} \end{cases} = \begin{cases} \lambda \frac{\partial w_B}{\partial z} \\ \lambda \frac{\partial w_B}{\partial z} \\ \rho C_P^2 \frac{\partial w_B}{\partial z} \\ \rho C_S^2 \frac{\partial w_B}{\partial z} \\ 0 \end{cases} = \\ \begin{cases} -\frac{\lambda}{C_P} \left[\dot{w_0} \left(t - \frac{h}{C_P} \right) - \dot{w_0} \left(t - \frac{2H - h}{C_P} \right) \right] \\ -\frac{\lambda}{C_P} \left[\dot{w_0} \left(t - \frac{h}{C_P} \right) - \dot{w_0} \left(t - \frac{2H - h}{C_P} \right) \right] \\ -\rho C_P \left[\dot{w_0} \left(t - \frac{h}{C_P} \right) - \dot{w_0} \left(t - \frac{2H - h}{C_P} \right) \right] \\ -\rho C_S \left[\dot{v_0} \left(t - \frac{h}{C_S} \right) - \dot{v_0} \left(t - \frac{2H - h}{C_S} \right) \right] \\ -\rho C_S \left[\dot{u_0} \left(t - \frac{h}{C_S} \right) - \dot{u_0} \left(t - \frac{2H - h}{C_S} \right) \right] \\ 0 \end{cases}$$
(16)

人工边界面定义如图 3 所示,为清晰显示底面,特将 Z 轴正方向取为竖直向下。



Fig. 3 Artificial boundary surface definition

(17, 18)

当节点所在人工边界面外法线方向与 X 轴平 行时,弹簧刚度及阻尼系数矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} K_{BN} & & \\ & K_{BT} & \\ & & K_{BT} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} C_{BN} & \\ & C_{BT} & \\ & & C_{BT} \end{bmatrix}$$

同理可得节点所在人工边界面外法线方向与 Y,Z轴平行时的弹簧刚度及阻尼系数矩阵。

对于 X 正方向边界面节点,式(9)中 $n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$,将式(16~18)与 $n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ 代回式(9)得

$$\{F_{Bx} F_{By} F_{Bz}\}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} K_{BN} & 0 & 0 \\ 0 & K_{BT} & 0 \\ 0 & 0 & K_{BT} \end{bmatrix} \begin{cases} u_{0} \left(t - \frac{h}{C_{s}}\right) + u_{0} \left(t - \frac{2H - h}{C_{s}}\right) \\ v_{0} \left(t - \frac{h}{C_{s}}\right) + v_{0} \left(t - \frac{2H - h}{C_{s}}\right) \\ w_{0} \left(t - \frac{h}{C_{p}}\right) + w_{0} \left(t - \frac{2H - h}{C_{p}}\right) \end{bmatrix} \\ A_{B} + \begin{bmatrix} C_{BN} & 0 & 0 \\ 0 & C_{BT} & 0 \\ 0 & 0 & C_{BT} \end{bmatrix} \times \\ \left\{ \dot{u}_{0} \left(t - \frac{h}{C_{s}}\right) + \dot{u}_{0} \left(t - \frac{2H - h}{C_{s}}\right) \\ \dot{v}_{0} \left(t - \frac{h}{C_{s}}\right) + \dot{v}_{0} \left(t - \frac{2H - h}{C_{s}}\right) \\ \dot{v}_{0} \left(t - \frac{h}{C_{p}}\right) + \dot{v}_{0} \left(t - \frac{2H - h}{C_{s}}\right) \\ \dot{w}_{0} \left(t - \frac{h}{C_{p}}\right) + \dot{w}_{0} \left(t - \frac{2H - h}{C_{s}}\right) \end{bmatrix} \\ A_{B} + \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xx} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} A_{B}$$
(19)

 ${ I \hspace{-.5mm} I \hspace{-.5mm} I \hspace{-.5mm} I \hspace{-.5mm} F_{Bx} \hspace{.5mm} F_{By} \hspace{.5mm} F_{Bz} \hspace{.5mm} \}^{\, \mathrm{T}} = }$

$$\begin{cases}
A_B \left(K_{BN} \left[u_0 \left(t - \frac{h}{C_s} \right) + u_0 \left(t - \frac{2H - h}{C_s} \right) \right] + C_{BN} \left[\dot{u}_0 \left(t - \frac{h}{C_s} \right) + \dot{u}_0 \left(\frac{t - h}{C_s} \right) \right] - \frac{\lambda}{C_P} \left[\frac{\dot{w}_0 \left(t - \frac{h}{C_P} \right) - \lambda}{\dot{w}_0 \left(t - \frac{2H - h}{C_P} \right)} \right] \right] \\
A_B \left(K_{BT} \left[v_0 \left(t - \frac{h}{C_s} \right) + v_0 \left(t - \frac{2H - h}{C_s} \right) \right] + C_{BT} \left[\dot{v}_0 \left(t - \frac{h}{C_s} \right) + \dot{v}_0 \left(t - \frac{2H - h}{C_s} \right) \right] \right) \\
A_B \left(K_{BT} \left[w_0 \left(t - \frac{h}{C_P} \right) + w_0 \left(t - \frac{2H - h}{C_P} \right) \right] + C_{BT} \left[\dot{w}_0 \left(t - \frac{h}{C_P} \right) + \dot{w}_0 \left(t - \frac{2H - h}{C_P} \right) \right] - \lambda \\
A_B \left(K_{BT} \left[w_0 \left(t - \frac{h}{C_P} \right) + w_0 \left(t - \frac{2H - h}{C_P} \right) \right] + C_{BT} \left[\dot{w}_0 \left(t - \frac{h}{C_P} \right) + \dot{w}_0 \left(t - \frac{2H - h}{C_P} \right) \right] - \lambda \\
\rho C_S \left[\dot{u}_0 \left(t - \frac{h}{C_S} \right) - \dot{u}_0 \left(t - \frac{2H - h}{C_S} \right) \right]
\end{cases}$$
(20)

同理可得 X 负方向边界面节点等效节点荷载公式为

$$\{F_{Bx} \quad F_{By} \quad F_{Bz}\}^{\mathrm{T}} = \begin{cases} A_{B} \Big(K_{BN} \Big[u_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) + u_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] + \\ C_{BN} \Big[\dot{u}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) + \dot{u}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] + \frac{\lambda}{C_{P}} \Big[\dot{w}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{P}} \Big) - \dot{w}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{P}} \Big) \Big] \Big) \\ A_{B} \Big(K_{BT} \Big[v_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) + v_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] + C_{BT} \Big[\dot{v}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) + \dot{v}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] \Big)$$
(21)
$$A_{B} \Big(K_{BT} \Big[w_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{P}} \Big) + w_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{P}} \Big) \Big] + C_{BT} \Big[\dot{w}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{P}} \Big) + \dot{w}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{P}} \Big) \Big] + \\ \rho C_{s} \Big[\dot{u}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) - \dot{u}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] \Big)$$

Y 正方向边界面节点等效节点荷载公式为 $\{F_{Br} \quad F_{Fr} \quad F_{Fr} \}^{\mathrm{T}} =$

$$\begin{cases} A_{B} \Big(K_{BT} \Big[u_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) + u_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] + C_{BT} \Big[\dot{u}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) + \dot{u}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] \Big) \\ A_{B} \Big(K_{BN} \Big[v_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) + v_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] + C_{BN} \Big[\dot{v}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) + \dot{v}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] - \frac{\lambda}{C_{P}} \Big[\dot{w}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{P}} \Big) - \dot{w}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{P}} \Big) \Big] \Big) \end{cases}$$

$$(22)$$

$$A_{B} \Big(K_{BT} \Big[w_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{P}} \Big) + w_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{P}} \Big) \Big] + C_{BT} \Big[\dot{w}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{P}} \Big) + \dot{w}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{P}} \Big) \Big] - \frac{\rho C_{s} \Big[\dot{v}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) - \dot{v}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] \Big)$$

Y负方向边界面节点等效节点荷载公式为

 $\{F_{Bx} \quad F_{By} \quad F_{Bz}\}^{\mathrm{T}} =$

$$\begin{cases} A_{B} \Big(K_{BT} \Big[u_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) + u_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] + C_{BT} \Big[\dot{u}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) + \dot{u}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] \Big) \\ A_{B} \Big(K_{BN} \Big[v_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) + v_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] + C_{BN} \Big[\dot{v}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{s}} \Big) + \dot{v}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{s}} \Big) \Big] + \frac{\lambda}{C_{P}} \Big[\dot{w}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{P}} \Big) - \dot{w}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{P}} \Big) \Big] \Big) \end{cases}$$

$$(23)$$

$$A_{B} \Big(K_{BT} \Big[w_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{P}} \Big) + w_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{P}} \Big) \Big] + C_{BT} \Big[\dot{w}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{P}} \Big) + \dot{w}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{P}} \Big) \Big] + \rho C_{S} \Big[\dot{v}_{0} \Big(t - \frac{h}{C_{S}} \Big) - \dot{v}_{0} \Big(t - \frac{2H - h}{C_{S}} \Big) \Big] \Big)$$

底面节点等效节点荷载为

 $\{F_{Bx} \quad F_{By} \quad F_{Bz}\}^{\mathrm{T}} =$

$$\begin{cases} A_{B} \Big(K_{BT} \Big[u_{0}(t) + u_{0} \Big(t - \frac{2H}{C_{s}} \Big) \Big] + C_{BT} \Big[\dot{u}_{0}(t) + \dot{u}_{0} \Big(t - \frac{2H}{C_{s}} \Big) \Big] + \rho C_{s} \Big[\dot{u}_{0}(t) - \dot{u}_{0} \Big(t - \frac{2H}{C_{s}} \Big) \Big] \Big) \\ A_{B} \Big(K_{BT} \Big[v_{0}(t) + v_{0} \Big(t - \frac{2H}{C_{s}} \Big) \Big] + C_{BT} \Big[\dot{v}_{0}(t) + \dot{v}_{0} \Big(t - \frac{2H}{C_{s}} \Big) \Big] + \rho C_{s} \Big[\dot{v}_{0}(t) - \dot{v}_{0} \Big(t - \frac{2H}{C_{s}} \Big) \Big] \Big) \\ A_{B} \Big(K_{BN} \Big[w_{0}(t) + w_{0} \Big(t - \frac{2H}{C_{p}} \Big) \Big] + C_{BN} \Big[\dot{w}_{0}(t) + \dot{w}_{0} \Big(t - \frac{2H}{C_{p}} \Big) \Big] + \rho C_{P} \Big[\dot{w}_{0}(t) - \dot{w}_{0} \Big(t - \frac{2H}{C_{p}} \Big) \Big] \Big)$$

$$(24)$$

式(20~24)即为具迟滞效应的 P,SV 与 SH 波同时垂直入射等效节点地震力的理论表达式。

3 程序逻辑流程与关键函数

传统的人工式外挂式程序的本质是分析处理 数据,而并未真正实现与 ABAQUS 交互式建模。 同时,运行程序生成各种 INP 文件尤其是幅值文 件需要耗费大量计算时间以及存储空间。本文的 可视化接口程序实现了与 ABAQUS 二次开发接 口的无缝对接,从根本上避免了人工前处理步骤, 在提升效率的同时也提高了黏弹性人工边界施加 的准确性。可视化程序目标是点击鼠标即可得,其 总体逻辑流程及所用关键函数如下文所述。

3.1 前处理过程的自动完成

首先,设置人工边界除顶面外五个表面的表面 集与节点集。使用边界函数 EncastreBC 将人工边 界表面节点的六个自由度约束。使用压强函数 Pressure 对各人工边界表面施加 1.0 Pa 大小的均 布压强,并使用场输出函数 FieldOutputRequest 输出边界节点集的节点信息与反力(节点控制面 积),使用 Job 函数依次提交作业。

3.2 提取节点信息并生成列表(供后续调用)

使用数据库打开函数 openOdb 打开 odb 文件,提取分析步末帧的节点信息,并储存在名为 C_N的列表当中。此时,C_N 中共有四列数据,分 别为节点编号及节点三个方向的坐标。通过循环 判断语句,对节点的归属面进行划分,返回至 C_N 的第五列,同时生成节点的 R 值,返回至 C_N 的 第六列。根据节点归属面,提取节点反力的绝对 值,作为节点控制面积返回至 C_N 的第七列。至 此,C_N 成为一个共有七列的列表,包含节点各项 基本物理信息,作为单一数据源在后续计算的过程 中可以随时调用,避免了不同数据格式转换可能带 来的问题。

3.3 遍历各节点生成弹簧阻尼及节点力

(1)循环遍历 C_N 中节点,将各节点坐标分别 在 X,Y 及 Z 三个方向上增加固定值,形成远地点 坐标信息列表,命名为 y。固定值数值大小无具体 要求,本文采用二倍地基几何尺寸。使用 Part 函 数,生成名为 GROUND 的远地点节点部件,完成 装配。使用点质量函数 PointMassInertia 对远地 点节点施加附加质量。使用 EncastreBC 函数约束 GROUND 各点的六个自由度。

(2)循环遍历 C_N 中节点,计算并使用 Point-MassInertia 函数施加近地点附加质量。

(3)循环遍历 C_N 中节点,计算并使用 Two-PointSpringDashpot 函数施加弹簧与阻尼器。

(4)循环遍历 C_N 中节点,使用 TabularAmp-litude 函数生成节点等效地震荷载幅值。

(5)循环遍历 C_N 中所有节点,使用 ConcentratedForce 函数,在各边界节点施加对应的集中 力。

4 准确性与高效性检验

4.1 准确性验证

从三维半无限空间中截取 50 m×50 m× 100 m 的有限区域作为计算区域,以 5 m×5 m× 5 m 的 C3D8R 单元进行离散,在其底面及四个侧 面设置黏弹性人工边界,顶面自由。材料密度为 ρ =2000 kg/m³,弹性模量为E=2×10⁸ Pa,泊松比 为 0.25。计 算 得 到 材 料 的 剪 切 波 波 速 为 200 m/s²,纵波波速约 346.41 m/s²。采用 SV 波 沿 X 轴正向,SH 波沿 Y 轴正向,P 波沿 Z 轴正向, 同时由有限域底部垂直入射,入射波位移时程函 数为

$$u(t) = \frac{1}{2}(1 - \cos 8\pi t) \quad (0 \le t \le 0.25)$$
$$u(t) = 0 \quad (0.25 < t \le 1)$$

地震波持时为 0.25 s,频率为 f = 4.0,最小波 长为 $\lambda_{\min} = C_s / f = 200/4 = 50$ m。模型的网格尺寸

N L 满足参考文献[9]中 $\lambda_{min}/8 \leq L \leq \lambda_{min}/6$ 的要求, 模型的时间增量步长取 $\Delta t = 0.002$ s,满足参考文 献[10]中 $\Delta t \leq L/C_P$ 的要求。分别选取人工边界 底面中心、X 正面中心及地表顶面中心的A,B,C 三个观测点,如图4所示。使用可视化接口程序自 动建模的三维黏弹性人工边界模型如图5所示。



由波动理论求解理论解。P 波、SV 波及 SH 波由观测点 A 出发,P 波波速更快,于 0.289 s (100/346.41 =0.289)时到达观测点 C,SV 波及 SH 波于 0.5 s(100/200 =0.5)时到达点 C。观测 点 C 位于自由表面,其位移振幅为入射波位移振幅二倍。

可视化程序所建模型中观测点 C 的位移时程数值解如图 6 所示, X, Y 及 Z 向位移分别表示 SV, SH 及 P 波的作用。



由位移计算结果可看出,可视化程序所建模型 的位移响应数值解和理论解拟合良好,观测点无明 显余波震荡现象。结果表明可视化程序自动施加 的黏弹性人工边界对于散射波具有良好吸能效果 的同时,也说明了等效节点地震力公式的准确性。 由此验证了可视化程序的实用性与可靠性。

4.2 高效性检验

(25)

为验证本文程序的建模高效性,将采用本文程 序和传统 MATLAB 外挂式程序建模耗时进行对 比,对比结果列入表 2。 相较于传统 MATLAB 程序,本文程序由于无 需生成并修改 INP 文件, INP 数据文件储存量减 少 100%。此外,由于无需进行手动前处理操作,同 时无需将修改好的 INP 文件重新传回 ABAQUS 计算 内核,前处理效率提升 5.13倍,提取节点信息效率 提升 6.16倍,生成弹簧阻尼及等效节点荷载效率 提升 6.81倍。此外,事实上不难推断,随着实际模 型几何尺寸增大,将必然性地导致人工边界单元节 点成倍增多,传统 MATLAB 程序运行生成的 INP 文件储存量将以几何倍数增大,同时建模耗时也将 以几何倍数增加。因此,在实际科学研究及工程应 用中,本文程序将更为显著地减少数据文件储存 量,缩短建模所用时间。

表 2 耗时对比及效率提升 Tab. 2 Time comparison and efficiency improvement

各项指标	外挂 MATLAB 程序	本文建 模程序	效率提升倍数 (本文/外挂)
前处理耗时/s	903	176	5.13 倍
提取节点信息(生成 INP 文件)耗时/s	18.49	3	6.16 倍
生成人工边界单元及等效 节点荷载耗时/s	484	71	6.81 倍

由此可见,本文程序除具有精准性外,在建模 产生的数据文件存储量与建模耗时方面较传统外 挂式程序也具极大优势,一是完全可视自动化;二 是具有显著高效性。

5 结 语

本文面向 ABAQUS 显式算法,为实现黏弹性 人工边界与等效节点地震力的精准高效建模,具体 做了4部分工作,现简要总结如下。

(1)提出的两点连接轴向弹簧-阻尼元件等效 新方法,经验证可行,成功解决了显式算法下接地 弹簧-阻尼元件失效的固有问题。

(2)推导并具体给出的 P,SV 与 SH 波同时入 射时迟滞效应的等效节点地震力公式,适用于多种 波入射情形,可供程序直接使用。

(3)成功自主开发了基于 Python 语言面向 ABAQUS显式算法的可视化接口程序及交互式 插件,实现了三维黏弹性人工边界自动建模与等效 地震力自动施加。

(4)以 P,SV 与 SH 波同时入射算例模型对可 视化程序的建模准确性进行了验证。计算结果表 明,本文程序所建边界对于散射波具有与理论解吻 合的精准吸能效果,也侧面证明了迟滞效应等效节 点地震力公式的准确性。通过与传统 MATLAB 外挂式程序建模耗时比较,突出了本文程序的高 效性。

本文自主开发的可视化接口程序兼具理论完 善性、操作可靠性与实用便捷性,可直接为边界-土-结构相互作用的科学研究与工程应用提供有力 支持。

参考文献(References):

- [1] 于 翔,陈启亮,赵跃堂,等.地下结构抗震研究方法 及其现状[J].解放军理工大学学报(自然科学版), 2000,1(5):63-69.(YU Xiang, CHEN Qi-liang, ZHAO Yue-tang, et al. The Status Quo and Methods of antiseismic research of underground structure(Nature Science)[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2000,1(5):63-69.(in Chinese))
- [2] 刘晶波,谷 音,杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报,2006,28(9):1070-1075. (LIU Jing-bo, GU Yin, DU Yi-xin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9):1070-1075. (in Chinese))
- [3] 刘晶波,谷 音,李 彬.结构-地基开放系统动力相 互作用问题的高效解法[J]. 土木工程学报,2006,39
 (5):112-116,121. (LIU Jing-bo,GU Yin,LI Bin. An efficient method for the dynamic interaction of open structure-foundation systems[J]. China Civil Engineering Journal,2006,39(5):112-116,121. (in Chinese))
- [4] Deeks A J, Randolph M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(17): 25-42.
- [5] 刘晶波,吕彦东.结构-地基动力相互作用问题分析的 一种直接方法[J]. 土木工程学报,1998,31(3):55-64. (LIU Jing-bo,LÜ Yan-dong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3):55-64. (in Chinese))
- [6] 刘晶波,王振宇,杜修力,等. 波动问题中的三维时域 粘弹性人工边界[J]. 工程力学,2005,22(6):46-51.
 (LIU Jing-bo, WANG Zhen-yu, DU Xiu-li, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems[J]. Engineering Mechanics,2005,22(6):46-51. (in Chinese))
- [7] 刘晶波,李 彬.三维黏弹性静-动力统一人工边界

[J]. 中国科学 E 辑: 工程科学 材料科学, 2005, **35** (9): 72-86. (LIU Jing-bo, LI Bin. Three-dimensional viscoelastic static-dynamic unified artificial boundary [J]. *Science in China*, *Ser/E*, 2005, **35**(9): 72-86. (in Chinese))

- [8] 马笙杰,迟明杰,陈红娟,等. 黏弹性人工边界在 ABAQUS中的实现及地震动输入方法的比较研究
 [J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(7):1445-1457. (MA Sheng-jie, CHI Ming-jie, CHEN Hong-juan, et al. Implementation of viscous-spring boundary in ABAQUS and comparative study on seismic motion input methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1445-1457. (in Chinese))
- [9] 李述涛,刘晶波,宝 鑫,等.人工边界子结构地震动 输入方法在 ABAQUS 中的实现[J].自然灾害学报, 2020,29(4):133-141. (LI Shu-tao,LIU Jing-bo,BAO

Xin, et al. Implementation for seismic wave input method based on the artificial boundary substructure in ABAQUS [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2020,**29**(4):133-141. (in Chinese))

- [10] 刘晶波,宝 鑫,李述涛,等.采用粘弹性人工边界时显式算法稳定性的改善研究[J].工程力学,2023,40
 (5):20-31.(LIU Jing-bo,BAO Xin,LI Shu-tao,et al. Stability improvement of explicit algorithm when using viscoelastic artificial boundary[J]. Engineering Mechanics,2023,40(5):20-31.(in Chinese))
- [11] 廖振鹏,杨柏坡,袁一凡.波动理论基础知识及其在地 震工程中的初步应用(续)[J].华南地震,1995,15
 (1):70-76.(LIAO Zhen-peng,YANG Bai-po,YUAN Yi-fan. Basic knowledge of wave theory and its preliminary application in earthquake engineering (continued)[J]. South China Journal of Seismology, 1995,15(1):70-76.(in Chinese))

Development and verification of Python-based and explicit algorithm-oriented modeling program for viscous-spring boundary and seismic force

CHEN Zhi-chao^{1,2}, LIU Guo-huan^{*1,2}, FEI Qi-xiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: A Python-based visual interface program tailored for explicit algorithms was developed, by which it is convenient to achieve the efficient modeling of 3D viscoelastic boundary and automatic application of the equivalent seismic force and realize the seamless docking with known commercial software ABAQUS accurately. The meaning of the explicit algorithm tailored interface program and its differences with the original external and implicit algorithm tailored programs are expounded. An approach of using the two-point spring-dashpot element to replace the ground spring-dashpot element is proposed to solve the inherent incompatibility issue of a ground spring-dashpot element in the explicit algorithm, and then its feasibility and accuracy are verified, which lays the prerequisite theoretical foundation for the subsequent program development. Then, the hysteresis-effect analytical solutions used in the program of the nodal equivalent seismic force for P, SV and SH waves at vertical incidence are derived and given with clear physical meaning and theoretical completeness. The underlying logic, flowchart and key functions of the program development are clarified. Finally, an example of vertical incidence of P, SV and SH waves is taken to verify the absorption effect of the intelligent viscous-spring boundary on the scattered wave and the results are consistent with classical theoretical ones. The results of this paper can be used in the scientific research and engineering practice of boundary-soil-structure interaction.

Key words: viscous-spring boundary; seismic motion input; explicit algorithm; Python language; secondary development of ABAQUS