论文

基于显-隐式格式的三维时域土-结相互作用分析的异步并行算法

陈少林^{1*}, 王俊泉¹, 刘启方², 周国良³, 唐晖³

1. 南京航空航天大学土木工程系, 南京 210016;

2. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080;

3. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100101

* E-mail: iemcs1@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2017-07-06; 接受日期: 2017-08-21; 网络出版日期: 2017-10-17

国家自然科学基金(批准号: 51378260)、国家重大科技专项(编号: 2013ZX06002001-9)、南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(编号: kfj20170107)资助项目

摘要 提出了一种分析三维时域土-结构动力相互作用的并行计算方法. 该方法利用显式和隐式积分格式各自的优点, 采用集中质量显式有限元和黏弹性人工边界模拟无限域地基, 采用隐式积分格式有限元法计算上部结构的响应, 两者可采用不同的时间步距. 在此基础上, 采用MPI通信协议, 提出了土-结构系统中土体区域的并行计算方法, 以及土体区域与结构间的异步并行计算方法, 并通过自编的Fortran源程序实现了地震作用下土-结相互作用分析的并行计算. 以某一核电结构模型为例, 分别采用串行算法和并行算法分析了土-核电结构体系在SV波输入下的反应, 验证了本文并行算法的可行性和高效性.

关键词 土-结相互作用, 集中质量显式有限元, 黏弹性人工边界, 并行算法, 显-隐式积分格式

1 引言

土-结相互作用是地震工程领域的重要问题之一. 一方面, 地震发生时容易引起重大次生灾害的重大工程, 如核电站, 其设计时必须考虑土-结相互作用的影响^[1,2]; 另一方面, 对地震作用下结构响应准确地预测, 是实现结构性态设计的基本要求之一. 从理论分析而言, 线性土-结相互作用的基本理论已较为成熟, 按照求解系统的不同, 一般分为子结构法和直接法^[3,4]. 子

结构法将土-结体系划分为地基、基础、结构子系统, 每个子系统可独立分析, 具有较大的灵活性, 但由于基础动力刚度与频率有关, 通常在频域求解^[5], 理论上只适用于线性系统. 直接法, 又称整体直接法, 是将上部结构、基础及地基土作为一个整体系统进行分析, 一般在时域内分析, 可考虑非线性. 但直接法涉及的自由度数较多, 计算量大, 效率较低. 廖振鹏^[6]发展了一套显式解耦技术, 包括集中质量显式有限元和透射边界, 极大地提高了近场波动问题的求解效率, 在场

引用格式: 陈少林, 王俊泉, 刘启方, 等. 基于显-隐式格式的三维时域土-结相互作用分析的异步并行算法. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 1321–1330
Chen S L, Wang J Q, Liu Q F, et al. Asynchronous parallel algorithm for three-dimensional soil-structure interaction analysis based on explicit-implicit integration scheme (in Chinese). Sci Sin Tech, 2017, 47: 1321–1330, doi: [10.1360/N092017-00212](https://doi.org/10.1360/N092017-00212)

地震响应分析^[7], 土-结相互作用分析^[8~10]和地震模拟方法得到了广泛应用^[11,12].

以往时域动力分析方法中, 一般采用单一的时步积分格式, 在问题规模较小或问题涉及的介质波速差异不大时, 可根据需要统一选用显式积分格式或隐式积分格式. 但对于大型复杂问题, 若其涉及的介质波速差异较大, 单一地采用显式或隐式积分格式, 计算效率都将受到限制. Belytschko和Mullen^[13], Hughes和Liu^[14,15]提出显式和隐式积分结合的思想, 充分利用显、隐式积分格式的优点. Brun等人^[16]将显-隐式方法应用到混凝土框架结构的爆炸分析中, Gravouil等人^[17]对目前显-隐式积分格式进行了综述, 并提出在显式积分区域和隐式积分区域界面采用速度连续条件. 以大型土-结相互作用问题为例, 其中土体自由度很大, 采用集中质量结合时步显式积分格式, 可避免每一时步求解大型方程组, 效率较高; 而对于结构而言, 一方面, 由于其材料的剪切波速远大于一般土体的剪切波速, 若采用显式积分格式, 因稳定性的要求, 时间步距要取得很小; 另一方面, 结构自由度数较土体自由度数要少得多; 因此, 即便每一时步需要求解方程组, 结构分析采用隐式时步积分格式也比采用显式积分格式的效率. 基于此, 陈少林等人^[8,10]提出一种时域土-结相互作用分析的显-隐式算法, 土体采用显式积分格式, 结构采用隐式积分格式, 两者采用不同的时间步距, 可大大提高计算效率.

即使采用上述显-隐式算法和人工边界, 对于大型复杂结构的土结相互作用分析, 由于模拟的精度要求, 所涉及的自由度数常以百万为单位计数; 考虑到强地震持时及数值稳定性对时间步距的要求, 数值计算的时步总数亦常以万为单位计数, 求解一次地震反应(正演问题)的计算量很大, 尤其要考虑非线性时. 另外, 在工程设计中常需对比不同设计方案并考虑各种工况, 从而要求设计期限内完成多次结构地震反应的计算, 计算量非常大, 一般直接法很难在工程设计中推广应用. 对于反演问题而言, 需要求解很多次这样的正演计算, 更需提高正演计算的效率. 因此, 在保证计算结果可靠的前提下, 不断提高计算效率对最终切实地解决大型复杂工程抗震问题极为重要.

基于此, 本文在显-隐式算法和人工边界的基础上, 将土体分成若干计算区域, 结构为单独计算区域, 采用MPI(message passing interface)进行多进程并行计

算, 并以某实际核电结构为例, 实现了该计算方案, 可大大提高计算效率.

2 基本原理

2.1 土体的运动

将土体单元节点按计算时程响应时所采用的方法不同, 划分为3类(图1): 内节点(包括地表自由界面节点), 与基础相连的点和人工边界点. 其中, 与基础相连的土单元节点, 由基础运动确定, 将在第2.2节讨论.

2.1.1 内节点运动

对于任意内节点*i*, 采用集中质量显式有限元方法进行计算, 运动方程可以写成:

$$\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{u}}_i + \sum_j \mathbf{C}_{ij} \dot{\mathbf{u}}_j + \sum_j \mathbf{K}_{ij} \mathbf{u}_j = \mathbf{F}_i, \quad (1)$$

其中, *N*为与节点*i*相邻的节点总数, $\ddot{\mathbf{u}}_i$, $\dot{\mathbf{u}}_i$ 和 $\mathbf{u}_i$ 分别表示节点*i*的加速度向量、速度向量和位移向量.

$$\mathbf{M}_i = \begin{pmatrix} m_i & 0 & 0 \\ 0 & m_i & 0 \\ 0 & 0 & m_i \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中, m_i 为集中于内节点*i*的质量, $\mathbf{C}_{ij}$ 和 $\mathbf{K}_{ij}$ 分别为内节点*i*与相邻节点*j*之间的阻尼阵和刚度阵, $\mathbf{F}_i$ 为作用于内节点*i*的外荷载向量.

在时域内, 对方程(1)采用如下显式差分格式:

$$\ddot{\mathbf{u}}^P = \frac{\mathbf{u}^{P+1} + \mathbf{u}^{P-1} - 2\mathbf{u}^P}{\Delta t^2}, \quad (3)$$

图1 结构-基础-土整体分析模型示意图

$$\dot{u}^P = \frac{u^P - u^{P-1}}{\Delta t}. \quad (4)$$

则方程(1)可重写为

$$u_i^{P+1} = 2u_i^P - u_i^{P-1} - \frac{\Delta t}{m_i} \sum_j^N C_{ij}(u_j^P - u_i^{P-1}) - \frac{\Delta t^2}{m_i} \sum_j^N K_{ij}u_j^P - F_i^P, \quad (5)$$

其中, Δt 为时间步距, $\ddot{u}_i^P$, $\dot{u}_i^P$ 和 u_i^P 分别为节点 i 在 $t = P\Delta t$ 时刻的加速度向量、速度向量和位移向量. 当计算内节点运动时, F_i 为零.

2.1.2 人工边界点运动

本文采用黏弹性人工边界^[18-20]. 图2为人工边界等效弹簧、阻尼系统示意图. 人工边界的切向以及法向刚度, 按照式(6)进行取值.

$$\left. \begin{aligned} k_N &= \alpha_N \frac{G}{R}, & c_N &= \rho c_p, \\ k_T &= \alpha_T \frac{G}{R}, & c_T &= \rho c_s, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中, R 为波源点至人工边界的距离; c_s 和 c_p 分别为S波和P波波速; G 为介质的剪切模量; ρ 为介质密度; α_T 与 α_N 分别为切向与法向黏弹性人工边界的修正系数, 推荐取值^[19]为 $\alpha_T = 0.67$, $\alpha_N = 1.33$.

图2 人工边界等效弹簧阻尼系统

地震波输入可通过转化为切向和法向等效节点力的方式实现:

$$\sigma_i(t) = \sigma_f(x, y, t) + c\dot{u}_f(x, y, t) + ku_f(x, y, t), \quad (7)$$

其中, $\sigma_i(t)$ 为边界上一点 i 在 t 时刻的等效荷载; $\sigma_f(x, y, t)$ 为连续介质中由原自由场产生的应力; k 和 c 分别为黏弹性边界弹簧和阻尼系数, 分为切向和法向两个方向; $u_f(x, y, t)$ 和 $\dot{u}_f(x, y, t)$ 分别为 i 点的自由波场位移与速度.

边界点上施加的等效力可通过下式计算:

$$F_b = (\sigma_f + ku_f + c\dot{u}_f)A, \quad (8)$$

其中, A 为边界点所代表的面积. 采用式(5)计算边界节点的时程响应, 此时外荷载向量为 F_b , 刚度阵和阻尼阵需考虑边界上的弹簧和阻尼.

2.2 基础运动

连接土体和结构的部分是基础, 基础传递土与结构之间的相互作用力. 假设基础为刚性的, 其运动可由6个分量描述, 即3个平动分量和3个转动分量. 土和结构作用在基础上的合力使基础产生刚体运动.

2.2.1 土体给基础的作用力

设点 k 是土体单元与基础相连的一个节点, 土体在 k 点对基础中心产生作用力:

$$F_k = \{F_{kx}, F_{ky}, F_{kz}, M_{kx}, M_{ky}, M_{kz}\}^T, \quad (9)$$

其中, F_{kx} , F_{ky} , F_{kz} 分别为土体在 k 点对基础3个方向作用的集中力, 可由土体 k 节点及其相邻节点的局部刚度阵、阻尼阵, 以及该时步的位移和速度得到. M_{kx} , M_{ky} , M_{kz} 分别为土体在 k 点的集中力对基础产生3个方向的弯矩, 可由 F_{kx} , F_{ky} , F_{kz} 及 k 点相对于基础中心的坐标求得. 则土体对基础产生的合力为

$$F_{S1} = \sum_k F_k. \quad (10)$$

2.2.2 上部结构对基础的作用力

设点 i 是结构上与基础相连的一点, 结构点 i 对基础的作用力:

$$F_i = \{F_{ix}, F_{iy}, F_{iz}, M_{ix}, M_{iy}, M_{iz}\}^T, \quad (11)$$

其中, F_{ix} , F_{iy} , F_{iz} 分别为结构在 i 点对基础3个方向作用的集中力, M_{ix} , M_{iy} , M_{iz} 分别为结构在 i 点对基础3个方

向的弯矩. 则结构对基础产生的合力为

$$\mathbf{F}_{S2} = \sum_i \mathbf{F}_i. \quad (12)$$

2.2.3 基础的运动

根据式(10)和(12)可得施加的基础上作用力, 则刚性基础的运动方程为

$$\mathbf{M}_F \ddot{\mathbf{u}}_F = \mathbf{F}_{S1} + \mathbf{F}_{S2}, \quad (13)$$

式中, $\ddot{\mathbf{u}}_F$ 为基础的加速度向量, 包括3个平动分量和3个转动分量. $\mathbf{M}_F$ 为基础的质量矩阵:

$$\mathbf{M}_F = \begin{pmatrix} M_{F_x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{F_y} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{F_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{F_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{F_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{F_z} \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中, M_{F_x} , M_{F_y} , M_{F_z} 为基础的质量, I_{F_x} , I_{F_y} , I_{F_z} 分别为绕基础质心的3个方向的转动惯量.

采用中心差分格式可得:

$$\mathbf{u}_F^{P+1} = 2\mathbf{u}_F^P - \mathbf{u}_F^{P-1} + \Delta t^2 \mathbf{M}_F^{-1} \mathbf{F}^P, \quad (15)$$

式中, $\mathbf{u}_F^P$ 为基础在时步的位移.

由刚体运动决定了土体和结构与基础相连点的运动, 可表示为

$$\mathbf{u}^{P+1} = \mathbf{H} \mathbf{u}_F^{P+1}, \quad (16)$$

其中, $\mathbf{H}$ 为一几何转换矩阵, 可根据节点和基础质心的相对距离求出. 需要指出的是, 土体与基础相连点的位移中没有转动分量, 在计算中不予考虑.

2.3 上部结构的运动

对于上部结构其运动方程如下:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}. \quad (17)$$

采用Newmark隐式积分方法进行时域积分, 得:

$$\begin{aligned} & (b_1 \mathbf{M} + b_4 \mathbf{C} + \mathbf{K}) \mathbf{u}^{P+1} \\ & = \mathbf{F}^{P+1} + \mathbf{M} (b_1 \mathbf{u}^P + b_2 \dot{\mathbf{u}}^P + b_3 \ddot{\mathbf{u}}^P) \\ & + \mathbf{C} (b_4 \mathbf{u}^P + b_5 \dot{\mathbf{u}}^P + b_6 \ddot{\mathbf{u}}^P), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} b_1 &= 1 / (\beta \Delta t^2), & b_2 &= 1 / (\beta \Delta t), \\ b_3 &= 1 - 1 / (2\beta), & b_4 &= \gamma \Delta t b_1, \\ b_5 &= 1 + \gamma \Delta t b_2, & b_6 &= \Delta t (1 + \gamma b_3 - \gamma). \end{aligned} \quad (19)$$

求解积分式(18)组成的代数方程组, 可得到结构上各节点的位移.

2.4 土-结相互作用分析的步骤

由于结构采用无条件稳定的Newmark隐式积分算法, 所以时间步距的选取满足精度要求即可, 可较土体分析的时间步距大, 即结构和土体可以采用不同的时间步距. 已知 P 时步及以前各时步土、基础和结构的位移, 求解 $(P+1)$ 时步各点的位移, 基本步骤如下:

(1) 根据递推式(5)可以计算土体内部节点及人工边界节点 $(P+1)$ 时步的位移;

(2) 根据式(15), 可以由 P 时步结构和土体作用于基础上的力计算基础 $(P+1)$ 时步的位移, 进而可以得到土体及结构与基础相连点 $(P+1)$ 时步的位移;

(3) 结构底部节点 $(P+1)$ 时步的位移作为结构约束, 可使用商业软件采用瞬态分析法, Newmark隐式积分格式, 计算结构响应, 并得到 $(P+1)$ 时步结构对基础施加的力;

(4) 重复以上各步, 即可得到土-基础-结构体系各时刻的反应.

3 并行算法

本文采用集中质量显式有限元方法计算有限土体内部节点的响应. 在该方法中, 某节点 $(P+1)$ 时刻的位移, 仅与周围局部节点系在 P 及 $(P-1)$ 时刻的位移有关, 即波动的时空局部性. 因此, 可将有限土体划分为若干区域, 多个进程并行计算, 通过进程间传递信息, 实现对有限土体的分析, 从而提高计算效率.

MPI是一个消息传递接口的编程标准^[21], 可结合C, Fortran等编程语言开发并程序. 本文基于所采用分析方法的特点, 在自编的串行Fortran程序的基础上, 结合MPI协议, 编写了多进程并程序.

3.1 土体区域的并行计算

以图3所示情形为例, 将有限土体沿 X 方向划分为

图3 土-结相互作用分析示意图

3个子区域: 土体1、土体2和土体3, 相邻子区域间重叠一层单元。假设 P 及 $(P-1)$ 时刻系统的反应已知, 各子区域的内部节点和人工边界节点在 $(P+1)$ 时刻的反应, 可分别通过式(5)独立计算。对于土体子区域的边界点, 其也为相邻子区域的内节点, 例如图3中土体子区域1的边界点 j , 也是土体子区域2的内节点, 其反应可在土体子区域2中计算, 并通过进程间通信, 传递给土体子区域1。由2.4节中的分析步骤可知, 土体(基础)与结构的计算是顺序的、串行的。若土体子区域2的计算时间加上结构的计算时间大于土体子区域1和3的计算时间, 则对土体区域实行并行计算的效果, 等同于将原土体区域的土-结相互作用问题, 缩小为土体子区域2的土-结相互作用问题。下面对其效率进行分析。

结构和土体分析分别选用不同的时间步距 Δt_1 和 Δt_2 , 并有 Δt_1 。设每时步(以 Δt_1 为时步)结构分析的用时为 t^{st} 。将有限土体划分为 N 个子区域, 相应地有 N 个进程并行计算。设进程 i 完成单一时步土体分析的理论时长为 t_i^{so} ($i = 1, 2, \dots, N$), 忽略MPI通信所需时间, 则土体计算一时步所需的时间为 $t^{so} = \text{MAX}(t_1^{so}, t_2^{so}, \dots, t_N^{so})$ 。土-结相互作用分析过程如图4所示。其中, 时间轴上的圆点表示时间步, 圆点间的标注表示每时步的计算时间, 坐标轴的上方表示结构分析过程, 下方表示土体分析过程, 向上箭头表示该时刻土体(基础)传输给结构底部位移, 启动结构分析; 向下箭头表示结构在该时刻传输给基础反力。结构分析和土体分析间的关系是依次串行的。

假设各土体进程的计算时间相同, 均为 t^{so} , 串行程序(土体不采用并行)完成 n 步(以 $t^{\text{serial}} = n \cdot N \cdot t^{so} + t^{st}$ 为时步)计算的时间为

图4 土体并行时土-结相互作用分析过程示意图

$$t^{\text{serial}} = n \cdot N \cdot t^{so} + t^{st}. \quad (20)$$

并行程序(土体采用并行)完成 n 步计算的时间为

$$t^{\text{parallel}} = n \cdot t^{so} + t^{st}. \quad (21)$$

此时, 并行程序与串行程序计算时间的比值为

$$\eta = \frac{t^{\text{parallel}}}{t^{\text{serial}}} = \frac{n \cdot t^{so} + t^{st}}{n \cdot N \cdot t^{so} + t^{st}} = \frac{n + r}{nN + r}, \quad (22)$$

$$r = \frac{t^{st}}{t^{so}}, \quad (23)$$

其中, r 表示结构分析一时步($r \ll n$)所需的计算时间与土体子区域分析一时步($r \ll n$)所需的计算时间之比。由式(22)知, 当 $r \ll 1$ 时, 也即当结构分析一时步所需的时间远小于并行计算土体子区域分析一时步所需的时间, η 接近 $1/N$ (土体自由场并行计算的效率); 随着 r 的增大, η 增大, 并行计算的效率降低, 当 $r \gg nN$ 时, 也即结构分析的时间远大于土体分析的时间, η 接近1, 此时仅对土体区域采用并行计算对土-结相互作用体系的计算效率提高甚微。对于大型复杂结构的土-结相互作用问题, 结构分析一时步的时间将大于土体并行计算的时间($r \geq n$), 仅仅对土体区域采用并行, 计算效率得不到充分提高, 需改变土体和结构计算之间的串行关系, 进一步提高并行计算的效率。

3.2 土体与结构并行的计算

土体(与基础)在第 kn 时步传输给结构基底位移, 启动结构第 k 时步的分析。土体和结构串行时(3.1节), 需等待结构分析完第 k 时步, 将第 k 时步(对土体而言为第 kn 时步)的反力传输给基础, 土体(与基础)再进行第 $(kn+1)$ 至 $(k+1)n$ 时步的计算, 再启动第 $(k+1)$ 步的结构分析。土体和结构间的数据传输均在第 kn 时步进行, 属于“同步”传输。若土体(与基础)不必等待, 如图5所示, 而是在结构进行第 k 时步分析时, 同时进行第 $(kn+1)$ 及后续时步的计算。在第 $(kn+1)$ 至 $(kn+m-1)$ 时步的计

图5 土体与结构并行时土-结相互作用分析过程示意图

算中, 其中 $m \leq n$, 采用的是结构第 $(k-1)$ 时步给基础的反力. 在第 $(kn+m)$ 时步, 结构将第 k 时步的反力传给基础, 土体(基础)进行第 $(kn+m)$ 至 $(k+1)n$ 的计算中, 采用的是结构第 k 时步给基础的反力. 土体和结构间的数据传输分别在第 kn 和 $(kn+m)$ 时步进行, 属于“异步”传输. 上述分析过程中, 土体(与基础)分析和结构分析之间为并行关系, 可以进一步提高计算效率. 下面分析其效率. 若 $t^{st} \leq nt^{so}$, 即 $r \leq n$, 忽略进程间通信的时间, 此时完成 n 步(以 $\eta = \frac{t^{asy}}{t^{serial}} = \frac{n \cdot t^{so}}{n \cdot N \cdot t^{so} + t^{st}} = \frac{n}{Nn+r}, r \leq n$ 为时步)土-结相互作用分析的时间为

$$t^{asy} = n \cdot t^{so}. \quad (24)$$

与串行程序计算时间的比值为

$$\eta = \frac{t^{asy}}{t^{serial}} = \frac{n \cdot t^{so}}{n \cdot N \cdot t^{so} + t^{st}} = \frac{n}{Nn+r}, r \leq n. \quad (25)$$

显然, r 值越大, 计算效率越高, 当 $r = n$ 时, 即结构分析时间与 n 步土体子区域分析时间相等时, 效率最高, $\eta = \frac{1}{N+1}$. 当 $r = 0$ 时, $\eta = \frac{1}{N}$, 退化为土体自由场分析时并行计算的效率.

若 $t^{st} > nt^{so}$, 即 $r > n$, 则土体(与基础)进行完 n 个时步的分析后, 应等待第 k 步结构分析所求得的底部反力, 用于第 $(k+1)n$ 及后续时步的土体分析. 此时完成 n 步土-结相互作用分析的时间为

$$t^{asy} = t^{st}. \quad (26)$$

与串行程序计算时间的比值为

$$\eta = \frac{t^{asy}}{t^{serial}} = \frac{t^{st}}{n \cdot N \cdot t^{so} + t^{st}} = \frac{r}{nN+r}, r > n. \quad (27)$$

4 算例验证

我们编制了相应的计算程序, 实现了显-隐式积分格式的三维土-结相互作用分析方法. 对于无限域土体和基础的动力响应, 采用自编的Fortran程序进行分

析. 对于结构响应, 其每一时步的计算独立于土体的计算, 因此可使用ANSYS等商业软件进行分析, 结构和土体可分别采用不同的时间步距. 通过在Fortran程序中调用ANSYS, 实现土-结相互作用动力分析. 进一步采用MPI协议, 编程实现了前述两种并行方案. 下面, 以某核电结构为例进行分析计算, 验证该方法的可行性和高效性.

4.1 计算模型

该核电站结构模型如图6, 结构单元数为597686, 相应的节点数为700194. 选取3层水平成层土地, 土层材料参数及相应厚度见表1. 选取土体计算区域的尺寸为 $640 \text{ m} \times 360 \text{ m} \times 60 \text{ m}$, 土体离散为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的六面体八节点实体单元, 单元总数为1728000, 节点总数为1801131. 刚性基础尺寸为 $92 \text{ m} \times 60 \text{ m} \times 16 \text{ m}$. 选取脉冲宽度0.10 s的单位脉冲作为SV波垂直入射, 土体采用显式中心差分格式, 时间步距 $\Delta t_1 = 5 \times 10^{-5} \text{ s}$, 计算步数为24576步, 结构采用Newmark积分格式, 时间步距 $\Delta t_2 = 25 \Delta t_1$, 也即 $n = 25$.

方案一采用串行算法计算, 也即结构、基础和土体在同一进程计算, 其计算结果及计算用时主要用作对比参照. 计算模型如图7(a)所示.

图6 (网络版彩图)某核电结构模型

表1 下卧土体参数^{a)}

土层编号	密度 (kg/m ³)	厚度 (m)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	泊松比	阻尼比
1	1950	20	320	2090	0.488	0.0005
2	1600	20	554	1492	0.42	0.0005
3	2800	20	1600	3826	0.394	0.0005

a) V_s 为剪切波速, V_p 为压缩波速

图7 不同方案的计算模型示意图. (a) 方案一; (b) 方案二; (c) 方案三

方案二仅考虑对有限土体进行并行计算, 相邻土体子区域间存在一层重叠单元. 子区域1的尺寸为 $242\text{ m} \times 360\text{ m} \times 60\text{ m}$, 子区域2的尺寸为 $160\text{ m} \times 360\text{ m} \times 60\text{ m}$, 子区域3的尺寸为 $242\text{ m} \times 360\text{ m} \times 60\text{ m}$, 也即 $N=3$. 结构、基础与土体子区域2在同一进程计算, 相邻土体子区域间通过MPI协议传递消息. 计算模型如图7(b)所示.

方案三在方案二的基础上($N=3$), 为结构分析单独分配一个进程, 采用3.2节中的异步并行方案, 其中 $m=20$. 方案三的计算模型如图7(c)所示.

4.2 计算结果及分析

4.2.1 方案一与方案二计算结果及对比

由于输入垂直入射的SV波, 体系的位移反应主要以X方向的平动位移为主, 其余方向位移较小, 这里仅给出结构、基础和土体部分节点的位移. 由图8~10可以看出, 并行算法(方案二)与串行算法(方案一)的计算结果完全一致, 说明本文3.1节中土体划分区域并行算法的可行性. 从图8(a)和图10中X方向的位移时程可看出, 脉冲反应结束后, 结构进入自由振动阶段, 其频率为 2.38 Hz , 由于土结相互作用的影响, 略小于结构X方向的自振频率 2.54 Hz . 基础受到结构的作用, 按同

图8 (网络版彩图)基础位移. (a) X方向平动位移; (b) Z方向转动位移

图9 (网络版彩图)土体某节点X方向位移

样的频率做受迫振动. 另外, 从图8可以看出, 计算结果出现了数值失稳现象. 这里, 土体计算区域的人工边界采用的是黏弹性边界, 黏弹性边界不会导致计算失稳, 所以数值失稳应该是显-隐式积分格式引起的.

4.2.2 方案二与方案三计算结果及分析

由图11~图13可以看出, 除了数值失稳外, 方案三

图 10 (网络版彩图)结构顶部某点A(见 图6) X方向位移

图 12 (网络版彩图)土体某节点X方向平动位移

图 11 (网络版彩图)基础X方向(a)和基础Y方向(b)平动位移

图 13 (网络版彩图)结构位移. (a) 点A(见 图6)X方向位移; (b) 点C(见 图6)Y方向位移

的计算结果与方案二的计算结果一致. 同时从图11及图13中可以看到, 采用异步并行方案(也即为结构分析单独设置进程), 计算结果稳定, 也即异步并行方案可以抑制本文显-隐式积分格式的失稳, 是一种可能的抑制失稳措施. 文献[13,15]采用能量法, 证明了显-隐式积分方案的稳定性取决于其中的显式

积分格式和隐式积分格式各自的稳定性, 也即采用的显式、隐式积分格式都稳定, 则显-隐式积分格式稳定. 从本文的算例来看, 这一结论不适合于本文所采用的显-隐式积分格式. 关于本文显-隐式积分格式的稳定性, 及异步并行方案抑制失稳的机理需进一步研

究和讨论.

4.2.3 计算时间对比

本文算例的计算使用联想 ThinkCentre M8400t-N000 台式计算机, CPU 是 Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU@3.40GHz(3500 MHz), 主存大小为 16 G, 操作系统为 Ubuntu 16.04 LTS. 各算例的计算时间见表 2.

由表 2 可知, 仅考虑土体区域并行时(方案二), 实际计算时间仅相当于串行算法(方案一)的 39.11%. 其中, $t^s \approx 45$ s, $t^{so} \approx 4$ s, 由公式(22)可得 $\eta = 42.02\%$. 采用异步并行方案(方案三), 计算时间相当于串行算法的 26.60%, 由式(25)可得 $\eta = 28.80\%$.

通过 3 个算例, 不仅验证了显-隐式结合算法在进行土-结相互作用分析时的有效性, 而且基于该方法

并行计算可显著提高计算效率.

5 结论

提出并实现了一种高效的三维时域土-结构动力相互作用分析的并行计算方法. 该方法从两个方面提高土-结相互作用时域分析的效率: 一方面, 根据土-结相互作用体系中土体子系统和结构子系统各自的特点, 分别选择显式时步积分格式和隐式时步积分格式, 以及不同的时间步距, 充分利用显、隐式格式的优点, 提高整体计算效率; 另一方面, 结构分析和土体分析在每一时步相互独立, 且土体分析的集中质量显式有限元结合局部人工边界的方法, 具有波动的时空局部性特点, 这种结构分析与土体分析、土体各节点分析间的解耦性, 很方便实行并行计算, 可进一步提高效率. 通过某核电模型的土-结相互作用分析算例, 验证了该方法的可行性和高效性. 同时由于该方法为时域分析方法, 可进一步考虑土体和结构的材料非线性, 以及土体和基础间的接触非线性, 将在后续工作中进行讨论.

表 2 各算例计算时长

方案	方案一	方案二	方案三
计算时间(h)	88.2	34.5	23.5

参考文献

- Bolisetti C, Whittaker A S, Mason H B, et al. Equivalent linear and nonlinear site response analysis for design and risk assessment of safety-related nuclear structures. *Nucl Eng Des*, 2014, 275: 107–121
- Coleman J L, Bolisetti C, Whittaker A S. Time-domain soil-structure interaction analysis of nuclear facilities. *Nucl Eng Des*, 2016, 298: 264–270
- Kausel E. Early history of soil-structure interaction. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 2010, 30: 822–832
- Lou M, Wang H, Chen X, et al. Structure-soil-structure interaction: Literature review. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2011, 31: 1724–1731
- Ostadan F, Deng N. Computer Program: SASSI2010—A System for Analysis of Soil-Structure Interaction. Version 1.1. San Francisco: Geotechnical and Hydraulic Engineering Services. Bechtel National Inc., 2011
- 廖振鹏. 工程波动理论导论. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2002. 136–285
- 杨笑梅, 赖强林. 二维土层地震反应分析的时域等效线性化解法. *岩土力学*, 2017, 38: 847–856
- 陈少林, 唐敢, 刘启方, 等. 三维土-结构动力相互作用的一种时域直接分析方法. *地震工程与工程振动*, 2010, 30: 24–31
- 杨笑梅, 关慧敏, 张学胜, 等. 分析三维土-结构动力相互作用体系等效输入的时域显式有限元法. *土木工程学报*, 2010, 43(增刊 1): 535–540
- 陈少林, 赵宇昕. 一种三维饱和土-基础-结构动力相互作用分析方法. *力学学报*, 2016, 48: 1362–1371
- 刘启方, 丁海平, 袁一凡, 等. 三维地震断层动力破裂的显式并行有限元解法. *地震工程与工程振动*, 2003, 23: 22–28
- 刘启方. 基于运动学和动力学震源模型的近断层地震动研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2005. 130–133
- Belytschko T, Mullen R. Stability of explicit-implicit mesh partitions in time integration. *Int J Numer Meth Engng*, 1978, 12: 1575–1586
- Hughes T J R, Liu W K. Implicit-explicit finite elements in transient analysis: Implementation and numerical examples. *J Appl Mech*, 1978, 45: 375–378
- Hughes T J R, Liu W K. Implicit-explicit finite elements in transient analysis: Stability theory. *J Appl Mech*, 1978, 45: 371–374
- Brun M, Batti A, Limam A, et al. Explicit/implicit multi-time step co-computations for blast analyses on a reinforced concrete frame structure. *Finite Elem Anal Des*, 2012, 52: 41–59
- Gravouil A, Combescure A, Brun M. Heterogeneous asynchronous time integrators for computational structural dynamics. *Int J Numer Meth*

Engng, 2015, 102: 202–232

- 18 刘晶波, 李彬. 三维黏弹性静-动力统一人工边界. 中国科学E辑: 技术科学, 2005, 35: 966–980
- 19 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致黏弹性人工边界及等效黏弹性边界单元. 工程力学, 2007, 24: 31–37
- 20 章小龙, 李小军, 陈国兴, 等. 黏弹性人工边界等效荷载计算的改进方法. 力学学报, 2016, 48: 1126–1135
- 21 Forum M P I. Document for a standard message-passing interface. Technical Report. University of Tennessee, 1993. 1735–1749

Asynchronous parallel algorithm for three-dimensional soil-structure interaction analysis based on explicit-implicit integration scheme

CHEN ShaoLin¹, WANG JunQuan¹, LIU QiFang², ZHOU GuoLiang³ & TANG Hui³

¹Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

²Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

³Nuclear and Radiation Safety Center of Ministry of Environmental Protection, Beijing 100101, China

A computationally efficient explicit-implicit FEM in parallel manner to analyze the response of three-dimensional soil-structure system subjected to seismic wave is presented. The unbounded soil is modelled by lumped-mass explicit finite element method and viscoelastic artificial boundary, the structure is analysed through implicit finite element method, and response of the rigid foundation is calculated through explicit time integration scheme. The different time steps can be chosen for the explicit and implicit integration scheme, which can greatly improve the efficiency. The synchronous and asynchronous parallel algorithms using MPI are proposed for the soil-structure interaction analysis. The codes for this method are programmed. Example for seismic response analysis of a nuclear plant is given, which validates the feasibility and efficiency of the proposed method.

soil-structure interaction, lumped mass explicit finite element method, viscoelastic artificial boundary, parallel algorithm, explicit-implicit integration scheme

doi: 10.1360/N092017-00212