

DOI: 10.11779/CJGE202002012

非水平成层场地上核电结构时域土-结相互作用分析

陈少林¹, 张 娇¹, 郭琪超¹, 周国良², 刘启方³, 王俊泉¹

(1. 南京航空航天大学土木工程系, 江苏 南京 210016; 2. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100101; 3. 苏州科技大学, 江苏 苏州 215009)

摘 要: 目前核电土-结相互作用分析的主流软件 SASSI, 采用频域等效线性化, 不能很好地考虑土体强非线性, 且仅适合于水平成层场地。时域土-结相互作用分析方法可以考虑土体强非线性以及非水平成层场地, 但效率较低, 难于用于实际工程。采用一种高效的时域土-结构动力相互作用分析的分区算法, 地基无限域通过集中质量显式有限元和黏弹性人工边界进行模拟, 上部结构通过隐式有限元方法进行分析, 两者可采用不同的时间步距, 并通过 MPI 通信协议, 实现并行计算。以某一核电结构模型为例, 分析了某非水平成层场地上核电结构在三向地震波输入下的反应, 验证了该方法的高效性和用于大型实际工程的可行性。

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

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)02-0308-09

作者简介: 陈少林(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土-结构相互作用等方面的教学和科研工作。E-mail: iemcsl@nuaa.edu.cn。

Time-domain soil-structure interaction analysis of nuclear facilities on non-horizontal layered site

CHEN Shao-lin¹, ZHANG Jiao¹, GUO Qi-chao¹, ZHOU Guo-liang², LIU Qi-fang³, WANG Jun-quan¹

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Nuclear and

Radiation Safety Center of Ministry of Environmental Protection, Beijing 100101, China; 3. Suzhou University of Science and Technology,

Suzhou, 215009, China)

Abstract: The state-of-the-practice soil-structure interaction (SSI) of nuclear facilities are analyzed using the frequency-domain approaches, represented by the SASSI program. SASSI incorporates the strain-dependent characteristics of soils only indirectly, via the equivalent-linear method, and cannot account for non-horizontal layered soil case. SSI analysis in the time domain may capture non-linearity of materials in the soils and geometric nonlinearity in the foundation (gapping and sliding), but now it is not efficient in practice. In this study, a computationally efficient explicit-implicit FEM in parallel manner to analyze the response of three-dimensional soil-structure system subjected to three-direction seismic waves is proposed. The unbounded soil is modelled by the lumped-mass explicit finite element method and viscoelastic artificial boundary, the structure is analyzed by the implicit finite element method, and the response of the rigid foundation is calculated by the explicit time integration scheme. Different time steps can be chosen for the explicit and implicit integration scheme, which can greatly improve the efficiency. The synchronous parallel algorithms using MPI are used. The codes for this method are programmed. An example for seismic response analysis of a nuclear plant on non-horizontal layered site is given to validate the feasibility and efficiency of the proposed method.

Key words: soil-structure interaction; lumped-mass finite element; viscoelastic artificial boundary; parallel algorithm; explicit-implicit integration scheme

0 引 言

规范规定, 核电屏蔽厂房的地震反应分析需要考虑土-结相互作用的影响^[1]。按照求解系统的不同, 土-结相互作用分析一般分为子结构法和直接法^[2-3]。子结构法将土-结体系划分为地基、基础、结构子系统, 先求解无质量基础的散射问题得到基础输入, 再

通过求解基础动力刚度来考虑地基无限域的影响, 最后以动力刚度为约束, 求得结构在基础输入下的反应。由于基础动力刚度为频域函数, 子结构方法通常在频

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51978337); 国家重大科技专项子课题 (2013ZX06002001-9)

收稿日期: 2019-05-28

域内求解, 该方法的代表性软件为 SASSI^[4]。通过频率插值技术, 效率较高, SASSI 软件目前仍是核电土-结相互作用分析的主流, 但其在频域采用等效线性化方法考虑土体非线性, 在强震时不能很好地体现土体特性, 且不能考虑土与基础间的接触非线性, 目前只能分析水平成层场地情形。直接法^[5-7], 又称整体法, 是将上部结构、基础及地基作为一个整体系统进行分析, 一般在时域内分析, 可考虑土体强非线性和土体与基础间的接触非线性, 可适用于非水平成层场地。但直接法涉及的自由度数较多, 计算量大, 效率较低。Bolisetti 等^[8]通过对比等效线性化和时域非线性方法, 得到两者在中小地震强度时结果接近, 对于强震, 应该采用时域非线性。Kabanda 等^[9]采用 OpenSees, 土体采用非线性黏弹性模型, 对花莲大型土结相互作用试验模型进行分析, 并将分析结果与 SASSI 软件分析的结果以及实测结果进行对比。结果表明, 土体时域非线性黏弹性模型更能反映强地震下土体和土-结系统的反应, 但时域非线性土-结相互作用分析效率太低 (23961 个节点, 18200 个单元, 8000 时步数, 在 Intel Core i7 2.93 GHz, 8 GB 内存的微机上用 28 d)。因此, 发展高效的时域土-结相互作用分析方法十分必要。

廖振鹏^[10]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, 在场地地震响应分析^[11], 土-结相互作用分析^[12-14]和地震动模拟方面^[15-16]得到了广泛应用。在此基础上, 陈少林等^[12, 14, 17]提出一种时域土-结相互作用分析的显-隐式分区算法, 考虑土体和结构在材料和单元类型上的差异, 分别选取适合各自特点的计算格式和时间步距: 对于土-基础-结构体系而言, 土体计算区域较大, 自由度较多, 采用集中质量显式有限元方法效率更高。结构自由度相对较少, 采用隐式有限元方法效率较高。基础采用显式积分格式进行求解, 土体和结构通过基础进行耦合, 并采用 MPI (message passing interface) 通讯协议^[18], 实现了显-隐式时域土-结相互作用的并行计算, 进一步提高了计算效率, 使得该方法用于实际核电结构的土-结相互作用分析成为可能。

另外, 随着中国核电的发展, 核电站的拟选场址并不总是水平成层等规则场址。非水平成层场地对核电结构地震响应的影响分析受到关注, 而目前核电分析的商用软件 SASSI 只能考虑水平成层场地。鉴于此, 本文采用高效的时域土-结相互作用分析的分区算法, 根据实际资料, 建立某非水平成层场地的三维模型和核电模型, 考虑三向地震波输入, 分别进行场地的地震反应分析和核电结构的土-结相互作用分析。

1 基本原理

图 1 为结构-基础-土体模型示意图, 对该体系进行有限元离散, 并将节点类型分为结构节点、结构与基础的界面点、土体和基础节点, 以及人工边界点。则体系的运动方程可写为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{M}_{sb} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{bs} & \mathbf{M}_{bb}^s + \mathbf{M}_{bb}^g & \mathbf{M}_{bi} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{ib} & \mathbf{M}_{ii} & \mathbf{M}_{ia} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{ai} & \mathbf{M}_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_s \\ \ddot{\mathbf{u}}_b \\ \ddot{\mathbf{u}}_i \\ \ddot{\mathbf{u}}_a \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sb} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{bs} & \mathbf{C}_{bb}^s + \mathbf{C}_{bb}^g & \mathbf{C}_{bi} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{ib} & \mathbf{C}_{ii} & \mathbf{C}_{ia} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_{ai} & \mathbf{C}_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_s \\ \dot{\mathbf{u}}_b \\ \dot{\mathbf{u}}_i \\ \dot{\mathbf{u}}_a \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sb} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{bs} & \mathbf{K}_{bb}^s + \mathbf{K}_{bb}^g & \mathbf{K}_{bi} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{ib} & \mathbf{K}_{ii} & \mathbf{K}_{ia} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{K}_{ai} & \mathbf{K}_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}_b \\ \mathbf{u}_i \\ \mathbf{u}_a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_a \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中 下标 s, b, i 和 a 分别表示结构节点、结构与基础的界面节点、土体节点和人工边界点; 上标 s 和 g 分别表示结构和基础; \mathbf{K}_{aa} 和 \mathbf{C}_{aa} 分别为黏弹性边界的弹簧和阻尼系数矩阵; \mathbf{F}_a 为地震波输入时施加在人工边界节点上的等效荷载^[20-21]。若采用透射边界, 可通过多次透射公式在人工边界上施加位移^[22]。对方程

(1) 通过时步积分方法直接进行求解, 即为土-结相互作用的直接法或整体解法。若采用隐式解法, 则需每时步求解大型方程组, 计算量很大, 十分耗时。若采用集中质量显式积分方法, 每一时步不求解大型方程组, 但结构波速较大, 稳定性要求时间步距较小, 计算时步数较多, 效率受影响。

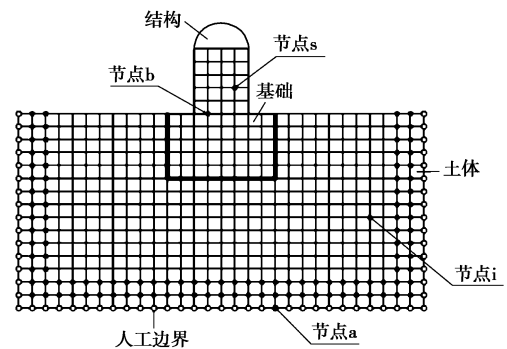


图 1 结构-基础-土整体分析模型示意图

Fig. 1 Diagram of structure-foundation-soil overall analysis model

将整个系统进行分区, 分为上部结构、下部基础和土体, 按此分区, 将方程 (1) 分开写成如下形式:

$$\mathbf{M}_{ss} \ddot{\mathbf{u}}_s + \mathbf{C}_{ss} \dot{\mathbf{u}}_s + \mathbf{K}_{ss} \mathbf{u}_s = -\mathbf{M}_{sb} \ddot{\mathbf{u}}_b - \mathbf{C}_{sb} \dot{\mathbf{u}}_b - \mathbf{K}_{sb} \mathbf{u}_b, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_{bb}^s + M_{bb}^g & M_{bi} & 0 \\ M_{ib} & M_{ii} & M_{ia} \\ 0 & M_{ai} & M_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_a \end{Bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} C_{bb}^s + C_{bb}^g & C_{bi} & 0 \\ C_{ib} & C_{ii} & C_{ia} \\ 0 & C_{ai} & C_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_i \\ \dot{u}_a \end{Bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} K_{bb}^s + K_{bb}^g & K_{bi} & 0 \\ K_{ib} & K_{ii} & K_{ia} \\ 0 & K_{ai} & K_{aa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_i \\ u_a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -M_{bs}\ddot{u}_s - C_{bs}\dot{u}_s - K_{bs}u_s \\ 0 \\ F_a \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, 式(2)的右端项为基础对结构的作用力, 式(3)的右端项第一分量为结构给基础的作用力, 两者为一对作用力和反作用力。考虑到地震作用的频率远小于爆炸等冲击荷载, 且结构相对于土体而言自由度较少, 所以结构采用隐式积分方法效率更高, 如无条件的稳定的 Newmark 法, 时间步距的选取满足精度要求即可。土体自由度数较大, 采用集中质量显式积分方法效率更高。

因此, 对式(3)采用集中质量形式, 并采用显式积分格式, 如单边中心差分格式:

$$\ddot{u}^p = \frac{u^{p+1} + u^{p-1} - 2u^p}{\Delta t^2}, \quad (4)$$

$$\dot{u}^p = \frac{u^p - u^{p-1}}{\Delta t} \quad (5)$$

则式(3)中每一节点 k 的位移可通过如下方程求解:

$$\begin{aligned} u_k^{p+1} = & 2u_k^p - u_k^{p-1} - \frac{\Delta t}{m_k} \sum_j C_{kj} (u_j^p - u_j^{p-1}) - \\ & \frac{\Delta t^2}{m_k} \sum_j K_{kj} u_j^p - F_k^p \end{aligned} \quad (6)$$

式中 N 为与节点 k 相邻的节点总数; Δt 为时间步距, \ddot{u}_k^p , \dot{u}_k^p 和 u_k^p 分别为节点 k 在 $t = p\Delta t$ 时刻的加速度向量、速度向量和位移向量; m_k 为集中于节点 k 的质量; C_{kj} 和 K_{kj} 分别为节点 k 与相邻节点 j 之间的阻尼阵和刚度阵; F_k^p 为 p 时刻作用在节点 k 上的荷载向量。若 k 属于基础与结构相连的界面点, 则 F_k^p 为结构施加在基础上的荷载; 若 k 属于人工边界点, 当采用黏弹性边界时, F_k^p 为地震输入时的等效荷载, 当采用透射边界时, 该点的位移直接由多次透射公式求得; 若 k 为基础和土体的其余节点, 则 F_k^p 为零。

由式(4)~(6)求得土体和基础 $(p+1)$ 时刻的反应后, 则式(2)的右端项已知, 由 Newmark 积分方法可求得结构 $(p+1)$ 时刻的反应, 包括结构作用在基础上 $(p+1)$ 时刻的荷载。每一时步求解式(2)右端项比较麻烦, 实际上由于基础和结构在界面点的位移连续, 可以每时步给结构施加位移约束, 求得结构的

反应后, 再反馈给基础以反力, 如图2所示。对于刚性基础情形, 具体公式和步骤见文献[17]。另外, 结构和土体可根据各自需要, 采用不同的时间步距, 其算法见图3所示。

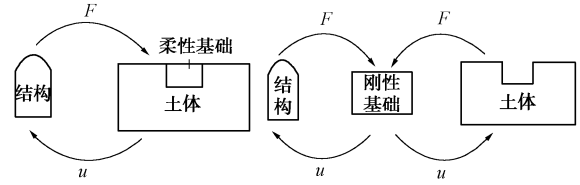


图2 数据交换示意图

Fig. 2 Diagram of data exchange

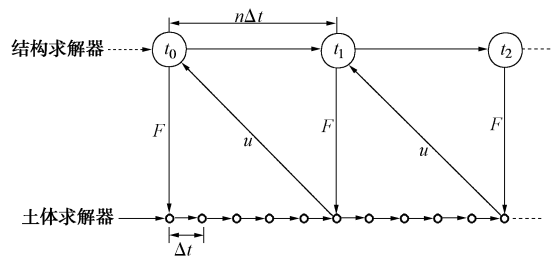


图3 算法示意图

Fig. 3 Diagram of algorithm

2 实例分析

笔者编制了相应的计算程序, 实现了显-隐式积分格式的三维土-结相互作用分析并行计算方法。对于无限域土体和基础的动力响应, 采用自编 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。通过耦合算法和 Fortran 程序与 ANSYS 之间的交互, 实现土-结相互作用动力分析。由于采用分区计算方式, 土体和结构可以独立进行建模, 且在每一时步, 两者独立进行计算。土体采用 MPI 协议, 编程实现并行。结构可采用 ANSYS 中的并行计算方案。土体和结构之间的并行通过异步传输数据实现, 具体见文献[17]。下面对某非均匀场址上核电结构的地震反应进行分析。

2.1 模型及输入

(1) 场地模型

根据地脉动测试和钻孔资料, 获得了某核电场地的剪切波速剖面, 如图4所示。土体参数如表1所示。选取土体计算区域的尺寸为 $640 \text{ m} \times 360 \text{ m} \times 194 \text{ m}$, 边界采用黏弹性边界。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 5587200, 节点总数为 5693898。采用集中质量显式有限元方法进行分析, 时间步距 $\Delta t_1 = 1 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。

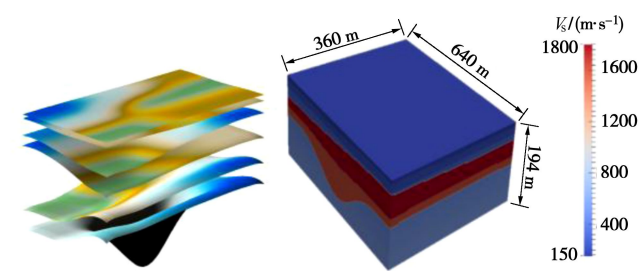


图 4 场地剪切波速剖面图及模型

Fig. 4 Shear wave velocity profile and model of site

表 1 土体参数

Table 1 Parameters of soils

| 土体 种类 | 密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | $v_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 泊松比 | 阻尼比 |
|----------|--------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------|------|
| 1 | 1800 | 150 | 1942 | 0.497 | 0.05 |
| 2 | 1950 | 180 | 2097 | 0.497 | 0.05 |
| 3 | 1900 | 240 | 2204 | 0.494 | 0.05 |
| 4 | 1950 | 320 | 2090 | 0.488 | 0.05 |
| 5 | 2450 | 1800 | 3817 | 0.357 | 0.05 |
| 6 | 2800 | 1600 | 3825 | 0.394 | 0.05 |
| 7 | 1600 | 539 | 1451 | 0.420 | 0.05 |
| 8 | 1600 | 541 | 1455 | 0.420 | 0.05 |
| 9 | 1600 | 543 | 1459 | 0.420 | 0.05 |
| 10 | 1600 | 545 | 1465 | 0.420 | 0.05 |
| 11 | 1600 | 547 | 1469 | 0.420 | 0.05 |
| 12 | 1600 | 549 | 1475 | 0.420 | 0.05 |
| 13 | 1600 | 550 | 1481 | 0.420 | 0.05 |
| 14 | 1600 | 552 | 1486 | 0.420 | 0.05 |
| 15 | 1600 | 554 | 1491 | 0.420 | 0.05 |
| 16 | 1600 | 556 | 1496 | 0.420 | 0.05 |
| 17 | 1600 | 558 | 1501 | 0.420 | 0.05 |
| 18 | 1600 | 560 | 1507 | 0.420 | 0.05 |
| 19 | 1600 | 562 | 1513 | 0.420 | 0.05 |
| 20 | 1600 | 564 | 1519 | 0.420 | 0.05 |
| 21 | 1600 | 566 | 1525 | 0.420 | 0.05 |
| 22 | 1600 | 562 | 1513 | 0.420 | 0.05 |

注: v_s 为剪切波速, v_p 为压缩波速。

(2) 结构模型

核电结构模型如图 5 所示, 核电结构高 91.25 m, 底部长 90.80 m, 宽约 54.19 m。结构单元数为 597686, 相应的节点数为 700194。刚性基础尺寸为 92 m \times 60 m \times 16 m。结构采用 Newmark 隐式积分格式, 时间步距 $\Delta t_2 = 25\Delta t_1$, 即 $\Delta t_2 = 2.5\times 10^{-3}$ s。

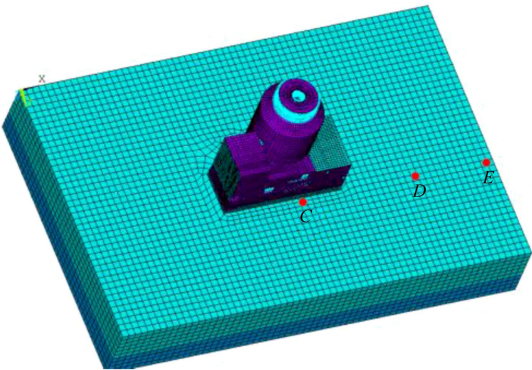


图 5 计算模型示意图

Fig. 5 Diagram of model

(3) 输入地震波

采用地震安全性评价得到的人工地震波。图 6 分别是露头基岩处的 3 个方向的加速度时程及其傅里叶幅值谱。这里假定 3 个方向的波垂直入射, X 方向为 SV 波, Y 方向为 SH 波, Z 方向为 P 波, 在边界区近似为水平成层场地, 取 194 m 深度作为输入基底面, 采用传递矩阵方法, 计算得到边界自由场, 进而得到黏弹性边界的等效荷载, 作为场地地震响应分析和土 - 结相互作用分析的输入。

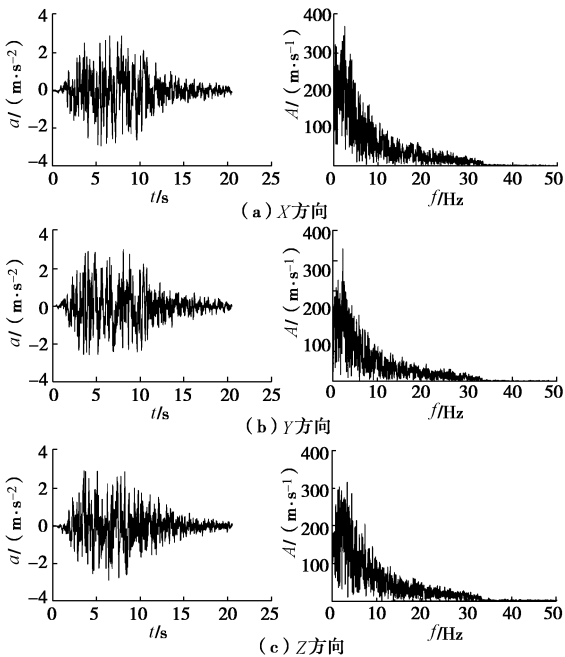


图 6 人工地震波加速度时程及其频谱

Fig. 6 Accelerations of artificial seismic waves

使用联想 ThinkCentre M8400t-N000 台式计算机进行计算, CPU 是 Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU @ 3.40 GHz (3500 Mhz), 主存大小为 16 G, 操作系统为 Ubuntu 16.04LTS。土体采用 5 进程, 结构采用 2 进程, 并行计算。分别计算了无核电结构时的场地地震响应(自由场)和考虑土 - 结相互作用影响的土体 - 核电结构体系的响应。土 - 结相互作用分析的时间为 363 h。与文献[9]相比, 本文硬件略好, 但模型节点数约为文献[9]中的 266 倍, 地震波时程均为 20 s 左右, 但计算时间仅为为其 1/2 左右。当然, 文献[9]考虑了土体非线性。根据非线性算例的经验, 本文方法考虑土体非线性时, 计算时间大概增加一倍。综合考虑, 本文计算模型为其 266 倍, 但计算时间却相当。

2.2 结果分析

(1) 场地反应

图 7~9 分别为 $C(344, 218, 0)$, $D(472, 218, 0)$, $E(600, 218, 0)$ 三点(位置见图 5)的位移、

加速度和加速度反应谱（阻尼比为 5%），图中实线为自由场响应，虚线为考虑土-结相互作用影响的响应。对比图中 3 点的位移时程图，可以看出，有结构存在时对位移反应影响较小，主要原因是位移的频率较低，其对应的波长大于结构尺寸，所以结构对该波的散射较小。相对来说，靠近结构的 C 点受结构的影响要比远离结构的 E 点大。与位移不同，加速度高频成分丰富，结构对短波长的波有较强的散射作用，因此加速度受结构的影响较大。从加速度反应谱中可以较明显看出，结构的存在对高频成分影响较大。靠近结构的 C 点受结构的影响较大，D 点次之，远离结构的 E 点较小。图 10 为 C、D、E 三点由核电结构引起的散射场（即有核电存在时的场地反应减去无核电结构时的场地反应）。由图 10 可看出，散射场随距离的增大有明显的衰减。

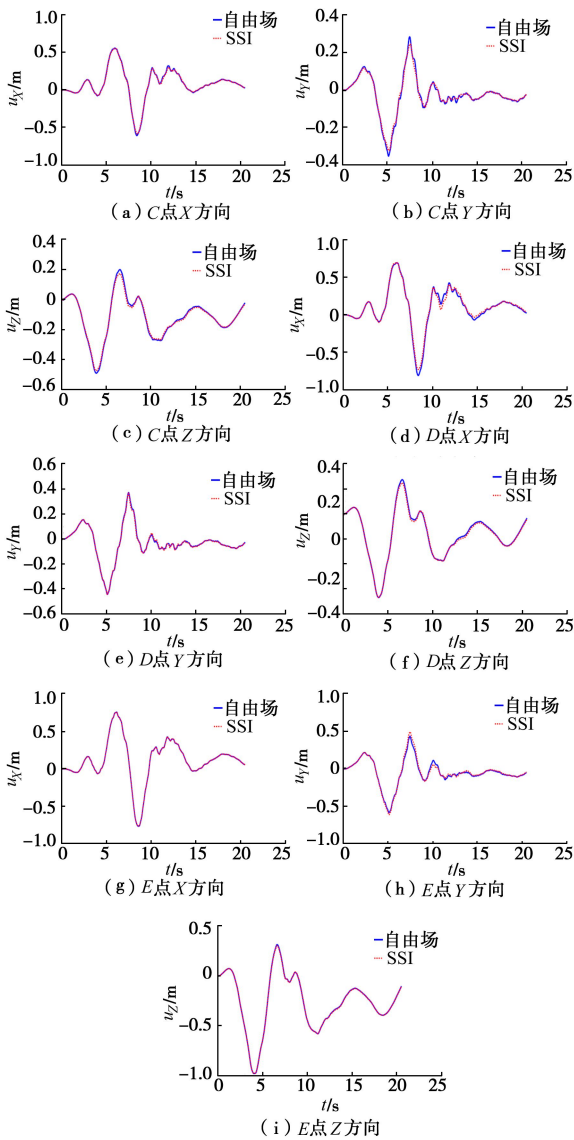


图 7 场地位移反应

Fig. 7 Site displacement response

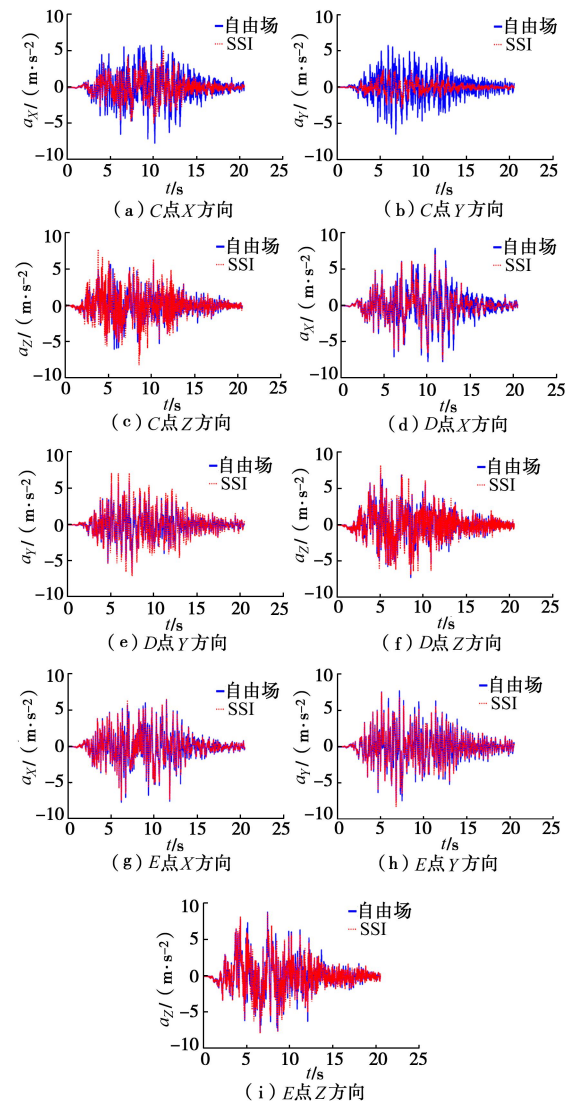


图 8 场地加速度反应

Fig. 8 Acceleration responses of site

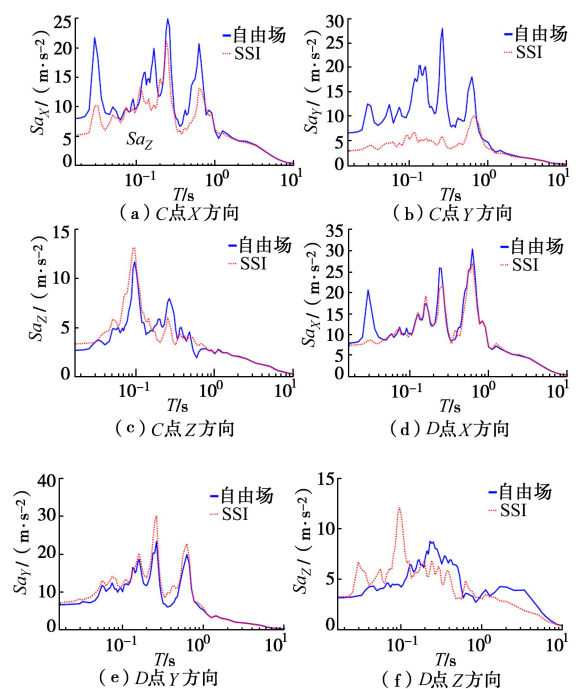


图 9 加速度反应谱

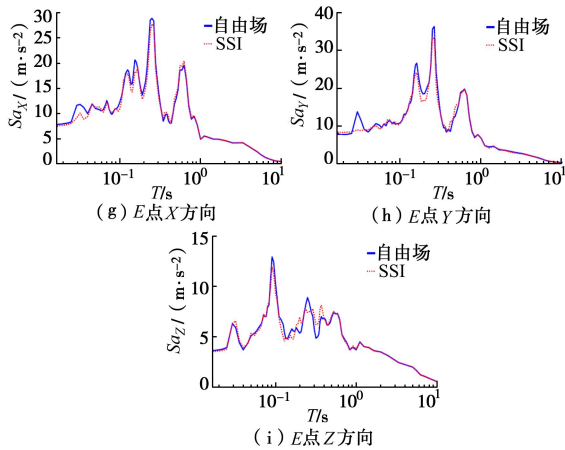


图9 场地加速度反应谱

Fig. 9 Acceleration response spectra of site

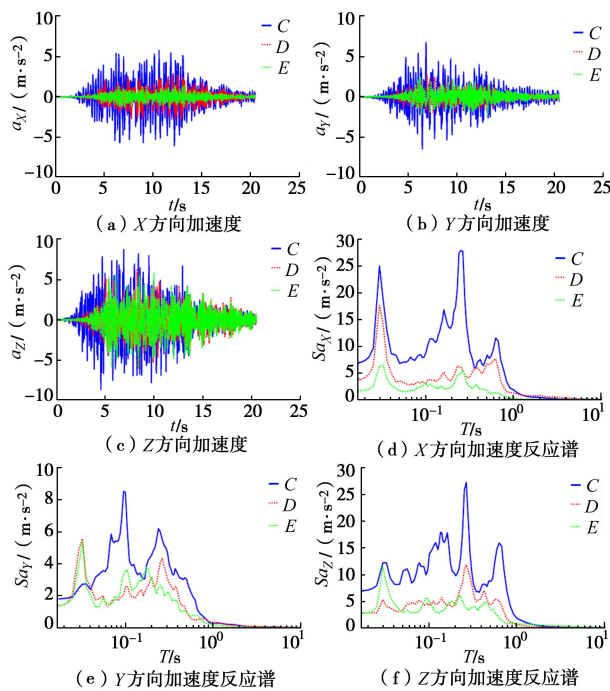


图10 散射场加速度及加速度反应谱

Fig. 10 Scattering accelerations and acceleration response spectra

(2) 基础反应

图11为基础位移、加速度和加速度反应谱。由于假定波垂直入射,基础的转动相对较小。对于加速度和加速度反应谱,图中同时给出了图6中基岩地震波,以蓝线显示;基础的加速度和加速度谱(5%的阻尼比)以红线显示。从图中可以看出,土体和基础对高频成分具有较大的滤波作用。

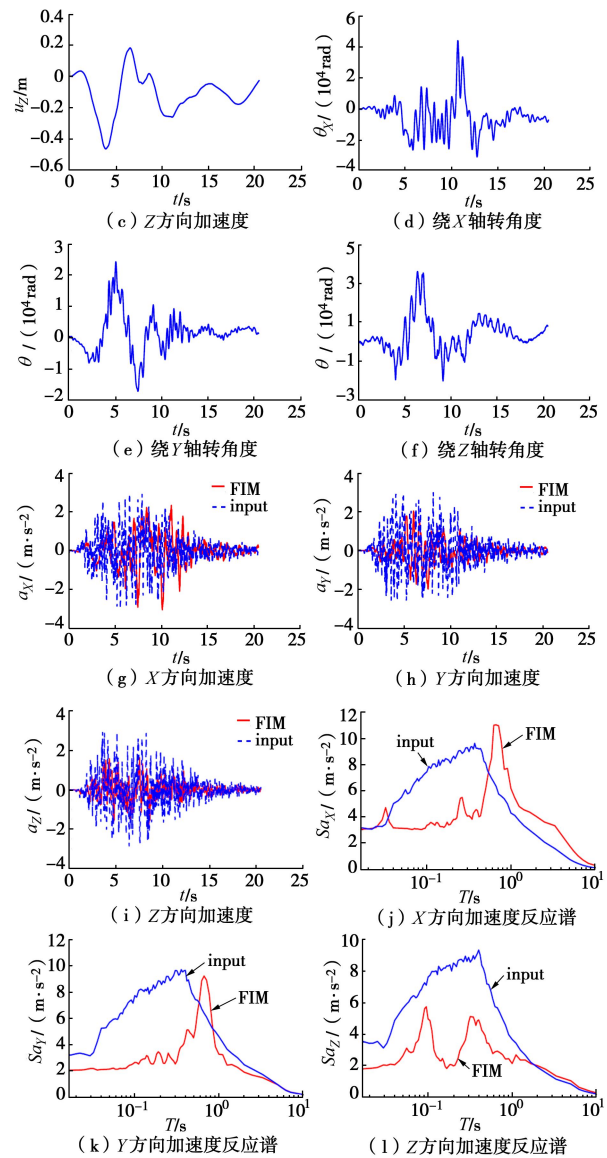
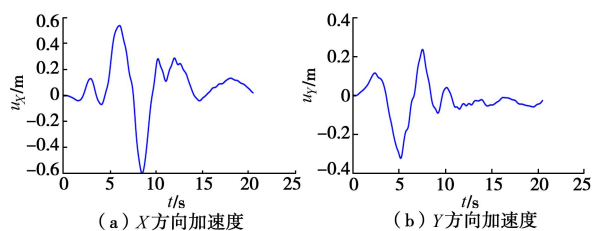


图11 基础的反应

Fig. 11 Responses of foundation

(3) 结构反应

图12为结构11 m高度处的截面图,给出其中#2107节点的反应,见图13。其中反应谱的阻尼比为5%。

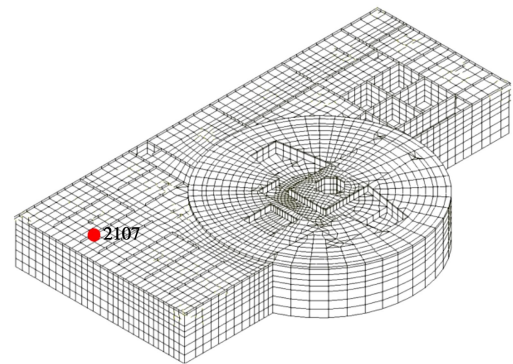


图12 11 m 高度截面图

Fig. 12 Sectional view of structure at height of 11 m

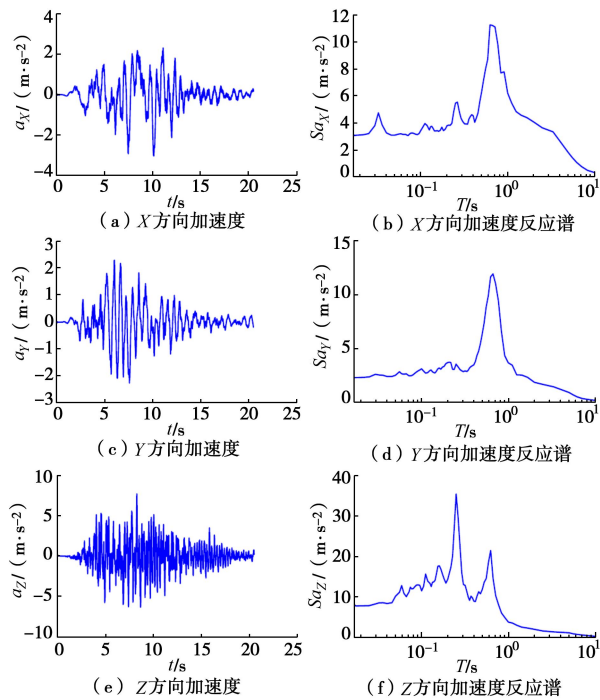


图 13 #2107 点的反应

Fig. 13 Responses at point No. 2107

图 14 为核岛结构屏蔽厂房剖面及参考点布置图，分别给出其中#64139、#136367、#136340 节点的反应，见图 15~17。其中反应谱的阻尼比为 5%。

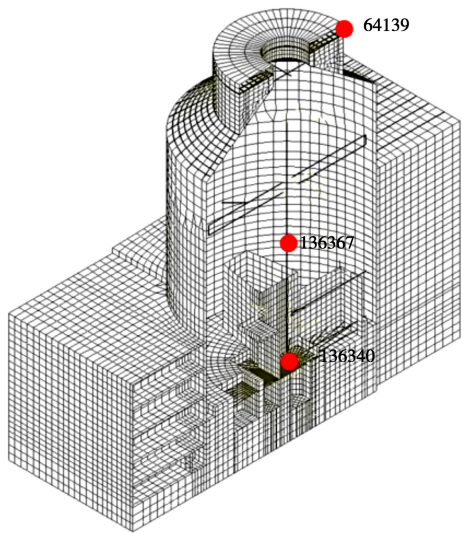


图 14 核岛结构屏蔽厂房剖面及参考点布置

Fig. 14 Section of nuclear island shielding plant and arrangement of reference points

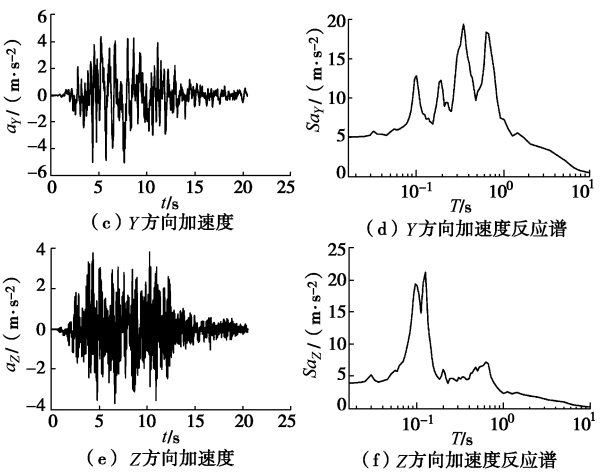
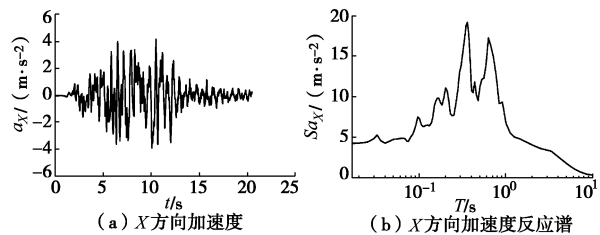


图 15 #64139 点的反应

Fig. 15 Responses at point No. 64139

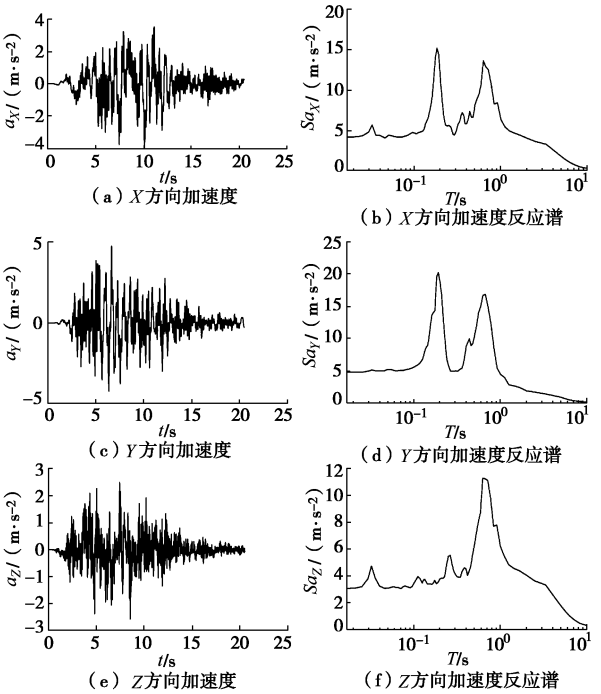
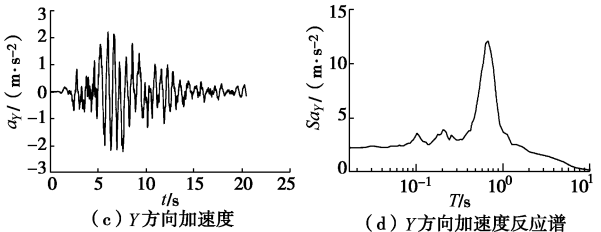
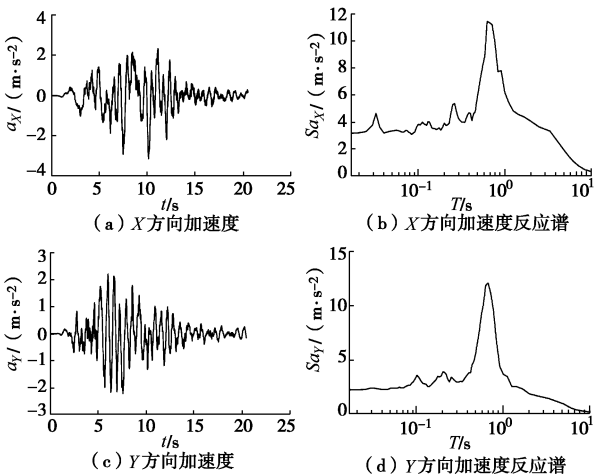


图 16 #136367 点的反应

Fig. 16 Responses at point No. 136367



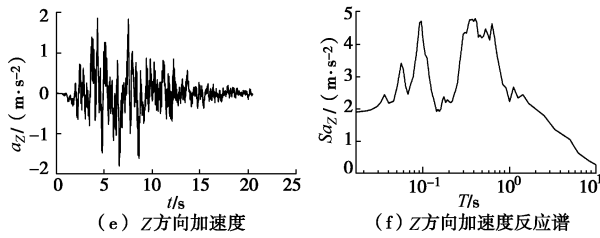


图 17 #136340 点的反应

Fig. 17 Responses at point No. 136340

3 结 语

本文采用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,分析了三向地震波输入下,某非均匀场地上核电结构的动力响应,验证了该方法的高效性和用于实际工程的可行性,克服了目前时域土-结相互作用分析方法效率低下,难于用于实际工程的问题。同时由于该方法为时域分析方法,可进一步考虑土体的强非线性,以及土体和基础间的接触非线性,弥补目前 SASSI 采用等效线性化考虑非线性的不足,以及仅能用于水平成层场地的局限。

目前笔者已发展了一套土-结相互作用分析的分区计算方法^[12, 14, 17], 简称为 PASSI (partitioned analysis of soil-structure interaction)。该方法可根据系统的特性进行分区,各区可独立建模,并分别选择适合各自特点和要求的计算方法与时间步距,具有较大的灵活性和高效性,可用于涉及土-结相互作用分析的大型复杂工程。

参考文献:

- [1] Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structure[S]. ASCE Standard, ASCE/SEI4-16.
- [2] KAUSEL E. Early history of soil-structure interaction[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2010, **30**(9): 822 - 832.
- [3] LOU M, WANG H, CHEN X, et al. Structure-soil-structure interaction: Literature review[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2011, **31**(12): 1724 - 1731.
- [4] OSTADAN F, DENG N. Computer Program: SASSI2010 - A System for Analysis of Soil-Structure Interaction. Version 1.1[R]. San Francisco: Geotechnical and Hydraulic Engineering Services, Bechtel National Inc., 2011.
- [5] COLEMAN J L, BOLISSETTI C, WHITTAKER A S. Time-domain soil-structure interaction analysis of nuclear facilities[J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, **298**: 264 - 270.
- [6] JEREMIC B, JIE G, PREISIG M, et al. Time domain simulation of soil-foundation-structure interaction in non-uniform soils[J]. Earthquake Engineering Structure Dynamic, 2009, **38**(5): 699 - 718.
- [7] BIELAK J, LOUKAKIS K, HISADA Y, et al. Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions: part-I theory[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, **93**(2): 817 - 824.
- [8] BOLISSETTI 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[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, **275**(8): 107 - 121.
- [9] KABANDA J, KWON O S, KWON G. Time and frequency domain analyses of the Hualien Large-Scale Seismic Test[J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, **295**: 261 - 275.
- [10] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2002: 136 - 285. (LIAO Zhen-peng. Introduction to Wave Motion Theories in Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002: 136 - 285. (in Chinese))
- [11] 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[J]. 岩土力学, 2017, **38**(3): 847 - 856. (YANG Xiao-mei, LAI Qiang-lin. Time-domain equivalent linearization method for two-dimensional seismic response analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(3): 847 - 856. (in Chinese))
- [12] 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[J]. 地震工程与工程振动, 2010, **30**(2): 24 - 31. (CHEN Shao-lin, TANG Gan, LIU Qi-fang, et al. A direct time-domain method for analysis of three-dimensional soil-structure dynamic interaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, **30**(2): 24 - 31. (in Chinese))
- [13] 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[J]. 土木工程学报, 2010, **43**(增刊 1): 535 - 540. (YANG Xiao-mei, GUAN Min-hui, ZHANG Xue-sheng, et al. The explicit finite element method in time domain for analysis of equivalent input of three-dimensional dynamic SSI system[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, **43**(S1): 535 - 540. (in Chinese))
- [14] 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[J]. 力学学报, 2016, **48**(6): 1362 - 1371. (CHEN Shao-lin, ZHAO Yu-xin. A method for three-

- dimensional saturated soil-foundation-structure dynamic interaction analysis[J]. Theoretical and Applied Mechanics, 2016, **48**(6): 1362 - 1371. (in Chinese))
- [15] 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[J]. 地震工程与工程振动, 2003, **23**(4): 22 - 28. (LIU Qi-fang, DING Hai-ping, YUAN Yi-fan, et al. An explicit parallel finite-element method of dynamic rupture in 3D earthquake fault[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, **23**(4): 22 - 28. (in Chinese))
- [16] 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[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2005: 130 - 133. (LIU Qi-fang. Studies on Near-fault Ground Motions Based on Kinematic and Dynamic Source Models[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2005: 130 - 133. (in Chinese))
- [17] 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[J]. 中国科学(技术科学), 2017, **47**(12): 1321 - 1330. (CHEN Shao-lin, WANG Jun-quan, LIU Qi-fang, et al. Asynchronous parallel algorithm for three-dimensional soil-structure interaction analysis based on explicit-implicit integration scheme[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2017, **47**(12): 1321 - 1330. (in Chinese))
- [18] FORUM M P I. Document for a Standard Message-Passing Interface[R]. Tennessee: University of Tennessee, 1993: 1735 - 1749. (in Chinese))
- [19] 刘晶波, 李彬. 三维黏弹性静-动力统一人工边界[J]. 中国科学: 工程科学 材料科学, 2005, **35**(9): 966 - 980. (LIU Jing-bo, LI Bin. Three-dimensional viscoelastic static-dynamic unified artificial boundary[J]. Chinese Science: Engineering Science Materials Science, 2005, **35**(9): 966 - 980. (in Chinese))
- [20] 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[J]. 工程力学, 2007, **24**(12): 31 - 37. (GU Yin, LIU Jing-bo, DU Yi-xin. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element[J]. Engineering Mechanics, 2007, **24**(12): 31 - 37. (in Chinese))
- [21] 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[J]. 力学学报, 2016, **48**(5): 1126 - 1135. (ZHANG Xiao-long, LI Xiao-jun, CHEN Guo-xing, et al. An improved method of the calculation of equivalent nodal forces in viscous-elastic artificial boundary[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, **48**(5): 1126 - 1135. (in Chinese))
- [22] LIAO Z P, WONG H L. A transmitting boundary for the numerical simulation of elastic wave propagation[J]. Soil Dynamic Earthquake Engineering, 1984, **3**(4): 174 - 183.

本期广告索引

- 封2 北京筑信达工程咨询有限公司
封3 北京理正软件股份有限公司
封4 南瑞集团水利水电技术分公司