

地震作用下深厚土层-结构相互作用的高效分析方法

赵 密¹, 高志懂¹, 杜修力¹, 王君杰²

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘 要: 基于黏弹性边界和将场地反应转化为等效地震荷载的有限元直接法是目前进行地震作用下土-结构相互作用分析的常用时程分析方法之一。当土层厚度较深时, 整个深厚土层-结构系统的有限元模型自由度数目较多, 尤其对于三维问题, 计算效率低。该文提出一种高效分析方法, 即一维场地反应分析仍然针对整个深厚土层, 在后续土-结构相互作用分析中将土-结构计算模型的底面人工边界从深厚土层底面(基岩面)向上移动到接近结构的位置, 通过缩减土-结构相互作用模型尺寸来提高计算效率。采用理论分析与数值算例, 通过与采用整个深厚土层的传统土-结构相互作用分析结果对比, 说明提出的高效分析方法能够满足精度要求, 并且给出底面人工边界位置以及边界条件和地震动输入方式的建议。

关键词: 土-结构相互作用; 场地反应; 深厚土层; 人工边界条件; 地震动输入

中图分类号: TU435 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.04.0245

EFFICIENT ANALYSIS SCHEME FOR SEISMIC SOIL-STRUCTURE INTERACTION WITH DEEP SOIL LAYER

ZHAO Mi¹, GAO Zhi-dong¹, DU Xiu-li¹, WANG Jun-jie²

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The direct finite element method is a widely used time history method for seismic soil-structure interaction (SSI) analysis. In this method, the viscous-spring boundary condition is used to model the radiation damping of infinite domain, and the seismic site response is transformed into the equivalent loading. When the soil layer is extraordinary thick, the computational efficiency of seismic SSI analysis especially for three-dimensional problem is very low due to the finite element model of the whole deep soil layer. In this paper, an efficient analysis scheme is developed. In which, the one-dimensional site response analysis is still performed for the whole deep soil layer, and subsequently the bottom artificial boundary of SSI model is moved up from the actual soil layer bottom (bedrock surface) to the location sufficiently near the structure. The theoretical analyses and numerical examples are presented to indicate the accuracy and efficiency of the proposed efficient analysis scheme. The different boundary treatments and seismic inputs at different locations of the moved bottom boundary are compared with the finite element model of the whole deep soil layer. The proposed scheme meets the precision requirements, and some suggestions on artificial boundary treatment and location are given.

收稿日期: 2018-04-17; 修改日期: 2018-07-24

基金项目: 国家 973 计划项目课题项目(2015CB057902); 国家自然科学基金项目(51421005, 51678015)

通讯作者: 赵 密(1980—), 男, 吉林人, 教授, 博士, 主要从事重大工程抗震研究(E-mail: zhaomi@bjut.edu.cn).

作者简介: 高志懂(1992—), 男, 山东人, 硕士生, 主要从事重大工程抗震研究(E-mail: gaozhidong@emails.bjut.edu.cn);

杜修力(1963—), 男, 四川人, 教授, 博士, 主要从事地震工程学研究(E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn);

王君杰(1962—), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 主要从事桥梁抗震和桥梁船撞研究(E-mail: jjwang@tongji.edu.cn).

Key words: seismic soil-structure interaction; site response; deep soil layer; artificial boundary condition; seismic input

地下结构等基础设施工程的抗震分析需要考虑土与结构间的动力相互作用。地震作用下土-结构相互作用分析通常采用有限元直接法或称为整体式分析方法^[1-2]。该方法的思路是引入一个虚拟边界,称作人工边界,将整个开放系统划分为近场有限域和远场无限域两部分,结构及其附近的土体属于有限域,采用有限元法模拟。有限域的人工边界处需要施加人工边界条件来模拟无限域的辐射阻尼效应,并输入场地地震反应。

近半个世纪以来,研究者们提出了多种人工边界条件,并应用于地震作用下土-结构相互作用分析中。一类是高精度时空全局方法。如早期的一致边界^[3-4]和最近的比例边界有限元法^[5]等,这类人工边界条件属于频域方法,不便于非线性土-结构相互作用分析。一些研究者将时空全局的频域方法转化为高精度时域人工边界条件^[6-9],该类方法正处于理论发展阶段且难于在封装的商业有限元软件中实现,因而不适于复杂的土-结构相互作用问题。

近似的时空局部人工边界条件广泛应用于地震作用下土-结构相互作用分析。黏性边界^[10]是最早最著名的时空局部方法,它通过在每个人工边界结点设置远端固定的阻尼器来实现对散射波能量的吸收,物理概念清晰,程序实现简单,能够满足工程精度要求,目前已纳入多种商用软件^[11-12]。然而,黏性边界没有考虑无限域对有限域的刚度约束,在某些情况下存在计算模型产生刚体位移的低频飘移失稳现象。黏弹性边界^[13-15]在人工边界处设置远端固定的并联弹簧-阻尼器系统,弹簧为有限域

提供刚度约束,不存在低频飘移失稳问题,通常精度也高于黏性边界。研究者已将黏弹性边界与地震场地反应分析结合,提出将场地反应转化为等效地震荷载的地震动输入方法^[16-17],并广泛应用于地震作用下土-结构相互作用分析^[18-22]。

对于深厚土层场地条件下的浅埋地下结构,土层厚度通常可达 200 m~300 m,将底面人工边界设置于整个土层底部的基岩面进行土-结构相互作用分析时,计算成本较高,尤其对于三维问题。为了提高计算效率,在保证计算精度的前提下,本文提出一种地震作用下深厚土层-结构相互作用的高效分析方法。

1 高效分析方法

1.1 方法陈述

地震作用下深厚土层-浅埋地下结构相互作用分析过程如图 1 所示。图 1(a)是传统分析方法,首先计算整个深厚土层的一维场地反应,在基岩面处输入地震动,然后进行二维或三维土-结构相互作用分析,在人工边界处设置黏弹性边界并将场地反应转化为等效地震荷载,由于底面人工边界位于基岩面,这种方法的计算成本较高,尤其对于三维问题。提出的高效分析方法如图 1(b)所示,一维场地反应分析和传统方法一致,后续土-结构相互作用分析时计算模型的底面人工边界从基岩面处向上移动到充分接近结构的水平位置,形成缩减的计算模型,提高计算效率。缩减模型的侧面人工边界处理与传统方法一致,底面人工边界采用两种处理方式:一种是柔性边界,设置黏弹性边界模拟无限域辐射阻

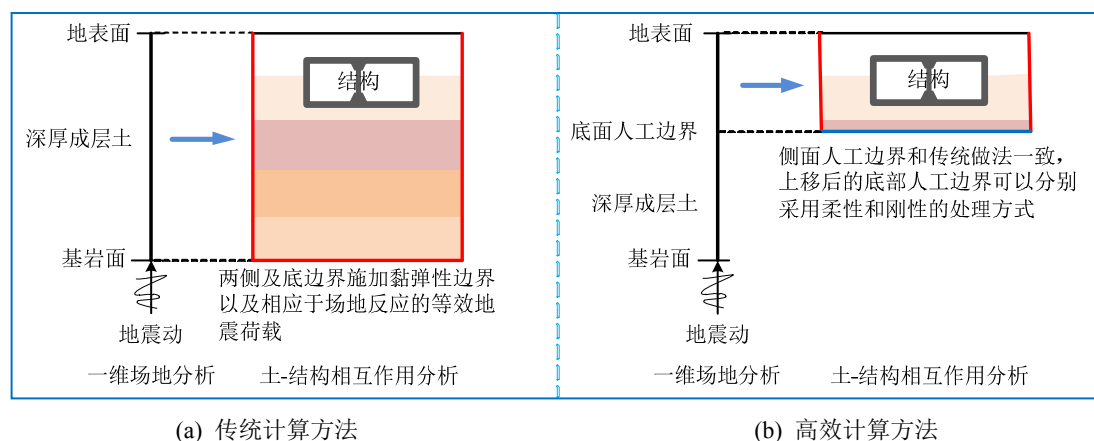


图 1 地震作用下深厚土层-结构相互作用分析

Fig.1 Seismic soil-structure interaction analysis with deep soil layer

尼,并将相同高度的场地反应转化为等效地震荷载实现地震动输入;另一种是刚性边界,强制相同高度的场地反应实现地震动输入。下面通过理论和数值分析,比较两种处理方式的精度,给出底面人工边界位置和设置方式的建议。

1.2 自由场分析

本节通过理论分析说明,底面人工边界上移后计算得到的无结构自由场反应与整个土层一维场地反应分析得到的相应位置反应一致,表明底面人工边界上移后计算得到的自由场反应不产生误差。

如图 2(a)所示,首先对整个深厚土层进行一维场地反应分析,然后将计算模型的底面人工边界上移形成缩减模型,并在缩减模型上输入与整个深厚土层一维场地反应相同位置的反应。缩减模型的底面人工边界分别采用前述柔性和刚性的处理方式,如图 2(b)和图 2(c)所示。

图 2(a)中一维场地反应分析的有限元方程为:

$$\begin{bmatrix} \tilde{M}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{M}_2 + \bar{M}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{M}_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \tilde{C}_{12} & 0 \\ \tilde{C}_{21} & \tilde{C}_{22} + \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} \\ 0 & \bar{C}_{32} & \bar{C}_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{K}_{11} & \tilde{K}_{12} & 0 \\ \tilde{K}_{21} & \tilde{K}_{22} + \bar{K}_{22} & \bar{K}_{23} \\ 0 & \bar{K}_{32} & \bar{K}_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_3 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: u 为绝对位移矢量; f_3 为已知的,它是黏性边界和已知地震动输入形成的下卧基岩对上部土层的作用荷载; M 、 C 和 K 分别为集中质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;下标 1、下标 2 和下标 3 分别表示缩减模型的底面人工边界以上、底面人工边

界和底面人工边界以下的自由度;符号 $\sim$ 和 $-$ 分别表示 1-2 和 2-3 部分。

对于图 2(b),根据式(1),1-2 部分的有限元方程可写为:

$$\begin{bmatrix} \tilde{M}_1 & 0 \\ 0 & \tilde{M}_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \tilde{C}_{12} \\ \tilde{C}_{21} & \tilde{C}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{K}_{11} & \tilde{K}_{12} \\ \tilde{K}_{21} & \tilde{K}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中,节点荷载为:

$$f_2 = -(\tilde{M}_2 \ddot{u}_2 + \tilde{C}_{22} \dot{u}_2 + \tilde{C}_{23} \dot{u}_3 + \tilde{K}_{22} u_2 + \tilde{K}_{23} u_3) \quad (3)$$

式(3)中 u_2 和 u_3 是通过式(1)计算得到的已知量。

将向量 $k^{ve} u_2 + c^{ve} \dot{u}_2$ 加到式(2)两边的自由度 2 处,式(2)转换为:

$$\begin{bmatrix} \tilde{M}_1 & 0 \\ 0 & \tilde{M}_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \tilde{C}_{12} \\ \tilde{C}_{21} & \tilde{C}_{22} + c^{ve} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{K}_{11} & \tilde{K}_{12} \\ \tilde{K}_{21} & \tilde{K}_{22} + k^{ve} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f_2 + k^{ve} u_2 + c^{ve} \dot{u}_2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中: k^{ve} 、 c^{ve} 和 f_2 分别表示黏弹性边界的刚度矩阵、黏弹性边界的阻尼矩阵以及 2-3 部分对 1-2 部分的作用力向量。黏弹性边界的刚度和阻尼矩阵参见文献[14—15]。式(4)表示底面人工边界采用柔性处理的缩减土层自由场反应分析,等号右边的运动利用式(1)求得,等号左边的运动为未知量。对比式(1)和式(4)可以看到,如果底面人工边界处输入一维场地反应,则计算得到 1-2 部分的自由场反应与相应部分一维场地反应一致,表明缩减模型自由场反应不会引起误差,这也是式(4)两边未知和已知的 u_2 没有采用不同符号表示的原因。

对于图 2(c),当在缩减模型的底面人工边界即自由度 2 处强制相应位置的一维场地反应时,根据式(1),第 1 部分的方程可以写为:

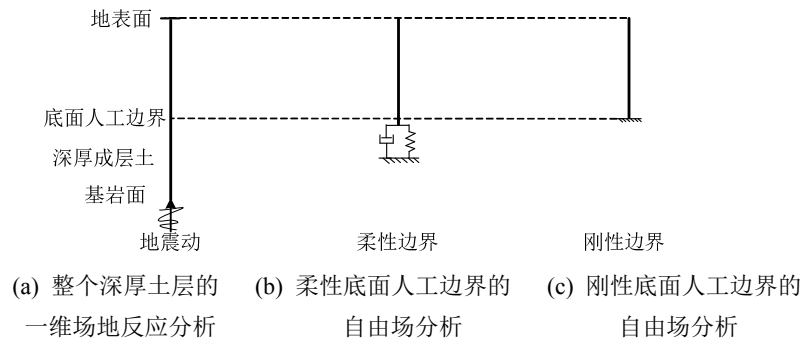


图 2 一维场地反应和自由场分析

Fig.2 1D site response analysis and free field analysis

$$\begin{aligned} \tilde{M}_1 \ddot{u}_1 + \tilde{C}_{11} \dot{u}_1 + \tilde{K}_{11} u_1 &= f_1, \\ f_1 &= -(\tilde{C}_{12} \dot{u}_2 + \tilde{K}_{12} u_2) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)表示底面人工边界采用刚性处理的缩减土层自由场反应分析,其中 u_1 是未知量、 u_2 是通过式(1)得到的已知量。对比式(1)和式(5)可以看到,如果底面人工边界处输入一维场地反应,则计算得到1-2部分的自由场反应与相应部分一维场地反应一致,表明缩减模型自由场反应不会引起误差。

1.3 土-结构相互作用分析

地震作用下土-结构相互作用分析如图1所示,引入人工边界将土-结构相互作用系统分为有限域和无限域。有限域部分包括结构及其邻近土体,它的有限元方程为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_{RR} & M_{RB} \\ M_{BR} & M_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_R \\ \ddot{u}_B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{RR} & C_{RB} \\ C_{BR} & C_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_R \\ \dot{u}_B \end{Bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} K_{RR} & K_{RB} \\ K_{BR} & K_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_R \\ u_B \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ f_B \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:下标 B 、 R 分别表示人工边界的自由度及其内部的自由度; u 、 $\dot{u}$ 和 $\ddot{u}$ 分别表示位移、速度及加速度矢量; M 、 C 和 K 分别表示质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵; f_B 是无限域传递到有限域的荷载向量。有限域内可以考虑材料和几何非线性。

无限域的反应能分解成散射场及自由场,在人工边界处写为:

$$f_B = f_B^S + f_B^F \quad (7)$$

$$u_B = u_B^S + u_B^F, \quad \dot{u}_B = \dot{u}_B^S + \dot{u}_B^F \quad (8)$$

式中,上标 S 和 F 分别表示散射场及自由场。

在土-结构相互作用分析之前,自由场能够通过一维场地反应分析得到。散射场通过人工边界条件吸收,黏弹性边界的表达式为:

$$f_B^S = -K_B^\infty u_B^S - C_B^\infty \dot{u}_B^S \quad (9)$$

式中, K_B^∞ 和 C_B^∞ 分别是黏弹性边界的刚度及阻尼矩阵,具体取值参考文献[12—13]。

将式(8)代入式(9),然后再代入式(7),最后代入式(6),整理得到:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_{RR} & M_{RB} \\ M_{BR} & M_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_R \\ \ddot{u}_B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{RR} & C_{RB} \\ C_{BR} & C_{BB} + C_B^\infty \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_R \\ \dot{u}_B \end{Bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} K_{RR} & K_{RB} \\ K_{BR} & K_{BB} + K_B^\infty \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_R \\ u_B \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ f_B^\infty \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

式中,人工边界上的等效地震荷载为:

$$f_B^\infty = K_B^\infty u_B^F + C_B^\infty \dot{u}_B^F + f_B^F \quad (11)$$

对于深厚土层条件下高效分析方法,1.2节已经证明缩减模型的自由场分析结果是准确无误的,但是由于黏弹性边界是吸收散射场的近似方法且方法精度通常随人工边界靠近结构而降低,因此需要通过数值算例研究底面人工边界上移是否能够满足精度要求,并且比较柔性和刚性两种底面人工边界处理方法的精度。

2 数值算例

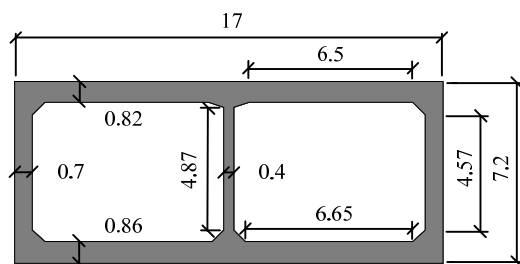
2.1 算例描述

以日本大开地铁车站为工程背景,将大开车站场地调整为深厚土层场地,剪切波速达到500 m/s作为基岩,土层和基岩的基本信息如表1所示,土体阻尼采用Rayleigh阻尼进行计算,阻尼系数按第1阶和第10阶自振频率计算,地下结构混凝土的阻尼系数和土体取一样。车站的几何尺寸如图3所示,结构埋深(结构顶面至地表的距离)为4.8 m。结构混凝土材料的密度为2500 kg/m³、弹性模量为24 GPa、泊松比为0.15。沿车站纵向中柱的宽度为1 m、柱间距为2.5 m,二维平面应变分析时,中柱的弹性模量折减为混凝土弹性模量的1/3.5。

表1 土层和基岩的几何及材料常数

Table 1 Geometry and material properties of soil and bedrock

土层	深度/m	密度/(kg/m ³)	剪切波速/(m/s)	泊松比
1	0~10	1900	140	0.33
2	10~30	1900	140	0.32
3	30~60	1900	170	0.32
4	60~100	1900	190	0.40
5	100~150	1900	240	0.30
6	150~250	2000	330	0.26
7	250~∞	2100	500	0.470



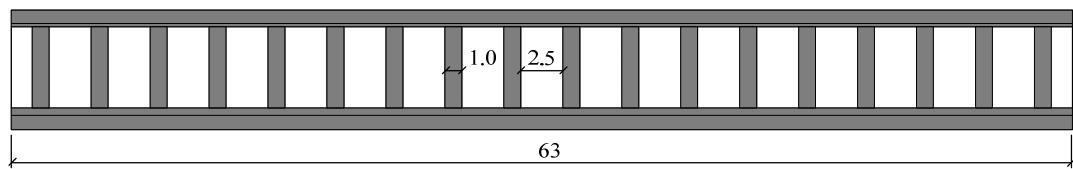


图 3 车站结构的几何尺寸 /m
Fig.3 Geometry of structure

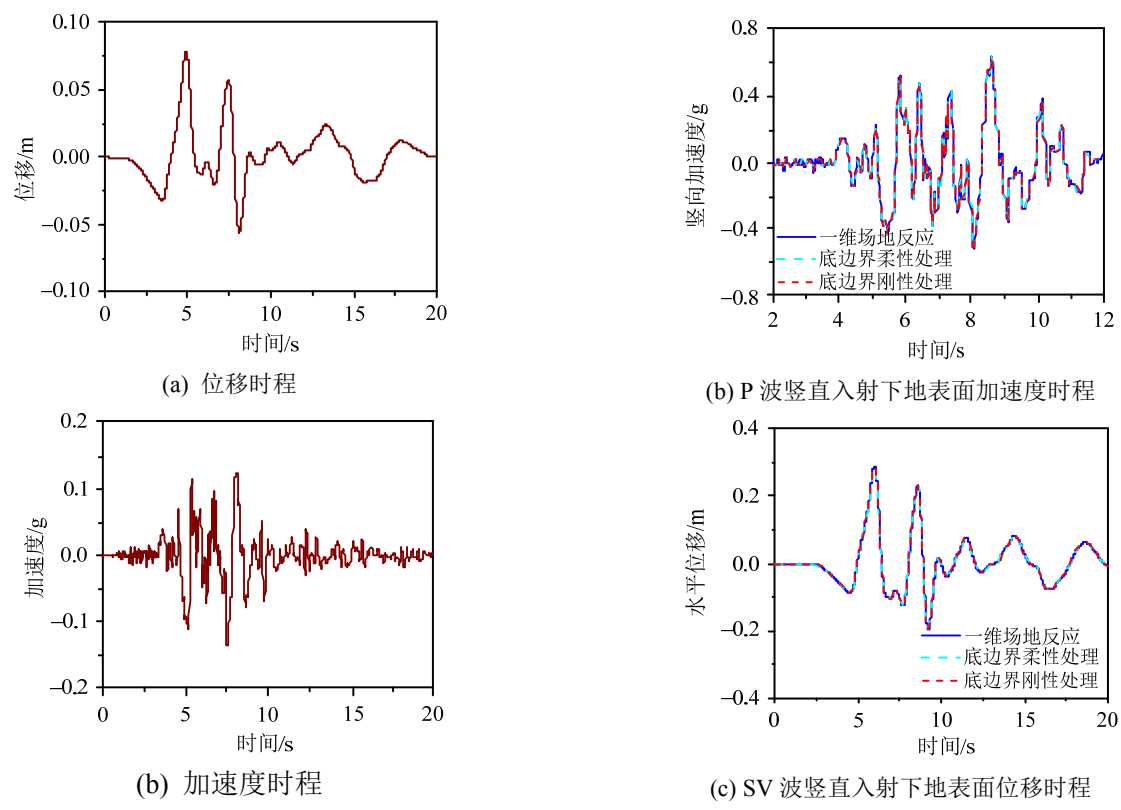
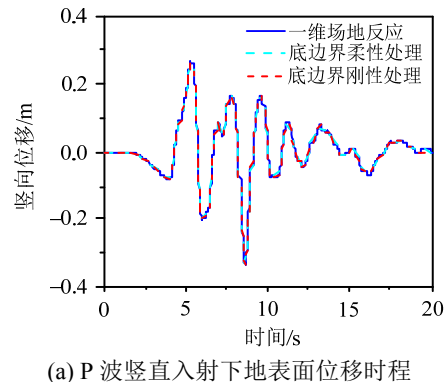


图 4 基岩面处输入的地震动时程

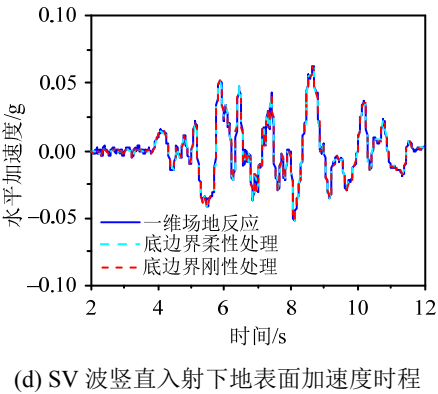
Fig.4 Time histories of seismic input on bedrock surface

2.2 自由场分析结果

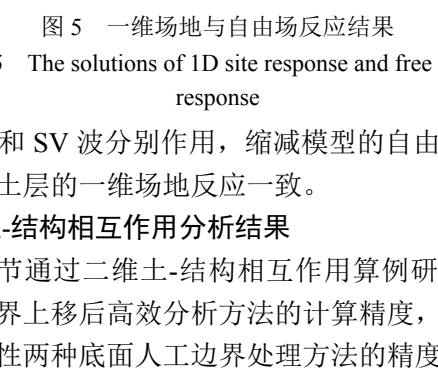
本节通过数值算例验证 1.2 节的理论证明。一维场地反应分析采用 250 m 深土层；计算自由场的缩减模型深度为 50 m 土层，在缩减的底面人工边界分别采用柔性和刚性两种处理方式。一维场地反应结果和自由场反应结果如图 5 所示，图中给出地表面处的位移和加速度时程。从图中可以看出，对



(a) P 波竖直入射下地表面位移时程



(b) P 波竖直入射下地表面加速度时程



(c) SV 波竖直入射下地表面位移时程

(d) SV 波竖直入射下地表面加速度时程

图 5 一维场地与自由场反应结果
Fig.5 The solutions of 1D site response and free field response

于 P 波和 SV 波分别作用，缩减模型的自由场反应与深厚土层的一维场地反应一致。

2.3 土-结构相互作用分析结果

本节通过二维土-结构相互作用算例研究底面人工边界上移后高效分析方法的计算精度，比较柔性和刚性两种底面人工边界处理方法的精度；通过

三维土-结构相互作用算例说明高效分析方法的计算效率。

2.3.1 计算精度

二维土-结构相互作用系统的有限元模型如图 6 所示,土和结构的接触面满足连续性条件。为了减小侧面人工边界近似性的影响,模型宽度取为 300 m。传统分析方法的底面人工边界设置在 250 m 深基岩面;高效分析方法的底面人工边界分别设置在 20 m、30 m、50 m 和 70 m 深度处,分别采用柔性性和刚性两种处理方式。

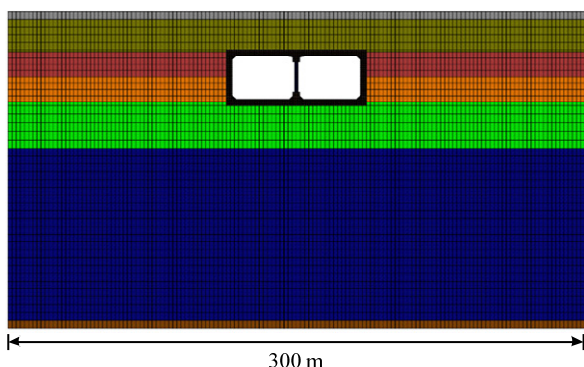


图 6 二维土体-车站结构系统有限元模型

Fig.6 Two dimensional finite element model of soil-structure system

以传统分析方法的计算结果为参考解,定义衡量高效分析方法精度的峰值相对误差为:

$$R = \frac{\left| |r(t)|_{\max} - |r_0(t)|_{\max} \right|}{|r_0(t)|_{\max}} \quad (12)$$

式中: $r_0(t)$ 是参考解; $r(t)$ 是高效分析方法的计算结果; $||$ 表示取绝对值。

中柱中间点加速度反应的峰值相对误差如图 7 所示, P 波入射取竖向加速度, SV 波入射取水平加速度。从图中可以得到如下结论: 1) 不同高度土-结构相互作用模型的加速度峰值相对误差与入射波类型以及底面人工边界处理方式有关; 2) SV 波

入射误差小于 P 波入射误差, 前者误差小于 5%;

3) 随着模型高度增加, 峰值相对误差呈减小趋势, 但不严格单调递减; 4) 柔性处理的误差小于刚性处理的误差, 前者误差小于 5%, 建议底面人工边界采用柔性处理。

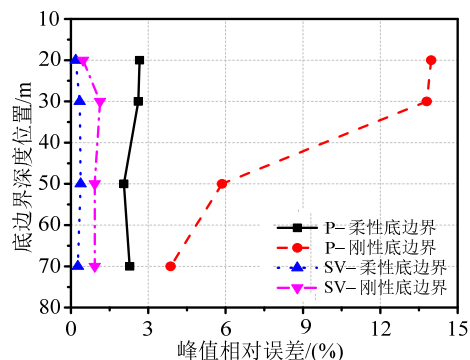


图 7 中柱中间点加速度峰值相对误差

Fig.7 Relative peak error of acceleration at mid-point of central column

上述分析结果表明, 深厚土层问题的高效分析方法可以将底面人工边界设置于距离结构较近位置。主要原因是, 自由场反应计算是准确无误差的, 土-结构相互作用的误差来自于黏弹性边界吸收散射场的误差, 而通常土-结构相互作用问题中散射场含量远少于自由场^[23], 因此底面人工边界可以设置于距离结构较近位置。

2.3.2 计算效率

三维土-结构相互作用系统的有限元模型如图 8 所示, 土和结构的接触面满足连续性条件。三维有限元模型的长度和宽度分别是 100 m 和 67 m。下面研究底面人工边界上移后土-结构相互作用高效分析方法的计算效率。传统分析方法的底面人工边界设置在 250 m 深基岩面; 高效分析方法的底面人工边界设置在 30 m 深度处, 采用柔性处理方式。考虑 SV 波竖直入射。

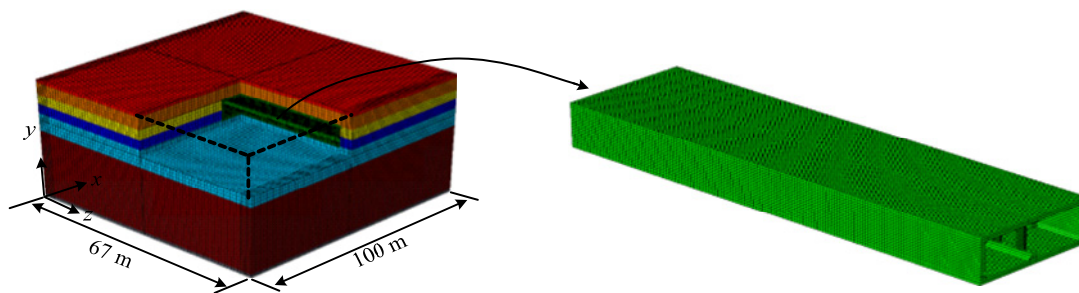


图 8 三维土体-车站结构系统有限元模型

Fig.8 Three dimensional finite element model of soil-structure system

计算模型和计算耗时见表 2。可以看出, 高效分析方法仅为传统分析方法计算时间的 1/2。中柱中间点计算结果如图 9 所示。可以看出, 高效分析方法得到的位移和剪应力结果与传统方法结果吻合较好, 位移反应的峰值相对误差不到 1%, 剪应力的峰值相对误差不到 5%, 说明高效分析方法在大幅提高计算效率的前提下具有较高的计算精度。

表 2 计算模型和计算耗时
Table 2 The computational model and time

模型 高度/m	单元数量	节点数量	算法	时间步长	CPU 数量	计算 用时/h
250	523626	608226	Explicit	1×10^{-4}	8	≈ 16
30	330326	391086	Explicit	1×10^{-4}	8	≈ 8

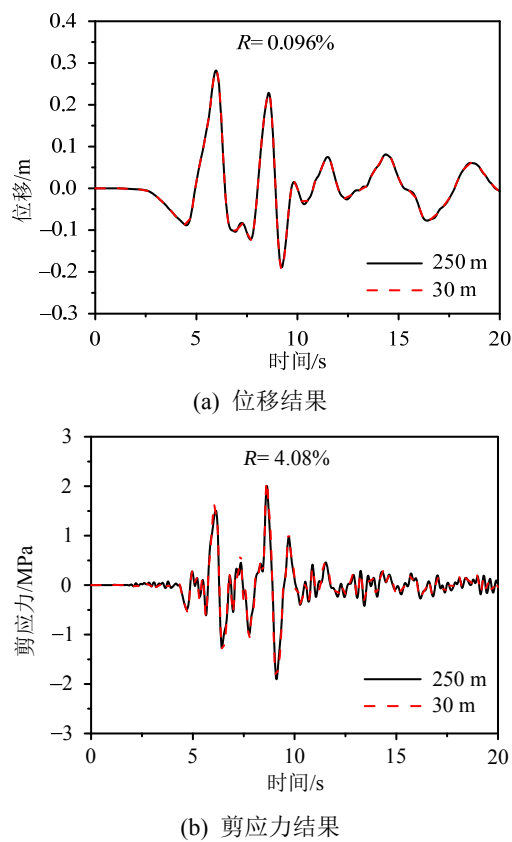


图 9 SV 波作用下中柱中间点计算结果

Fig.9 The computational solution of mid-point of central column with SV wave

3 结论

本文提出一种地震作用下深厚土层-结构相互作用的高效分析方法, 即一维场地反应分析仍然针对整个深厚土层, 在后续的土-结构相互作用分析中将土-结构计算模型的底界面从深厚土层底面(基岩面)向上移动到接近结构的水平位置, 建议底面人工边界采用柔性设置。数值算例表明, 底面人工边

界从 250 m 深基岩面上移至 20 m 或者 30 m 深度位置时, 计算成本节约为 50%, 计算误差小于 5%。

参考文献:

[1] Wolf J P. Dynamic soil-structure interaction [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1985.

[2] Wolf J P. Soil-structure-interaction analysis in time domain [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1988.

[3] Lysmer J, Wass G. Shear waves in plane infinite structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1972, 98(1): 85—105.

[4] Lysmer J, Udaka T, Tsai C, et al. FLUSH, a computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems [R]. Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, 1975.

[5] Wolf J P. The scaled boundary finite element method [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 2003.

[6] Zhao M, Wu L H, Du X L, et al. Stable high-order absorbing boundary condition based on new continued fraction for scalar wave propagation in unbounded multilayer media [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 334: 111—137.

[7] Zhao M, Li H F, Du X L, et al. Time-domain stability of artificial boundary condition coupled with finite element for dynamic and wave problems in unbounded media [J]. International Journal of Computatioanal Methods, 2018, 15(3): 1850099.

[8] 赵密, 杜修力, 刘晶波. 一种高阶精度人工边界条件: 出平面外域波动问题[J]. 工程力学, 2012, 29(4): 7—14.

Zhao Mi, Du Xiuli, Liu Jingbo. A high-order accurate artificial boundary condition: Out-of-plane exteior wave problem [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 7—14. (in Chinese)

[9] Zhao M, Du X L, Liu J B, et al. Explicit finite element artificial boundary scheme for transient scalar waves in two-dimensional unbounded waveguide [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2011, 87(11): 1074—1104.

[10] Lysmer J, Kuhlemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1969, 95(4): 859—878.

[11] FLAC. (fast Lagrangian analysis of continua) Version 2.10, users manual [R]. Itasca Consulting Group, Inc., 2002.

[12] Brinkgreve R B J, Vermeer P A. Finite element code for soil and rock analysis [M]. Rotterdam A. A. Balkema, 1998.

- [13] Du X L, Zhao M. A local time-domain transmitting boundary for simulating cylindrical elastic wave propagation in infinite media [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(10): 937—946.
- [14] 杜修力, 赵密, 王进廷. 近场波动模拟的人工应力边界条件[J]. *力学学报*, 2006, 38(1): 49—56.
Du Xiuli, Zhao Mi, Wang Jinting. A stress artificial boundary in for near-field wave problem [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, 38(1): 49—56. (in Chinese)
- [15] 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 Jingbo, Wang Zhenyu, Du Xiuli, 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)
- [16] 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 Jingbo, Lü Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1998, 31(3): 55—64. (in Chinese)
- [17] Zhao M, Gao Z D, Wang L T, et al. Obliquely incident earthquake input for soil-structure interaction in layered half space [J]. *Earthquakes and Structures*, 2017, 13(6): 573—588.
- [18] 包锐, 周叮, 刘伟庆, 等. 粘弹性人工边界及其在盆地地震效应研究中的应用[J]. *世界地震工程*, 2013, 29(4): 133—140.
Bao Rui, Zhou Ding, Liu Weiqing, et al. Viscous-spring artificial boundary and its application to study on seismic effect of basin [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2013, 29(4): 133—140. (in Chinese)
- [19] 陈灯红, 杜成斌, 苑举卫. 基于 ABAQUS 的粘弹性边界单元及在重力坝抗震分析中的应用[J]. *世界地震工程*, 2010, 26(3): 127—132.
Chen Denghong, Du Chengbin, Yuan Juwei. Viscous-spring boundary element based on ABAQUS and application to dynamic analysis of gravity dam [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2010, 26(3): 127—132. (in Chinese)
- [20] 杜修力, 赵密. 基于黏弹性边界的拱坝地震反应分析方法[J]. *水利学报*, 2006, 37(9): 1063—1069.
Du Xiuli, Zhao Mi. Analysis method for seismic response of arch dams in time domain based on viscous-spring artificial boundary condition [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(9): 1063—1069. (in Chinese)
- [21] 黄景琦, 杜修力, 田志敏, 等. 斜入射 SV 波对地铁车站地震响应的影响[J]. *工程力学*, 2014, 31(9): 81—88.
Huang Jingqi, Du Xiuli, Tian Zhimin, et al. Effect of the oblique incidence of seismic SV waves on the seismic response of subway station structure [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(9): 81—88. (in Chinese)
- [22] 杜修力, 李洋, 赵密, 等. 下卧刚性基岩条件下场地土-结构体系地震反应分析方法研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(5): 52—59.
Du Xiuli, Li Yang, Zhao Mi, et al. Seismic response analysis method for soil-structure interaction system of underlying rigid rock base soil condition [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(5): 52—59. (in Chinese)
- [23] 赵密, 王利涛, 高志懂, 等. 土-结构相互作用分析中几类地震动输入方式的比较[J]. *震灾防御技术*, 2017, 12(3): 589—598.
Zhao Mi, Wang Litao, Gao Zhidong, et al. Comparison of earthquake input methods for soil-structure interaction analysis [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2017, 12(3): 589—598. (in Chinese)