

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.005

地震作用下土-深埋地下结构相互作用的高效时程分析方法*

赵密, 李旭东, 高志懂, 杜修力

(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)

摘要: 基于黏弹性边界和将场地地震反应转化为等效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。当结构埋深较深时, 整个土-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。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, 在后续的土-结构相互作用分析中将土-结构计算模型的自由表面向下移动、底边界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, 并且针对不同结构尺寸、结构埋深和围岩等级给出上、下人工边界位置的建议。

关键词: 土-结构相互作用; 场地反应; 深埋地下结构; 人工边界条件; 地震动输入; 参数分析

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0039-07

Efficient Analysis for Seismic Soil-structure Interaction with Deep Burial Depth

ZHAO Mi, LI Xudong, GAO Zhidong, DU Xiuli

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

Abstract: The direct finite element method has been widely used in the soil-structure interaction (SSI) analysis. It is achieved by transforming the site response into the equivalent loading based on the viscous-spring boundary condition. When the structure is deeply buried in the soil, the whole finite element model of the SSI system contains too many degrees of freedom, especially for the three-dimensional problem, so that the computation efficiency is low. In this paper, an efficient analysis scheme is developed. In this new scheme, the one-dimensional site response analysis is still performed for the whole deep soil layer. Subsequently, the artificial bottom and top boundaries of the SSI model are moved up from the bottom of the actual soil layer (bedrock surface) and down from free surface, respectively, to the locations sufficiently near the structure. The theoretical analysis and numerical examples indicate that the proposed efficient analysis scheme satisfies the requirements of precision,

* 收稿日期: 2018-10-22; 修回日期: 2019-01-13

基金项目: 北京市自然科学基金杰出青年科学基金项目(JQ19029)、中国教育部创新团队(No.IRT_17R03)、国家973计划项目(2015CB057902)、国家自然科学基金项目(51421005, 51678015)资助

作者简介: 赵密(1980—), 男, 教授, 博士。主要从事重大工程抗震研究。E-mail: zhaomi@bjut.edu.cn

even when the location of the artificial boundary is sufficiently near the structure. The boundary location is discussed based on some parametric analyses regarding the structure size, its buried depth and the surrounding rock grade.

Keywords: seismic soil-structure interaction; site response; deep structure; artificial boundary condition; seismic input; parameter analysis

引言

地下结构、大坝、桥梁等重大工程的抗震分析需要考虑土-结构动力相互作用。有限元直接法或称为整体式分析方法^[1-5]是土-结构相互作用分析的常用数值方法。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。

人工边界条件主要分为全局人工边界和局部人工边界两类。全局人工边界^[6-7]多在频域下建立,是对无限介质的精确模拟,然而其难以用于时域分析。已有研究^[8-9]提出了时域稳定的高精度人工边界条件。

近似的时空局部人工边界条件被广泛应用于地震作用下土-结构相互作用分析。最常用的是黏性边界^[10],黏性边界通过在人工边界节点处设置远端固定的阻尼器来实现对散射波能量的吸收,使用简单、精度良好。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^[11-13]在人工边界远端设置并联弹簧-阻尼器系统解决了失稳问题,已有研究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^[14-15],并广泛应用于地震作用下土-结构相互作用分析^[16-18]。

对于深埋地下结构,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埋地下结构的高效分析方法。

1 高效分析方法

1.1 方法陈述

地震作用下土层-深埋结构相互作用的有限元

直接法如图1所示。图1(a)是传统分析方法,首先计算整个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且结构深埋,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下部水平位置,顶部自由表面移动到充分接近结构的上部水平位置,形成缩减的计算模型,并在顶部和底部人工边界处施加黏弹性边界并输入相同位置的场地反应,缩减模型的侧面人工边界处理与传统方法一致。下文分析说明高效分析方法对于自由场反应是精确的;对于土-

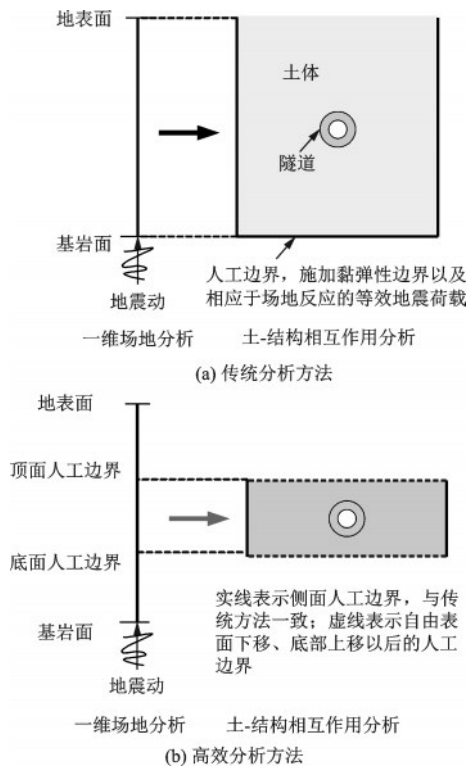


图1 地震作用下土-深埋地下结构相互作用分析

Fig.1 Seismic soil-structure interaction analysis with deep burial depth

结构相互作用分析是近似的,且方法精度随边界位置接近结构而降低,下文给出底面和顶面人工边界位置的建议。

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、顶部自由表面下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、顶部自由表面下移后计算得到的自由场反应不产生误差。

计算过程如图2所示。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、顶部自由表面下移形成缩减模型,如图2(b)所示,在缩减模型上下边界输入与整个深厚土层一维场地反应相同位置的反应。

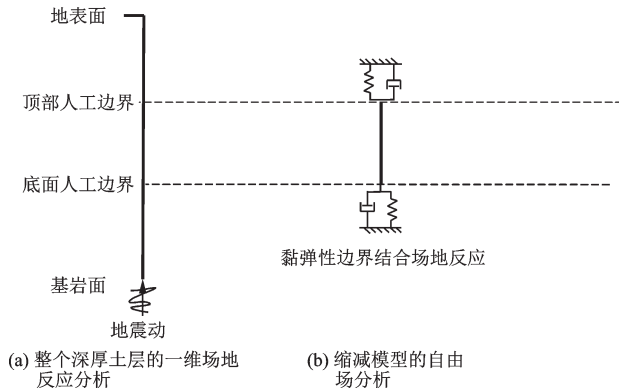


图2 一维场地反应和自由场分析

Fig.2 One-dimensional analysis of site response and free field

图2(a)中一维场地反应分析的有限元方程为:

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{M}_2 + \bar{M}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{M}_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{M}_4 + \hat{M}_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \hat{M}_5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \\ \ddot{u}_4 \\ \ddot{u}_5 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{C}_{21} & \bar{C}_{22} + \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{C}_{32} & \bar{C}_{33} & \bar{C}_{34} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{C}_{43} & \bar{C}_{44} + \hat{C}_{44} & \hat{C}_{45} \\ 0 & 0 & 0 & \hat{C}_{54} & \hat{C}_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \\ \dot{u}_4 \\ \dot{u}_5 \end{Bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \bar{K}_{11} & \bar{K}_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{K}_{21} & \bar{K}_{22} + \bar{K}_{22} & \bar{K}_{23} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{K}_{32} & \bar{K}_{33} & \bar{K}_{34} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{K}_{43} & \bar{K}_{44} + \hat{K}_{44} & \hat{K}_{45} \\ 0 & 0 & 0 & \hat{K}_{45} & \hat{K}_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_5 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中, \mathbf{u} 为绝对位移矢量; f_5 为已知的地震荷载,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; \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分别为集中质量、阻尼和刚度矩阵;下标1、2、3、4和5分别表示顶面人工边界以上、顶面人工边界、顶面人工边界与底面人工边界之间、底面人工边界、以及底面人工边界以下的自由度;符号 \sim 、 $-$ 和 $\hat{}$ 分别表示1-2、2-3-4和4-5部分。

根据方程(1),2-3-4部分的有限元方程可写为:

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_2 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{M}_3 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{M}_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \\ \ddot{u}_4 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} & 0 \\ \bar{C}_{32} & \bar{C}_{33} & \bar{C}_{34} \\ 0 & \bar{C}_{43} & \bar{C}_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \\ \dot{u}_4 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{K}_{22} & \bar{K}_{23} & 0 \\ \bar{K}_{32} & \bar{K}_{33} & \bar{K}_{34} \\ 0 & \bar{K}_{43} & \bar{K}_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_2 \\ 0 \\ f_4 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

其中,节点荷载为:

$$f_2 = -(\bar{M}_2 \ddot{u}_2 + \bar{C}_{22} \dot{u}_2 + \bar{C}_{21} \dot{u}_1 + \bar{K}_{22} u_2 + \bar{K}_{21} u_1) \quad (3)$$

$$f_4 = -(\hat{M}_4 \ddot{u}_4 + \hat{C}_{44} \dot{u}_4 + \hat{C}_{45} \dot{u}_5 + \hat{K}_{44} u_4 + \hat{K}_{45} u_5) \quad (4)$$

将相同的量加到方程(2)的两边,方程(2)写为

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_2 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{M}_3 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{M}_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \\ \ddot{u}_4 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}_{22} + c^{ve} & \bar{C}_{23} & 0 \\ \bar{C}_{32} & \bar{C}_{33} & \bar{C}_{34} \\ 0 & \bar{C}_{43} & \bar{C}_{44} + c^{ve} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \\ \dot{u}_4 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{K}_{22} + k^{ve} & \bar{K}_{23} & 0 \\ \bar{K}_{32} & \bar{K}_{33} & \bar{K}_{34} \\ 0 & \bar{K}_{43} & \bar{K}_{44} + k^{ve} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_2 + k^{ve} u_2 + c^{ve} \dot{u}_2 \\ 0 \\ f_4 + k^{ve} u_4 + c^{ve} \dot{u}_4 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中, k^{ve} 和 c^{ve} 表示黏弹性边界的刚度矩阵和阻尼矩阵,取值见文献[12-15]; f_2 和 f_4 分别表示1-2部分和4-5部分对2-3-4部分的作用力向量。

方程(5)表示缩减土层的自由场反应,等号右边的运动利用方程(1)求得,等号左边的运动为未知量。对比方程(1)和(5)可以看到,如果底面人工边界、顶面人工边界处输入一维场地反应,则计算得到2-3-4部分的自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,这也是方程(5)两边未知和已知的 u_2 和 u_4 没有采用不同符号表示的原因。

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,其有限元方程为:

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

式中,下标B和R分别表示人工边界的自由度及其内部的自由度; u 表示绝对位移; M 、 C 和 K 分别表示质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵; f_B 是无限域对有限域的作用荷载。有限域内可以考虑非线性。

人工边界处反应可以分解为散射场和自由场,即:

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

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

式中,上标S和F分别表示散射场和自由场。

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^∞ 分别为黏弹性边界的刚度和阻尼矩阵,具体取值参考文献[11-14]。

将式(8)代入式(9),然后再代入(7),最后代入式(6),整理得:

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

其中,人工边界上的等效地震荷载为:

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

对于结构深埋条件下高效分析方法,上文已经证明缩减模型的自由场分析结果是准确的,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、自由表面下移是否能够满足精度要求,并且通过研究结构尺寸、结构埋深、围岩等级等参数来给出边界位置的建议。

2 数值算例

2.1 算例描述

研究均匀半空间围岩中圆形隧道地震反应。隧道衬砌厚度为0.45 m,不考虑结构与围岩间接触非线性。分别考虑隧道外径大小、隧道埋深(隧道圆心至地表距离)和围岩等级三种参数对高效分析方法精度的影响。隧道外径大小考虑3、5和8 m;隧道埋深考虑200、400和600 m;围岩等级考虑3级、4级和5级围岩。围岩和隧道衬砌的材料常数见表1。

表1 围岩和衬砌的材料常数

Table 1 Material constants of surrounding rock and lining

围岩和衬砌	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	P波波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	SV波波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
围岩等级	3级	2 600	3	0.26	1 188	593
	4级	2 400	1	0.3	748	400
	5级	2 200	0.5	0.32	570	293
衬砌	2 500	30	0.22	—	—	

隧道结构及围岩均采用平面应变单元。地震波作为平面SV波垂直入射,入射地震动时程如图3所示。

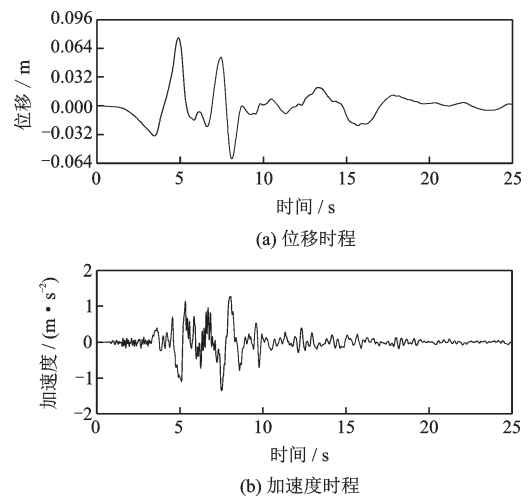


图3 入射地震动时程

Fig.3 Time histories of seismic input

2.2 自由场分析结果

一维场地反应采用1 200 m深围岩,围岩为5级围岩。自由场的缩减模型为100 m,上部自由表面

下移 550 m,底部岩层上移 550 m;模型宽度取为 60 m。一维场地反应结果和自由场结果如图 4 所示,图中给出模型中间点处的位移和加速度时程。从图中可以看出,缩减模型的自由场反应与一维场地反应一致。

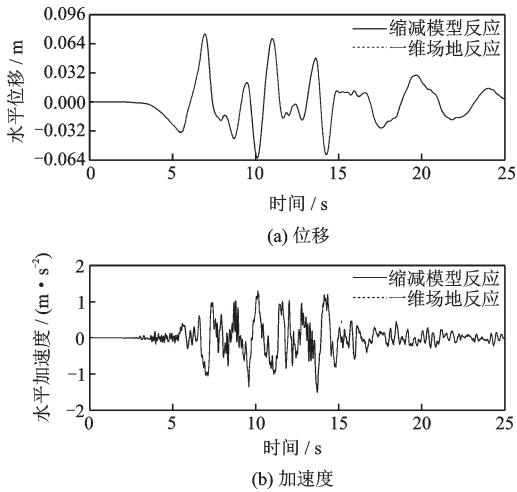


图 4 一维场地与自由场反应结果

Fig.4 Solutions of 1D site response and free field response

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、顶部自由表面下移后高效分析方法的计算精度,讨论埋深、围岩等级、洞径大小三种参数对高效分析方法精度的影响。

2.3.1 计算精度

如图 1(a)所示传统分析方法中土-结构模型宽度×高度分别为 5 级围岩 1 800 m×1 500 m、4 级围岩 2 400 m×1 800 m、3 级围岩 3 600 m×2 400 m,由于模型尺寸足够大,有限分析时间内结构反应不受边界效应影响,因而将其计算结果作为参考解。图 1(b)所示高效分析方法的土-结构模型尺寸取为 40 m×40 m、60 m×60 m、100 m×100 m、200 m×

200 m,结构位于模型正中,一维场地反应分析模型高度与传统方法模型高度一致。分析结构拱顶拱底相对位移的峰值误差以及拱顶剪应力的峰值误差,误差定义为:

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

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;下标 max 表示取最大值。

图 5 为考虑结构外径大小对精度影响的计算结果,此时隧道埋深和围岩等级分别取 600 m 和 5 级。图 6 为考虑结构埋深对精度影响的计算结果,此时隧道外径和围岩等级分别取 5 m 和 5 级。图 7 为考虑围岩等级对精度影响的计算结果,此时隧道外径和埋深分别取 5 m 和 600 m。图 8 给出隧道外径为 5 m、隧道埋深为 600 m 和围岩等级为 5 级条件下,模型尺寸分别为 40 m×40 m 和 60 m×60 m 时,结构各位置剪应力峰值误差的计算结果。

从图中可以得到如下结论:(1)随着模型尺寸增加,拱顶拱底相对位移峰值误差、拱顶剪应力峰值误差、拱顶加速度峰值误差呈单调递减;(2)在围岩等级、隧道埋深和模型尺寸一定的条件下,隧道外径越大误差越大;(3)在隧道外径、隧道埋深和模型尺寸一定的条件下,围岩等级越高误差越大;(4)在围岩等级、隧道外径和模型尺寸一定的情况下,隧道埋深对于误差的影响无明显规律;(5)拱顶剪应力峰值误差较结构其它位置大,因此本文在比较应力误差时只提取了拱顶的剪应力峰值误差。

上述分析表明,在保证计算精度的前提下,深埋结构的高效分析方法可以将底面人工边界和顶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

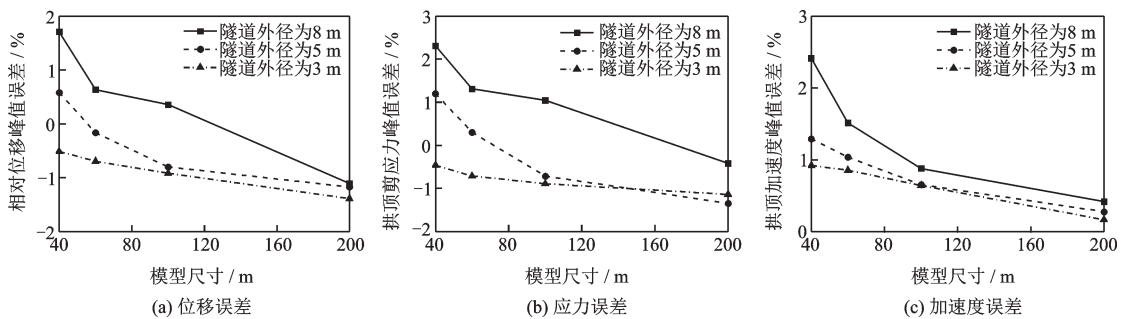


图 5 不同隧道外径下误差随模型尺寸的变化

Fig.5 Variations of errors with model sizes under different tunnel outer diameters

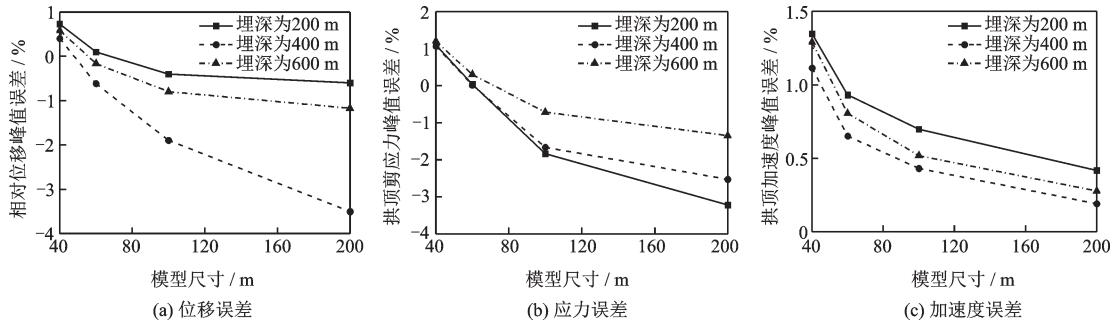


图6 考虑埋深的影响

Fig.6 Considering the influence of buried depth

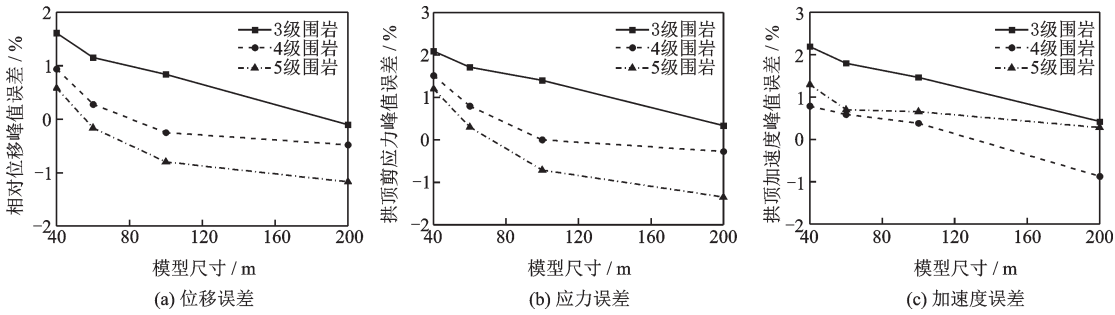


图7 考虑围岩等级的影响

Fig.7 Considering the influence of the grade of surrounding rock

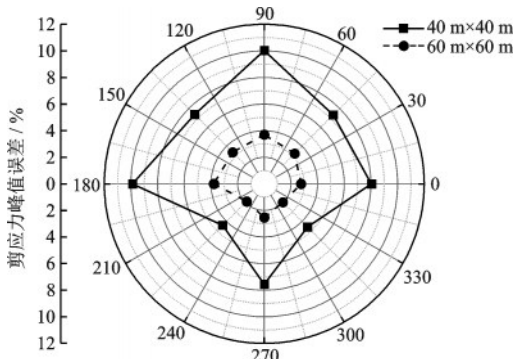


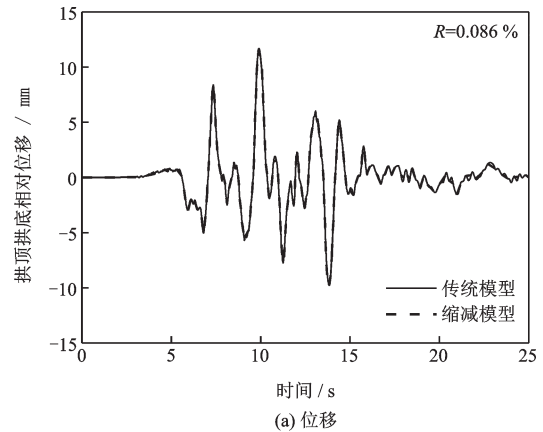
图8 结构剪应力峰值误差

Fig.8 Peak value errors of structural shear stresses

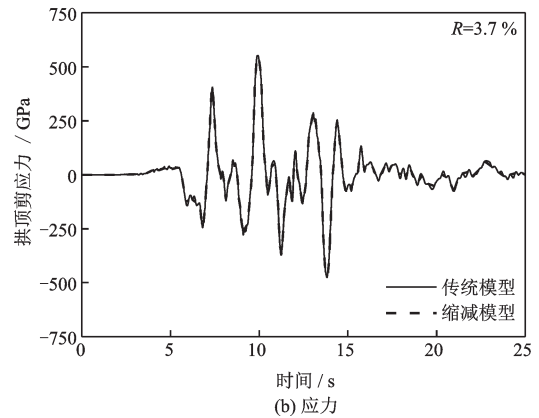
作用的误差来自于黏弹性边界吸收散射场的误差，而通常土-结构相互作用问题中散射场含量远少于自由场，因此底面人工边界和顶面人工边界可以设置于距离结构较近位置。

2.3.2 计算效率

下面研究底面人工边界上移和顶面自由表面下移后土-结构相互作用高效分析方法的计算效率。隧道外径为5 m、隧道埋深为600 m、围岩等级为5级。传统分析方法的模型尺寸为1 200 m×60 m，高效分析方法的模型尺寸为60 m×60 m。计算机CPU数量为2，采用隐式算法，时间步长为0.01 s。计算结果如图9所示，计算耗时见表2。可以看出，



(a) 位移



(b) 应力

图9 缩减模型与传统模型计算结果对比

Fig.9 Comparison of results between the reduced and common models

表2 计算模型和计算耗时

Table 2 Computational model and time

模型大小	1 200 m×60 m	60 m×60 m
单元数量	18 420	1 320
节点数量	19 070	1 400
计算用时	约 80 min	约 10 min

高效分析方法得到的相对位移和剪应力结果与传统方法吻合较好,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%,计算时间减少87.5%,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。

3 结 语

针对深埋地下结构提出一种地震作用下土-结构相互作用的高效分析方法,即一维场地反应分析针对整个深厚土层,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和地表面分别向上和向下移动到接近结构的位置。分别考虑了隧道外径、隧道埋深、围岩等级三种参数对高效方法精度的影响。数值算例表明:围岩等级为5级、埋深为600 m时,模型尺寸为隧道外径(直径)的4倍时,计算误差小于5%;围岩等级为5级、隧道外径为5 m时,不同埋深条件下,计算误差均小于5%;埋深为600 m,隧道外径为5 m时,随着围岩等级的提高,应该适当扩大模型尺寸的大小。高效方法的计算时间缩短为传统方法的1/8,大大提高了计算效率。

参考文献:

- [1] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2002.
Liao Zh P. Introduction to wave motion theories in engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Du X L. Theories and method of wave motion for engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [3] Wolf J P, Song C. Some cornerstones of dynamic soil-structure interaction [J]. Engineering Structures, 2002, 24(1):13-28.
- [4] Wolf J P. Soil-structure-interaction analysis in time domain[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1988.
- [5] Ghandil M, Behnamfar F. The near-field method for dynamic analysis of structures on soft soils including inelastic soil-structure interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 75:1-17.
- [6] Lysmer J, Wass G. Shear waves in plane infinite structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1972, 98(1): 85-105.
- [7] Wolf J P. The scaled boundary finite element method [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2003.
- [8] 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.
- [9] 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 Computational Methods, 2018, 15(3):1850099.
- [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] 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.
- [12] 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 X L, Zhao M, Wang J T. 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)
- [13] 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 J B, Wang Zh Y, Du X L, 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)
- [14] 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 J B, Lyu Y D. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 55-64. (in Chinese)
- [15] 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.

(本文责编: 池营营)

(下转第 54 页)