

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201912048

地震作用下土-结构相互作用的简化时程分析*

赵密¹, 王维伟¹, 黄景琦², 杜修力¹, 王君杰³

(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. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 3. 同济大学土木工程学院, 上海 200922)

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土-结构相互作用分析的常用时程分析方法之一。该方法具有严格的理论基础且计算精度较高,但在商业有限元软件中施加黏弹性边界和由场地反应确定的等效地震荷载时,需要使用者编制程序书写命令流文件。本文建议一种动力时程简化分析模型,即计算模型侧边界采用滚轴或绑定边界、底边界强制自由场反应。首先基于一维等效线性化场地反应分析软件 EERA,明确了分别给定岩石地表记录、基岩记录和场地地表记录条件下,正确实现场地反应分析的做法,表明在相同地震下三种分析能够得到相同的场地反应结果;然后给出动力时程简化分析过程;最后通过一层两跨地铁车站的地震分析,表明该方法具有较高精度,满足工程需求。

关键词: 土-结构相互作用; 动力时程分析; 场地反应; 滚轴边界; 地震动输入

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0111-07

Simplified Time History Analysis for Soil-Structure Interaction under Earthquake

ZHAO Mi¹, WANG Weiwei¹, HUANG Jingqi², DU Xiuli¹, WANG Junjie³

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200922, China)

Abstract: The direct finite element method is achieved by transforming the site response into the equivalent loading based on the viscous-spring boundary condition. It is one of the most common methods using time history analysis for soil-structure interaction analysis. This method is very accurate but users need to generate command stream files through programming based on commercial finite element software. In this paper, a simplified dynamic time analysis method, i.e. the roller boundary is applied at lateral boundaries and the bottom boundary are forced by the free field response that is obtained from one-dimensional (1D) site response analysis. Firstly, the site response analysis is done under the conditions of given rock surface, bedrock and site surface records respectively based on 1D

* 收稿日期:2019-12-19;修回日期:2020-04-26

基金项目:国家自然科学基金项目(U1839201; 51678015)、教育部创新团队项目(IRT_17R03)、北京市自然科学基金项目(JQ19029)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

equivalent linearization site response analysis, which shows that the same site response results can be obtained for the three analyses under the same earthquake. Then, simplified time analysis is presented. Finally, the seismic analysis of a two-span subway station is presented, and the results indicate that the method has high precision and meets engineering requirements.

Keywords: soil-structure interaction; dynamic time history analysis; site response; roller boundary; seismic input

引 言

地下结构、大坝、桥梁等重大工程的抗震分析通常需要考虑土-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-结构动力相互作用分析常用的一种数值方法。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。有限域的截断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,然而其通常较难用于时域分析。研究者^[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广泛应用于地震作用下土-结构相互作用分析。普遍使用的是黏性边界^[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,实现简单,计算准确,且已被纳入商业软件^[11-12]。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漂移失稳现象。黏弹性边界^[13-15]是远端固定的并联弹簧-阻尼器系统,引入弹簧解决了低频失稳问题,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^[18-20]。这种严格的分析方法计算精度较高,但在商业有限元软件中施加黏弹性边界和由场地反应确定的等效地震荷载,需要使用者编制程序书写命令流文件。

本文给出一种动力时程简化分析方法,即计算模型侧边界采用滚轴边界^[21]或绑定边界、底边界强制自由场反应,自由场反应通过一维场地反应分析获得。该方法不需要施加黏弹性边界和等效地震荷载,操作简单,适合工程应用。绑定边界和滚轴边界能够模拟自由场反应,在水平地震作用下,能够提供一维场地反应土体纯剪应力约束,但是和底边界一样都无法吸收结构产生的散射场,因此需要通过具体算例评价该方法的精度。本文首先基于常用的一维场地地震反应分析程序EERA^[22],明确了分别给定岩石地表记录、基岩记录和场地地表记录条件下,正确实现场地反应分析的做法,表明在相同地震下三种分析能够得到相同的场地反应分析结果;然后给出动力时程简化分析过程;最后通过一层两跨地铁车站的地震分析,表明该方法具有较高精度,满足工程需求。

1 场地地震反应分析

场地地震反应分析中,对于局部范围内场地条件较为均匀简单的情况,可以将场地简化为成层半空间模型。在地震动作为平面体波垂直入射的情况下,场地地震反应分析属于空间一维问题。采用严格的动力时程分析方法或简化的分析方法开展土-结构动力相互作用分析之前,都需要进行一维场地地震反应分析,将其结果作为土-结构相互作用分析的输入,因而场地反应分析结果的准确性至关重要。下面介绍在给定基岩地表运动、基岩运动或场地地表运动三个不同位置的地震动参数条件下,基于频域等效线性化程序EERA^[22]计算场地反应的做法。

一维场地地震反应分析如图1所示,入射地震动为 u_i ;忽略地震动在半空间基岩中的传播时间,则

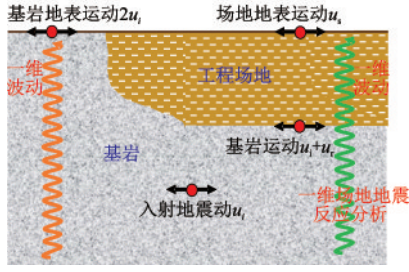


图1 工程场地的一维场地反应分析

Fig.1 One-dimensional site response analysis of engineering site

基岩地表运动为 $2u_i$; 入射地震动传播进入工程场地获得场地地震反应, 场地地表运动为 u_s , 基岩运动为 $u_g = u_i + u_r$ 。

(1)图2 (a)所示为输入基岩地表运动(或者入射地震动)的方式。由波动理论^[23]可知,基岩处应力为:

$$\tau = \tau_i + \tau_r = \rho c \dot{u}_i - \rho c \dot{u}_r \quad (1)$$

式中, τ_i 为入射波的应力; τ_r 为外行波的应力; u_i 为入射波位移; u_r 为外行波位移; ρ 为密度; c 为基岩介质剪切波速。

基岩处位移为:

$$u = u_i + u_r \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中得

$$\tau = \rho c \dot{u}_i - \rho c (\dot{u} - \dot{u}_i) \quad (3)$$

整理得

$$\tau + \rho c \dot{u} = 2\rho c \dot{u}_i \quad (4)$$

式(4)表明, 给定基岩地表运动时一维场地反应的输入方法为, 在基岩处施加一个远端固定且阻尼系数为 ρc 的阻尼器(即黏性边界), 在基岩处施加力的大小为 $2\rho c \dot{u}_i$ 。

使用一维等效线性化程序 EERA^[22]时, 若地震动为基岩地表处的地震响应, 在基岩处选择 Outcrop 选项。

(2)图2 (b)所示为强制基岩运动的方式, 强制的地震动为给定的基岩地震动 $\dot{u} = \dot{u}_i + \dot{u}_r$ 。

使用一维等效线性化程序 EERA^[22]时, 若地震动为钻孔测得的基岩地震动, 在基岩处选择 inside 选项。

(3)当给定场地地表地震动时, 由于 EERA^[22]是基于频域等效线性化方法, 因此可通过传递函数反演得到场地反应, 在场地地表处选择 inside 选项。

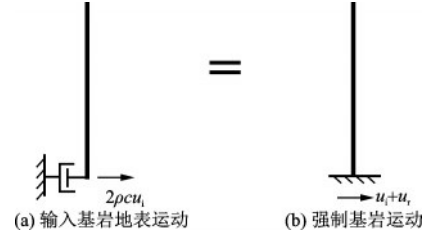


图2 场地反应分析的地震动输入

Fig.2 Seismic input for site response analysis

2 土-结构相互作用的简化时程分析

地震作用下土-结构动力相互作用的简化时程分析模型如图3所示。模型侧边界采用滚轴或绑定边界, 底部输入该位置处的场地反应。

对于动力时程简化分析模型, 土-结构整体模型的有限元方程为:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_{RR} & M_{RB} & M_{RG} \\ M_{BR} & M_{BB} & M_{BG} \\ M_{GR} & M_{GB} & M_{GG} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_R \\ \ddot{u}_B \\ \ddot{u}_G \end{Bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} C_{RR} & C_{RB} & C_{RG} \\ C_{BR} & C_{BB} & C_{BG} \\ C_{GR} & C_{GB} & C_{GG} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_R \\ \dot{u}_B \\ \dot{u}_G \end{Bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} K_{RR} & K_{RB} & K_{RG} \\ K_{BR} & K_{BB} & K_{BG} \\ K_{GR} & K_{GB} & K_{GG} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_R \\ u_B \\ u_G \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f_B \\ f_G \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, 下标 B、G、R 分别表示模型侧边界、底边界和有限区域内其它自由度; u 、 \dot{u} 及 \ddot{u} 分别表示位移、速度及加速度矢量; K 、 C 及 M 分别表示刚度矩阵、阻尼矩阵及质量矩阵; f_B 和 f_G 为侧边界及底部边界的支反力。

将式(5)中的绝对位移、速度及加速度分解为基岩运动以及相对基岩的运动两部分, 即

$$u = \bar{u} + Iu_g \quad (6)$$

式中, \bar{u} 为相对基岩位移; I 为单位向量。

将式(6)代入式(5)并忽略阻尼项和模型底部自由度可得

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_{RR} & M_{RB} \\ M_{BR} & M_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\bar{u}}_R \\ \ddot{\bar{u}}_B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{RR} & C_{RB} \\ C_{BR} & C_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\bar{u}}_R \\ \dot{\bar{u}}_B \end{Bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} K_{RR} & K_{RB} \\ K_{BR} & K_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_R \\ \bar{u}_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f_B \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} M_{RR} & M_{RB} \\ M_{BR} & M_{BB} \end{bmatrix} \bar{I} \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (7)$$

式中, f_B 由滚轴或绑定约束提供; \bar{I} 为单位向量。

上述动力时程简化分析过程很容易在商用有限元软件中实现,并通过软件的时程求解器进行计算。

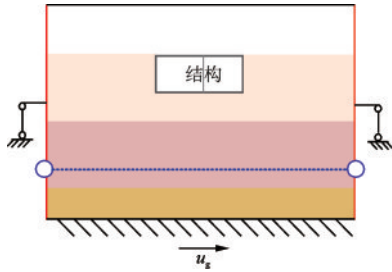


图3 动力时程简化分析模型

Fig.3 Simplified calculational models for dynamic time history analysis

与施加黏弹性边界和场地地震荷载的严格分析^[24]相比,上述简化时程分析具有以下优点:

(1)简化分析计算自由场是准确的(考虑了柔性地基),有结构时三个边界不能模拟散射场,但是通常散射场远少于自由场,因而方法具有较高精度。

(2)简化分析在有限元模型侧边界施加滚轴边界、底边界强制已知自由场运动(或者固定底边界施加惯性力),避免了三个边界上施加黏弹性边界和输入由自由场确定的等效地震荷载,操作更加简单。

3 数值算例

3.1 算例描述

采用的土层参数见表1,表中土体类别1为黏土,土体类别2为砂土,两类土体的动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化的曲线如图4所示,土层之间满足连续性条件。

某一层两跨矩形地铁车站结构如图5所示。结构混凝土材料的密度为 2500 kg/m^3 、弹性模量为 24 GPa 、泊松比为 0.15 。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 $1/3.5$ ^[25]。

土-结构相互作用有限元模型如图6所示,结构埋深(结构顶面至地表的距离)为 5 m ,土与结构采用绑定约束。《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[26]中规定,当地震反应计算中使用时程分析方法

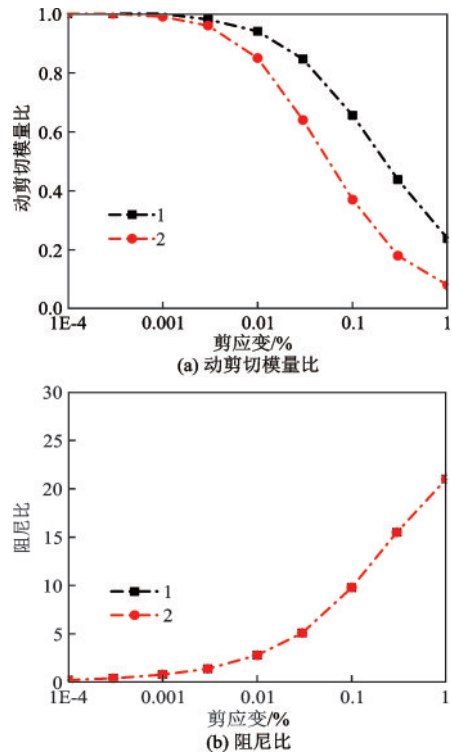


图4 动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化的曲线

Fig.4 Curves of dynamic shear modulus ratio and damping ratio varying with shear strain

时,计算模型的侧面人工边界距离地下结构的距离应该大于 $2\sim 3$ 倍地下结构的水平宽度,根据规范要求的距离,模型宽度取为 120 m 。有限元网格尺寸根据最小波长的 $1/6\sim 1/8$ 计算,土体网格尺寸为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$,结构网格尺寸为 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 。土-结构相互作用时程分析时,需要通过一维场地反应分析得到土体的等效剪切模量和模态阻尼比,计算方法见文献[23]。

采用在基岩地表测得的Kobe地震记录作为输入,Kobe记录的加速度、速度和位移时程如图7所示。

3.2 场地反应分析

由于Kobe记录在基岩地表测得,首先选择EE-RA^[22]基岩处的Outcrop选项,计算得到土层各处的地震反应;然后分别输入计算得到的场地地表和底部基岩加速度,分别在场地地表和基岩处选择inside选项,进行场地反应分析,三种输入方式下场地反应得到的相对位移峰值、剪应力峰值随深度变化的计算结果如图8所示。可见,在一次地震中三种输入方式能够得到相同的场地反应分析结果。

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of soil layers

土层号	深度/m	密度/(kg·m ⁻³)	剪切波速/(m·s ⁻¹)	泊松比	土体类别
1	0.0~1.0	1 900	140	0.33	1
2	1.0~5.0	1 900	140	0.32	2
3	5.0~8.0	1 900	170	0.32	2
4	8.0~11.0	1 900	190	0.40	1
5	11.0~17.0	1 900	240	0.30	1
6	17.0~22.0	2 000	330	0.26	2

注:土体类别 1 为黏土,土体类别 2 为砂土

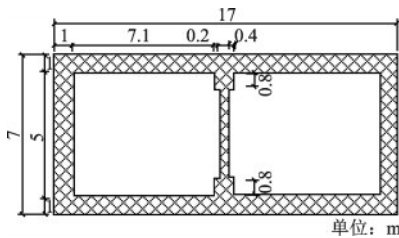


图 5 一层两跨地铁车站结构

Fig.5 Finite element model of one-story two-span subway station

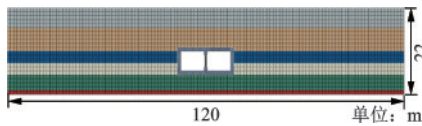


图 6 一层两跨地铁车站有限元模型

Fig.6 Finite element model of one-story two span subway station

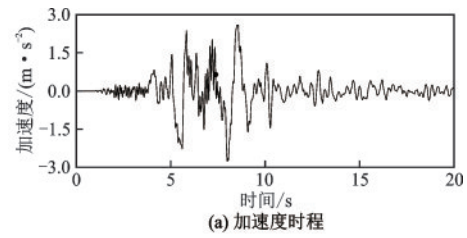
3.3 土-结构相互作用抗震分析

大量的数值算例已经证明采用黏弹性边界的精确性,在《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[26]中也给出了人工边界建议的位置。因此仅对比底边和侧边界都施加场地反应和黏弹性边界的严格分析模型^[24]和动力时程简化分析模型的计算结果,而不再与大模型结果进行对比。模型基岩输入的加速度、速度和位移时程如图 7 所示。

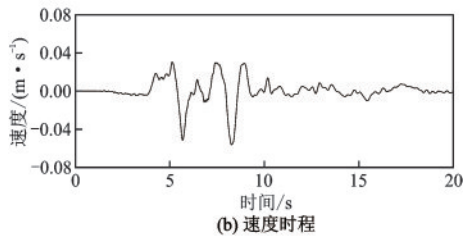
为评价计算结果,定义如下误差表达式:

$$R = \frac{\left| |r(t)|_{\max} - |r_0(t)|_{\max} \right|}{|r_0(t)|_{\max}} \quad (7)$$

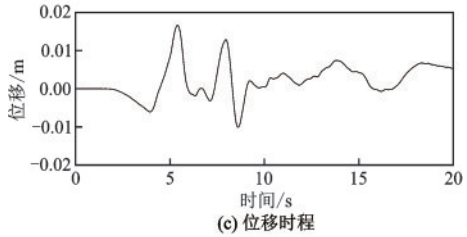
其中, $r_0(t)$ 为施加黏弹性边界和场地反应等效地震荷载严格分析^[24]的计算结果; $r(t)$ 为本文简化分析的计算结果; $|\cdot|$ 表示取绝对值;下标 max 表示取最



(a) 加速度时程



(b) 速度时程



(c) 位移时程

图 7 基岩地表记录

Fig.7 Bedrock outcrop motion

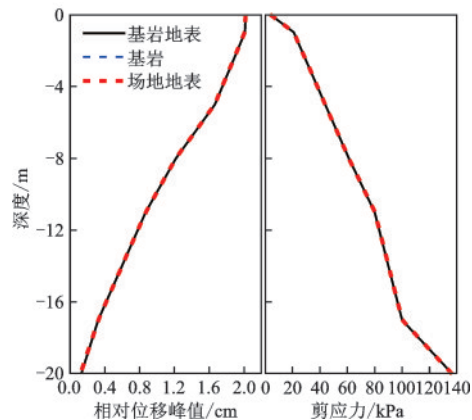


图 8 土层相对位移和剪应力峰值随深度的变化

Fig.8 Peak of relative displacement and shear stress with depths

大值。

图9给出了地铁车站的地震计算结果,9(a)、9(b)和9(c)分别为中柱相对位移、中柱剪力和中柱弯矩的计算结果。从图中可以看出,与严格分析结果相比,本文动力时程简化分析的中柱相对位移、中柱剪力和中柱弯矩误差分别为5.18%,7.47%和5.45%,能够满足工程精度要求。

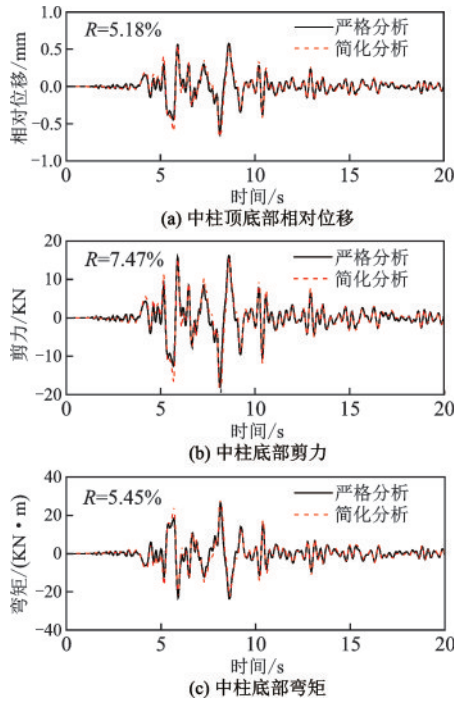


图9 地铁车站的时程分析结果

Fig.9 Time history analysis result of subway station

4 结论

(1)本文给出地震作用下土-结构相互作用的简化动力时程分析过程,即计算模型侧边界采用滚轴边界或绑定边界,底边界强制自由场反应。通过数值算例验证了方法的有效性。

(2)结合常用一维等效线性化程序EERA^[22],对于一次地震,在分别给定岩石地表记录、基岩记录和场地地表记录条件下,三种已知输入地震动能得到相同的场地反应。

(3)相对于施加黏弹性边界和场地反应等效荷载的严格动力时程分析,本文简化动力分析计算得到的车站中柱相对位移、中柱剪力和中柱弯矩误差分别为5.18%,7.47%和5.45%,能够满足工程精度

要求。因本文的模型尺寸是按照规范要求选取的,实际应用中可进一步增大简化模型尺寸来提高其计算精度。

参考文献:

- [1] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2002.
Liao Z P. Introduction to engineering wave theory [M]. Second Edition. 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. Theory and method of engineering wave [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] Itasca Consulting Group Inc. FLAC3D (fast lagrangian

- analysis of continua in 3D), version 2.00, users manual (volume V) [R]. USA: Itasca Consulting Group Inc, 1997.
- [12] Brinkgreve R B J, Vermeer P A. Finite Element code for soil and rock analysis, user's manual [M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 2012.
- [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 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)
- [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 J B, Wang Z 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)
- [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 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)
- [17] Zhao M, Gao Z D, Wang L T, et al. Obliquely incident earthquake 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 R, Zhou D, Liu W Q, 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 D H, Du C B, Yuan J W. Viscous-spring boundary element based on ABAQUS and application to dynamic analysis of a 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 X L, Zhao M. 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] Li Y, Zhao M, Xu C S, et al. Earthquake input for finite element analysis of soil-structure interaction on rigid bedrock [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 79: 250-262.
- [22] Bardet J P, Ichii K, Lin C H. EERA-A computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses [R]. California: Department of Civil Engineering, University of Southern California, 2000.
- [23] 杜修力, 许紫刚, 许成顺, 等. 基于等效线性化的土-地下结构整体动力时程分析方法研究 [J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(12): 2155-2163.
Du X L, Xu Z G, Xu C S, et al. Research on overall dynamic time history analysis method of soil-underground structure based on equivalent linearization [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(12): 2155-2163. (in Chinese)
- [24] 赵密, 王利涛, 高志懂, 等. 土-结构相互作用分析中几类地震输入方式的比较 [J]. *震灾防御技术*, 2017, 12(3): 589-598.
Zhao M, Wang L T, Gao Z D, et al. Comparison of several types of seismic input methods in soil-structure interaction analysis [J]. *Earthquake Disaster Prevention Technology*, 2017, 12(3): 589-598. (in Chinese)
- [25] Huo H, Bobet A, Fernández G, et al. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: evaluation of the failure of the Daikai Station [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(12): 1522-1533.
- [26] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

(本文责编: 赵霞)