

# 黄土区地铁车站动力分析中的无限元传输边界

权登州<sup>1</sup>, 王毅红<sup>1</sup>, 井彦林<sup>1</sup>, 尹尚之<sup>1</sup>, 周沈华<sup>2</sup>

(1.长安大学建筑工程学院, 陕西 西安, 710061; 2.西安市地下铁道有限责任公司, 陕西 西安 710018)

**摘要:** 地铁地下结构有限元分析时, 半无限域截断处的人工边界条件直接影响计算结果的可靠性。本文基于ABAQUS有限元分析软件, 探讨地铁地下结构动力响应分析中固定边界、远置边界、粘弹性边界及无限元传输边界的实现方法; 通过黄土介质振动响应分析, 对黄土地区地铁车站动力响应分析中各种人工边界条件的模拟效果进行对比研究。结果显示, 在黄土地区采用粘弹性边界和无限元传输边界均可有效控制波的反射干扰, 模拟波动穿过人工边界面向半无限域传播的特征。与粘弹性边界相比, 无限元传输边界使用有限单元模拟近场黄土, 使用无限单元界模拟远场黄土介质, 具有技术处理简单, 计算成本低, 精度高等特点。实例分析表明, 在黄土地区地铁车站地震反应分析中采用有限元-无限元耦合的建模方法, 具有较好的适用性。

**关键词:** 黄土地区; 地铁车站; 振动响应; 抗震分析; 无限元传输边界

**中图分类号:** U231 U453.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7930(2015)04-0537-6

## Infinite-element transmitting boundary in dynamic analysis of subway station in loess area

QUAN Dengzhou<sup>1</sup>, WANG Yihong<sup>1</sup>, JING Yanlin<sup>1</sup>, YIN Shangzhi<sup>1</sup>, ZHOU Shenhua<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. Xi'an Underground Railway Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

**Abstract:** The treatment for artificial boundary condition of semi-infinite region will directly influence the reliability of analysis results in finite element analysis of subway structures. Based on the finite element analysis software of ABAQUS, the implementation methods of fixed boundary, remote artificial boundary, viscous-spring boundary and infinite-element transmitting boundary were studied in the dynamic analysis of subway structures. By the vibration response analysis of loess medium, the reliability of artificial boundary conditions was comparatively studied. The results showed that the characteristics of seismic wave passing artificial boundary of semi-infinite region were simulated effectively in loess area by using viscous-spring boundary and infinite-element transmitting boundary, due to the interference of reflection on the boundary being weakened significantly. With the infinite-element transmitting boundary is use, the near-field and far-field loess medium were simulated by finite elements and infinite elements respectively. This presented the characters of simple technology, low computational cost and high precision compared with viscous-spring boundary. Then, the engineering example of simulating the semi-infinite region of loess medium using the infinite-element transmitting boundary was analyzed, and the applicability of coupling finite element with infinite element in the seismic analysis of subway station was studied for loess area.

**Keywords:** loess area; subway station; vibration response; seismic analysis; infinite-element transmitting boundary

地铁地下车站、区间隧道等地下结构的动力响应分析中, 需从半无限域地基中截取有限近场计算区域。半无限域截断处的边界处理直接影响计算结果的可靠性<sup>[1]</sup>。如果简单的采用固定边界处理截断处, 将使整个系统封闭, 脉冲波在固定边界上往复反射, 导致模拟失真。近年来, 一些学者为了减少人工截断面上反射波对近场区域的影响, 引入了多种人工边界条件, 如远置边界、粘性边界、粘弹性边界、无限元传输边界、旁轴近似边界和透射边界等<sup>[2-3]</sup>。

庄海洋、陈国兴等人<sup>[4-5]</sup>使用远置边界条件模拟半无限域, 边界取得足够远时, 在研究时段内反射

波未到达感兴趣的近场区域, 从而避免反射波对结构动力反应的干扰。远置边界具有技术处理简单、精度高等优点, 但模型总自由度大, 计算成本高, 当计算规模过大时, 其使用受制于计算机硬件条件。Lysmer<sup>[6]</sup>在 1969 年提出了粘性边界, 该边界条件存在精度不高和低频漂移失稳等缺点; Deeks<sup>[7]</sup>、刘晶波等人<sup>[8]</sup>在其基础上, 基于柱面波动方程建立了二维粘弹性边界, 可模拟截断面外半无限域介质的弹性恢复力, 具有良好的稳定性。但粘弹性边界建模时, 需逐点计算并施加弹簧及阻尼器, 前处理工作量大。实际应用中, 为了便于施加粘弹性边界, 通常采用一些近似处理, 对计算精度造成一定程度

收稿日期: 2015-03-17

修改稿日期: 2015-08-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41472267); 西安市地下铁道有限责任公司科研基金项目 (D4-YJ-042014048)

作者简介: 权登州(1983-), 男, 博士生, 主要从事工程结构抗震方面研究。E-mail: qdz0809@163.com



表1 人工边界参数  
Tab. 1 Parameters of artificial boundary

| 参数    | 取值范围    | 推荐系数 |
|-------|---------|------|
| $a_N$ | 1.0~2.0 | 1.33 |
| $a_T$ | 0.5~1.0 | 0.67 |

2 黄土介质振动响应分析

2.1 黄土的材性指标

我国黄土主要分布在西北、华北等地区, 本文以西安地铁工程建设为例, 研究黄土地区地铁车站动力响应分析中的人工边界. 西安地铁是我国首次在黄土地区修建的地铁工程, 其中五号线有约半数工程位于黄土区域, 为了解工程沿线黄土的动力特征, 对五号线 17 处站点进行工程地质钻探、取土样并做动力学试验、测试土层波速, 现场勘察和室内试验结果反映了黄土场地的特性. 假定地铁车站周围黄土为各项同性弹性介质, 选取典型的黄土物理力学参数, 建立分析模型, 使计算结果可反映黄土介质特性, 黄土材性参数见表 2.

表2 黄土材性参数  
Tab.2 The material parameters of loess

| 密度<br>/kg·m <sup>-3</sup> | 杨氏模<br>量/MPa | 泊松比 | 等效波速<br>/m·s <sup>-1</sup> | Rayleigh阻尼 |           |
|---------------------------|--------------|-----|----------------------------|------------|-----------|
|                           |              |     |                            | $\alpha$   | $\beta$   |
| 1 800                     | 50           | 0.3 | 250                        | 0.616      | 0.000 312 |

2.2 ABAQUS分析模型

将半无限域黄土介质简化为二维平面应变模型, 采用远置边界时, 为了避免边界上反射波对观测点动力反应的干扰, 模型尺寸取为 1 000 m×1 000 m, 远场区域底边采用固定边界, 侧边采用水平向约束. 近场观测区域尺寸为 100 m×20 m, 有限元网格尺寸为 1 m×1 m, 以近场区域对称轴处 A (表面点)、B (埋深 10 m) 和 C (埋深 20 m) 处为动力反应观测点. 在模型上表面作用 1/2 个正弦脉冲波, 时间为 0.25 s, 幅值为 0.1g, 荷载时程如图 3 所示.

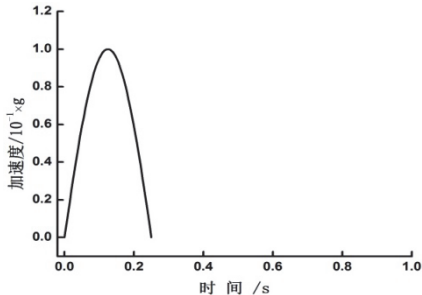


图 3 脉冲波加载时程图  
Fig.3 Loading curve

为了研究不同人工边界条件对黄土介质动力反应的影响, 同时建立尺寸为 100m×20m 的分析模型, 底边和侧边分别采用固定边界、粘弹性边界

和无限元传输边界. 模型网格划分、输入荷载及动力反应观测点同远置边界模型中的近场区域. 粘弹性边界模型边界面上分别设置法向和切向的弹簧及阻尼元件, 如图 4 所示; 无限元传输边界模型边界面上使用四边形平面应变无限元模拟 (CINPE4), 其延伸指向远离近场方向, 如图 5 所示.

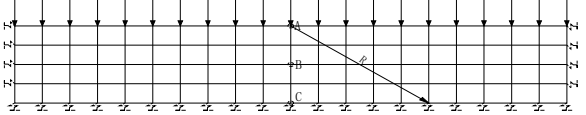


图4 粘弹性边界条件模型  
Fig.4 Model of viscous-spring boundary

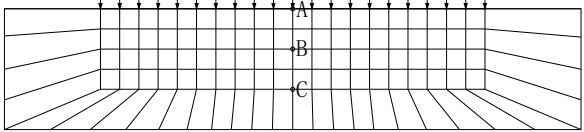


图5 无限元边界条件模型  
Fig.5 Model of infinite-element transmitting boundary

2.3 振动响应分析

取各模型观测点的加速度时程如图 6 所示. 固定边界模型中, 脉冲波到达人工边界后有反射作用, 且在 2s 的计算时间内, 脉冲波在计算范围内往复反射, 并没有穿过人工边界; 同时, 各测点处加速度反应幅值随埋深增加逐渐减小, 如图 6 (a) 所示. 从而可以预测在完全弹性介质中, 脉冲波不会穿过边界, 将永远在计算区域内往复反射; 在有阻尼介质中, 脉冲波将往复反射直到能量完全被介质吸收. 脉冲波在人工边界上往复反射, 这与波在半无限域介质内的传播特征相悖. 因此, 有必要在半无限域截断面处设置人工边界, 吸收反射能量, 消除不良影响.

远置边界模型中, 由于在研究时段内反射波未到达观测点, 观测结果未见明显反射波干扰现象, 波在介质内传播过程与在半无限域内传播特征相符, 计算结果可作为黄土介质加速度反映的精确解; 粘弹性边界模型中, 脉冲波到达人工边界后, 弹簧与阻尼器起到消能作用、减小波的反射, 模拟了波动穿过人工边界的情况, 如图 6 (b)、(c) 所示.

无限元传输边界模型计算结果显示, 输入的脉冲波能量几乎完全被人工边界的粘滞阻尼吸收, 仅仅产生了微小波动; 同时, 不同深度处测点的加速度反应幅值随埋深增加而逐渐减小, 且幅值出现的时刻随埋深增加而向后推移, 这是由于随埋深增加脉冲波传播的距离增大, 黄土介质阻尼耗散的能量越多. 对比分析发现, 无限元传输边界模型中黄土介质加速度反应与远置边界模型十分接近, 如图 6 (d) 所示. 可见无限元传输边界能够较好的模拟

黄土介质半无限域内波的传播特性, 计算精度和稳定性较好.

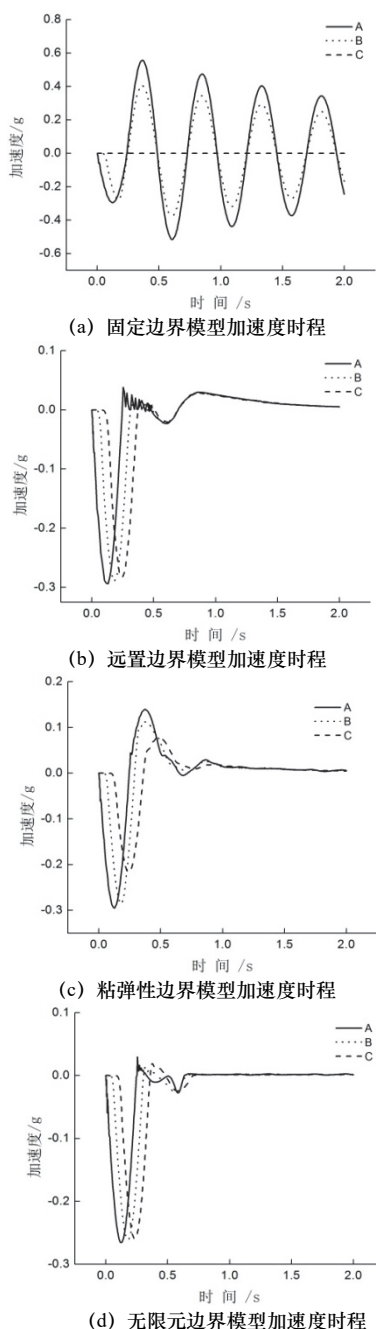


图6 不同边界模型的加速度反应

Fig.6 Acceleration response of the numerical models

由上述分析可知, 在黄土介质半无限域截断处使用固定边界时, 界面处反射波对计算结果产生严重干扰, 分析结果可靠度较低; 粘弹性边界和无限元传输边界能够较好的模拟输入波在黄土介质中传播特性. 与粘弹性边界相比, 无限元传输边界分析结果更接近远置边界, 具有更高精度; 且技术处理简单, 建模方便, 易于实现, 计算成本低. 因此, 推荐采用有限元-无限元耦合的建模方法, 使用无限元传输边界模拟半无限域远场黄土介质, 使用有限单元模拟近场黄土和地铁车站结构, 研究黄土地区

地铁车站动力反应.

### 3 有限元-无限元耦合分析

#### 3.1 典型地铁车站模型

西安黄土地区地铁车站典型结构为两层双跨矩形断面, 如图7所示. 基于 ABAQUS 大型非线性有限元分析平台, 采用有限元-无限元耦合的建模方法, 使用有限单元模拟车站结构及近场黄土, 使用无限元传输边界模拟远场黄土介质, 建立二维平面应变模型, 如图8所示. 模型尺寸为  $100\text{ m} \times 50\text{ m}$ , 地铁车站结构宽  $18.7\text{ m}$ , 高  $13.55\text{ m}$ , 埋深为  $16\text{ m}$ , 左右跨对称布置; 上、下层边墙厚度分别为  $0.6\text{ m}$  和  $0.7\text{ m}$ ; 上、下层净高分别为  $4.95\text{ m}$  和  $6.6\text{ m}$ ; 车站顶、底板厚度为  $0.8\text{ m}$ , 中板厚度为  $0.4\text{ m}$ . 地铁车站结构采用弹性模型, 材料密度取  $2500\text{ kg/m}^3$ , 杨氏模量取  $2.1 \times 10^{10}\text{ Pa}$ , 泊松比取  $0.2$ ; 周围黄土的材性参数见表2. 土-结构动力相互作用采用 ABAQUS 中主从接触面对模拟. 为了对比研究, 同时建立固定边界地铁车站分析模型, 模型尺寸及参数设置与无限元传输边界模型相同.

#### 3.2 地震响应分析

本文选用 EI-Centro 波模拟地震作用, 选取车站中柱底部转角  $K$  点 (见图7) 为地震反应观测点. EI-Centro 波是 1940 年 5 月 18 日在美国加利福尼亚州南部埃尔森特罗记录到的强震记录, 其 NS 分量原始峰值加速度为  $0.349\text{ g}$ , 持时  $54\text{ s}$ , 强震部分持续约  $26\text{ s}$ . EI-Centro 波加速度时程及相应傅氏谱如图9所示.

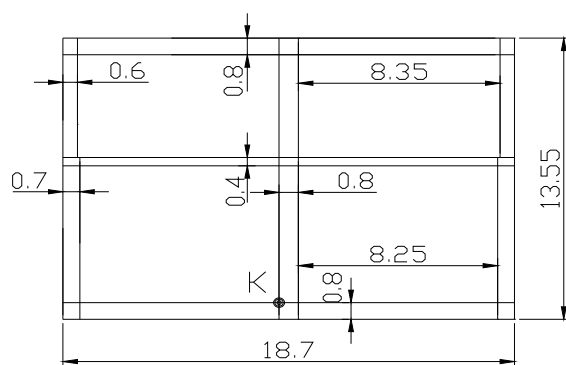


图7 地铁车站横截面图 (单位:mm)

Fig.7 The cross section of subway station/mm

对于固定边界模型与无限元传输边界模型, 分别采用两种方式施加地震动. 在固定边界模型中, 采用底边直接施加地震加速度时程的方式; 对于无限元传输边界模型, 则不能采用第一种方式, 因为使用边界约束条件施加加速度时程相当于固定边界, 所以将地震动加速度时程转化为力时程施加到



底部边界处<sup>[14-15]</sup>,分析结果如图10所示.

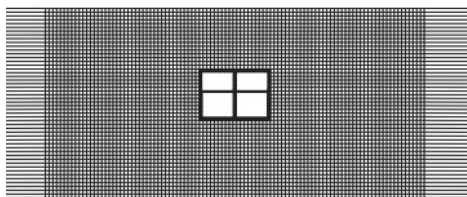


图8 地铁车站抗震分析模型  
Fig 8 The seismic analysis model of subway station

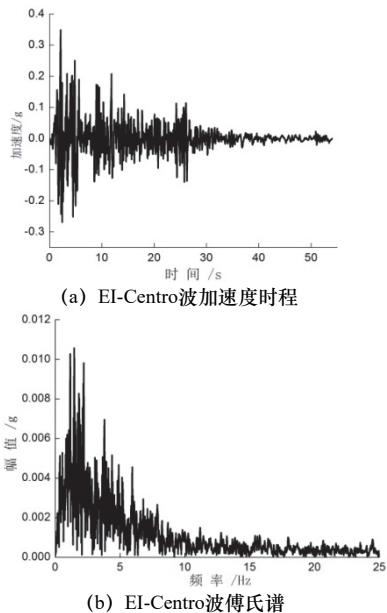


图9 El-Centro地震动  
Fig. 9 El-Centro wave

分析中输入的El-centro地震波在2 s时加速度到达峰值,15 s后振幅有明显衰减,20 s后逐渐趋于0 (见图9). 固定边界模型中,在整个研究时段内K点加速度反应时程曲线幅值未发生明显的衰减,与输入地震动波形有较大的差异,这主要是由于输入的地震波无法穿过人工边界,入射波在计算区域内往复反射,反射波对观测点加速度反应产生了严重干扰,如图10 (a) 所示;此外,由于固定边界模型相对封闭,输入地震波将一直往复反射,而黄土介质阻尼耗散模型体系能量有限,因此,模型体系的动能时程衰减较慢,且在地震动结束时模型体系中还存在较高的动能,如图10 (c) 所示.

采用无限元传输边界时,在研究时段内,模型K点的加速度反应时程曲线在2s左右出现峰值,在15s以后有明显的震动衰减,20s后逐渐趋于0,与入射地震波时程曲线十分相似,反应规律符合实际,如图10 (b) 所示;从模型动能时程图中可知,在3s时模型体系动能有较大幅度的衰减,20s后模型体系动能逐渐耗尽,在地震动结束时,模型中的动能趋于0,表明地震动能量穿越了人工边界,未对近场区域产生干扰,如图10 (d) 所示. 上述分析结果表明,黄土地区地铁车站的有限元-无限元耦合分

析模型中,无限元传输边界较好的解决了地震动能量从近场区域传输至远场区域,可靠的模拟了地震波在半无限域黄土介质中的传播.

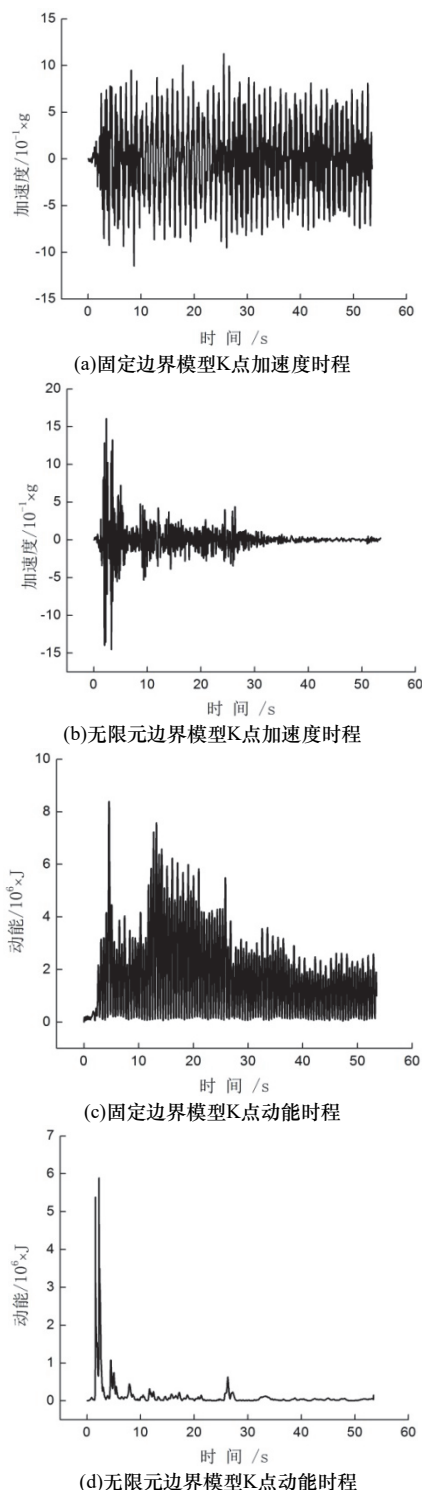


图10 无限元边界与固定边界分析结果对比图  
Fig 10 Results of infinite element boundary and fixed boundary

## 4 结论

基于 ABAQUS 大型非线性有限元分析平台,探讨了地铁地下结构动力响应分析中固定边界、远置边界、粘弹性边界及无限元传输边界的实现方

法;对黄土地地区地铁车站动力响应分析中的人工边界条件进行了对比研究;采用无限元传输边界模拟半无限域远场黄土介质,使用有限单元模拟近场黄土和地铁车站结构,将有限元-无限元耦合的建模方法用于黄土地地区地铁车站抗震分析实例中,得到以下结论:

(1) 在黄土介质振动响应分析中,采用固定边界模拟半无限域黄土介质时,由于整个系统封闭,输入的脉冲波将在固定边界间往复反射,直到能量完全被介质吸收,反射波对结构的动力反应产生较大的干扰,数值模拟精度差。

(2) 采用远置边界模拟半无限域黄土介质时,在分析时段内反射波未到达近场区域,避免了半无限域截断界面对近场的干扰,数值模拟结果精度高。但远置边界模型总自由度大,计算成本高,当计算规模较大时,其使用受制于计算机硬件条件。

(3) 黄土介质振动响应分析表明,采用粘弹性边界和无限元传输边界时,均可有效控制波的反射干扰,模拟波动穿过人工边界面向半无限域传播的特征;与粘弹性边界相比,无限元传输边界分析结果更接近于远置边界,且避免了施加粘弹性边界时较繁琐的前处理工作及近似处理对计算精度的折损;因此,无限元传输边界具有更高的精度,且操作便捷,建模更方便。

(4) 实例分析表明,在黄土地地区地铁车站地震反应分析中,采用有限元-无限元耦合的建模方法,使用有限单元模拟车站结构及近场黄土,使用无限单元界模拟远场黄土介质,技术处理简单,计算结果可靠,具有较好的适用性。

## 参考文献 References

- [1] 孙海峰, 景立平, 孟宪春等. ABAQUS中动力问题边界条件的选取[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(3): 71~76.  
SUN Haifeng, JING Liping, MENG Xianchun, et al. Wang Weining. The selection of boundary conditions in dynamic problems by using ABAQUS [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(3): 71-76.
- [2] KAUSEL E. Local transmitting boundaries [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1988, 114(6): 1011-1027.
- [3] 贺向丽, 李同春. 无限域中的动力人工边界[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(3): 64-67.  
HE Xiangli, LI Tongchun. Dynamic artificial boundaries condition for infinite domain [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(3): 64-67.
- [4] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 554-563.  
CHEN Guoxing, Geotechnical earthquake engineering [M]. Beijing: science Press, 2007: 554-563.
- [5] 楼梦麟, 潘旦光, 范立础. 土层地震反应分析中侧向人工边界的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003, 31(07): 757-761.  
LOU Menglin, PAN Danguang, FAN Lichu. Effect of vertical boundary on seismic response of soil layer [J]. Journal of Tongji university: Natural Science Edition, 2003, 31(07): 757-761.
- [6] LYSMER J, KULEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media [J]. Engineering Mechanics Division ASCE, 1969, 95: 859-877.
- [7] DEEKS A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1994, 120(1): 25-42.
- [8] LIU Jingbo, LU Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction based on interface idea [M]. In: Zhang Chuhan, Wolf J P, edited, Dynamic Soil-Structure Interaction. Academic Press, 1997: 12-23.
- [9] UNGLESS R F. An infinite finite element [R]. Vancouver: University of British Columbia, 1973.
- [10] ABAQUS Inc. Abaqus theory manual [R]. ABAQUS Inc: 2010.
- [11] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 53-57.  
FEI Kang, ZHANG Jiangwei. The application of ABAQUS in geotechnical engineering [M]. Beijing: China Water Power Press, 2010: 53-57.
- [12] 李秀强, 蒋通, 岳建勇, 等. 无限元边界在地铁引发环境振动分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 增刊1(7): 1377-1383.  
LI Xiuqiang, JIANG Tong, YUE Jianyong, et al. Application of infinite element boundary in the analysis of subway-induced environment vibration [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 1(7): 1377-1383.
- [13] 刘晶波, 杜义欣, 闫秋实. 粘弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(4): 37-42.  
LIU Jingbo, DU Yixing, YAN Qiushi. The implementation of viscoelastic artificial boundary and the ground motion input in the general finite element software [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(4): 37-42.
- [14] 张波, 李术孝, 杨学英, 等. 三维粘弹性人工边界地震波动输入方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 774-778.  
ZHANG Bo, LI Shuxiao, YANG Xuejia, et al. Research on seismic wave input with three-dimensional viscoelastic artificial boundary [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 774-778.
- [15] 孟宪春. 多层地铁车站振动台试验与数值模拟[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011.  
MENG Xianchun. Shaking table test and numerical simulation of multilayer subway station [D]. Harbin, China Earthquake Administration Institute of Engineering Mechanics, 2011.

(编辑 吴海西)