

地震作用下某明挖地铁站三维动力时程分析

閻东东^{1,2}, 苗启松², 金鹏³

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 北京市建筑设计研究院有限公司, 北京 100045; 3. 中建三局建设工程股份有限公司(北京), 北京 100089)

摘要: 基于 ABAQUS 对某明挖地铁站进行了三维动力时程分析。该明挖站空间较复杂, 横断面为变截面, 需要进行罕遇地震下的抗震验算, 并考虑土 - 结构动力相互作用。模型分别采用 ANSYS 和 ABAQUS 进行建模和分析, 通过自行编制的接口程序将模型从 ANSYS 导入 ABAQUS。土体采用了三维黏弹性动力本构, 边界采用黏弹性动力边界条件, 基岩波以加速度从基底输入。计算结果表明, 该明挖地铁站中柱底部边缘混凝土纤维进入塑性状态, 局部混凝土开裂, 没有出现倒塌破坏。该计算方法可以为类似工程提供参考。

关键词: 明挖; 地铁站; 土 - 结构动力相互作用; 动力时程分析; 罕遇地震

中图分类号: TU354

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2012)S0 - 0149 - 05

作者简介: 閻东东(1984 -), 男, 湖北随州人, 博士, 主要从事结构工程抗震等方面的研究工作。E-mail: gddhust@gmail.com。

Three-dimensional dynamic analysis of an open excavation subway station subjected to earthquake excitation

GE Dong-dong^{1,2}, MIAO Qi-song², JIN Peng³

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, China; 3. China Construction Third Engineering Joint-Stock, Ltd. (Beijing Branch), Beijing 100089, China)

Abstract: Three-dimensional dynamic analysis of an open excavation subway station under earthquake is carried out. The space of subway station is complex, and the transverse section is variable. Major earthquake analysis must be performed. Soil-structure dynamic interaction is also need to be considered. The subway station is modeled and analyzed by means of the software ANSYS and ABAQUS respectively. The ANSYS model is introduced into ABAQUS based on a programming interface coded by the authors. A three-dimensional viscoelastic dynamic constitutive model is used to simulate the soils. Three-dimensional viscoelastic artificial boundary is applied. Seismic wave of bedrock is input as the acceleration. The results demonstrate that edge concrete fiber at the bottom of interior column enters into the plastic stage, and local damage but no collapse damage is found. The proposed method may help engineers in similar projects.

Key words: open excavation; subway station; soil-structure dynamic interaction; dynamic analysis; major earthquake

0 引 言

近 20 年来, 全球发生的许多大地震, 造成大量严重的工程破坏和惨重的生命财产损失, 是人类面临的最危险的自然灾害之一。近年来, 我国土木工程建设正处于蓬勃发展时期, 一些已建和正在建设的工程如地铁处于强震高发区, 对这些工程进行深入的地震反应分析具有极其重要的意义^[1-2]。地铁工程是生命线工程的重要组成部分, 其抗震问题已经成为城市工程抗震和防灾减灾研究的重要课题。地铁地震反应的影响因素很多且十分复杂, 土 - 结构动力相互作用是最重要的影响因素之一, 很长时间来都是地震工程研究中的一个十分重要的课题, 动力时程分析是研究地铁站

抗震性能的一种重要方法^[1-2]。ABAQUS 软件是国际上最为先进的大型通用有限元软件之一, 对强非线性和不连续非线性问题(接触面分裂和滑移等)的求解具有明显的优势。利用 ABAQUS 求解土 - 结构的地震反应问题时, 必然涉及到模型建立、土体的动力本构模型和动力边界的选择问题。本文对采用 ABAQUS 求解土 - 结构的地震反应方法进行了详细叙述, 并以某一明挖地铁站为例, 从单元模型和材料动力本构选取, 以及计算步骤等, 说明了采用 ABAQUS 计算地铁站动力响应的方法, 并对计算结果进行了剖析。

1 黏弹性人工边界

土木工程中的结构-地基系统是一个开放的系统,静力分析和动力分析均涉及半无限地基的模拟问题,合理设置人工边界成为解决土-结构相互作用问题的关键。无限地基的模拟是结构-地基动力相互作用分析中的核心问题之一,截取的地基范围过大会导致结构计算模型太大,浪费过多的存储空间和计算时间,甚至无法完成计算,而直接截取地基的范围太小又会使散射波在人工边界上产生反射而导致计算结果存在较大误差甚至错误。

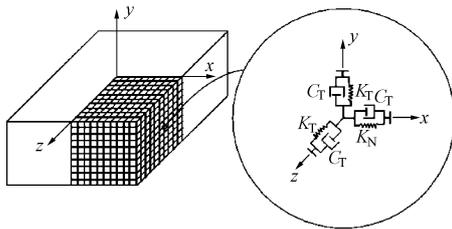


图1 三维黏弹性人工边界示意图

Fig. 1 Sketch of three-dimensional viscoelastic artificial boundary

黏弹性人工边界(如图1所示)克服了黏性边界引起的低频漂移,能够模拟人工边界外半无限介质弹性恢复性能,具有良好的频率稳定性,应用方便并且与大型软件容易结合,并且经过验证能够满足工程精度的要求,因此黏弹性人工边界已经在结构-地基动力相互作用相关的科研和工程问题中得到越来越多的应用。根据刘晶波等^[3]和杜修力等^[4]的研究,黏弹性人工边界的弹簧和阻尼器的参数取值如下:

切向阻尼系数为

$$C_1 = C_2 = \rho C_s \sum_{i=1}^l A_i, \quad (1)$$

切向弹簧刚度为

$$K_1 = K_2 = \frac{\alpha_T G}{R} \sum_{i=1}^l A_i, \quad (2)$$

法向阻尼系数为

$$C_3 = \rho C_p \sum_{i=1}^l A_i, \quad (3)$$

法向刚度系数为

$$K_3 = \frac{\alpha_N G}{R} \sum_{i=1}^l A_i, \quad (4)$$

式中, $\sum A_i$ 为人工边界上节点所代表的面积; ρ 为土体密度; G 为土体剪切模量; C_s 为土体剪切波速; C_p 为土体压缩波速; R 取为坐标原点到人工边界的距离; α_T 为切向黏弹性人工边界修正系数; α_N 为法向黏弹性人工边界修正系数。黏弹性人工边界有良好的鲁棒性,人工边界参数 α_T 与 α_N 可以在一定范围内取

值,均可以给出良好的计算结果^[3-4]。

2 土的动力本构模型

土体的动力本构模型表征了土动力学特性的基本关系,在研究土体在动力荷载作用下的力学行为方面起着十分重要的作用。等效线性方法则通过迭代的手段来近似地反映土体的非弹性和非线性。等效线性模型基于黏弹性理论发展而来,即用黏弹性Kelvin模型来反映土体的滞回性^[5-6],如图2所示,即一个线性弹簧和一个阻尼器单元并联,其应力应变关系为

$$\tau = G\gamma + \eta_G \dot{\gamma}, \quad (5)$$

式中, G 为土体剪切模量; η_G 为剪切黏滞系数; τ 为剪应力; γ 为剪应变。

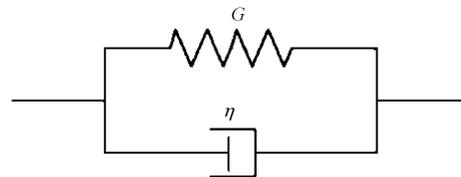


图2 Kelvin模型示意图

Fig. 2 Sketch of viscoelastic Kelvin model

3 单元尺寸及土体计算范围

采用动力分析时,由于直接输入地震波作用,因此应限制土体单元尺寸,为准确模拟地震波在土层中的传播,单元在剪切波传播方向的长度宜满足

$$L < \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{10} \right) \lambda_{\min}, \quad (6)$$

式中, λ_{\min} 为计算需要考虑的最短波长。通常,考虑到地震波的能量一般情况下主要集中在 $0 \sim 10$ Hz 的频率范围内,而土体的最小剪切波速约为 100 m/s,此时 λ_{\min} 约为 10 m,因此计算中竖向单元尺寸不大于 1 m 即可满足要求。当土体的最小剪切波速为 200 m/s 时,竖向单元尺寸取 2.5 m 可满足计算要求。

4 基于 ABAQUS 的分析方法

ABAQUS 包含丰富的、可模拟任意几何形状的单元库,并拥有各种类型的材料模型库,可以模拟典型工程材料的性能,其中包括金属、橡胶、复合材料、钢筋混凝土以及土壤和岩石等地质材料。它不仅提供了适合模拟建筑结构梁柱、剪力墙的单形式,同时允许用户进行二次开发,编制材料本构模型。ABAQUS/Standard (隐式积分) 和 ABAQUS/Explicit (显式积分) 可分别采用 Newmark 法和中心差分法对结构进行动力时程计算。ABAQUS 软件中包括了多个土体弹塑性本构模型,求解土-结构强力相互作用问

题时具有一定的优越性^[7-8]。

4.1 构件有限元模型选取

(1) 纤维梁单元模型

若采用实体单元模拟地铁结构中梁、柱构件, 由于实体单元没有转动自由度, 较精确模拟一根梁的力学行为需要在截面上划分较多的实体单元, 这在计算中可行性显然很差。常用的梁元模型有塑性铰模型和纤维模型两类, 其中的纤维模型直接从材料的本构关系出发, 比塑性铰模型更加准确。ABAQUS 提供的梁单元正是这类纤维模型, 可以较好的模拟混凝土梁柱构件在地震作用下的受力特性。梁、柱采用纤维梁单元 B31, 该单元基于 Timoshenko 梁理论, 可以考虑剪切变形刚度; ABAQUS 中的梁单元截面上设置若干积分点, 首先计算截面上每个积分点上的材料的单轴应力-应变关系, 然后综合截面上所有积分点的应力-应变关系计算整个截面的力-位移、弯矩-转角的关系, 并沿梁单元长度方向动态积分得到整个单元的反应。

(2) 壳单元

采用实体模拟墙板, 墙的厚度方向需要划分多个单元才可以得到较精确的结果, 与梁单元一样, 若采用实体单元模拟可行性并不好。当一个薄壁构件的厚度小于另外两维尺寸时 (一般小于 1/10), 并且厚度方向的应力可以忽略时, ABAQUS 建议用壳单元模拟构件。壳单元的横截面特性可以由沿厚度方向的数值积分确定; 数值积分在沿壳厚度方向的一系列积分点上进行。地铁中的钢筋混凝土墙采用四边形 (S4R) 或三角形缩减积分单元 (S3R) 模拟。

(3) 实体单元

ABAQUS 中实体单元可以通过其任意表面与其他单元连接, 因此实体单元几乎可以用于构件所有形状的模式。这里采用三维 8 节点六面体和三维 6 节点五面体线性减缩实体单元, 即 C3D8R 和 C3D6R, 模拟地铁四周的土体。

(4) 弹簧和阻尼器单元

ABAQUS 中的三维两节点连接单元 CONN3D2 的关键字 *CONNECTOR ELASTICITY 和 *CONNECTOR DAMPING 可分别模拟黏弹性边界中的弹簧和阻尼器。

4.2 材料本构

在地震荷载作用下, 混凝土处于一种拉压循环往复的复杂应力应变状态。ABAQUS 中提供了 Concrete damaged plasticity model (弹塑性损伤模型) 可较好的模拟混凝土复杂动力响应。

土体采用黏弹性动力本构, 其显式分析 VUMAT

用户子程序基于隐式 UMAT 用户子程序改编得到^[6]。

4.3 分析方法和步骤

整个分析过程共分 3 步: 得到土体地应力和反力、地应力平衡和施加地震加速度。由于 ABAQUS 不能像专业岩土软件可以自动精确完成地应力平衡, 因此, 需要建立两个分析模型, 第一个为只含有土体的计算模型, 第二个为含有地铁结构的计算模型, 两个模型的土体网格划分及编号完全一致。以上两个模型统一在 ANSYS 中建模, 并编制了接口程序导入 ABAQUS 中进行计算。地应力平衡的步骤需要得到无地铁结构的土体地应力, 将土体的应力和边界反力施加在有地铁结构模型中的土体上, 以上步骤需要在 ABAQUS/STANDARD 模块中完成。采用显式积分算法计算地震响应时, 需要将 ABAQUS/Standard 中的模型和计算结果导入 ABAQUS/Explicit 模块, 在模型底部输入基岩波计算结构动力响应。

表 1 土层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soils

土层	厚度/m	剪切模量/MPa	c/kPa	剪切波速/(m·s ⁻¹)
粉土填土	3.2	30	0	195~204
杂填土	0.6	60	0	163~191
粉细砂	2.7	82	8	258
圆砾-卵石	3.5	228	0	258
卵石-圆砾	8.5	283	0	290~338
卵石	13.5	508	0	338~367
砾岩岩	12.3	957	0	387~492

5 工程实例分析

某明挖地铁站, 地体顶板埋深为 3.66 m, 拟建场地土参数如表 1 所示。该站设计地震分组为第一组, 场地类别为 II 类, 场地特征周期值为 0.35 s, 抗震设防分类为乙类, 抗震等级为二级, 按 8 度抗震设防烈度要求进行抗震验算, E3 (重现期为 2450 a) 作用下需要达到性能要求 II。地铁站长度为 144.2 m, 平均宽度约为 30 m, 高度为 14.73 m, 轮廓如图 3 所示, 地铁中柱的截面尺寸为 800 mm×1100 mm, 材料采用 C50 混凝土。顶板、中板、底板厚度分别为 0.8, 0.4 和 1.0 m, 侧墙厚度为 0.4, 0.6 和 0.8 m。土体的宽度为 227.9 m, 地铁底板以下土体计算深度为 60 m, 网格划分尺寸为 2.5 m, 满足规范要求。该模型包括 229161 个单元, 其中包括 4383 个壳单元, 1174 个梁单元, 206217 个实体 17387 个弹簧阻尼器单元, 模型共有 235089 个节点。三维模型如图 4 所示。共取了 3 条基岩波计算, 其中一条加速度时程曲线如图 5 所示, 采用瑞利阻尼, 第一、二阶阻尼比为 0.05。

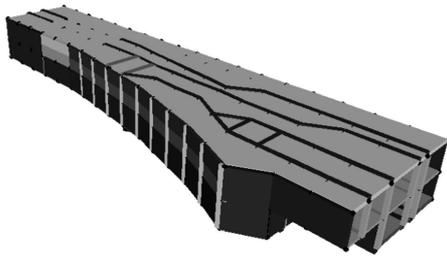


图3 地铁站轮廓图
Fig. 3 Sketch of subway

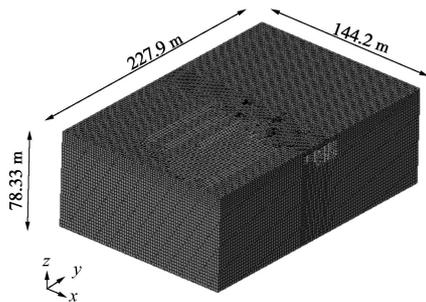


图4 结构三维有限元模型

Fig. 4 Three-dimensional finite element model of structure

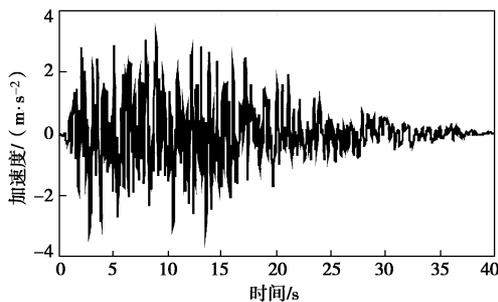


图5 基岩波加速度时程曲线

Fig. 5 Time histories of bedrock acceleration

地铁顶板与底板在基岩波激励下的最大位移差分别为 0.0287 m，层间位移角分别为 1/513。位移差时程曲线如图 6 所示。在另外两条基岩波作用下，地铁底板与顶板最大位移差分别为 0.0302 和 0.0301 m，层间位移角分别 1/488 和 1/489。

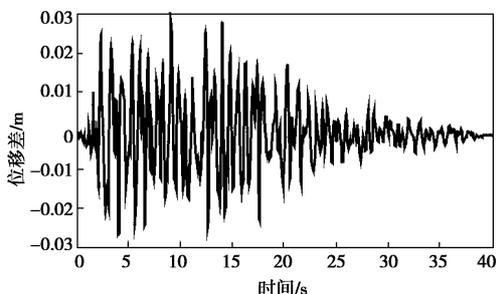


图6 地铁顶板与底板间位移差时程曲线

Fig. 6 Time histories of displacement difference between top and bottom plates of subway station

地铁中柱的截面尺寸为 800 mm×1100 mm，材料采用 C50 混凝土，抗压强度标准值为 32.4 MPa，抗压强度设计值为 23.1 MPa。以底部中柱（124744 号单元

为例），通过梁单元的弯矩、轴力和弯曲正应力反映结构的地震响应，时程曲线分别如图 7~9 所示，峰值分别为 1051 kN·m，8696 kN 和 21.3 MPa，地铁底部的中柱局部应力分别达到了混凝土峰值标准强度的 0.68 倍，说明截面外边缘的混凝土接近或已经屈服，按混凝土标准值计算时，整个截面的轴压比为 0.59。地铁顶板处的中柱弯矩最大值为 1733 kN·m，轴力最大值为 9041 kN，混凝土按抗压强度标准值计算时，顶部中柱的轴压比为 0.32，按抗压强度设计值计算时，顶部中柱的轴压比为 0.44；轴向的弯曲正应力最大压应力值为 23.8 MPa，为峰值标准强度的 0.73 倍。综合 3 条地震波的计算结果如下：绝大部分柱地铁钢筋混凝土框架柱的弯矩幅值约为 400 kN·m，局部弯矩达到 1500 kN·m，中柱的局部弯矩幅值约为 1000 kN·m；框架梁的压应力幅值为 11 MPa。顶部和底部中柱的计算结果说明中柱承载力还具有较大的富余量。

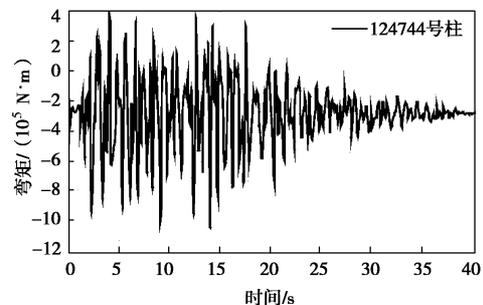


图7 中柱（124744 号单元）弯矩时程曲线

Fig. 7 Bending moment of interior column (No. 124744) varies with time

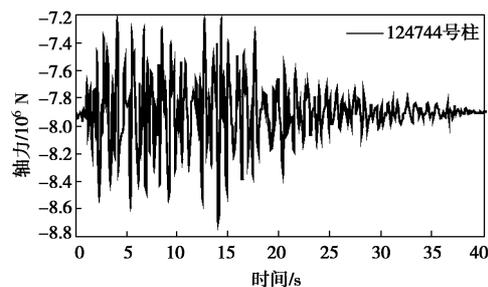


图8 中柱（124744 号单元）轴力时程曲线

Fig. 8 Variation of axial force of interior column (No. 124744) with time

图 10 和 11 分别给出了角部侧墙(126802 号单元)的弯矩 SM1 和弯曲应力 S22 时程曲线，S22 应力峰值为 14.7 MPa。综合 3 条地震波的计算结果，地铁顶板、中板和底板绝大部分板带的弯矩约为 200 kN·m/m，局部板带的弯矩达到 500 kN·m/m。地铁顶板、中板和底板局部板带的最大压应力 S11 和 S22 幅值约为 6 和 8 MPa 左右，大部分位置的压应力和拉应力为 2 MPa。从地铁钢筋混凝土墙体的应力状态可以看出混凝土局部接近屈服，可能会局部开裂。

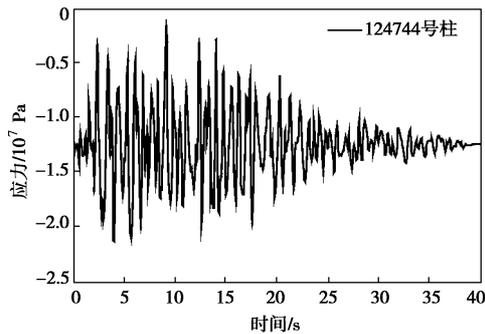


图 9 中柱 (124744 号单元) 轴向应力时程曲线

Fig. 9 Variation of axial stress of interior column (No. 124744) with time

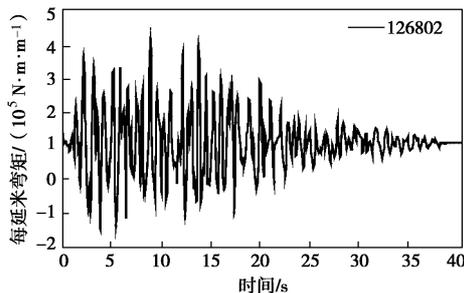


图 10 侧墙 (126802 号单元) 弯矩时程曲线

Fig. 10 Variation of bending moment of flank wall (No. 126802) with time

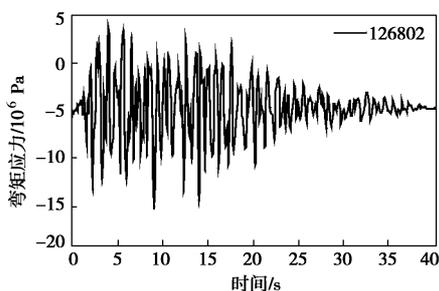


图 11 侧墙 (126802 号单元) 弯曲应力时程曲线

Fig. 11 Variation of bending stress of flank wall (No. 126802) with time

6 结 语

考虑土 - 结构共同作用的地铁站动力分析是一项复杂的工作, 本文以 ANSYS 作为前处理程序, 并编制了将模型导入 ABAQUS 的接口程序, 将土体的黏弹性的动力本构进行改进, 使其能够用于 ABAQUS/Explicit 模块进行地震响应分析。对某明挖地铁站进行了动力时程分析, 地铁在基岩波激励下的最大层间位移角分别为 1/488。底部和顶部中柱局部应力分别达到了混凝土峰值标准强度的 0.68 和 0.73 倍, 说明截面外边缘的混凝土接近或已经屈服, 按混凝土标准值计算时, 整个截面的轴压比分别为 0.59 和 0.32, 说明中柱承载力还具有较大的富余量。侧墙局部出现屈服, 但地铁并未出现倒塌破坏。本文的分析

方法可为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] UENISHI Koji, SAKURAI Shunsuke. Characteristic of the vertical seismic waves associated with the 1995 Hyogo-Nanbu (Kobe), Japan earthquake estimated from the failure of the Dakai underground station[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, **29**(6): 813 - 821.
- [2] 庄海洋, 程绍革, 陈国兴. 阪神地震中大开地铁车站震害机制数值仿真分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(1): 245 - 250. (ZHUANG Hai-yang, CHENG Shao-ge, CHEN Guo-xing. Numerical simulation and analysis of earthquake damages of Dakai metro station caused by Kobe earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 245 - 250. (in Chinese))
- [3] LIU J, DU Y, DU X, et al. 3D viscous-spring artificial boundary in time domain[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, **5**(1): 93 - 102.
- [4] DU Xiu-li, TU Jin. Nonlinear seismic response analysis of arch dam-foundation systems-part II: opening and closing contact joints[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2007, **5**(1): 121 - 133.
- [5] 费康, 郑憩. 等效线性动力模型在 ADINA 中的实现[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2008, **11**(4): 74 - 78. (FEI Kang, ZHENG Qi. Implementation of equivalent linear model in ADINA[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2008, **11**(4): 74 - 78. (in Chinese))
- [6] 费康, 刘汉龙. ABAQUS 的二次开发及在土石坝静、动力分析中的应用[J]. 岩土力学, 2010, **31**(3): 881 - 890. (FEI Kang, LIU Han-long. Secondary development of ABAQUS and its application to static and dynamic analyses of earth-rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(3): 881 - 890. (in Chinese))
- [7] 陈磊, 陈国兴, 龙慧. 地铁交叉隧道近场强地震反应特性的三维精细化非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(12): 3971 - 3983. (CHEN Lei, CHEN Guo-xing, LONG Hui. 3D refined nonlinear finite element analysis of intersecting metro tunnels under near-field ground motion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(12): 3971 - 3983. (in Chinese))
- [8] 庄海洋, 陈国兴, 胡晓明. 两层双柱岛式地铁车站结构水平向非线性地震反应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊): 3074 - 3079. (ZHUANG Hai-yang, CHEN Guo-xing, HU Xiao-ming. Analysis of nonlinear earthquake response of two-layer double-column subway station structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S0): 3074 - 3079. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)