

竖向强震作用下密贴地铁地下交叉结构动力响应分析

陶连金¹, 王文沛¹, 张 波¹, 边 金², 李文博¹

(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. 广东海洋大学工程学院, 广东 湛江 524088)

摘要: 研究密贴地铁地下交叉结构的地震反应特性, 对地铁地下结构穿越工程的建设和安全运营有着重要的现实意义。利用 FLAC^{3D}有限差分程序对北京地区典型密贴地铁地下交叉结构进行了地震响应的数值模拟分析, 研究了竖向强震作用下地铁区间隧道密贴下穿地铁车站结构体系的地震反应特性, 并与单一地铁车站的地震反应特性进行了比较, 研究表明: 密贴地铁车站交叉主体结构由于车站—隧道结构间的相互作用, 较单一地铁车站主体结构竖向位移及受力具有明显的增减, 并与输入地震动的特性有关, 且各监测部位增减幅值基本一致; 由于土体对地震动高频成份的显著滤波作用, 因此高频丰富的汶川卧龙波作用下地铁车站主体结构竖向相对位移差-时程及应力差-时程明显小于低频丰富的阪神波作用下地铁车站主体结构竖向相对位移差-时程及应力差-时程; 地铁车站主体结构竖向相对位移差-时程及应力差-时程对于输入地震动的峰值加速度不太敏感。

关键词: 密贴地铁地下交叉结构; 竖向强震; FLAC^{3D}有限差分程序; 地震反应特性

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)03-0433-05

作者简介: 陶连金(1964-), 男, 黑龙江鸡西人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程与地下工程方面的研究工作, E-mail: ljtao@bjut.edu.cn。

Dynamic response of closely-attached intersecting underground subway structures under vertical strong ground motion

TAO Lian-jin¹, WANG Wen-pei¹, ZHANG Bo¹, BIAN Jin², LI Wen-bo¹

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Engineering College of Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: It is important for subway approaching excavation and safe management to study the seismic response characteristics of closely-attached intersecting underground subway structures. The finite difference procedure FLAC^{3D} is used to simulate the seismic response of typical closely-attached intersecting underground subway structures under vertical strong ground motion in Beijing, of which the seismic response characteristics are analyzed carefully and compared with those of a single subway station as well. It is shown that there are significant changes in the vertical displacement and the stress of structures between the single subway station and the closely-attached intersecting subway station because of the strong interaction of the upper station and the lower tunnel, which is also in connection with input ground motion, and that the monitoring parts have the same variation amplitudes. As soils can filter high frequency component of ground motion significantly, the vertical displacement difference and the vertical stress difference between the above two kinds of subway stations under vertical strong ground motion rich in high-frequency waves are smaller than those rich in low-frequency waves, while they are not sensitive to peak acceleration of input ground motion.

Key words: closely-attached intersecting underground subway structure; vertical strong ground motion; finite difference procedure FLAC^{3D}; seismic response characteristic

0 引言

随着城市轨道交通快速发展和地铁施工技术的日渐成熟, 车站、隧道等空间交错结构愈来愈普遍, 穿越施工工程越来越多, 且以下穿为主。目前北京较主流的穿越施工方法为新建地下结构顶板与既有地下结

构底板密贴方法施工(专利工法), 该工法采取液压同

基金项目: 国家 973 项目(2007CB714203); 国家自然科学基金项目(40972189); 北京市自然科学基金重点项目(8111001); 北京工业大学研究生科技基金项目(ykj-2011-6505)

收稿日期: 2011-07-29

步控制顶升技术，在下穿段施工的各个阶段中按照不同的沉降变形量进行顶升调整，将上部结构恢复原状，有效地控制了施工期间对既有地下结构产生的变形，保证了既有结构在施工期间的正常运营；另外由于其间不留夹层土体，使穿越结构的埋深减小，有效降低施工风险和运营成本。以北京地区为例，目前利用该工法进行了穿越的地铁结构约 6 座，如：①地铁 10 号线国贸一双井站区间暗挖隧道密贴下穿既有地铁 1 号线；②地铁 15 号线奥林匹克公园站密贴下穿大屯路隧道；③地铁机场线东直门站密贴下穿既有地铁 13 号线折返线隧道等。此外按北京市轨道交通的规划，在 2015 年，交叉换乘点达 54 处，如果按照 2050 年的规划，则会有更多的这种密贴地下交叉结构。其他轨道交通发达城市也会面临同样的境地^[1-3]。

由于这种代表着未来趋势的密贴地下结构在动力作用下的交叉部位的位移分布与周围不同，较一般地下结构更易产生较大不均匀变形和显著的相互影响，其变形受力状态更加复杂，破坏后果更为严重，因此，密贴地铁地下交叉结构的地震反应特性研究工作更显迫切，理论价值和现实意义重大。

然而，目前这种结构抗震的设计一片空白，相关的研究鲜有见刊。姜忻良等^[4]利用三维有限元和无限元的耦合对地下铁道交叉换乘车站在地震反应进行了初步计算，表明了耦合分析方法在动力计算时的优越性；陈磊等^[5-6]利用 ABAQUS 软件研究了近场水平向强地震动作用下地铁双层交叉隧道的地震反应特性，结果得到了双层隧道间相对水平位移及结构应力的影响规律。以上研究成果均以水平向地震动输入，未考虑竖向地震对地下结构不容忽视的影响^[7-10]，也并未对车站—隧道密贴穿越结构的动力特性进行相关研究。本文基于 FLAC^{3D} 有限差分程序，以北京地铁 7 号线国贸一双井站区间暗挖隧道密贴下穿既有地铁 10 号线双井站为研究对象，利用阪神、汶川大地震的竖向地震动记录，对北京地区典型密贴地铁地下交叉结构进行了动力计算分析，该研究将有助于对竖向强地震动作用下典型密贴地铁地下交叉结构地震动力响应机理的认识。

1 计算模型

1.1 模型建立

新建 7 号线双矩形隧道密贴下穿 10 号线双井站主体结构相对位置关系及模型详见图 1, 2。上层车站为单层暗挖双连拱复合衬砌结构，衬砌厚度为 0.35 m，二衬厚度为 0.70 m，中柱的直径为 700 mm，中心段间距为 3.0 m。下层为两个分离矩形隧道，初衬厚度

为 0.35 m，二衬厚度为 0.50 m，隧道宽度为 6.4 m，隧道中心线距离为 17 m，既有 10 号线车站顶板结构的上覆土层厚 14 m。根据岩土勘察报告，并考虑数值计算模型要求，将场地土层性质及力学参数相似的土层进行合并，共合并成 7 层土，详见表 1。密贴部位上方控制截面 A1~A5、B1~B4 位置示于图 1 中，分别用于监测竖向应力及位移。

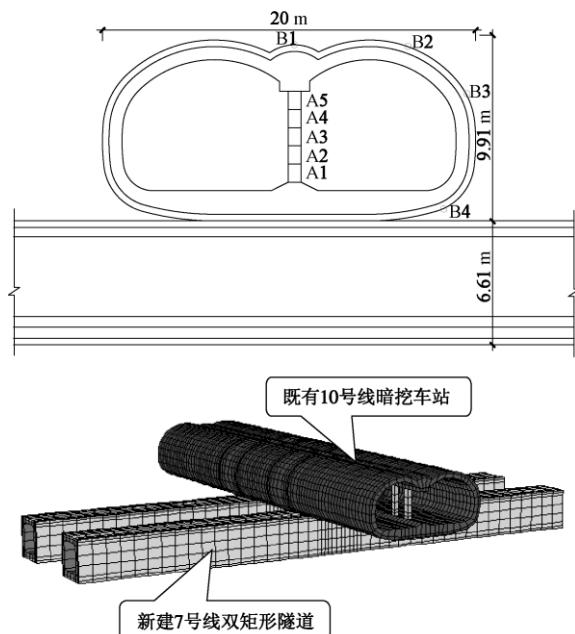


图 1 位置关系图

Fig. 1 Positions of closely-attached intersecting underground subway structures

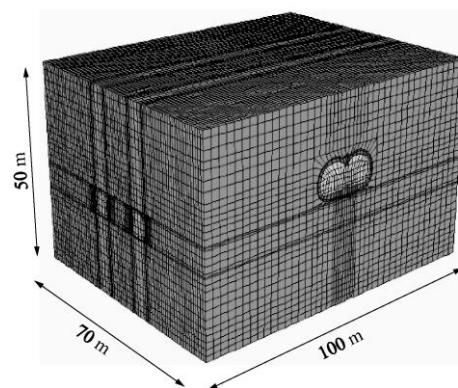


图 2 计算模型图

Fig. 2 Numerical model of FLAC^{3D}

结构采用实体单元，根据设计说明，选用结构参数详见表 2。

1.2 模型动力参数

计算模型在静力计算获得应力场后，进行动力计算。在模型底部竖直方向 (z 方向) 施加地震动的速度边界，计算区域边界为自由场边界，它的原理是采

用黏滞阻尼器与自由场耦合来模拟动力边界, 原理见图3。

表1 土层参数

Table 1 Parameters for soils

层号	名称	厚度/m	重度/(kN m ⁻³)	压缩模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	杂填土	2.00	20.30	6.10	0.30	12.00	6.00
2	粉土	6.00	19.90	8.40	0.28	25.00	23.00
3	中粗砂	5.00	20.80	30.00	0.30	35.00	0.00
4	粉细砂	5.00	21.00	35.00	0.27	40.00	0.00
5	粉土	6.00	20.30	17.70	0.27	29.00	21.00
6	中粗砂	10.00	21.40	45.00	0.27	40.00	0.00
7	粉质黏土	剩余	20.30	15.40	0.27	21.00	27.00

表2 结构参数

Table 2 Parameters for structures

属性	重度/(kN m ⁻³)	弹性模量/GPa	尺寸
既有结构柱	26.0	34.5	0.7 m ²
车站初期支护	25.0	28.0	0.35 m
车站二衬结构	25.0	30.0	0.70 m
隧道初期支护	24.0	25.5	0.35 m
隧道二衬支护	25.0	30.0	0.50 m

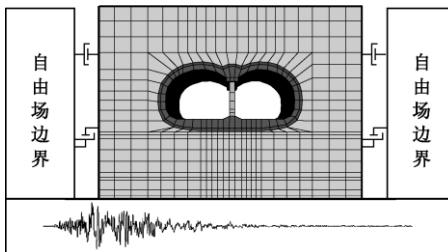


图3 模型边界示意图

Fig. 3 Dynamic boundaries of FLAC^{3D}

阻尼选取瑞利阻尼 (Rayleigh damping), 计算时, 假设动力方程中的阻尼矩阵 C 与刚度矩阵 K 和质量矩阵 M 有关^[3]:

$$C = \alpha M + \beta K, \quad (1)$$

其中, α 为与质量成比例的阻尼系数, β 为与刚度成比例的阻尼系数。

在 FLAC^{3D} 中, 使用瑞利阻尼时, 一般需设置两个参数, 即临界最小阻尼比 ξ_{\min} 和最小中心频率 ω_{\min} , 可假定分析模型为弹性材料进行动力计算, 得到各种材料关键部位的功率谱, 根据功率谱的分布确定该区域的阻尼中心频率。由于岩土材料弹塑性模型相当多的能量消散发生在塑性流动阶段, 因此大应变的动力分析时, 可设置一个较小的阻尼比, 本文选用 5% 的阻尼比。由式(2)确定各参数值^[11], 具体详见表3。

$$\left. \begin{aligned} \xi_{\min} &= (\alpha \cdot \beta)^{1/2}, \\ \omega_{\min} &= (\alpha / \beta)^{1/2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

表3 瑞利阻尼参数

Table 3 Parameters for Rayleigh damping

结构形式	α	β	ξ_{\min}	ω_{\min}
单一地铁车站结构	0.0648	0.03858	0.05	1.30 Hz

密贴地铁车站交叉 结构	0.0670	0.03731	0.05	1.34 Hz
----------------	--------	---------	------	---------

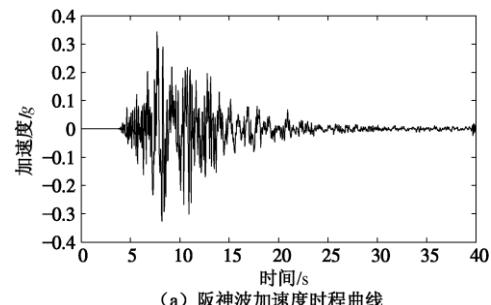
1.3 地震动参数

选择国内外具有代表性 OKJMA 站监测到的阪神 Kobe 波的坚向加速度原始记录及汶川 Ms8.0 级地震中具有代表性的卧龙波近场强地震动坚向加速度原始记录作为密贴地铁地下交叉结构地震反应分析的近场输入地震动格式, 坚向分量的幅值都较大, 已接近水平分量, 较典型, 其加速度峰值分别为 0.332g 和 0.948g, 具体时程曲线及加速度傅氏谱见图4。由谱可知, 阪神波低频成分较丰富, 而汶川卧龙波主频段集中在中高频, 具有显著近场地震动特征。地震动输入分 4 种工况, 详见表4。

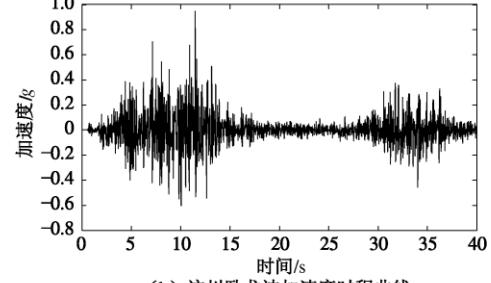
表4 地震动输入工况

Table 4 Input ground motion conditions

结构形式	阪神波	卧龙波
单一地铁车站结构	工况 1	工况 3
密贴地铁车站交叉结构	工况 2	工况 4



(a) 阪神波加速度时程曲线



(b) 汶川卧龙波加速度时程曲线

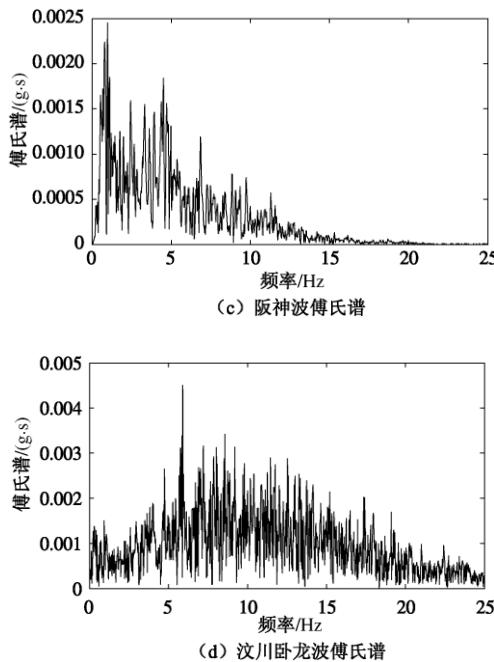


图 4 输入地震动加速度时程曲线及傅氏谱

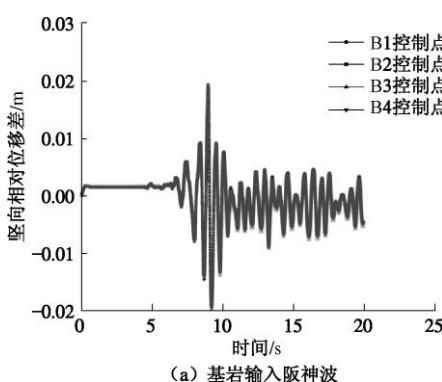
Fig. 4 Acceleration time-histories and Fourier spectra of bedrock

ground motion

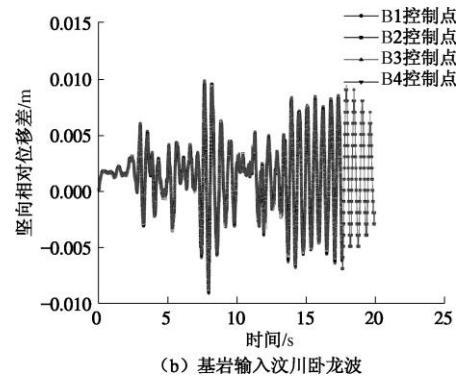
2 计算结果与分析

2.1 密贴交叉部位上方车站结构竖向相对位移差 - 时程

为比较单一与密贴交叉地铁车站主体结构各控制点处在竖向地震动作用下位移不同，将地震动作用下单一地铁车站各控制点处的竖向位移 - 时程与密贴车站交叉结构竖向位移 - 时程之差定义为车站结构竖向相对位移差 - 时程，即基岩输入阪神波时，工况 1—工况 2 的竖向相对位移差或基岩输入汶川卧龙波时，工况 3—工况 4 的竖向相对位移差，详见图 5。



(a) 基岩输入阪神波



(b) 基岩输入汶川卧龙波

图 5 地震持续 20 s 时车站 B1~B4 控制点竖向相对位移时程

Fig. 5 Vertical displacement difference time-histories at control points B1~B4 under earthquake duration of 20 s

由图 5 可以得出以下结论：

(1) 与单一地铁车站结构竖向位移 - 时程相比，密贴地铁车站交叉结构由于车站 - 隧道结构间的相互作用，车站结构的竖向位移具有明显的增减，并与输入地震动的特性有关，且结构上各点增减幅值基本一致。

(2) 由于土体对地震动高频成份的显著滤波作用，因此汶川卧龙波作用下地铁车站主体结构竖向相对位移差 - 时程明显小于阪神波作用下地铁车站主体结构竖向相对位移差 - 时程。

(3) 地铁车站主体结构竖向相对位移差 - 时程对于输入地震动的峰值加速度不太敏感^[12]。

2.2 密贴交叉部位上方车站中柱竖向相对应力差 - 时程

由图 6 可以得出以下结论：

(1) 与单一地铁车站中柱竖向应力 - 时程相比，密贴地铁车站交叉结构中柱由于车站 - 隧道结构间的相互作用，车站中柱的竖向应力具有明显的增减，并与输入地震动的特性有关，且中柱上各截面增减幅值基本一致。

(2) 由于土体对地震动高频成份的显著滤波作用，因此汶川卧龙波作用下地铁车站中柱竖向相对应力差 - 时程明显小于阪神波作用下地铁车站中柱竖向相对应力差 - 时程。

(3) 地铁车站中柱竖向相对应力差 - 时程对于输入地震动的峰值加速度也不太敏感。

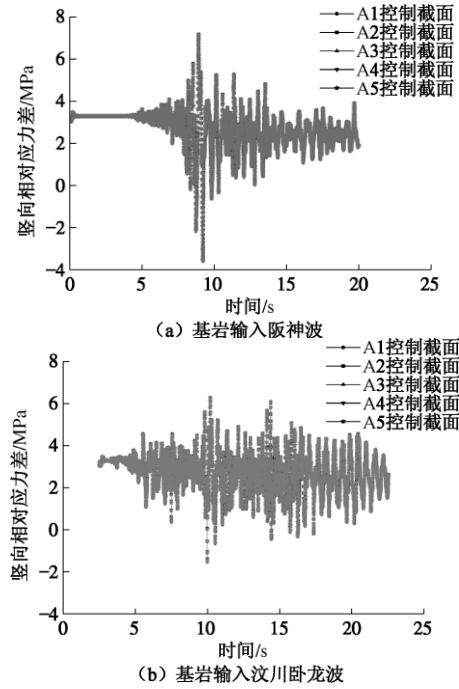


图 6 地震持续 20 s 时车站 A1~A5 控制截面坚向相对应力差时程

Fig. 6 Vertical stress difference time-histories at control sections A1~A5 under earthquake duration of 20 s

3 结 论

本文针对北京地铁 7 号线国贸一双井站区间暗挖隧道密贴下穿既有地铁 10 号线双井站建立了计算模型, 运用 FLAC^{3D}有限差分程序进行动力时程分析, 研究了坚向强地震动作用下典型密贴地铁地下交叉结构地震动力响应, 由计算分析可以得出以下几点结论:

(1) 密贴地铁车站交叉主体结构由于车站—隧道结构间的相互作用, 较单一地铁车站主体结构坚向位移及受力具有明显的增减, 并与输入地震动的特性有关, 且各监测部位增减幅值基本一致。

(2) 由于土体对地震动高频成份的显著滤波作用, 因此高频丰富的汶川卧龙波作用下地铁车站主体结构坚向相对位移差—时程及应力差—时程明显小于低频丰富的阪神波作用下地铁车站主体结构坚向相对位移差—时程及应力差—时程。

(3) 地铁车站主体结构坚向相对位移差—时程及应力差—时程对于输入地震动的峰值加速度不太敏感。

参考文献:

- [1] 杨广武. 地下工程穿越既有地铁线路变形控制标准和技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 1~13. (YANG Guang-wu. Study on the permissible value and technique for

deformation controlling of underground construction crossing existing metro line[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010: 1~13. (in Chinese))

- [2] 童利红, 徐祯祥. 地下工程近距离穿越地铁既有线施工技术综述[J]. 市政技术, 2008, 26(2): 117~130. (TONG Li-hong, XU Zhen-xiang. Summarize of construction techniques for underground engineering crossing an existing subway line at close range[J]. Municipal Engineering Technology, 2008, 26(2): 117~130. (in Chinese))
- [3] 汪春生. 新建地铁隧道下穿既有地铁施工技术[J]. 都市快轨交通, 2010, 23(1): 82~88. (WANG Chun-sheng. New metro tunnel to under-pass an existing metro tunnel[J]. Urban rapid rail transit, 2010, 23(1): 82~88. (in Chinese))
- [4] 姜忻良, 谭丁, 姜南. 交叉隧道地震反应三维有限元和无限元分析[J]. 天津大学学报, 2004, 37(4): 307~311. (JIANG Xin-liang, TAN Ding, JIANG Nan. 3D finite and infinite element analysis for seismic response of intersecting tunnel[J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(4): 307~311. (in Chinese))
- [5] 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): 3971~3976. (CHEN Lei, CHEN Guo-xing, LONG Hui. Study on applicability of a pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3971~3976. (in Chinese))
- [6] 陈磊, 陈国兴. 近场和远场地震动作用下双层坚向重叠地铁隧道的地震反应比较[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1): 79~85. (CHEN Lei, CHEN Guo-xing. 3D refined nonlinear finite element analysis of intersecting metro tunnels under near-field ground motion[J]. China Railway Science, 2010, 31(1): 79~85. (in Chinese))
- [7] 于翔, 钱七虎, 赵跃堂, 等. 地铁工程结构破坏的坚向地震力影响分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2001, 2(3): 75~77. (YU Xiang, QIAN Qi-hu, ZHAO Yue-tang, et al. Analysis of vertical earthquake influence on damage to subway structures[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science), 2001, 2(3): 75~77. (in Chinese))
- [8] 曹炳政, 罗奇峰, 马硕, 等. 神户大开地铁车站的地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(4): 102~107. (CAO Bing-zheng, LUO Qi-feng, MA Shuo, et al. Seismic response analysis of Dakai subway station in Hyogoken-nanbu earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4): 102~107. (in Chinese))
- [9] KIRCHER C A. Kobe earthquake: ground shaking, damage and loss[C]// Proceedings of the 14th Structures Congress :

- Part 2 (of 2) . Chicago: ASCE, 1996.
- [10] KOJI UENISHI, SHUNSUKE SAKURAI. 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.
- [11] 熊良宵, 李天斌, 刘勇. 隧道地震响应数值模拟研究[J]. 地质力学学报, 2007, **13**(3): 255 – 260. (XIONG Liang-xiao, LI Tian-bin, LIU Yong. Numerical simulation of seismic response at the entrance of the unsymmetrical loading tunnel[J]. Journal of Geomechanics, 2007, **13**(3): 255 – 260. (in Chinese))
- [12] 张玉敏, 盛 谦, 朱泽奇, 等. 地震作用下大型地下洞室群位移特征的若干影响因素分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3525 – 3530. (ZHANG Yu-min, SHENG Qian, ZHU Ze-qi, et al. Some influence factors on displacement characteristics of cavern group under strong earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(11): 3525 – 3530. (in Chinese))