

文章编号: 1000-7598(2012)03-0919-06

基于三维地质模型的地下洞室群地震动力响应分析

鲁文妍, 钟登华, 佟大威, 李明超

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:工程区域地质条件是影响地下洞室群稳定的重要因素,而通用数值分析软件在建立复杂地质模型时存在建模时间长、准确度低、不能真实反映复杂地质特征等困难。针对此问题,采用以非均匀有理B样条(NURBS)为主的混合数据结构,对复杂区域地质构造进行了三维建模,建立了西南某水电站大型地下洞室群的三维地质模型。并以此模型为基础,建立了包括空间曲面断层、地层等复杂地质因素的数值模型,结合ABAQUS的隐式和显式分析,对洞室开挖和地震作用下的动力时程响应进行了仿真分析。分析结果表明,该方法不仅较大幅度地反映了实际地质情况,而且有利于数值仿真分析的网格剖分与计算,从而为分析地下洞室群地震反应提供了三维数值模型,为地震作用下洞室的安全性评价提供了重要的技术支持。

关键词: 三维地质模型; 地震荷载; 地下洞室群; 动力时程响应

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Dynamic response analysis of underground cavern group based on 3D geologic model

LU Wen-yan, ZHONG Deng-hua, TONG Da-wei, LI Ming-chao

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Engineering regional geologic condition is an important factor that affects the stabilization of underground cavern group, while the common numerical analysis soft wares have some disadvantages such as the long time consumption for modeling, low accuracy and the difficulty in reflecting the real complex geological features. Aiming at these problems, a mixed data structure, in which nonuniform rational B-spline(NURBS) is predominated, is used to carry out the 3D detailed modeling of the complex regional geological structure; and the whole 3D refined geological model of a large underground cavern group in Southwest China is established by this method. Based on this geological model, a numerical model including complex geological factors such as the space surface faults, formations have also been built; and combine the implicit and explicit module of ABAQUS, the underground cavern group excavation and dynamic response under seismic load have been simulated. The results indicate that: This approach not only reflects the actual geological condition to the greatest degree, but also makes against the mesh generation and numerical calculation; thus it provides an accurate and practical model for the dynamic response analysis of underground cavern group and important technical support for the seismic safety evaluation of underground cavern group.

Key words: 3D geological model; seismic load; underground cavern group; dynamic time history response

1 引言

西南地区是我国高烈度地震多发区,受地形条件的限制,水电开发往往需要布置大型的地下厂房洞室群,这些地下洞室群所处的地质环境非常复杂,一旦遭受震害,不但造成工程本身的损失,而且还会带来巨大的次生灾害,后果将不堪设想^[1-2]。因此,如何正确、客观地分析地下洞室群的地震动力

响应是一项重要而迫切的任务。

考虑到地震作用时地下洞室群响应的复杂性,通常采用数值模拟方法来求解^[3-6],而现有的数值分析软件对于复杂地质曲面的建模存在着技术难度大和工作量大、甚至难以进行的局限。在建立数值模型时往往难以反映实际地质条件,而是将地表简化成平面或者折面,将整个地质体看成一个均质整体或者简单的水平分层,忽略断层或将空间扭曲多

收稿日期: 2010-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(No. 90815019, 50879056); 天津市基金(No. 08JCZDJC25400)。

第一作者简介: 鲁文妍,女,1985年生,博士研究生,主要从事岩石力学与工程等方面的研究工作。E-mail: wenyanlu_ddd@126.com

通讯作者: 佟大威,男,1982年生,博士,讲师,主要从事水利水电仿真的研究工作。E-mail: tongdw@tju.edu.cn

变的断层也简单处理成平面^[7], 这些简化在很大程度上缩减了数值分析前处理的难度和工作量, 然而越来越多的工程实例表明, 复杂区域性地质构造正是地震失稳时的薄弱环节, 结构面尤其是不连续面的存在会导致地质体力学特征的不连续性和不均一性, 而断层的端部和几何形态的拐点处则往往正是高应力集中区, 对岩体变形和稳定性起到控制作用^[8-9]。因此, 如何快速、准确、有效地表达这些复杂地质构造, 对于分析地震作用下地下洞室群的稳定性具有重要意义。

针对上述问题, 本文综合考虑各种地质因素, 统筹各方面相互制约关系, 结合我国西南某工程实例, 研究基于三维地质模型的大型地下洞室群地震响应动力分析方法。采用基于以非均匀有理 B 样条 (NURBS) 结构为主的混合数据结构, 实现了地形类、地层类、断层类等地质对象的拟合构造与几何建模, 准确揭示了区域内断层、地层等在地质岩体中的空间展布, 弥补了通用数值分析软件前处理中建造复杂模型方面的不足, 为更可靠地分析地下工程岩体的动力稳定性提供了丰富实用的手段。

2 地下洞室群三维地质建模

采用 VisualGeo 系统, 建立地下洞室群三维地质精细模型^[10-11]。其总体思路如下: 首先, 基于原始地质勘探数据、二维地质解译剖面数据和工程设计数据, 采用面向对象技术将建模对象进行分类; 然后, 基于 NURBS 混合数据结构分别对自然地质对象 (包括地形类、地层类、断层类等) 和人工对象 (包括地下工程、钻孔、平硐等) 进行插值、拟合和几何建模, 考虑其中具体的空间结构关系, 如断层引起的地层错位、断层尖灭、岩脉侵入等, 构建相应的三维地质模型和工程建筑物模型, 其中地质模型还需要运用原始地质数据 (主要是钻孔数据) 进行地质趋势面分析来补充修改和验证; 最后, 对这两大类模型进行布尔操作运算, 完成耦合地质信息和工程建筑物信息的地下洞室群三维统一地质模型。图 1 为利用以上方法构建的某个三维地层面模型, 图 2 为地下洞室区域几个空间曲面断层模型。

以这种方法构建的某水电站的三维地质模型, 如图 3、4 所示, 将地下洞室群所在区域地层、断层等复杂的地质构造情况进行了很好地模拟, 可为地下洞室群地震作用下的稳定性分析提供能反映实际情况的计算分析几何模型, 且在空间剖分方面有很强的优势, 具有数据存储量小且易于操作分析的优点, 从而为地下洞室群地震响应数值模拟分析创造

了重要的前提条件。



图 1 某三维地层面模型

Fig.1 A 3D geological subsurface model

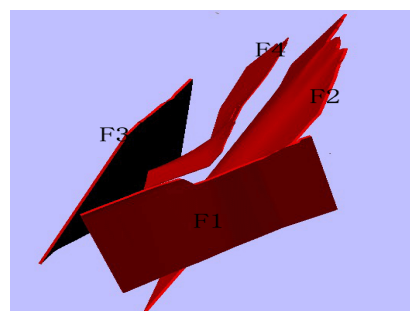


图 2 三维空间地质断层

Fig.2 3D spatial geological faults

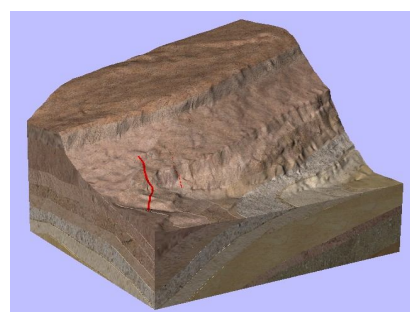


图 3 某地下洞室群三维地质精细模型

Fig.3 3D refined model of an underground cavern group



图 4 地下厂房区地质剖面图

Fig.4 Geological profile of underground powerhouse

3 数值仿真计算

3.1 工程概况

某水电站地下厂房洞室群由主副厂房洞、主变

洞、母线洞、引水洞、尾水洞等组成,该区为缓倾层状结构岩体,以厚层、巨厚层砂岩为主,夹少量薄层状或透镜状泥质岩石的软弱岩层,岩石的主要类型有砂岩和泥质岩石,并且洞室大部分置于T32-6岩体内,其主要为厚层至巨厚层的中细粒及中粗粒砂岩。岩体完整性较好,以Ⅱ类围岩为主,局部受断层影响,为Ⅴ类围岩。厂房区有4个较大断层,对厂房区的影响比较显著。主厂房洞室尺寸为245.0 m×31.0 m×85.5 m(长×宽×高),顶拱高程为306.12 m。主变洞为173 m×26 m×23 m(长×宽×高),顶拱高程为297.74 m。主变洞与主厂房洞的中心距为73 m,为两洞室平均跨度的2.6倍。地应力为以重力为主的中低量级应力场。

3.2 计算模型和参数选取

由于厂房与主变室总跨度为100 m,计算模型沿洞室最外侧向上下游分别延伸约3倍结构跨度,总长为783 m,沿洞室轴线方向结构最长为245 m,左右分别延伸约1倍,取为800 m,高度方向从主厂房底板高程向下延伸180 m,向上延伸到地表。模型坐标系遵循右手螺旋法则,将洞室跨度方向设置为 x 轴,轴线长度方向为 y 轴,高度方向为 z 轴。首先建立地下洞室群三维地质模型,在此基础上建立了三维有限元计算模型,如图5所示。其中厂房三维计算模型如图6所示,计算模型共划分单元39 839个,节点11 936个。模型侧面和底部采用无限元边界作为边界条件,以保证地震波在边界处不反射回模型内部影响计算结果^[12]。断层采用实体单元模拟。支护采用壳体单元模拟。对于岩土动力非线性问题,围岩阻尼通常采用Rayleigh阻尼,假设与围岩质量和刚度成正比。而在大型地下洞室群地震反应分析时,主要考虑无限地基的刚度对阻尼的影响,围岩质量影响不大,故仅取刚度阻尼即可^[13]。刚度阻尼系统 β 的具体计算公式^[14]为

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_A + \omega_B} \quad (1)$$

式中: β 为刚度阻尼系数; ξ 为围岩阻尼比; ω_A 、 ω_B 为所选取振型的角频率。

围岩阻尼比一般为0.01~0.03,本文阻尼比 ξ 取0.02进行计算^[15-16]。利用三维场地提取固有频率,去掉6个刚体模态,通过查看振型和振型参与系数选取第7阶($\omega_A = \omega_7 = 3.3054$)和第8阶($\omega_B = \omega_8 = 4.0648$),从而计算得到刚度阻尼系数 β 为0.00543。

岩体采用理想弹塑性模型,屈服准则采用Drucker-Prager强度准则^[5]。由于这种屈服模型考虑

了围压对屈服特性的影响,并且能反映剪切引起的膨胀性质,因此,广泛应用于模拟岩石类材料的弹塑性性质。计算所需的岩体物理力学参数见表1。

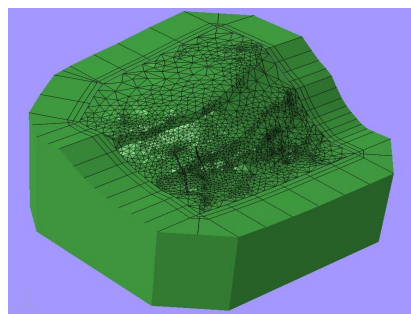


图5 三维数值计算模型

Fig.5 3D numerical calculation model

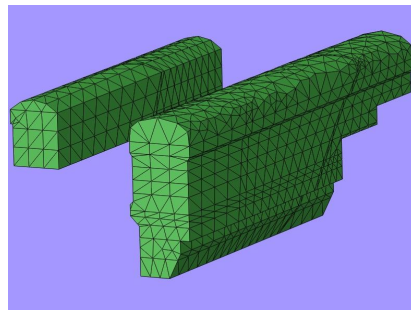


图6 厂房与主变室网格划分

Fig.6 Mesh generation of powerhouse main transformer chamber

表1 岩体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock masses

地层 编号	变形模量 E/GPa	密度 ρ $/(\text{g}/\text{cm}^3)$	泊松比	凝聚力 c/MPa	抗拉强度 $/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
J1-2z	2.0	2.51	0.28	0.79	1.14	30.00
T3(4)	8.0	2.55	0.23	1.57	1.62	41.30
T3(3)	6.0	2.53	0.23	1.23	1.23	33.00
T3(2-6)	14.8	2.55	0.22	1.70	1.72	51.00
T3(2-5)	2.5	2.56	0.25	0.87	0.84	30.70
T3(2-4)	11.0	2.55	0.22	1.67	1.73	52.80
T3(2-3)	4.0	2.56	0.24	1.03	1.00	31.40
T3(2-2)	9.0	2.55	0.22	1.63	1.68	36.70
T3(2-1)	7.0	2.56	0.22	1.60	1.68	40.00
T3(1)	9.5	2.53	0.23	1.00	1.26	39.76
Fault	0.3	2.52	0.40	0.20	0.31	25.00

3.3 地震荷载的输入

根据GB18306—2001《中国地震动参数区划图》,该水电站坝址区50年超越概率为10%时,地震动峰值加速度为0.10g,地震基本烈度为Ⅷ度。计算地震波采用1978年唐山余震天津医院地震波,峰值加速度为145.8 cm/s²,地震持续时间为19.19 s,

其加速度时程曲线如图 7 所示。利用 Matlab 程序^[17-18]反演此地震波至基岩并进行基线校正,得到校正后的基岩地震波如图 8 所示。动力时程计算时将反演得到的基岩地震波沿 x 轴方向施加于模型有限元部分底面^[19-20],垂直向波幅采用水平向的 1/3。

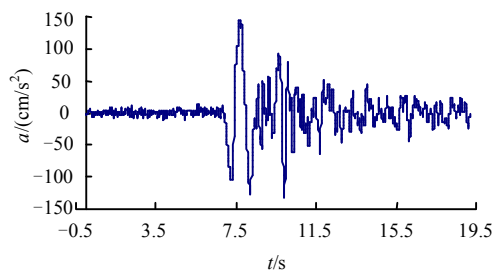


图 7 唐山余震天津医院地震波加速度时程曲线

Fig.7 Acceleration time history of Tianjin hospital seismic wave arising from Tangshan aftershock

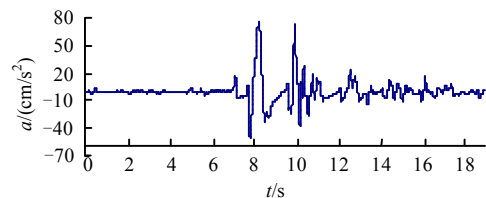


图 8 基岩处地震加速度

Fig.8 Seismic acceleration time history of the bed rock

4 计算结果与分析

计算过程包括静力和动力计算两部分,分别采用隐式和显式来计算。静力采用隐式算法,首先施加自重荷载,计算并进行地应力平衡后分 10 步开挖洞室。整个洞室群开挖支护完成后,再将计算结果导入 explicit 模块,在有限元模型底部施加加速度时程,继续进行地震响应计算。

4.1 围岩应力场分析

(1) 洞室围岩初始应力主要以压应力为主,洞室开挖完毕后围岩应力发生了重分布,厂房和主变室围岩应力释放,压应力减小,局部甚至出现拉应力,洞室端墙角点以及被断层切割处应力集中现象明显,拉应力最大值为 0.99 MPa,压应力最大值为 9.28 MPa。

(2) 施加地震荷载后,整个时程各时刻洞周最大拉应力主要出现在 3 个部位: F4 断层与主厂房下游拱座相交部位、F3 断层与厂房底板相交处、主变室左侧端面下游拱座处。整个地震过程中洞周最大拉应力为 2.31 MPa,发生在 10.6 s (见图 9),仍位于 F4 断层与主厂房下游侧边墙相交处,其拉应力时程曲线如图 10 所示。地震过程中最大压应力基本

一直位于 F4 断层与主厂房下游侧边墙相交处,最大压应力为 14.6 MPa,发生在 11.1 s。



图 9 $t=10.6$ s 时最大主应力云图

Fig.9 Nephogram of maximum principal stress when $t=10.6$ s

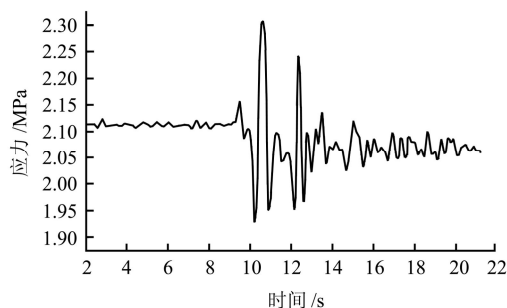


图 10 最大拉应力所在点第一主应力时程曲线

Fig.10 Maximum principal stress time history where the maximum tensile appears

由计算结果可以看出,洞周大部分区域应力都在允许范围内,应力状态良好,分布规律合理,但由于受 4 个大断层的影响,在断层处出现了较明显的应力集中和错动。此外洞室拱座及角点等边界突变处也产生了应力集中,极易产生破坏,故应在这些部位采取有效的支护措施。

4.2 洞周位移场分析

(1) 洞室开挖完毕后,厂房顶拱位移为 7.3 mm,沿洞室纵轴线,顶拱的两端位移小,中间位移大,位移矢量基本都趋向洞内 (见图 11)。

(2) 施加地震荷载后,位与 F3、F4 两断层之间的中间部位位移矢量较大,软弱地层和断层处位移矢量明显大于其他部位。图 12 为整个地震过程中洞周最大位移分布图 (各点位移分布包络线云图),整个地震时程中洞室顶拱垂直位移最大为 19 mm,边墙位移 11~26 mm 左右,大部分均小于位移的允许值,洞室的整体稳定状态较好,除了在断层和洞室交叉处位移稍大外,其他部位的位移值分布正常,说明断层对洞室位移和围岩稳定具有较大影响,应针对其进行相应的支护处理。

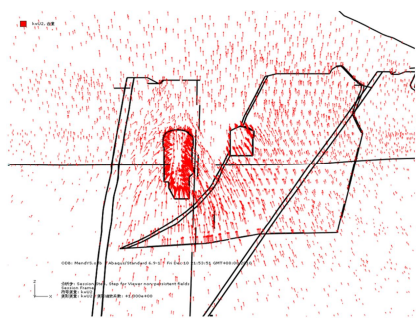


图 11 开挖后洞周位移矢量图

Fig.11 Vector diagram of displacements at cavern circumference after excavation

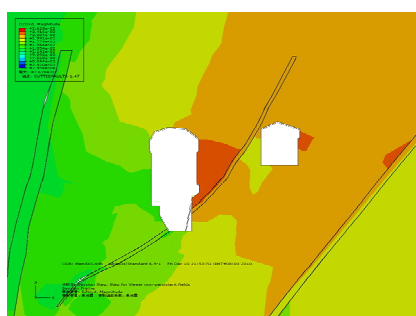


图 12 地震过程中洞周各点最大位移分布云图

Fig.12 Nephogram of maximum displacement distribution of underground cavern group during earthquake

4.3 塑性区及应变能分析

开挖及地震过程中断层部位出现拉裂区, 除此之外, 围岩无大范围的塑性变形区和拉损区, 稳定性较好。模型的应变能在 $t=11\text{ s}$ 左右急剧降低 (见图 13), 此时极易导致片帮、爆裂等破坏的发生, 应予以关注。

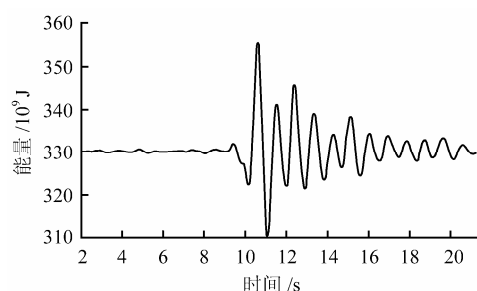


图 13 模型应变能变化时程曲线

Fig.13 Time history curve of strain energy of whole model

5 结 论

数值仿真计算中模型的准确与否直接影响到计算结果的可靠性, 针对通用数值分析软件存在的复杂地质结构建模困难的问题, 本文研究利用基于 NURBS 的混合数据结构建立三维地质模型, 其不仅准确揭示了区域内断层、地层等在地质岩体中的

空间展布, 而且具有布尔运算速度快等优点, 具有很强的实用性, 为更可靠的分析地下工程岩体的动力稳定性提供了快捷实用的手段。并建立了反应复杂地质条件的三维数值模型, 利用 ABAQUS 的显隐式计算对地震作用下某大型地下洞室群的稳定性进行了分析, 研究结果表明, 在Ⅷ度地震作用下, 该洞室整体安全, 但厂房、主变室拱顶与角点部位, 以及被断层切割的部位为地震高应力区, 在这些部位应采取相应的工程措施, 如适当增强配筋或提高混凝土的强度, 使用锚杆、锚索加强衬砌与围岩间的连接等, 从而更好地保障该地下洞室群的抗震安全性。

参 考 文 献

- [1] 林皋. 地下结构抗震分析综述(上)[J]. 世界地震工程, 1990, 6(2): 1—10.
LIN Gao. Summarization of earthquake resistance analysis of underground structures (first)[J]. **World Earthquake Engineering**, 1990, 6(2): 1—10.
- [2] McClure, COLE R. Damage to underground structures during earthquakes[C]//Workshop on Seismic Performance of Underground Facilities. Augusta Ga USA: E.I.du Pont de Nemours & Co.E.I.du Pont de Nemours & Co, 1981: 75—106.
- [3] 陈健云, 胡志强, 林皋. 超大型地下洞室群的三维地震响应分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 494—498.
CHEN Jian-yun, HU Zhi-qiang, LIN Gao. 3-D seismic response study of large scale underground group caverns[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 494—498.
- [4] 马行东, 李海波. 地震波入射方向对地下岩体洞室动态响应的初步分析[J]. 水力发电, 2007, 33(1): 23—25.
MA Xing-dong, LI Hai-bo. Primary analysis of different incidence propagation on dynamic response of underground rock cavern under earthquake[J]. **Water Power**, 2007, 33(1): 23—25.
- [5] 吕涛, 李海波, 杨建宏, 等. 溪洛渡地下洞室群地震响应的二维及三维数值模型比较分析研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 721—728.
LÜ Tao, LI Hai-bo, YANG Jian-hong, et al. Comparison between 2D and 3D numerical analysis for seismic

- response of Xiluodu underground caverns[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 721—728.
- [6] 吕涛. 地震作用下岩体地下洞室响应及安全评价方法研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.
- [7] 左双英, 肖明. 映秀湾水电站大型地下洞室群三维非线性损伤地震响应数值分析[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 127—133.
- ZUO Shuang-ying, XIAO Ming. 3D numerical analysis of nonlinear damage seismic response of large underground caverns of Yingxiuwan hydropower station[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2009, 28(5): 127—133.
- [8] 袁松. 地震动力响应下公路隧道合理净距的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [9] 李小军, 卢滔. 水电站地下厂房洞室群地震反应显式有限元分析[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 41—46.
- LI Xiao-jun, LU Tao. Explicit finite element analysis of earthquake response for underground caverns of hydropower stations[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2009, 28(5): 41—46.
- [10] 钟登华, 李明超, 刘杰. 水利水电工程地质三维统一建模方法研究[J]. 中国科学 E 辑(技术科学), 2007, 37(3): 455—466.
- [11] 钟登华, 李明超, 杨建敏. 复杂工程岩体结构三维可视化构造及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 575—580.
- ZHONG Deng-hua, LI Ming-chao, YANG Jian-min. 3D visual construction of complex engineering rock mass structure and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(4): 575—580.
- [12] 姜忻良, 徐余, 郑刚. 地下隧道-土体系地震反应分析的有限元与无限元耦合法[J]. 地震工程与工程振动, 1999, (3): 22—26.
- JIANG Xin-liang, XU Yu, ZHENG Gang. Finite element and infinite element coupling method for seismic analysis of soil-underground tunnel system[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1999, (3): 22—26.
- [13] 李琦. 基于 ABAQUS 软件的地下洞室群抗震分析研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [14] 克拉夫, 彭津. 结构动力学[M]. 王光远等译. 北京: 科学出版社, 1984.
- [15] 隋斌, 朱维申, 李晓静. 地震荷载作用下大型地下洞室群的动态响应模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1877—1882.
- SUI Bin, ZHU Wei-shen, LI Xiao-jing. Simulation on dynamic response of large underground opening complex under seismic loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(12): 1877—1882.
- [16] 华东水利学院土力学教研室. 土工原理与计算[M]. 北京: 水利水电出版社, 1984.
- [17] 廖振鹏. 工程波动理论导论(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [18] 解振涛. 层状场域内上、下部结构动力相互作用的输入地震动问题研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [19] 王如宾, 徐卫亚, 石崇, 等. 高地震烈度区岩体地下洞室动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 568—575.
- WANG Ru-bin, XU Wei-ya, SHI Chong, et al. Dynamic response analysis of rock underground caverns in highly seismic region[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 568—575.
- [20] 李海波, 刘博, 吕涛, 等. 一种简单的岩体地下洞室地震安全评价方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1873—1882.
- LI Hai-bo, LIU Bo, LÜ Tao, et al. A simple safety assessment method for underground engineering in rock under seismic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 1873—1882.