

文章编号: 1000-7598-(2012)07-2127-06

地下岩体洞室群地震响应的加、卸载响应比分析

杨继华^{1,2}, 盛 谦¹, 朱泽奇¹, 冷先伦¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.黄河勘测规划设计有限公司, 郑州 450003)

摘 要: 将加、卸载响应比理论引入地下岩体洞室群地震响应分析中。以输入的地震加速度作为加、卸载, 以洞室围岩的加速度作为响应, 合理地确定了加、卸载响应区段。通过有限差分程序 FLAC^{3D} 建立了白鹤滩水电站 13 号机组剖面数值分析模型, 选用汶川地震波进行动力时程计算, 探讨地下岩体洞室群的地震动力稳定性, 研究表明: 在 100 年超越概率 2% 的地震作用下, 白鹤滩水电站地下洞室群围岩响应比峰值范围在 4.05~11.52 之间; 结合应力及位移分析, 主厂房拱顶及层间错动带 C₄ 在尾调室上游边墙出露部位的围岩均进入了非线性变形状态, 但响应比在整个时程中并没有趋于无穷大, 围岩没有发生失稳破坏; 错动带两侧的围岩产生了一定的相对位移, 会对尾调室的边墙稳定性产生不利影响。该研究方法可应用于一般地下岩体结构的地震稳定性分析中。

关 键 词: 地下岩体洞室群; 加、卸载响应比; 地震响应; 时程分析

中图分类号: TU 45; P 315

文献标识码: A

Loading/unloading response ratio study of seismic response on underground rock cavern group

YANG Ji-hua^{1,2}, SHENG Qian¹, ZHU Ze-qi¹, LENG Xian-lun¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The loading/unloading response ratio theory is introduced to analyze the seismic response of underground rock cavern group. The response region is determined reasonably by taking the input seismic accelerations as loads and unloads and cavern accelerations as response. The numerical section model of No.13 unit of Baihetan hydropower station is established by FLAC^{3D}. With Wenchuan earthquake as input wave, the seismic stability of underground rock cavern group is discussed. The result shows that the peak value of loading/unloading response ratio is about 4.05-11.52 under 2% exceeding probability in future 100 years. The rock mass around top arch of main powerhouse and interlayer C₄ in upstream wall of tailrace surge chamber are under the state of nonlinear deformation, but the loading/unloading response ratio is not infinite during the whole process, with no stability failure of rock mass. The relative displacement of interlayer has adverse effect on the wall stability of tailrace surge chamber. This research method can be used for seismic stability study of common rock mass.

Key words: underground rock cavern group; loading/unloading response ratio; seismic response; time-history analysis

1 引 言

我国西南地区兴建了大批的水电工程, 由于地形条件的限制, 大都采用了地下式厂房, 并形成了大跨度、高边墙的地下洞室群。同时, 该地区处于高地震烈度区, 如果发生强震, 地下洞室群有发生破坏的可能, 如在 2008 年的汶川地震中, 多座山岭隧道和水工地下厂房发生破坏^[1-2]。因此, 研究大

型地下岩体洞室群的抗震安全性十分重要。许多学者对此进行研究, 并得出一些有益的结论。陈健云等^[3]采用阻尼影响抽取法研究了围岩动刚度的动力特性, 提出了地下结构抗震分析的实用算法。李海波等^[4]运用动应力集中因子代表值的概念, 对溪洛渡水电站超大型地下洞室群安全性进行了评价。隋斌等^[5]对地震荷载作用下大型地下洞室群进行动态模拟, 采用新的劈裂判据对震后可能出现的劈裂损

收稿日期: 2011-08-12

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目 (No. 90715042)。

第一作者简介: 杨继华, 男, 1980 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程数值分析研究工作。E-mail: yangjihua68@sohu.com

伤范围进行了预测。王如宾等^[6]研究了自然地震波作用下,有无衬砌工况下厂房洞室相对位移、点安全系数变化趋势。

岩体在地震力作用下的响应是由静态变成动态的力学过程,由于动力响应是一个复杂的非线性系统,考虑到地下岩体的失稳是由于地震力的加、卸载所致,并且其演化过程具有明显的非线性特征,因此,可借鉴地震预报领域的加、卸载响应比理论进行描述^[7-9]。石崇等^[10]建立了地震波穿越地下岩体洞室模型,采用动力时程分析法,验证了加、卸载响应比法的正确性;姜彤等^[11-12]将加、卸载比应用于岩体边坡动力响应分析并取得了较好的效果。

本文应用加、卸载响应比理论,将作用在地下岩体洞群围岩的地震力时程视为加、卸载过程,通过动力时程分析,对地下岩体洞室群围岩的地震动力响应进行了一些有益的探索。

2 岩体地震响应的加、卸载响应比理论

2.1 加、卸载响应比理论

加、卸载响应比理论是由我国学者尹祥础提出的^[13-14],最初应用于地震预测中。其主要思路是:非线性系统的失稳前兆是系统在极其微弱的加载下产生巨大的响应,因此,可以利用系统的加荷响应率与卸荷响应率的比值定量地描述非线性系统偏离稳定状态(或接近失稳状态)的程度。

从岩体受力破坏的角度分析,加、卸载响应比理论就是将岩体受力过程中的荷载 P 和相应的某响应参数 R 的变化之比值 $\Delta R / \Delta P$ 定义为响应率。由于 $\Delta R / \Delta P$ 是一个有量纲的量,单位取的不同,其数值也会不同,这将引起许多不便,为此进一步引入无量纲化量——加、卸载响应比 Y :

$$Y = \left(\frac{\Delta R_+}{\Delta P_+} \right) / \left(\frac{\Delta R_-}{\Delta P_-} \right) \quad (1)$$

式中: Y 为响应比; P 为荷载; R 为响应; 下标 +、- 分别表示加载和卸载。

当岩体在弹性变形阶段时, $Y \approx 1$; 进入非线性变形阶段后, $Y > 1$; 岩体失稳破坏时, $Y \rightarrow \infty$ 。根据这一规律,可以用 Y 这一参量来描述岩体趋向破坏失稳的程度。

2.2 地下洞室群围岩加、卸载响应参数的选取

在地震力作用下,地下洞室群围岩的加、卸载过程是一个时间序列,同样,围岩的响应过程也是一个时间序列,通过对这两个时间序列进行计算,即可获得围岩加、卸载响应比随时间的变化规律。在岩体

地震动力时程的加、卸载响应比分析中,一般将输入的加速度时程作为加、卸载参数,将输出的加速度时程、速度时程或位移时程作为响应参数^[10-12]。由动力分析的原理可知^[15],输出的速度时程和位移时程通常是由加速度时程通过 1 次和 2 次积分得到的,尽管地震波在输入之前进行了修正,但一些周期较长的分量仍然会残留下来,这对输出的加速度时程没有影响,但可能造成经过 1 次和 2 次积分得到的速度时程和位移时程的失真。如果以速度时程和位移时程作为加、卸载响应参数同样会造成加、卸载响应比的失真,因此,采用加速度作为响应参数进行加、卸载响应比计算会更加合理。

2.3 加、卸载响应比计算方法

加、卸载过程一般采用区间直接平均法^[10-11],即将地震荷载周期性变化作为对地下洞室群围岩的加、卸载手段,按地震持时 T 划分 n 个加、卸载区间,将加、卸载区间内的地震荷载时间序列 p_i (加载时 p_i 为正,卸载时 p_i 为负) 将洞室群围岩在加、卸载区间内的加速度 a_i 作为地下洞室围岩对地震荷载的响应,应用加、卸载响应比理论确定围岩的加、卸载响应比 Y 。

第 i 个区间的地震加、卸载和响应平均值为

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_{i+} &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_{i+}, \bar{P}_{i-} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_{i-} \\ \bar{R}_{i+} &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_{i+}, \bar{R}_{i-} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_{i-} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$(i=1, 2, \dots, m)$

根据加、卸载响应比理论,可得地震过程中的加、卸载响应比序列为

$$Y_i = \frac{\bar{R}_{i+} / \bar{P}_{i+}}{\bar{R}_{i-} / \bar{P}_{i-}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: m 为第 i 个区间加、卸载点与响应点数目; \bar{P}_{i+} 、 \bar{P}_{i-} 为加、卸载过程的第 i 个区间平均值; \bar{R}_{i+} 、 \bar{R}_{i-} 为加、卸载过程中第 i 个区间响应平均值。

2.4 加、卸载响应区段的确定

一般来说,加、卸载区间的划分应既能反映整个地震过程响应的特征,又能有效减少计算量,加、卸载区间划分过少,将使计算结果趋于均化,且会漏掉峰值信息,不能真实反映地震过程响应变化过程;区间划分过多,将极大增大计算量,不利于分析计算成果,另外还会出现因某一区间全为加载,计算的响应比为无穷大的情况。因此,区间划分的确定实际上是一个均衡这两方面因素的过程。本文经过反复试算,将加、卸载区间取为 0.5 s。

3 工程背景

3.1 工程概况

白鹤滩水电站位于四川省宁南县和云南省巧家县交界的金沙江下游，其引水发电建筑采用地下式，其中厂区三大洞室主副厂房洞、主变洞、尾水调压室平行布置，洞室尺寸均以长×宽×高给出，主副厂房洞尺寸为 439 m×32.2 m×78.5 m、439 m×29 m×78.5 m，主变洞尺寸为 400 m×20.5 m×33.2 m，尾水调压室尺寸为 321.6 m×27.6 m×103.5 m。白鹤滩水电站地下厂房洞室群处在地震活动强烈的高山峡谷地区，地震基本烈度为Ⅷ度，工程区域地形地貌复杂，区域地应力水平较高，地质条件复杂，发育有多条层间错动带，其中层间错动带 C₃、C₄ 和 C₅ 对地下洞室群稳定性影响较大。

3.2 数值模型

通过有限差分程序 FLAC^{3D} 建立白鹤滩水电站 13 号机组剖面的数值模型。X 轴与厂房轴线垂直，以指向下游方向为正；Y 轴为厂房轴线方向；Z 轴为铅直方向，以向上为正。区域范围为 X 向由主厂房中心线向上游方向约延伸 450 m，向下游方向约延伸 450 m，共 900 m；由于采用假三维模拟二维的方法，因此，模型 Y 轴取 2 m；Z 向由高程 300 m 延伸至地表。在研究区域内发育的岩层主要有新鲜状隐晶质玄武岩、斑状玄武岩夹杏仁玄武岩、玄武质角砾熔岩等，岩质坚硬，岩体新鲜较完整，岩块嵌合紧密，无区域断裂切割，构造型式以断层、节理裂隙、层间错动带为主要特征，坝区岩体可分为Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ共 4 大类。模型中仅考虑对地下洞室群围岩稳定影响较大的Ⅱ、Ⅲ类围岩及层间错动带 C₃、C₄ 和 C₅，忽略位于坡面附近影响较小的全、强、弱风化层。层间错动带 C₃、C₄ 和 C₅ 采用软弱夹层模拟。在模型中没有考虑衬砌的影响，为满足动力时程计算对单元尺寸的要求，将Ⅱ、Ⅲ类围岩处最大单元尺寸取为 10 m，将层间错动带处最大网格尺寸取为 2 m。模型网格见图 1。岩体及层间错动带的物理力学参数见表 1。

3.3 地震动输入

在地震动动力时程分析中，输入的地震动最好是本场区的实测地震记录，但白鹤滩水电站场区没有实测的地震动记录可以选用，因此，输入的地震动采用与白鹤滩水电站场区断裂带和地质背景相似的 2008 年汶川地震中绵竹清平台站处的实测地震记录。根据地震危险性分析，白鹤滩水电站场区 100 年超越概率 2% 水平向峰值加速度为 3.4 m/s²，经过峰值加速度调整后的汶川地震波时程曲线如图 2 所

示。根据地壳基本结构及固体介质波的折射规律，在地震动响应分析中通常认为从震源发出的地震波到达地壳表层时入射方向垂直于地表，故在计算分析时在模型边界上输入地震波的入射方向垂直于底边表面，同时考虑到地震波的剪切作用对地下洞室群破坏作用最大，将入射地震波设置为水平向振动的 S 波。边界条件设置为黏性边界。选用瑞利阻尼，通过对岩体动态响应的速度谱分析，在数值分析时阻尼比取为 0.05，中心频率取为 1.0。

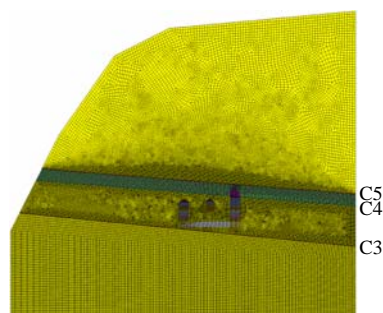


图 1 13 号机组剖面数值模型

Fig.1 Numerical model of cross-section No.13

表 1 岩体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock masses

岩层分级	密度 /(g/cm ³)	变形模量 /GPa	泊松比
Ⅱ类	2.80	15.0	0.23
Ⅲ类	2.70	10.0	0.25
C ₃ 和 C ₅	2.35	0.9	0.35
C ₄	2.35	0.7	0.35

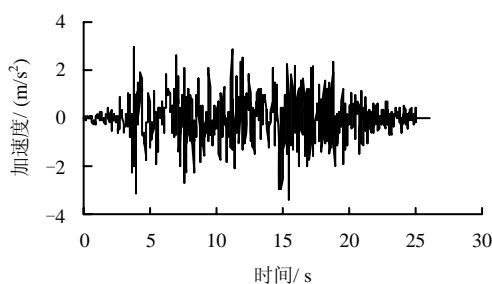


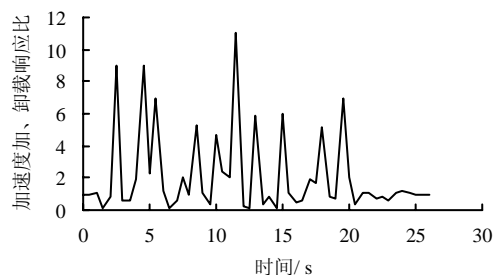
图 2 汶川地震波加速度时程曲线

Fig.2 Acceleration time-history curve of Wenchuan earthquake

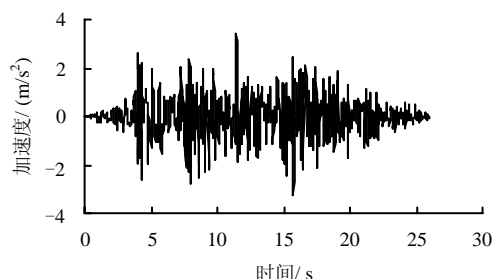
4 计算结果分析

洞室在地震作用下的破坏多表现为相互错动、挤压、弯曲，因此，可以采用洞室内壁质点的响应特征来衡量洞室受地震影响程度^[16]。通过动力时程计算，可以得出洞室各关键部位的加速度、位移和主应力差时程曲线，通过式(2)可计算出白鹤滩水电站右岸地下厂房洞室群 13 号机组剖面洞室群围

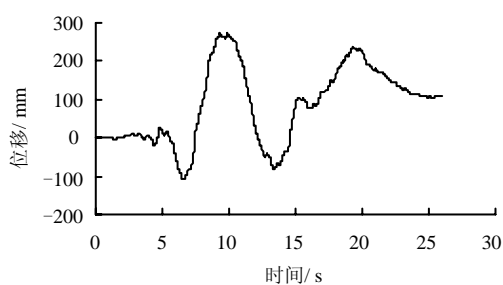
相比,尾调室上游边墙层间错动带 C₄ 出露部位响应比非线性信息明显强烈,极值个数也明显增加,在加速度峰值时刻出现最大响应。震后响应比虽趋于 1,加速度幅值归零,但产生了 110 mm 的永久位移,围岩应力得到一定程度的释放,主应力差减小了 4.04 MPa,这说明错动带部位围岩经受了较大的变形与应力状态调整,但并没有发生整体失稳破坏。



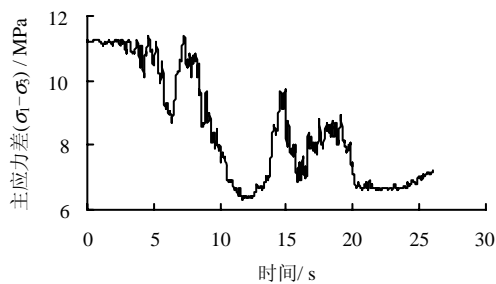
(a) 加速度加、卸载响应比时程曲线



(b) 加速度时程曲线



(c) 位移时程曲线



(d) 主应力差时程曲线

图 5 层间错动带 C₄ 与尾调室上游边墙切割部位加速度加、卸载响应比

Fig.5 Acceleration loading/unloading response ratio of intersection of bedding fault zone No.C₄ and upstream sidewall of tailrace surge chamber

当错动带在洞室出露时,洞室的稳定性受错动带两侧围岩的相对变形影响较大。图 6 给出了错动带 C₄ 与尾调室上游边墙上、下盘的相对位移曲线。可以看出,错动带上、下盘岩体相互错动产生了 37 mm 的相对位移,这对尾调室的边墙的稳定性的产生不利影响。

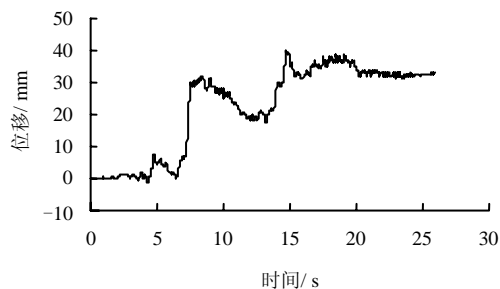


图 6 层间错动带 C₄ 与尾调室上游边墙出露部位相对位移
Fig.6 Relative displacement of intersection of bedding fault zone No.C₄ and upstream sidewall of tailrace surge chamber

5 结 论

(1) 在本文的计算条件下,三大洞室围岩关键部位加速度加、卸载响应比峰值变化范围在 4.05~11.52 之间,各关键部位的响应比均在震后不久出现极值,这从理论上解释了洞室围岩由静态进入动态所发生的巨大系统变化。

(2) 主厂房拱顶部位的峰值响应比为 6.12,在地震过程中,响应比均未出现趋于无穷大的趋势,综合分析应力及位移特征,主厂房拱顶虽进入非线性变形状态,但并没有失稳破坏。

(3) 层间错动带 C₄ 在尾调室上游边墙出露部位岩体峰值响应比达到 11.52,岩体非线性变形强烈,震后产生了 110 mm 的绝对位移,且主应力降低了 4.04 MPa,表明错动带部位岩体经受了较大变形与应力调整,从响应比趋于 1 可以看出,围岩并没有发生整体破坏,但错动带上、下盘产生了 37 mm 的相对位移,这对尾调室的边墙的稳定性的产生不利影响。

本文研究方法可以应用于一般地下岩体结构地震动力稳定分析中。如何通过数值计算方法确定地下洞室围岩系统失稳破坏的临界加、卸载响应还有待于进一步的研究。

参 考 文 献

[1] 李天斌. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2009, 16(6): 742-750.
LI Tian-bin. Failure characteristics and influence factor

- analysis of mountain tunnels at epicenter zones of great Wenchuan earthquake[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2009, 16(6): 742—750.
- [2] 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 reponse of large underground caverns of Yingxiuwan hydropower station[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2009, 28(5): 127—133.
- [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] 李海波, 刘博, 吕涛, 等. 一种简单的岩体地下洞室地震安全性评价方法[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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 苗胜军, 樊少武, 蔡美峰, 等. 基于加卸载响应比的载荷岩石动力学特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(3): 329—333.
MIAO Sheng-jun, FAN Shao-wu, CAI Mei-feng, et al. Dynamic characteristics experiment study of loading rock based on theory of load/unload response ratio[J]. **Journal of China Coal Society**, 2009, 34(3): 329—333.
- [8] 王裕仓, 尹祥础, 彭克银, 等. 加卸载响应比的数值模拟[J]. 地球物理学报, 1999, 42(5): 669—676.
WANG Yu-cang, YIN Xiang-chu, PENG Ke-yin, et al. Numerical simulation on load/unload response ration theory[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 1999, 42(5): 669—676.
- [9] 张晖辉, 尹祥础, 梁乃刚, 等. 模拟引潮力作用下岩石破坏前兆的实验研究——加卸载响应比(LURR)理论和能量加速释放(AER)[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3172—3179.
ZHANG Hui-hui, YIN Xiang-chu, LIANG Nai-gang, et al. Experimental study of rock failure precursor using simulated tide stress—load/unload response ratio (LURR) and accelerating energy release(AER)[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3172—3179.
- [10] 石崇, 徐卫亚, 周家文, 等. 动力时程响应的加、卸载响应比描述研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 743—747.
SHI Chong, XU Wei-ya, ZHOU Jia-wen, et al. Dynamic stability research by using load/unload ratio method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.): 743—747.
- [11] 姜彤, 马莎, 许兵, 等. 边坡在地震作用下的加、卸载响应规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3803—3807.
JIANG Tong, MA Sha, XU Bing, et al. Study of laws of load-unload response of slope under seismic load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(22): 3803—3807.
- [12] 姜彤, 马瑾, 许兵. 基于加卸载响应比理论的边坡动力稳定分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 626—631.
JIANG Tong, MA Jin, XU Bing. Dynamic analysis method of slope stability based on LURR theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(3): 626—631.
- [13] 尹祥础. 地震预测新途径探索[J]. 中国地震, 1987, 3(1): 1—7.
YIN Xiang-chu. Study for a new approach to earthquake prediction[J]. **Earthquake Research in China**, 1987, 3(1): 1—7.
- [14] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统的失稳与前兆——响应比理论及其应用[J]. 中国科学(B 辑), 1991, 21(5): 512—518.
YIN Xiang-chu, YIN Can. Instability and precursor of nonlinear system—Response ratio theory and its application[J]. **Science in China(Series B)**, 1991, 21(5): 512—518.
- [15] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) User's Guide, Version 5.0[M]. Mineapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.
- [16] 张玉敏, 盛谦, 朱泽奇, 等. 深度衰减效应对大型地下洞室群强震响应影响分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3197—3203.
ZHANG Yu-min, SHENG Qian, ZHU Ze-qi, et al. Influence of depth attenuation on seismic response of large underground cavern group[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3197—3203.