

DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2014.04.005

# 基于三维离散元法的地下洞室定位块体地震响应

朱付广<sup>1</sup>, 王禹<sup>1</sup>, 宋康林<sup>2</sup>, 刘继国<sup>2</sup>, 朱泽奇<sup>3</sup>

(1. 湖北省电力勘测设计院 湖北 武汉 430040; 2. 中交第二公路勘察设计院有限公司 湖北 武汉 430056;  
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 为分析定位块体在不同支护工况下的地震响应特征与动态稳定性响应,以大岗山水电站地下厂房为工程实例,采用块体理论和三维离散元软件(3DEC)建立了安装间某典型定位块体数值模型,并将围岩模拟开挖位移与实测变形监测数据进行对比,论证块体与结构面力学参数及相关模型建立的合理性。对比该定位块体在不同支护工况下的地震响应规律与动态稳定性,结果表明,应用离散单元方法分析块体地震响应与稳定性是可行的,锚杆支护对定位块体具有较好的抗震作用。

**关键词:** 地下洞室; 块体理论; 三维离散元法; 地震响应; 大岗山水电站

**中图分类号:** TV731.6; P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)04-0020-04

**Seismic response assessment of positioning block in underground cavern based on 3D DEM//ZHU Fuguang<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, SONG Kanglin<sup>2</sup>, LIU Jiguo<sup>2</sup>, ZHU Zeqi<sup>3</sup>(1. Hubei Electric Power Survey & Design Institute, Wuhan 430040; 2. China Second Highway Survey, Design and Research Institute of Communications, Wuhan 430056, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)**

**Abstract:** In this paper, we analyze the earthquake response characteristics and dynamic stability of positioning block under different support conditions by taking the underground plant of Dagangshan Hydropower Station as an example. In doing it so, a typical positioning block numerical model of erection bay based on the block theory and three-dimensional distinct element code (3DEC) have been built. Additionally, we perform a comparison between simulative dig displacement of surrounding rock and real deformation monitoring data, then demonstrates the parameter of block and structural planes and the feasibility of building relative models. Overall, the comparisons of earthquake response characteristics and dynamic stability of positioning block under different support conditions show that it is feasible to analyze block earthquake and stability with discrete element method. Additionally, the bolting support presents a better anti-earthquake effect for positioning block.

**Key words:** underground cavern; key block; 3D DEM; seismic response; Dagangshan Hydropower Station

在不连续数值分析方法中,离散元与 DDA、流形元等方法一起,是被认为适用于不连续岩体变形与稳定分析的有力工具<sup>[1]</sup>。离散元法是针对节理岩体提出的一种适用于模拟岩土体大位移的数值方法,与工程中常用的有限元方法相比,离散元法在三大定律的满足上有所不同:①从平衡方程上看,离散元法采用牛顿第二定律控制,按围绕各刚体块体形心的力平衡和力矩平衡来满足;②从变形协调方程来看,各刚体块体间不再位移连续,而是允许大变形和断裂分开,可以模拟岩体不连续结构面的滑移与开裂;③从本构方程上看,离散元法避开了复杂的本构关系推导,采用在刚性块体间设置不同种类弹簧和阻尼(法向刚度和阻尼、切向刚度和阻尼)来反映材料的应力-位移关系<sup>[2]</sup>。离散元法避开大规模刚

度矩阵的形成,采用动态松弛法求解,可以高效地求解非线性大变形问题。

在地震动载荷作用下,地震波将在断层、岩脉等结构面上产生复杂的透射、折射、反射等传播现象,个别部位的岩体就可能产生松动滑移甚至失稳垮落。节理岩体地下洞室开挖的稳定性问题一直是岩土工程界比较关注的问题,但对于地下厂房中由结构面和高边墙、大跨度顶拱切割形成的可动块体,对其动力特性和稳定性目前研究较少。周剑等<sup>[3]</sup>运用离散元软件研究了结构面产状与节理数量影响下应力波传播规律,结果表明结构面数量越多,应力波穿过造成动力响应越弱,验证了断裂的隔震效应与上盘效应;杨志华等<sup>[4]</sup>将强震作用下断层破裂及其引起的隧道围岩破坏过程定性划分为 5 个主要

基金项目:国家自然科学基金(51009130 51279202)

作者简介:朱付广(1983—),男,江苏盐城人,工程师,硕士,主要从事岩土力学参数和围岩稳定性研究。E-mail: 331584689@qq.com

阶段:弹性应力集中阶段、破裂起始阶段、破裂加速阶段、稳定破裂阶段和破裂逐渐停止阶段;王光纶等<sup>[5-7]</sup>对刚性块体进行了动力试验和离散元法动力分析参数选择的研究,得到了地震影响下刚性块体稳定性的一些非常有价值的结论;石崇等<sup>[8-10]</sup>运用二维离散元与三维离散元软件模拟了岩质边坡失稳过程,结果表明高烈度地震作用下岩质边坡破坏是从表层局部块体失稳开始的;李海波等<sup>[11-12]</sup>针对地震荷载作用下顺层岩质边坡安全系数进行了分析研究,给出了在离散元中判断块体滑动变形最终稳定与否的方法。

本文以大岗山水电站地下厂房施工期揭露地质资料为基础,运用三维离散元软件(3DEC)建立安装间某典型定位块体的数值模型,研究定位块体在不同支护工况下的地震响应特征与动态稳定性。

## 1 工程概况及模型建立

大岗山水电站坝址位于四川省大渡河中游上段雅安市石棉县境内。电站装机容量为2600 MW。引水、发电建筑物由电站进水口、4条压力管道、地下厂房、主变室、尾水调压室、2条尾水洞等组成。地下厂房系统采用主副厂房、主变室、尾水调压室3大洞室平行布置,主厂房开挖尺寸为206.00 m×30.80 m×73.78 m(长×宽×高),主变室开挖尺寸为144.00 m×18.80 m×25.10 m(长×宽×高),尾水调压室长为130.00 m,净跨度为20.50~24.00 m,室高为75.08 m。厂区岩体新鲜较完整,呈块状~次块状结构,岩块嵌合紧密,有断层 $f_{57}$ 、 $f_{58}$ 、 $f_{59}$ 和 $f_{60}$ 等较大规模的软弱结构面和延伸较长的 $\beta_6$ 、 $\beta_{80}$ 、 $\beta_{81}$ 等辉绿岩脉穿过厂房洞群区。厂区裂隙(V级结构面)优势产状大致有5组,总体上以近SN/E向、近EW/N(或S)向陡倾角结构面最为发育。

工程区位为SN向、NW向和NE向多组断裂构造交汇部位,区域地质构造及地震地质背景复杂,新构造活动较强烈,其区域构造稳定性对工程建设影响较大。水电站坝址50年超越概率10%基岩水平向峰值加速度为0.251g,相应地震基本烈度为8度。安装间顶拱施工期间揭露较大型岩脉如图1所示,由图1可直观看出,岩脉 $\beta_{c3}$ 、 $\beta_{c4}$ 、 $\beta_{c5}$ 相互切割,形成了一体积达46.87 m<sup>3</sup>、埋深12.83 m的定位块体,其施工期和运营期稳定性引起了设计和施工方的极大关注,有鉴于此,本文利用3DEC建立安装间定位块体模型,模型尺寸330 m×330 m×60 m(分别为x、y、z向尺寸,如图2所示),通过模拟开挖和施加支护与地震荷载,研究该定位块体开挖稳定性以及地震响应规律,为地下厂房施工期和运营期稳定

性评价提供分析资料和依据。

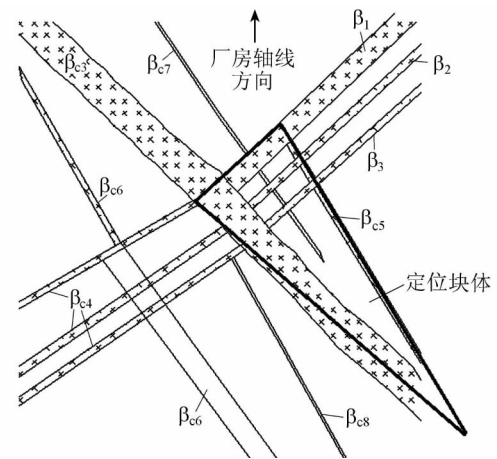


图1 安装间岩脉地质示意图

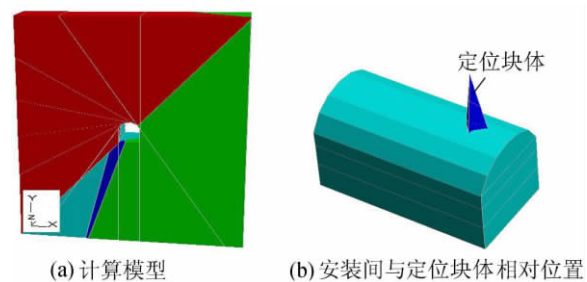


图2 三维离散元模型

计算模型中岩体材料选用各向同性弹性本构模型,结构面采用面接触的Coulomb滑动模型,岩体为II类围岩,物理力学指标如下:密度2650 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量20 GPa,泊松比0.25;结构面物理力学指标如下:法向刚度20 GPa/m,切向刚度10 GPa/m,内摩擦角35°,黏聚力0.5 MPa。

## 2 模型验证

地下洞室开挖顺序见图3。每开挖一步,迭代计算直至整个计算模型稳定为止,然后再进行下一步的开挖。洞室开挖后发生指向临空面的位移,洞周位移云图如图4所示。可以看出,拱顶开挖完成后最大位移值为2.276 cm。



图3 地下厂房开挖顺序示意图(单位:m)

在上层排水廊道具备钻孔施工条件后,由排水廊道向主厂房钻孔,施工时在监测孔CSP2-1中埋设了滑动测微计监测管,此时主厂房仅进行了中导洞部分的先期开挖,如图5所示。

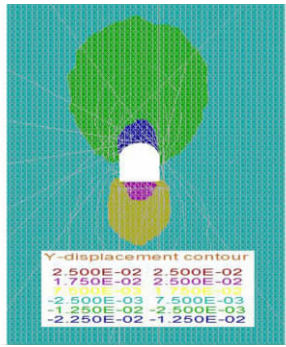


图4 完全开挖后洞周位移云图

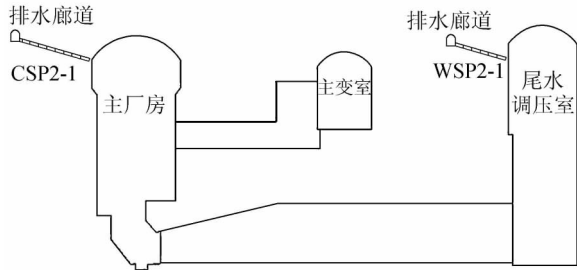


图5 监测孔布置示意图

将该洞段附近安装的滑动测微计位移监测结果与该计算剖面相应部位的位移进行对比,图6给出了主厂房上游边墙部位 CSP2-1 监测孔利用滑动测微计实测位移和无支护条件下的计算位移过程线。从安装间开挖完成后洞周围岩变形的数量级来看,可以认为围岩在洞室开挖后未发生大的变形。位移实测值与计算值大小在同一个量级,相差不大,且随开挖施工过程的变化趋势也基本一致,说明本文所建模型和相关力学参数取值合理,可以作为下一步地震响应研究的基础。

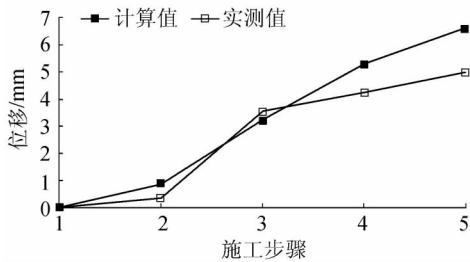


图6 监测与计算位移过程线

### 3 地震响应分析

#### 3.1 无支护块体地震稳定性计算与分析

由于工程区域缺乏现有的实测地震波数据,采用与大岗山水电站断裂带和地质背景相似的汶川地震中郫县走石山地震台记录的地震波来研究该电站地下厂房块体的地震响应。利用低频滤波器将输入地震波时程中高频部分滤去,并经基线校正后得到如图7所示的地震速度时程曲线。地下洞室开挖模拟达到稳定状态后,将模型四周(水平向)设置为黏

滞边界,同样将计算模型底部边界(竖直向)设置为黏滞边界,并输入校正后的汶川地震中郫县走石山3个方向上的地震动作用,开展定位块体的地震响应计算,如图8所示。

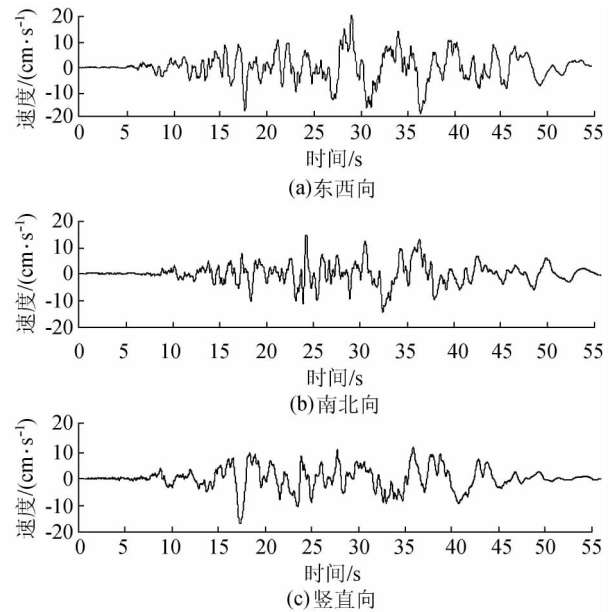


图7 郫县走石山3个方向的地震速度波

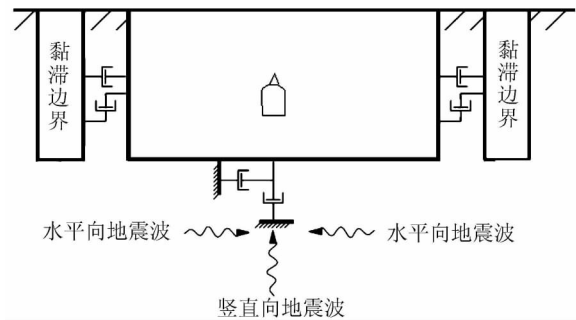


图8 地震响应分析计算模型

在离散元法地震反应分析中,可通过监测该定位块体质心部位的绝对位移响应时程和该定位块体质心与组成该定位块体四周结构面的相对滑动位移规律,来分析研究定位块体的地震响应特征以及地震稳定性。图9给出了定位块体在郫县走石山地震波作用下的3个方向上的绝对位移响应时程曲线。可以看出该定位块体在位移地震响应过程中整体上

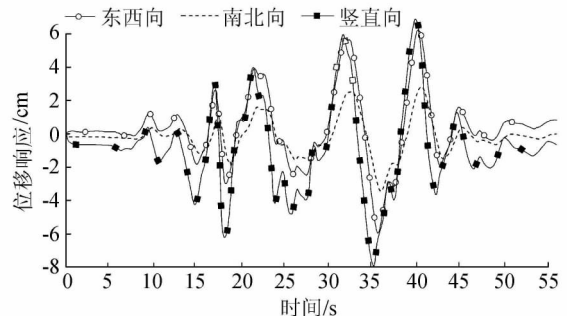


图9 定位块体3个方向的位移响应时程

呈与围岩共同振动的趋势,但最终3个方向上都产生了一定的残余位移。

为了进一步分析该残余位移产生的过程,图10给出了该定位块体沿结构面滑动的位移时程曲线(位移为块体对应于围岩的位移,下同)。通过对块体地震工况下产生的永久位移分段分析可知:由于地震波起始阶段振幅较小,因而块体AB段位移较小;地震波输入约20s时3个方向上都几乎达到峰值,导致块体在BC段的滑动位移产生了跃迁;地震波在25~45s时3个方向都处于剧烈的振动阶段,由此导致块体CD段的位移也产生较大的波动;地震波在DE段趋于平缓,块体的位移相应也趋于平稳,并最终产生5cm左右永久位移。3DEC软件的计算未能考虑岩土力学参数的退化效应,故块体滑动了5cm仍能在两个滑动面阻滑力作用下保持稳定,但厂房拱顶定位块体5cm的变形已经影响正常使用,属于破坏状态。

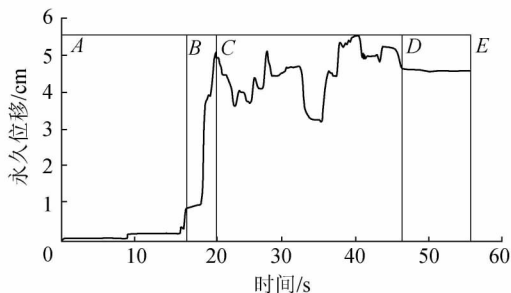


图10 定位块体的滑动位移时程

### 3.2 支护条件下块体地震稳定性计算与分析

依据洞室支护设计资料实际情况(图11),对该定位块体施加2根长9m的预应力锚杆和2根长6m的普通砂浆锚杆,布锚间距都为1.2m,进行支护后的地震稳定性计算,其中锚杆是通过3DEC软件中的命令“struct”与关键词“cable”和“prop”施加的;图12为支护后该定位块体的地震滑动位移响应时程曲线。可将施加支护后的块体位移时程划分为3个阶段:AB段时地震作用较小,几乎没有产生位移;BC段随着地震作用增大,该定位块体相对位移在2.5mm左右震荡,且位移波动幅度较大,但由于锚杆力的约束,该定位块体相对位移没有产生图

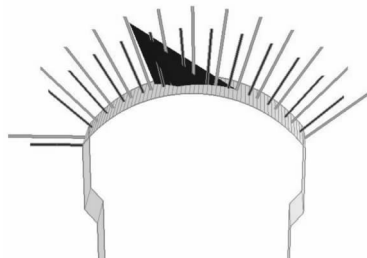


图11 定位块体锚杆支护

11所示的跃迁;CD段地震波逐渐减弱,块体的位移也趋于平稳,最终在锚杆力、块体下滑力与两个滑面阻滑力综合平衡下产生了1mm左右的残余位移。对比施加支护前后的相对位移响应规律,说明锚杆对于定位块体具有较好的抗震作用。

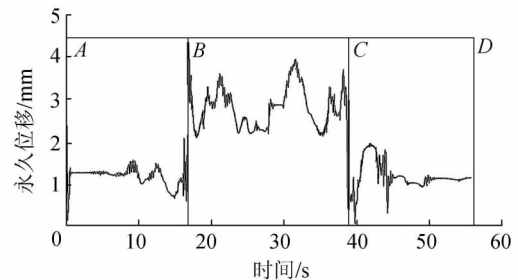


图12 支护条件下定位块体的滑动位移时程

## 4 结语

本文以大岗山水电站地下厂房为工程实例,以在施工期揭露地质资料为基础,运用3DEC建立安装间某典型定位块体的数值模型,开展了安装间的开挖稳定性分析以及定位块体的地震响应分析,比较了定位块体在支护条件下的位移响应特点和规律,结果表明应用离散单元方法分析定位块体地震响应与稳定性是可行的,锚杆对于定位块体具有较好的抗震作用。

### 参考文献:

- [1] 周家文,徐卫亚,石崇.基于3DEC的节理岩体边坡地震影响下的楔体稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊1):3402-3409. (ZHOU Jiawen, XU Weiya, SHI Chong. Wedge stability analysis of jointed rockmass slope considering seismic influences based on 3DEC [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2007, 26(Sup1): 3402-3409. (in Chinese))
- [2] 王泳嘉,邢纪波.离散单元法及其在岩土力学中的应用[M].沈阳:东北工学院出版社,1991.
- [3] 周剑,张路青,胡瑞林,等.大型结构面产状影响下应力波传播规律研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4):769-780. (ZHOU Jian, ZHANG Luqing, HU Ruilin, et al. Study of rules of stress waves propagation under various attitudes of large-scale fractures. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2011 30(4): 769-780. (in Chinese))
- [4] 杨志华,兰恒星,张永双,等.强震作用下穿越断层隧道围岩力学响应研究[J].工程地质学报,2013,21(2):171-181. (YANG Zhihua, LAN Hengxing, ZHANG Yongshuang, et al. Rock dynamic response of railway tunnel traversing through fault under strong earthquake. [J]. Journal of Engineering Geology 2013 21(2): 171-181. (in Chinese))

(下转第28页)

## 参考文献:

- [ 1 ] RAPHAEL J M. The optimum gravity dam rapid construction of concrete dams [M]. New York: ASCE ,1970.
- [ 2 ] 唐新军, 陆述远. 胶凝堆石料的力学性能初探[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30 ( 6 ): 15-18. ( TANG Xinjun ,LU Shuyuan. Preliminary research on mechanical behaviors of cemented rockfill material [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering ,1997 30 ( 6 ): 15 -18. ( in Chinese ) )
- [ 3 ] 贾金生, 马锋玲, 李新宇, 等. 胶凝砂砾石坝材料特性研究及工程应用[J]. 水利学报, 2006, 37( 5 ): 578-582. ( JIA Jinsheng ,MA Fengling ,LI Xinyu ,et al. Study on material characteristics of cement-sand-gravel dam and engineering application [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering 2006 37( 5 ): 578-582. ( in Chinese ) )
- [ 4 ] 孙明权, 彭成山, 李永乐, 等. 超贫胶结材料三轴试验[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27( 4 ): 46-49. ( SUN Mingquan ,PENG Chengshan ,LI Yongle et al. Triaxial test of over lean cemented material [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource 2007 27( 4 ): 46-49. ( in Chinese ) )
- [ 5 ] 杨朝晖, 赵其兴, 符祥平, 等. CSG 技术研究及其在道塘水库的应用[J]. 水利水电技术, 2007, 38( 8 ): 46-49. ( YANG Chaohui ,ZHAO Qixin ,FU Xiangping et al. Study on CSG dam construction technique and its application to Daotang Reservoir Project [ J ]. Water Resources and Hydropower Engineering , 2007 , 38 ( 8 ): 46-49. ( in Chinese ) )
- [ 6 ] BATMAZ S. Clidere dam-107m high roller compacted dam ( RCHD ) in Thrkey [ C ]. // Proceedings 4th international Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Madrid: [ s. n. ] 2003: 121-126.
- [ 7 ] 杨首龙. CSG 坝筑坝材料特性与抗荷载能力研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40( 2 ): 97-103. ( YANG Shoulong. Characteristics and load carrying capacity of CSG dam construction materials [ J ]. China Civil Engineering Journal 2007 40( 2 ): 97-103. ( in Chinese ) )
- [ 8 ] 蔡新, 武颖利. 胶凝堆石料本构特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32( 9 ): 1340-1344. ( CAI Xin ,WU Yingli. Constitutive equation for CSG materials [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2010 32( 9 ): 1340-1344. ( in Chinese ) )
- [ 9 ] 武颖利. 胶凝堆石坝坝料力学特性及大坝工作性态研究[D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [ 10 ] WU Mengxi , DU Bin , YAO Yuancheng , et al. An experimental study on stress-strain behavior and constitutive model of hardfill material [J]. Science China: Physics ,Mechanics & Astronomy , 2011 , 54 ( 11 ): 2015-2024.
- [ 11 ] DL/T5355—2006 水利水电工程土工试验规程[S].
- [ 12 ] 南京水利科学研究所土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. ( 收稿日期: 2013-07-03 编辑: 周红梅 )
- 
- ( 上接第 23 页 )
- [ 5 ] 王光纶, 张楚汉, 彭冈, 等. 刚块体动力试验与离散元法动力分析参数选择的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13( 2 ): 124-133. ( WANG Guanglun , ZHANG Chuhan , PENG Gang , et al. Dynamic test of rigid blocks and parameter study in dynamic analysis of distinct elements. [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 1994 , 13( 2 ): 124-133. ( in Chinese ) )
- [ 6 ] 李世海, 汪元年. 三维离散元计算参数选取方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23( 21 ): 3642-3651. ( LI Shihai , WANG Yuannian. Selection study of computational parameters for DEM in geomechanics. [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2004 23( 21 ): 3642-3651. ( in Chinese ) )
- [ 7 ] 王卫华, 李夕兵, 胡盛斌. 模型参数对 3DEC 动态建模的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24( 增刊 1 ): 4790-4797. ( WANG weihua , LI xibing , HU Shengbin. Effect of model parameters on 3DEC dynamic modeling. [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2005 24( Sup1 ): 4790-4797. ( in Chinese ) )
- [ 8 ] 石崇, 王盛年, 刘琳. 地震作用下陡岩崩塌颗粒离散元数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32( 增刊 1 ): 2798-2805. ( SHI Chong , WANG Shengnian , LIU Lin. Research of avalanche disaster numerical simulation based on granular discrete element method of high-steep slope under seismic loads [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2013 , 32 ( Sup1 ): 2798-2805. ( in Chinese ) )
- [ 9 ] 贺续文. 基于离散单元法的节理岩体边坡稳定性分析[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2010.
- [ 10 ] 李新坡, 何思明. 节理岩质边坡破坏过程的 PFC2D 数值模拟分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42( 增刊 1 ): 70-75. ( LI Xinpo , HE Siming. Numerical analysis of the failure of heavily jointed rock slopes using PFC2D [ J ]. Journal of Sichuan University: Engineering Science 2010 42( Sup1 ): 70-75. ( in Chinese ) )
- [ 11 ] 李海波, 肖克强, 刘亚群. 地震荷载作用下顺层岩质边坡安全系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26( 12 ): 2385-2393. ( LI Haibo , XIAO Keqing , LIU Yaqun. Factor of safety analysis of bedding rocking slope under seismic load. [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2007 , 26 ( 12 ): 2385-2393. ( in Chinese ) )
- [ 12 ] 李海波, 蒋会军, 赵坚, 等. 动荷载作用下岩体工程安全的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22( 11 ): 1887-1891. ( LI Haibo , JIANG Huijun , ZHAO jian et al. Some problems about safety analysis of rock engineering under dynamic load. [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2003 , 22 ( 11 ): 1887-1891. ( in Chinese ) ) ( 收稿日期: 2013-07-17 编辑: 熊水斌 )