

文章编号: 1000-7598 (2014) 03-783-06

# 基于原生裂隙重张试验确定围岩块体 边界法向应力分布规律研究

景 锋, 尹健民, 艾 凯, 韩晓玉, 刘元坤

(长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010)

**摘 要:** 由于地下工程处于一定水平的地应力环境中, 块体边界法向应力概化的正确与否直接关系到块体的稳定性分析结果, 现通过实测途径确定块体边界法向应力的研究还较少。基于大型地下厂房块体稳定性分析, 通过在块体范围及邻区不同方向布置多个钻孔, 首次将原生裂隙重张试验引入到块体边界法向应力的测定, 对开挖后与块体主要边界产状相近的所有原生裂隙的法向应力进行了测试, 成功取得了块体边界上的法向应力状态及其空间变化规律。研究结果表明: 洞室开挖完成后, 块体边界应力分布不均匀, 但具一定规律, 垂直向表现为从浅部到深部结构面的法向应力依次增大, 在水平向上, 随与洞室开挖面距离的增大而增大; 结构面的法向应力实测值稍小于基于围岩应力的估算值, 但总体一致。该成果可为确定围岩块体的边界力学状态和应力模型简化提供参考和依据。

**关 键 词:** 围岩; 块体边界; 法向应力; 重张试验; 分布规律

中图分类号: TU457

文献标识码: A

## Study of distribution rule of wall rock block boundaries normal stress based on reopening test of preexisting fractures

JING Feng, YIN Jian-min, AI Kai, HAN Xiao-yu, LIU Yuan-kun

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** As a result of underground engineering in a certain level of in-situ stress condition of surrounding rock, the stress environment is different from the surface slope. It directly relates to the block stability analysis results which the block boundary normal stress quantification is correct or not. Study of block boundaries normal stress by field measurement is not common. Based on stability analysis of a large underground powerhouse block, several different direct boreholes are placed in the block and adjacent areas; the method of preexisting fractures reopening tests is used to determinate block boundary normal stress firstly; and the normal stress state and rules of spatial change of preexisting fractures that occurrence similar to block boundary are successfully acquired. Research results show that, after the completion of excavation, distribution of block boundary stress is not uniform, but with a certain rule; the normal stress of structural surface increases from shallow to deep in the vertical direction, and increases with the excavation surface distance increasing in the horizontal direction. The measurement data of normal stress are less than the calculated values based on the method of surrounding rock stress; but the overall consensus. The results provide references for determining block boundary condition and simplifying stress model.

**Key words:** wall rock; block boundary; normal stress; reopening test; distribution rule

## 1 引 言

随着我国交通、能源、水利水电和矿山等行业的快速发展, 将在西部复杂地形地貌条件下, 兴建大量的岩土工程, 将出现大量的超大型人工高边坡、坝基和地下洞室等。由于岩体受各种不连续结构面

切割, 形成了规模不等的块体, 块体的稳定性直接关系到工程的进展与安全。因此, 块体的稳定性分析一直是工程界和科研界关注的焦点之一<sup>[1-2]</sup>。

根据结构岩体的特点, 许多学者已研究了相应的力学模型和稳定性计算方法, 如极限平衡法、有限元法、离散元法和块体理论等<sup>[3-5]</sup>。针对块体稳

收稿日期: 2013-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.41272350, No.51179013)。

第一作者简介: 景锋, 男, 1974 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事岩石力学及工程安全监测和地应力测试等方面的研究工作。E-mail: fjingl8@163.com

定性分析,在块体定性、划分和关键块体搜寻及加固、考虑地下水等方面已取得了大量研究成果,并已在工程中得到了大量应用<sup>[6-8]</sup>。但在具体的工程实践中,块体边界的法向应力概化通常过于简化,常根据工程经验或简单的连续力学数值模拟得到的边界应力状态进行分析,使得计算结果具有一定的不确定性。因此,如何能准确确定块体边界的应力状态具有一定的理论和现实意义。

长江中上游某大型水电站右岸地下电站厂房下游边墙块体稳定是工程围岩稳定性分析与评价的关键问题之一,块体处理方案的合理与否直接关系到工程施工期及运行期的安全。对于边坡工程的块体稳定性分析,通常可只考虑块体的自重。而地下工程一般处于一定水平量值的地应力环境中,围岩的块体稳定性分析明显与边坡工程不同。一般而言,边界面上的法向正应力作用有利于块体稳定。因此,有必要研究块体边界边结构面的法向应力状态。

本文结合工程实例围岩块体稳定性研究,通过在块体及邻区不同方向布置多个钻孔,开展块体边界力学状态的试验研究工作,首次将原生裂隙重张试验引入到块体边界力学状态的测定,得到了块体边界法向应力状态的空间变化规律,并与围岩实测地应力的关系进行了对比,得出了有意义的结论。本文的研究结果可为其他类似工程,尤其是块体边界力学性态的简化和稳定性分析提供参考和依据。

## 2 工程概况

某大型水电站地下电站位于长江右岸白岩尖山体中,与右岸坝后式厂房相毗邻,共设置6台单机容量为700 MW的水轮发电机组。区内岩石主要为前震旦系闪云斜长花岗岩和闪长岩包裹体,岩石坚硬,完整性较好。地下电站由主厂房洞室、引水隧洞、尾水隧洞、排沙洞和母线廊道组成,且洞室之间还有排水洞、交通洞、竖井等,组成了规模庞大的地下洞室群,各洞室埋深一般在44~120 m之间。其中主厂房洞室为直墙曲顶型,高约为88.62 m,跨度约为32 m,长为311.3 m。

该地下电站围岩断层不发育,块体边界多呈裂隙密集带型,延伸长一般小于100 m,宽一般小于0.3 m。厂房区主要存在NEE向(倾向约333°)、NNW(倾向约256°)和NNE向(倾向约110°)3组裂隙,围岩主要受前两组结构切割形成了多个大型不稳定块体,块体出露面积占边墙总面积的50.9%。3#和4#机组间的18#和19#两大块体,体积均超过 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,下游侧边墙的地质展布见图1。

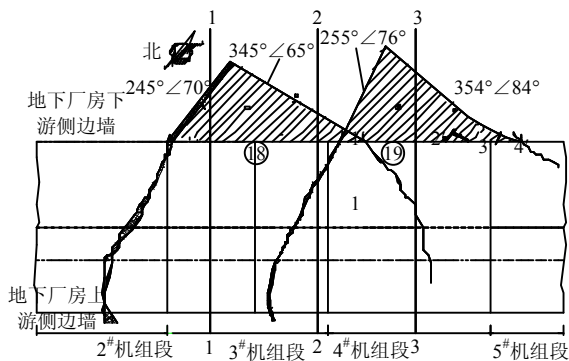


图1 地下厂房下游侧边墙地质展布和测试断面示意图  
Fig.1 Geological and test cross section diagram of downstream side wall block of underground powerhouse

为了解块体边界的应力状态,根据厂房区的地质条件和洞室布置情况,在3#、4#机组下游侧布置了3个测试断面。其中2#断面布一近垂直孔K1,1#断面不同高程分别布水平孔K2和K3,3#剖面与1#对称布置两水平孔K4和K5,所有钻孔均穿过块体边界。测试断面布置见图1,测孔布置见图2。

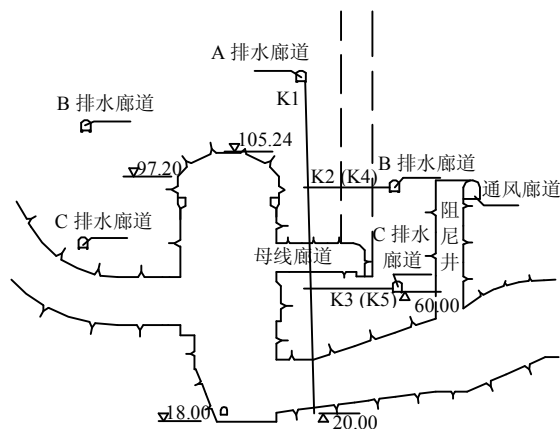


图2 测孔布置示意图(单位: m)  
Fig.2 Layout of measuring holes(unit: m)

## 3 试验方法和原理

### 3.1 试验方法和原理

原生裂隙重张试验来自水压致裂法地应力测量,其与传统水压致裂法地应力测量的操作程序和步骤类似,均采用封隔器将一段钻孔与其他部分隔开注入液体加压。传统水压致裂法封隔段为完整段,而原生裂隙重张试验则为孤立的原生裂隙<sup>[9]</sup>。原生裂隙重张试验一般包括准静态重张试验和关闭试验,以确定裂隙法向应力 $\sigma_n$ 为

$$\sigma_n^i = \min(P_{ti}^0, P_{si}) \quad (1)$$

式中:  $\sigma_n^i$  为第*i*条原生裂隙法向应力;  $P_{ti}^0$  为*i*条原生裂隙拟静态重张压力;  $P_{si}$  为*i*条原生裂隙重张试

验的关闭压力；

当获得6条以上不同产状原生裂隙的法向应力实测值时，还可基于式(2)采用最小二乘法求解三维应力。

$$\sigma_n^i = \sigma(X_i) n_i n_i \quad (2)$$

式中： $X_i$ 为第*i*点位置； $\sigma(X_i)$ 为 $X_i$ 处的空间应力张量； $n_i$ 为第*i*条原生裂隙法向与坐标轴*X*、*Y*和*Z*的夹角余弦向量。

### 3.2 裂隙重张试验确定边界法向应力的适用性研究

本试验是在地下厂房基本开挖完成后进行，围岩一定范围都属于开挖扰动区(EDZ)和地应力场扰动区，测试范围内的地应力状态分布规律更加复杂<sup>[10-12]</sup>。上节的老原生裂隙重张试验确定三维地应力方法一般适合开挖前，测试区地应力场分布均匀或具有一定分布规律的条件下可采用进行三维地应力测量，而不太适合开挖后扰动区的三维地应力测量。

本案例仅利用裂隙重张试验理论完善、操作简单、结果可靠的特点，来测定局部单条裂隙的法向应力，再通过大量的裂隙法向应力测定结果来研究块体边界上的法向应力分布状态，理论上和技术上是可行的。

### 3.3 试验步骤

①采用钻孔电视确定裂隙的位置、产状和性状；②下放封隔器至拟测位置；③封隔段注水；④封隔段施0.5~1 MPa压力，保持约1 min，测试其渗透性；⑤重张过程宜采用逐级循环慢性加压，确保加压过程中不产生新裂缝，并自动采集压力与流量随时间的变化，一般做3个循环；⑥测试完成后采用钻孔电视检查孔壁前后变化。

### 3.4 试验设备

原生裂隙重张试验设备见表1。

表1 原生裂隙重张试验设备统计表  
Table 1 Statistics of reopening test equipment for preexisting fractures

| 设备名称     | 型 号        | 备 注         |
|----------|------------|-------------|
| 彩色钻孔电视   | MDTV2000   | 可分辨0.1 mm裂缝 |
| 高压水泵     | HD 10/25 S | 高压、大流量      |
| 动态数据采集系统 | SYS        | 采集压力、流量     |
| 压力传感器    | ZQ502      | 20 MPa      |
| 流量传感器    | LWGY       | 高压          |
| 压力表      | 0.4 级      | 25 MPa      |
| 封隔器      | Φ91        |             |

### 3.5 试段选取

采用高精度钻孔电视，在布置的5个测孔内选择原生裂隙。原生裂隙选择原则：①孤立闭合的裂隙；②裂隙的产状与块体边界 NEE 向（倾向约

333°）、NNW（倾向约256°）和 NNE 向（倾向约110°）3组结构面产状一致或相近；③原生裂隙分布在块体及周边一定范围内。其中 K1 孔深90 m处典型原生裂隙的钻孔电视图见图3。

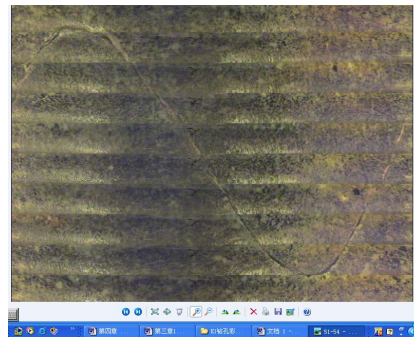


图3 典型原生裂隙钻孔电视成像图  
Fig.3 Typical borehole television picture of preexisting fracture

### 3.6 特征曲线及取值

鉴于岩石与裂隙渗透性的差异，原生裂隙重张试验实际上就是一单独自然裂隙在三维应力状态下的现场特殊渗透性试验。原生裂隙重张试验的测试曲线主要是压力与流量-时间关系曲线，根据曲线上压力和流量的变化来综合确定裂隙的法向应力。

大量的理论与试验研究表明，对于岩体裂隙渗流，除裂隙的隙宽、糙度、充填物等物理特性直接影响裂隙的渗流状态外，裂隙的三维应力状态也直接影响到裂隙的渗流。裂隙面上的剪应力、法向应力及裂隙的侧压力都直接影响到裂隙的渗流状态，其中法向应力影响最大，而剪应力则相对较小。裂隙的法向应力主要使裂隙闭合，侧向应力通过泊松比效应使裂隙张开，而剪应力则使裂隙的渗流规律更为复杂，目前在如缩减现象、剪切方向、渗流各向异性等方面还有待更深入的研究<sup>[13-15]</sup>。

但鉴于本文原生裂隙重张试验的主要目的是确定裂隙的法向应力，即使裂隙侧向应力和剪应力对裂隙的渗流有影响，但对于具体的裂隙，在相对确定的侧向应力和剪应力下，仍可通过裂隙流量与压力随时间的变化关系曲线来判定裂隙的法向应力。

因此，原生裂隙法向应力可由压力-时间曲线上判取的关闭压力  $P_s$  与压力-流量曲线判读的拟静态重张压力两个特征值来综合确定。 $P_s$  为原生裂隙闭合瞬间液体压力与裂隙法向应力平衡时，压力-时间曲线所对应的拐点。拟静态重张压力对应着裂隙重张时的液体压力，为裂隙重张过程中的压力-流量曲线的拐点。通常实测时孔口压力量值包括动水压力与管路压力损失，拟静态重张压力一般稍大于关闭压力。通常将关闭压力与拟静态重张压力中

的低值作为原生裂隙的法向应力<sup>[16]</sup>。

如 K1 孔 90 m 处的原生裂隙闭合状态好, 共进行了 3 次重张试验, 前两个循环为拟静态重张试验, 最后一个为快速加压重张试验, 试验压力-流量关系见图 4。从试验过程曲线看, 3 个循环均未出现岩石致裂现象, 但受重复张开闭合影响, 裂隙刚度有轻微衰减迹象, 根据经验取第 2 循环分析。图中, 第 2 循环的关闭压力  $P_s$  为 2.6 MPa, 而拟静态重张压力在 2.8~3.1 MPa 之间。综合比较, 该原生裂隙的法向应力值取为 2.6 MPa。

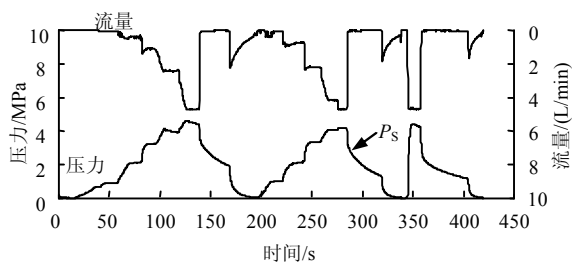


图 4 典型原生裂隙重张测试曲线

Fig.4 Typical reopening test curves of preexisting fracture

## 4 试验结果分析及工程应用

### 4.1 试验结果及分析

在地下厂房 5 个测孔中共获得了约 40 条原生裂隙法向应力的试验测试结果, 部分结果见表 2。

因块体边界结构面范围较大, 将 5 个孔的 3 组结构面法向应力测试结果进行综合分析。结果表明, NEE 组裂隙的法向应力总体上在 1.04~2.5 MPa 之间, NNW 组在 1.3~4.3 MPa 之间, NNE 在 1.4~4.3 MPa 之间。

原块体稳定性分析计算, 边界法向应力约采用 1 MPa。实测结果表明, 边界法向实测应力值明显高于原计算分析采用值。因此, 采用实测值, 既符合实际状况, 又可减少块体的加固支护工作量, 节省成本。

表 2 原生裂隙法向应力测试结果表

Table 2 Test results of normal stress of preexisting fracture

| 测孔编号 | 测段深度 H/m | 裂隙倾向/(°) | 裂隙法向应力/MPa |
|------|----------|----------|------------|
| K1   | 8.50     | 256      | 2.19       |
|      | 21.40    | 122      | 1.51       |
|      | 90.00    | 104      | 2.61       |
| K2   | 8.50     | 310      | 1.60       |
|      | 15.40    | 358      | 1.20       |
|      | 21.20    | 342      | 1.10       |
| K3   | 19.65    | 137      | 1.60       |
|      | 24.50    | 326      | 2.50       |
|      | 13.94    | 141      | 3.20       |
| K4   | 18.50    | 352      | 1.60       |
|      | 6.60     | 111      | 4.30       |
|      | 12.70    | 246      | 2.50       |
| K5   | 16.50    | 263      | 1.30       |

### 4.2 结构面法向应力的空间变化规律

为了解各组结构面法向应力的空间变化规律, 将 5 个测孔中的 3 组裂隙按埋深进行了分析, NNW 向、NNE 向和 NEE 向 3 组裂隙法向应力与埋深的关系统计见图 5。图 5 表明, 各组裂隙法向应力除浅部少数点可能受厂房拱顶应力集中影响量值稍偏大外, 其余点总体上表现为随埋深增大而增大, 符合一般规律。

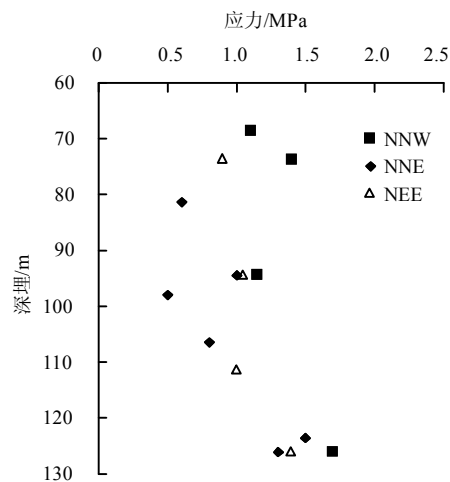


图 5 裂隙法向应力随埋深变化关系图

Fig.5 Relation of normal stress of fracture with burial depth

图 6 为 3 组原生裂隙法向应力随与厂房下游侧边墙距离的变化关系图。结果表明, 3 组裂隙法向应力受厂房开挖卸荷应力调整影响明显, 总体表现为随离厂房边墙距离的增大应力值由小变大, 其中 NNW 和 NNE 向裂隙法向应力变化趋势较明显, 而 NEE 向裂隙法向应力变化整体上不明显。这主要因为厂房轴线为 NE 向, 由于开挖卸荷, 应力在 NNW 和 NNE 向卸荷明显, 而 NEE 向与厂房轴向夹角约为 15°, 该方向岩体卸荷相对不明显, 使得 NEE 向的裂隙法向应力变化不明显, 造成 3 组裂隙法向应力随地下厂房边墙距离的变化趋势不同。

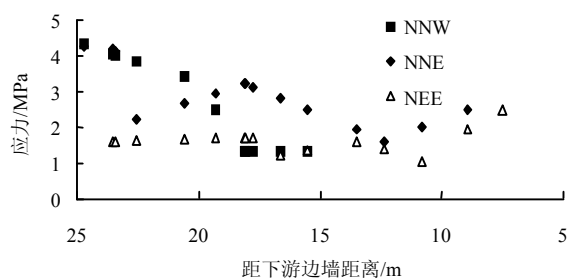


图 6 裂隙法向应力随厂房边墙距离变化关系图

Fig.6 Relation of normal stress of fracture with distance to side wall of underground powerhouse

### 4.3 裂隙法向应力与围岩实测地应力的关系

从3组裂隙法向应力的量值大小对比看，NNE和NNW向两组应力较大，量值分别在1.3~4.3 MPa和1.4~4.3 MPa之间，而NEE向组裂隙最小，在1.04~2.5 MPa之间，这主要是受厂房开挖后围岩的地应力状态的影响。

地下厂房4个水平孔空心包体法实测最大水平主应力方向在NE~EW向间，而NNE和NNW向两组与最大水平主应力近垂直，使得NNE和NNW向两组裂隙的法向应力值相对大，而NEE向裂隙的法向应力相对偏小。3组裂隙法向实测应力与空心包体法的实测最大水平主应力 $S_H$ 关系见图7。

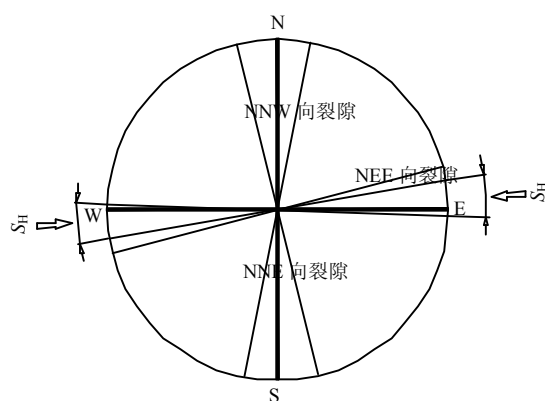


图7 3组裂隙走向与最大水平主应力关系图

Fig.7 Diagram of three groups of fracture direction and maximum horizontal principal stress

从裂隙法向应力与围岩实测地应力关系看，各组裂隙法向应力大小明显受围岩地应力场作用。根据开挖后围岩解除法实测地应力，最大水平主应力 $S_H$ 方位约N70°E，量值为3.8~5.8 MPa，最小水平主应力 $S_h$ 为1.1~2.7 MPa，按平面应力计算NNW、NNE和NEE向裂隙方向应力分别在3.7~5.7 MPa、2.6~4.5 MPa和1.1~2.8 MPa之间，见表3。除NEE向裂隙法向应力的计算与实测值较一致外，其余两组裂隙的法向应力计算值均大于实测值。从基于地应力实测值所估算的3组裂隙法向应力看，NNW向和NNE向两组裂隙法向估算应力亦大于NEE向，其与原生裂隙重张试验所测得的规律一致。

裂隙法向应力实测值小于基于实测地应力的计算值，其主要与各组裂隙面在长期的地应力和地下水作用下物理力学性能有一定程度的恶化有关。

表3 裂隙法向应力实测与计算对比表(单位: MPa)  
Table 3 Comparison of test and calculation values of preexisting fracture normal stress(unit: MPa)

| 裂隙法向应力   | NNW 向     | NNE 向     | NEE 向      |
|----------|-----------|-----------|------------|
| 基于地应力估算值 | 3.7 ~ 5.7 | 2.6 ~ 4.5 | 1.1 ~ 2.8  |
| 重张试验实测值  | 1.4 ~ 4.3 | 1.3 ~ 4.3 | 1.04 ~ 2.5 |

## 5 结 论

(1) 地下厂房围岩原生裂隙重张试验，可直接测得结构面的法向应力，为块体的稳定性分析提供应力参数。根据实测结果，案例中的块体稳定性分析可充分利用空间地应力作用，安全系数可较前期分析结果有一定提高，可优化设计。

(2) 地下洞室围岩块体及邻区结构面法向应力分具有一定规律，具体表现为，同一垂直向上产状相近裂隙结构面的法向应力随埋深增大而增大；同一水平向上，产状相近裂隙结构面法向应力随与开挖自由面距离的增大而增大。

(3) 结构面法向应力状态受围岩地应力状态作用明显。总体表现为，与围岩最大水平主应力夹角大的裂隙法向应力较大，反之较小。裂隙法向应力实测值一般稍小于基于实测地应力的估算值。

(4) 对于地下洞室块体稳定分析，边界结构面上法向应力的概化，可基于块体所在围岩的实测地应力，结合数值开挖模拟或理论分析来估算结构面的法向应力，再根据开挖形态和结构面法向分布规律进行概化，可为块体稳定性分析提供相对可靠的边界力学条件。

## 参 考 文 献

- [1] 王思敬. 中国岩石力学与工程的世纪成就与历史使命[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 867—871.  
WANG Si-jing. Century achievement and new historical mission of rock mechanics and engineering in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 867—871.
- [2] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [3] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [4] 王泳嘉, 邢纪波. 离散单元法同拉格朗日元法及其在岩土力学中的应用[J]. 岩土力学, 1995, 16(2): 1—14.  
WANG Yong-jia, XING Ji-bo. Discrete element method and Lagrangian element method and their applications in geomechanics[J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, 16(2): 1—14.
- [5] 于青春, 薛果夫, 陈德基. 裂隙岩体一般块体理论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [6] 石根华. 一般自由面上多面节理生成、节理块切割与关键块搜寻方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2161—2170.  
SHI Gen-hua. Production joint polygons, cutting joint blocks and finding key blocks for general free surface[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(11): 2161—2170.
- [7] 张奇华, 邬爱清. 边坡及洞室岩体的全空间块体拓扑搜索研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2072—2078.
- ZHANG Qi-hua, WU Ai-qing. Study on spatial block topological identification of slope and cavern rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2072—2078.
- [8] 陈剑平, 卢波, 王良奎. 复杂不稳定块体的自动搜索及其失稳方式判断——基于随机不连续面三维网络模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1126—1131.
- CHEN Jian-ping, LU Bo, WANG Liang-kui. Automatic search for complex unstable rock blocks and the judgment of instability mode — based on 3D network simulation of random fractures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(7): 1126—1131.
- [9] 景锋. 原生裂隙水压致裂法三维地应力测量研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1692—1696.
- JING Feng. Determination of three-dimensional geostress by hydraulic tests on preexisting fractures[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(11): 1692—1696.
- [10] 丰成君, 陈群策, 谭成轩, 等. 广东核电站地应力测量及其应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1745—1752.
- FENG Cheng-jun, CHEN Qun-ce, TAN Cheng-xuan, et al. In-situ stress measurement and its application to Guangdong nuclear power stations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1745—1752.
- [11] 周火明, 盛谦, 李维树, 等. 三峡船闸边坡卸荷扰动区范围及岩体力学性质弱化程度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1078—1081.
- ZHOU Huo-ming, SHENG Qian, LI Wei-shu, et al. Excavation-disturbed zone and weaken degree of mechanical properties for rockmass of TGP shiplock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(7): 1078—1081.
- [12] 张建海, 胡著秀, 杨永涛, 等. 地下厂房围岩松动圈声波拟合及监测反馈分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1191—1197.
- ZHANG Jian-hai, HU Zhu-xiu, YANG Yong-tao, et al. Acoustic velocity fitting and monitoring feedback analysis of surrounding rock loosening zone in underground powerhouse[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(6): 1191—1197.
- [13] 熊祥斌, 张楚汉, 王恩志. 岩石单裂隙稳态渗流研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1839—1847.
- XIONG Xiang-bin, ZHANG Chu-han, WANG En-zhi. A review of steady state seepage in a single fracture of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(9): 1839—1847.
- [14] 常宗旭, 赵阳生, 胡耀青. 裂隙岩体渗流与三维应力耦合的理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 2): 4907—4911.
- CHANG Zong-xu, ZHAO Yang-sheng, HU Yao-qing. Theoretic and experimental studies of the coupling of seepage flow and 3D stresses in fractured rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(Supp.2): 4907—4911.
- [15] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 剪应力作用下岩体裂隙渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1651—1655.
- LIU Cai-hua, CHEN Cong-xin, FU Shao-lan. Study on seepage characteristic of a single rock fracture under shear stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1651—1655.
- [16] 陈策群, 李方全. 水力阶撑法用于原地应力测量的工作原理及其工程实践[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 305—310.
- CHEN Ce-qun, LI Fang-quan. Principle of in-situ stress measurement by hydraulic jacking test and its application in engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(3): 305—310.