文章编号: 1004-5589 (2012) 01-0204-06

某水电站引水洞进口侧山体边坡块体识别

杨树才¹,王常明¹,马栋和¹,陈龙²,刘治³

1. 吉林大学 建设工程学院,长春 130021;

2. 中国石油天然气管道工程有限公司,河北廊坊 065000;

3. 山东省地矿局 第三地质矿产勘查院,山东烟台 264004

摘要: 某水电站进口侧山体边坡岩体为完整性较差的中-薄层状灰岩,岩体中主要发育3条断层、1组 岩脉和4组优势节理,严重影响了该山体边坡的稳定性。根据结构面分布,采取块体理论搜索边坡上 的关键块体,通过赤平投影法找出边坡上所有的非空裂隙锥,将这些非空裂隙锥与临空面组合,从而 获得所有可动块体;利用矢量法计算不同运动形式下块体 JP 编号、净滑力即可获得关键块体。结果 表明: 该水电站引水洞进口侧山体边坡有4块关键块体(JP 编号为00010111、00110111、10110111、 10111011),为该边坡稳定性的进一步研究提供了基础。

关键词: 引水洞; 边坡; 块体理论; 关键块体

中图分类号: TU457 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1004-5589.2012.01.026

Block recognition of mountain slope in delivery tunnel inlet side for a hydropower station

YANG Shu-cai 1 , WANG $\rm Chang-ming^1$, MA $\rm Dong-he^1$, CHEN $\rm Long^2$, LIU $\rm Zhi^3$

1. College of Construction Engineering , Jilin University , Changchun 130021 , China;

2. China Petroleum Pipeline Engineering Co. , Langfang 065000 , Hebei , China;

3. No. 3 Exploration Institute of Geological Mineral , Geological Prospecting Bureau of Shandong , Yantai 264004 , Shandong , China

Abstract: The slope rocks of delivery tunnel inlet side of a hydropower station are middle-thin layered limestone, in which there are mainly three faults, one dyke and four groups of superior joints. The characters seriously effect the stability of this mountain slope. According to the distribution of structural surfaces, the authors use block body theory to search of the key block bodies in the slope. The non-spatial fracture cones in the slope were find out by stereographic projection law. Combined them with free surface to get the whole movable block bodies, the authors calculated the JP number and the net sliding force under different movable forms to find out the key block bodies. The result indicates that there are 4 key block bodies in the slope of delivery tunnel inlet side of this hydro– power station, with the JP numbers 00010111, 00110111, 10110111 and 10111011, which proves the base for further examination of the slope stability.

Key words: delivery tunnel; slope; block theory; key block body

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40972171)

0 引言

某水电站引水工程位于吉林省境内的松江河下 游,进口侧山体由引水洞进口、交通洞口、上坝公 路组成。该引水洞工程山体由震旦系下统万隆组灰 岩组成,岩石以薄层-中厚层互层为主,岩体完整 性差;又有岩质坚硬,完整性差的强风化岩脉贯 穿;山体中有多条断层和节理裂隙交叉。这些复杂 的结构面相互交叉,形成大量的块体。

目前关键块体理论^[1-3]或与其相类似的楔形体 法^[4]在国内外研究不稳定岩石块体的识别、稳定 性评价以及加固设计时,得到了普遍应用^[5]。块 体识别是块体理论发展的重要环节。

Goodman 最早采用极射赤平投影法分析了非连 续性岩体的稳定性,随后石根华^[2]提出了利用极 射赤平投影判断滑落体的方法和采用矢量代数法分 析岩体稳定性的理论。石根华还与 Goodman 合作 建立了块体理论,《块体理论及其在岩体工程中的 应用》(Block Theory and its Application to Rock Engineering)^[1]一书的出版,标志着利用块体理论作 为岩体工程分析的一种有效方法已趋于完善。刘锦 华^[1]和吕祖珩最先将块体理论引入到中国,并对 块体理论的分析方法及在岩体工程中的应用进行了 系统全面的介绍;随后矢量分析法和赤平投影分析 法也分别在地下工程围岩块体分析中得到了应用, 块体理论软件也已开发成功,并在工程中得到应 用^[3]。

近年来,随着多学科的交叉结合,出现了多种 块体识别的新方法。杨文东等^[6]提出了关键块体 神经网络预测法,该方法针对岩体边坡关键块体的 状态(关键与否)与其几何参数和力学参数之间 存在的高度的非线性映射关系,利用人工神经网络 理论的强大非线性映射能力和自学能力,对关键块 体进行识别。王述红和张奇华等^[740]提出了全空间 块体搜索的方法,该方法通过非接触摄影技术采集 现场围岩的结构面信息,建立开挖模型,并利用数 值模拟方法,对开挖区块体进行全空间搜索。张国 新^[11]等提出利用三维不连续变形分析理论对块体 进行识别,该方法根据三维块体理论及三维不连续 变形分析相关理论,针对块体建立模型,从而识别 块体。

块体理论中常见的识别方法主要分为矢量运算

法和作图法^[12]。矢量运算法将空间平面和力系以 矢量表示,通过矢量运算给出全部块体理论分析的 结果; 作图法应用全空间赤平投影方法直接作图求 解。笔者将这两种方法有机的结合,既得到了关键 块体的结构面的组合形式,又定量分析了其安全 性,从而使得分析结果更加直观^[1]。

1 块体识别方法

块体识别时,将各结构面组合而成的所有非空 裂隙锥在赤平投影图上直观地反映出来,并对其进 行 JP 编号;将这些非空裂隙锥与边坡临空面相结 合,识别出所有可动块体;再运用块体理论,通过 自编程序计算出各运动形式下块体的 JP 编号和净 滑力;最后根据可动块体的净滑力判定出关键块 体。其具体步骤是:

(1)运用赤平投影法找出所有已知结构面下可能构成的所有非空裂隙锥,并对各个非空裂隙锥进行 JP 编号(0 代表结构面的上半空间,1 代表结构面的下半空间)。将这些非空裂隙锥与开挖面组合,确定所有的可动块体。

(2)根据可动块体的运动学和力学分析、计算,在可动块体中筛选出真正的关键块体或者可能失稳的块体。

采取赤平投影找出非空裂隙锥后,根据块体理 论中的块体可动性条件判别可动块体。块体可动的 充分必要条件是 JP ≠ φ ,且 JP ∩ EP = φ,其中 JP 为裂隙锥,EP 为开挖锥^[1]。

关键块体的判别采用矢量法。各运动方向矢量 及相应运动方式的编号和净滑力的计算公式:

对于边坡而言,块体可能的运动方式主要为单面和沿双面滑动^[13],当沿单面*i*滑动时:

$$\hat{s}_i = \frac{(\hat{n}_i \times r) \times \hat{n}_i}{|\hat{n}_i \times \vec{r}|}$$
(1)

而沿双面 *i、j* 滑动时:

$$\hat{s} = \hat{s}_{ij} = \frac{\hat{n}_i \times \hat{n}_j}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|} sign \left[(\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot \vec{r} \right] (2)$$

其中:

 $\hat{n}_i = (A_i \ B_i \ C_i) = (\sin\alpha_i \cdot \sin\beta_i \ \sin\alpha_i \cdot \cos\beta_i \ , \\ \cos\alpha_i)$

 $\widehat{n}_i \times \widehat{n}_j = [(B_iC_j - B_jC_i) , (A_jC_i - A_iC_j) , (A_iB_j - A_jB_i)]$

式中: \hat{n}_i 为某结构面单位法相矢量(A代表X方向、B代表Y方向、C代表Z方向); \hat{s} 为滑动方向, \vec{r} 为主动力合力, α 为某结构面的倾角, β 为倾向。

相应运动方式下的块体编号^[1]: 裂隙锥可以用 符号编号 JP [$I(a_1)$, $I(a_2)$ …… $I(a_n)$] 表示,而 $l(a_l) = sign(v_l)$ 因此只要求出相应某种运动形式 的各结构面向内单位法线矢量 \hat{v}_l ,就可以确定相应 该运动形式的 JP 编号。当 $\hat{v}_l = \hat{n}_l$,定义 $l(a_l) = 0$; 当 $\hat{v}_l = -\hat{n}_l$,定义 $l(a_l) = 1$ 。l 为各结构面。

沿单面 i 滑动时:

$$\hat{v}_{i} = sign(\vec{r} \cdot \hat{n}_{i}) \cdot \hat{n}_{i}$$

$$\hat{v}_{l} = sign(\hat{s} \cdot \hat{n}_{l}) \cdot \hat{n}_{l} \quad (l \neq i)$$
(3)

沿双面 $i \cdot j$ 滑动时:

$$\hat{v}_{i} = -sigh(\hat{s}_{j} \cdot \hat{n}_{i}) \cdot \hat{n}_{i}$$

$$\hat{v}_{j} = -sigh(\hat{s}_{j} \cdot \hat{n}_{j}) \cdot \hat{n}_{j}$$

$$\hat{v}_{l} = sigh(\hat{s}_{ij} \cdot \hat{n}_{l}) \cdot \hat{n}_{l} \quad (l \neq i \neq j)$$
(4)

根据块体理论, 当净滑力 $F > 0$ 时,该块体为

沿单面 i 滑动时的净滑力:

$$F = |\hat{n}_i \times \vec{r}| - |\hat{n}_i \cdot \vec{r}| \tan \varphi_i$$
(5)
沿双面 *i*,*j* 滑动:

$$F = \frac{1}{\mid \hat{n}_{i} \times \hat{n}_{j} \mid^{2}} \left[\mid \vec{r} \cdot (\hat{n}_{i} \times \hat{n}_{j}) \mid \cdot \mid \hat{n}_{i} \times \hat{n}_{j} \mid - \right]$$
$$\mid (\vec{r} \times \hat{n}_{j}) \cdot (\hat{n}_{i} \times \hat{n}_{j}) \mid \tan\varphi_{i} - \left[(\vec{r} \times \hat{n}_{i}) \cdot (\hat{n}_{i} \times \hat{n}_{j}) \mid \tan\varphi_{j} \right]$$
(6)

式中: φ 为内摩擦角。

各运动方向矢量及相应运动方式的编号和净滑 力的计算,已经通过自编程序实现,使得该部分的 计算简便快捷,程序代码采取C语言实现,主体 程序代码为:

 $b[n][3] = B^* C/sqrt(A^* A + B^* B);$ $b[n][4] = -(A^*A + B^*B) / sqrt(A^*A + B^*)$ B) ; $b[n][5] = sqrt(A^*A + B^*B) - fabs(C)^* tan(a)$ [i][2]* API); $n + +; \}$ for(i = 0; i < j - 1; i + +) { m = i + 1;for(m; m < j - 1; m + +) $\{A = sin(a[i][0]* API) * sin(a[i][1]* API);$ B = sin(a[i][0]* API) * cos(a[i][1]* API);C = cos(a[i][0]* API);b[n][0] = i + 1;b[n][1] = m + 1;D = sin(a[m][0]* API) * sin(a[m][1]*API); E = sin(a [m] [0] * API) * cos(a [m] [1] *API): $F = \cos(a[m][0]* API);$ $Q = D^* B - A^* E;$ if (0 > 0)I = 1;else if (Q = = 0) I = 0; else I = -1; H = sqrt(pow((B*F - E*C), 2) + pow((D*C))) $-A^* F$, 2) + pow(($A^* E - D^* B$), 2)); $b[n][2] = (B^* F - E^* C) * I/H;$ $b[n][3] = (D^* C - A^* F) * I/H;$ $b[n][4] = (A^* E - D^* B) * I/H;$ b[n][5] = (fabs(Q) * H - fabs(E* B* F - E* E* C – D* D* C + A* D* F) * tan(a [i] [2] * API) – fabs($B^* B^* F - B^* E^* C - C^* A^* D + A^* A^* F$) *

tan(a[m][2]* API)) /(H* H);n++;} 式中: a[j][0]为结构面倾角 α, a[j][1]为倾 向 β, a[j][2]为摩擦角 φ; b[n][0]、b[n][1]为 滑动方式, b[n][2]、b[n][3]、b[n][4]为滑动 方向的矢量, b[n][5]为净滑力。

2 进口侧山体边坡的块体识别

2.1 山体边坡工程地质条件

本文主要对进口侧高程 484 m 以上山体的工程 地质条件进行分析。

边坡总体坡向 N20°W~N20°E,进口闸门平台

与交通洞、上坝公路相连,高程均为484 m。此高 程以上边坡长90~110 m。484~494 m 高程开挖坡 比为1:0.5,494 m 高程以上受岩体节理的影响坡 面不平整,平均坡比为1:0.75~1:0.90,将山顶下 挖6.0~7.5 m。

边坡岩石为震旦系下统万隆组(Z₁w) 灰岩, 呈灰-灰黑色,以薄-中厚层互层状结构为主,在 #1、#2 引水洞中心线高程 535~520 m 和 526~510 m 为中厚层,以中等风化状态为主,岩质坚硬。正 长斑岩(ξ_{π-7})分布高程在 484 m 以上,上界限与 围岩呈裂隙接触,下界限为断层接触。

岩层产状: 走向 N80°~85°E,倾向 NW,倾 角 35°~36°。F₇断层自下游山顶延伸至484 m 平台 #1 引水洞中心线上游9 m 处出露,出露宽度1.5 m。F₂₃断层在484 m 平台被F₇断层错断,向上游 边坡延伸,出露宽度1.0 m。优势节理为4组:① 走向 N80°~85°E,倾向 NW,倾角 35°~36°,多 数呈闭合状态,为层面节理;②走向 N15°~50°E, 倾向 SE 为主,倾角 46°~86°;③走向 N26°~53° W,倾向 SW 为主,倾角 81°~87°,间距 50~200 cm;④走向 N70°E~EW,倾向 SE~S,倾角 66° ~86°。其中 b、e、d 组节理宽度 1~5 mm,个别 为 10 mm,充填岩屑或泥,节理面以平直粗糙为 主。详细的结构面组合见表 1。表 1 中边坡的倾 向、倾角均取平均值。各种结构面的φ值见表 2。

表1 进口侧山体结构面统计表

Table 1 Statistics of structural surface in inlet side

坡面产状	名称	结构面编号	倾向/°	倾角/ °
	F_7	P_1	275	85
	F ₂₃	P_2	340	65
	F_6	P ₃	280	63
倾向0°	$\xi_{\pi-7}$	P_4	197	20
倾角 57°	\mathbf{J}_1	P_5	350	35
	J_2	P_6	125	66
	J_3	P_7	230	84
	J_4	P_8	160	76

表 2 各种结构面的 φ 值

Table 2 φ value of all structural surfaces

结构面	岩脉	断层	灰岩层面	其他节理
φ值/°	26.6	14	24. 2	21.8

2.2 可动块体的查找

(1) 非空裂隙锥的搜索

通过赤平投影法对各结构面进行投影,一个区 域代表一个非空裂隙锥,利用块体的数字编号法对 各非空裂隙锥进行 JP 编号^[13]。

(2) 可动块体的搜索

根据可动性定理,块体可动的充分必要条件是 JP $\neq \phi$,且JP \cap EP = ϕ 。通过非空裂隙锥与结构面 的组合可以确定空间内所有的可动块体^[13],搜索 结果见表 3。

表 3 可动块体的 JP 编号 Table 3 JP numbers of movable blocks

10000000	00000010	10000010	11000010	10100011
00000001	10100010	00000011	10000011	10110010
00000111	00010111	00110111	10010111	10110111
10000111	10100111	10110011	10111011	11110011
11110010				

2.3 关键块体的判别

(1) 各运动形式下,块体的 JP 编号和净滑力的计算

设主动力合力 $\vec{r} = W\hat{r}, \vec{r} = (0, 0, -1)$ (即仅 考虑自重),通过计算机程序,求出各运动方向、JP 编号及净滑力,计算结果见表4。

键块体 JP 编号为 1111111、01111111、00111111、 01011101、00110111、11111010、 11111101 11111110、 10111111 10110111 01111000、 01111101、 01111100、 00011101、 10111011、 00111101 00010111、 00011111, 01011100、 00010101、11111000、11111011、11111100。

(2) 关键块体判别

结合块体计算分析,由8组优势结构面与边坡 临空面形成的可动块体共21块,可动块体的JP编 号见表3。运用关键块体的判别方法(即当净滑力 F>0时,块体为关键块体),将该边坡中的关键块 体从已经识别出的21块可动块体中分离出来,得 到4块关键块体,详细信息见表5。

通过块体的 JP 编号,找出所有结构面组合下 的无限裂隙锥;与临空面组合,得到可动块体;再 通过自重下块体稳定性判别得到关键块体。通过计 算机编程,计算自重作用仅考虑内摩擦角的情况下 各个可动块体的净滑力F(表4)。当F>0时,该 块体为关键块体(表5)。 由图 1 和表 5 可以看出,该边坡处存在着 4 个 关键块体。关键块体的组合情况:第一组: F_7 、 F_6 、 $\xi_{\pi-7}$ 、 J_1 、 J_3 ;第二组: F_7 、 F_6 、 J_1 ;第三组:

表4	各运动方向矢量及相应运动方式的 JP 编号及 $ar{r}$, \hat{s}_i , \hat{s}_{ij}	

Table 4	JP num	per and	lr,	s_i ,	s _{ij} of	vector	r and	corresponding	g movement	t pattern	under	different	directions
---------	--------	---------	-----	---------	--------------------	--------	-------	---------------	------------	-----------	-------	-----------	------------

运动方向	Х	Y	Z	JP 编号	净滑力/F 运	动方向	Х	Y	Z	JP 编号	净滑力/F
\overrightarrow{r}	0	0	- 1	11111111	W	ŝ ₂₆	0.65849	0. 512 95	-0.5507	10111011	0.006 1W
\hat{s}_1	-0.086 82	0.007 60	-0.996 19	01111111	0.974 46W	ŝ ₂₇	-0.372 41	0.300 23	-0.878 16	00111101	0.664 56W
\hat{s}_2	-0.144 54	0.397 13	-0.906 31	00111111	0.800 94W	ŝ ₂₈	-0.93969	-0.342 02	0	00001100	-0.960 43W
\hat{s}_3	-0.447 09	0.078 83	-0.891 01	01011101	0.777 81W	ŝ ₃₄	-0.331 71	-0.87944	-0.341 40	01001000	-0.129 56W
\hat{s}_4	-0.274 74	-0.898 63	-0.342 02	01101000	-0.128 54W	ŝ ₃₅	-0.154 9	0.804 41	-0.57353	00010111	0. 245 62W
\hat{s}_5	-0.142 24	0.80671	-0.573 58	00110111	0.245 94W	ŝ ₃₆	-0.361 06	-0.836 15	-0.412 9	01011000	-0.210 03W
\hat{s}_6	0.333 18	-0.233 29	-0.913 55	11111010	0.750 86W	ŝ ₃₇	-0.389 35	0.322 97	-0.862 61	00011111	0. 592 37W
\hat{s}_7	-0.080 07	-0.067 19	-0.994 52	11111101	0.952 71W	ŝ ₃₈	-0.476 84	-0.383 42	-0.79096	01011100	0.469 59W
\hat{s}_8	0.082 74	-0.227 33	-0.970 30	11111110	0.873 53W	ŝ ₄₅	-0.993 74	-0.014 53	-0.110 81	00000101	-0.400 83W
ŝ ₁₂	-0.041 32	0.432 02	-0.900 91	10111111	0.757 10W	ŝ ₄₆	-0.409 31	-0.847 29	-0.338 47	01001100	-0.167 91W
ŝ ₁₃	0.067 73	0.977 03	-0.202 06	10010111	-0.998 33W	ŝ ₄₇	0. 613 43	-0.763 85	-0.200 59	11101010	-0.447 54W
ŝ ₁₄	-0.111 40	-0.934 81	-0.337 23	11101000	-0.152 14W	\hat{s}_{48}	-0.893 47	-0.386 08	-0.229 46	01001101	-0.429 50W
ŝ ₁₅	0.022 44	0.824 31	-0.565 69	10110111	0.205 32W	ŝ ₅₆	0.65944	0.653 97	-0.37077	10110011	-0.138 56W
ŝ ₁₆	-0.123 01	-0.712 16	-0.691 15	01111000	0.029 06W	ŝ ₅₇	-0.594 67	0.626 26	-0.504 15	00010101	0.042 58W
ŝ ₁₇	-0.091 96	-0.052 99	-0.994 35	01111101	0.953 45W	ŝ ₅₈	0.943 16	0.315 91	-0.103 16	11110010	-0.549 67W
ŝ ₁₈	-0.108 98	-0.291 80	-0.950 25	01111100	0.767 45W	ŝ ₆₇	0.209 16	-0.395 5	-0.894 33	11111000	0.641 05W
ŝ ₂₃	-0.399 94	0.28647	-0.870 62	00011101	0.733 65W	ŝ ₆₈	0. 431 36	-0.081 40	-0.898 50	11111011	0. 522 87W
ŝ ₂₄	-0.949 20	-0.251 85	-0.188 67	00001101	-0.332 22W	ŝ ₇₈	0.063 49	-0.234 29	-0.970 09	11111100	0.867 85W
ŝ ₂₅	0. 893 80	0.412 56	-0.175 81	11110011	-0.781 92W						

表 5 关键块体组合 Table 5 Combination of key blocks

滑动方向	JP 编号	组成块体的结构面组合
ŝ ₃₅	00010111	P5、P3、P1、P4、P7、临空面
\hat{s}_5	00110111	P5、P3、P1、临空面
ŝ ₁₅	10110111	P1、P5、P6、P4、P3、临空面
ŝ ₂₆	10111011	P2、P6、P5、临空面

 F_7 、 F_6 、 $\xi_{\pi-7}$ 、 J_1 、 J_2 ; 第四组: F_{23} 、 J_1 、 J_2 。各关 键块体的运动形式: 第一组沿 F_6 、 J_1 的交线滑动; 第二组沿 J_1 滑动; 第三组沿 F_7 、 J_1 的交线滑动; 第 四组沿 F_{23} 、 J_2 的交线滑动。通过表 4 中各关键块 体的净滑力值,可以看出前三组块体的净滑力为 0.2 W,较第四组大很多,因此,前三组关键块体 更容易滑动,对山体边坡的稳定造成威胁。

3 结论

针对某水电站引水洞进水侧岩体边坡,识别了 4 个关键块体,其 JP 编号和组成情况为: 00010111 (P5、P3、P1、P4、P7、临空面)、 00110111 (P5、P3、P1、临空面)、10110111 (P1、P5、P6、P4、P3、临空面)、10111011 (P2、P6、P5、临空面)。前三个关键块体的净滑 力较大,工程中应当重点考虑。

参考文献:

[1] 刘锦华. 块体理论在工程岩体稳定分析中的应用
 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1988: 3-80.
 LIU Jin-hua. Application of block theory in the analysis of stability of engineering rock mass [M]. Beijing: Chi-

na Water Power Press, 1988: 3-80.

- [2] 石根华. 岩体稳定性分析的赤平投影法 [J]. 中国科 学,1977 (3): 320-350.
 SHI Gen-hua. Stereographic projection of analysis of block stability [J]. Science China, 1977 (3): 320-350.
- [3] 刘向飞,齐伟,高凤怀. 块体理论在 LPG 地下储库
 围岩稳定性分析中的应用 [J]. 世界地质,2010,29
 (4): 628-632.

LIU Xiang-fei , QI Wei , GAO Feng-huai. Application of block theory in stability analysis on the surrounding rocks of LPG underground storage [J]. Global Geology ,2010 , 29 (4): 628-632.

- [4] Hoek E , Kaiser P K , Bawden W F. Support of underground excavation in hard rock [M]. New York: A A Balkema Publishers , 1995: 80-95.
- [5] 张莉丽,于青春. 一般块体方法理论解验证 [J]. 水 文地质工程地质,2010,37 (6):55-60.
 ZHANG Li-li,YU Qing-chun. Theoretical validation on general block method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2010,37 (6):55-60.
- [6] 杨文东,范高军. 边坡关键块体的神经网络预测法
 [J]. 国外建材科技,2007,28(5):82-84.
 YANG Wen-dong, FAN Gao-jun. Slope of the key block neural network prediction method [J]. Foreign Materials Science and Technology,2007,28(5):82-84.
- [7] 王述红,张靖杰,李云龙,等. 工程岩体开挖过程全空间块体搜索及其系统研制 [J]. 东北大学学报: 自然科学版,2010,31 (7): 1026-1029.
 WANG Shu-hong, ZHANG Jing-jie, LI Yun-long, et al. Quickly spatial identification process of blocks during rock excavation and its system modeling [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2010,31 (7): 1026-1029.
- [8] 张奇华,邬爱清.随机结构面切割下的全空间块体拓 扑搜索一般方法 [J].岩石力学与工程学报,2007, 26 (10): 2043-2048.

ZHANG Qi-hua , WU Ai-qing. General methodology of spatial block topological identification with stochastic discontinuities cutting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2007 , 26 (10): 2043-2048.

- [9] 王述红,杨勇,王洋,等. 基于数字摄像测量的开 挖空间模型及不稳定块体的快速识别 [J]. 岩石力 学与工程学报,2010,29 (12): 3432-3438.
 WANG Shu-hong, YANG Yong, WANG Yang, et al. Spatial modelling and quick identification of unstable rock blocks based on digital photogrammetry [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29 (12): 3432-3438.
- [10] 王述红,王勇,王洋,等.裂隙岩体隧道施工关键 块体识别数值方法 [J].地下空间与工程学报, 2009,5(5):976-979.

WANG Shu-hong , WANG Yong , WANG Yang , et al. Numerical method of key block identification for jointed rock tunnel construction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering , 2009 , 5 (5): 976– 979.

- [11] 张国新,李海枫,董涛,等. 三维不连续变形分析 理论及其在岩质边坡工程中的应用 [J],岩石力学 与工程学报,2010,29 (10): 2026-2116.
 ZHANG Guo-xin, LI Hai-feng, DONG Tao, et al. Three-dimensional discontinuous deformation analysis theory and its applyication to rock slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (10): 2026-2116.
- [12] 卢达. 基于赤平投影法的岩质边坡稳定性分析
 [J]. 铁道建筑, 2010 (11): 69-71.
 LU Da. Rock slope stability analysis based on stereographic projection method [J]. Railway Construction, 2010 (11): 69-71.
- [13] 闫和雷. 浦西河抽水蓄能电站地下厂房围岩块体稳 定性研究:硕士学位论文 [D]. 长春:吉林大学, 2007.

YAN He-lei. A study on block stability in the surrounding rock of underground cavities in Puxihe pumped-storage power station: master's degree thesis [D]. Changchun: Jilin University , 2007.



免费论文查重: <u>http://www.paperyy.com</u> 3亿免费文献下载: <u>http://www.ixueshu.com</u> 超值论文自动降重: <u>http://www.paperyy.com/reduce_repetition</u> PPT免费模版下载: <u>http://ppt.ixueshu.com</u>