

# 裂隙化岩体中圆形断面调压井围岩稳定性分析

郝健<sup>1</sup> 何鹏<sup>2</sup> 吴赛钢<sup>2</sup>

(1. 解放军 78188 部队, 四川成都 610213; 2. 四川大学水利水电学院, 四川成都 610065)

**【摘要】** 块体理论是适用于裂隙化岩体变形失稳分析的有效方法。运用块体理论赤平投影法研究某水电站超大型调压井围岩随机块体的稳定性, 将圆形断面调压井开挖临空面抽象简化为八个方位的边墙加以研究, 分析了井周各部位可能的关键块体及其运动形式, 计算了关键块体的净滑力。分析结果对工程施工具有可靠的现实指导作用, 为锚固设计和永久衬砌设计提供了依据, 可供类似工程参考。

**【关键词】** 裂隙岩体; 块体理论; 圆形调压井; 随机块体; 稳定性

**【中图分类号】** TV 732.53; TU 457

## Stability Analysis of Surrounding Rock of Circular Surge Shaft in Fissured Rock Mass

Hao Jian<sup>1</sup> He Peng<sup>2</sup> Wu Saigang<sup>2</sup>

(1. Troop 78188 of the PLA, Chengdu Sichuan 610213;

2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065 China)

**【Abstract】** Block theory is an effective and reliable engineering analysis method for the stability of fissured rock mass. Based on stereographic projection, an analysis is made for the stability of random blocks in surrounding rock of a certain circular surge shaft of a hydropower station. During the study with stereographic projection cylindrical free surface is simply converted to eight walls. Potential key blocks and their moving modes are studied and the values of sliding force of those blocks are worked out. This could be a direction to the design of excavating, anchoring and permanent lining of those walls, and also a reference to similar projects.

**【Key Words】** fissured rock mass; block theory; circular surge shaft; random block; stability

### 0 引言

岩体的力学介质类型基本可分为连续介质岩体、碎裂介质岩体、裂隙化(块裂)介质岩体和板裂介质岩体四类<sup>[1]</sup>。针对不同的岩体介质类型, 分析研究的方法也不同。裂隙化岩体的变形和破坏主要受控于岩体中的结构面, 失稳破坏形式往往是沿结构面滑动或脱离, 结构面两侧岩体的应力、应变不连续。因此, 弹塑性力学方法在解决裂隙化岩体工程问题时具有一定的局限性, 需要采用非连续岩体力学的方法。石根华和 R. E. Goodman 创立的块体理论<sup>[2]</sup>, 经过十几年的工程实践检验和丰富发展, 是适用于分析裂隙化岩体稳定性的有效方法。

本文针对某水电站超大型调压井围岩实际情况, 运用块体理论对围岩的开挖稳定性进行不定位随机块体分析<sup>[3]</sup>, 预测井周围岩可能出现的关键块体及其稳定性, 为调压井施工开挖和围岩支护设计提供依据。

### 1 工程地质条件

某引水式电站超大型调压井位于三面临空且呈

NE 向展布的长条形单薄山脊中, 山体岩性为晋宁—澄江期中—细粒黑云母花岗岩, 地面标高约 1 325 m, 设计为开敞差动式调压井, 断面为圆形, 开挖直径 31 m, 井筒高 111 m。

地质勘察资料显示, 调压井上部 1 260 m 高程以上为强卸荷岩体, 岩体破碎、完整性差, 呈碎块状结构, 属 V—IV 类围岩。调压井中下部围岩以次块状、块状结构为主, 属 III—II 类围岩, 弹性模量为 12~18 GPa。调压井中下部发育的优势裂隙组和断层见表 1。

表 1 调压井中下部围岩结构面产状

结构面	产 状			间距 /m	长度 /m	结构面特性
	走向/(°)	倾向	倾角/(°)			
J <sub>1</sub>	NE 65~80	NW	75°~85°	0.3~1	3~5	发育面粗糙
J <sub>2</sub>	NW 0~10	SW	78°~85°	0.4~0.6	2	
J <sub>3</sub>	NE 65~75	SE	30°~42°			
J <sub>4</sub>	NW 5~25	SW	10°~30°	1~2	5~10	发育面光滑
断层 F	NE 55~70	NW	70°~85°			

## 2 调压井围岩稳定性分析

调压井上部围岩风化强烈,呈碎块状结构,成井条件差,设计施工方案为边开挖边浇筑永久混凝土衬砌,在此不作研究。研究重点为中下部裂隙化岩体的开挖稳定性。

### 2.1 圆柱形临空面的抽象与简化

调压井横断面为圆形,开挖临空面为竖直圆柱面。由于圆柱形临空面在下极射全空间赤平投影图上难以表达,必须将圆柱面简化为平面。在此,将圆柱形临空面简化为其内接正八棱柱面,横断面由圆形简化为其内接正八边形(见图 1),分别按东、西、南、北、北东、北西、南东、南西八个方位的边墙(Wall-E、Wall-W、Wall-S、Wall-N、Wall-NE、Wall-NW、Wall-SE、Wall-SW)考虑。在进行上述抽象与简化的同时,应当注意到边墙临空面的长度不应超过调压井的开挖直径 31 m,在进行最大关键块体分析<sup>[4]</sup>时,必须予以考虑。

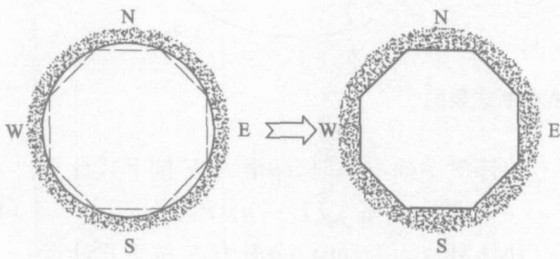


图 1 临空面的转化

### 2.2 各部位可动块体分析

在对圆柱形临空面抽象简化的基础上,根据结构面和临空面的各种组合关系,进行井周围岩的随机块体分析。

由块体可动的判定条件: $JP \neq \Phi$  且  $JP \subset SP$ ,下极射全空间赤平投影图上,若非空裂隙锥  $JP$  对应的投影区域完全包括在空间锥  $SP$  内,则该区域对应的块体可动。

通过分析,各边墙内可动块体对应  $JP$  编号、位置和组成  $JP$  的结构面见表 2。

表 2 可动块体分析成果

序号	块体可能出现部位	$JP$ 编号	$JP$ 组成
1	Wall-E, Wall-S, Wall-SE	00111	$J_1, J_2, F$
2	Wall-E, Wall-SE	00110	$J_1, J_2, J_4, F$
3	Wall-E, Wall-SE, Wall-NE	10110	$J_1, J_4, F$
4	Wall-E, Wall-N, Wall-SE, Wall-NE	10100	$J_1, J_3, J_4, F$
5	Wall-E, Wall-N, Wall-NE	10101	$J_3, J_4, F$
6	Wall-E, Wall-NE	10111	$J_1, J_2, J_3, J_4, F$
7	Wall-W, Wall-SW	01000	$J_1, J_2, J_3, J_4, F$

续表

序号	块体可能出现部位	$JP$ 编号	$JP$ 组成
8	Wall-W, Wall-SW, Wall-NW	01001	$J_1, J_4, F$
9	Wall-W, Wall-S, Wall-SW, Wall-NW	01011	$J_1, J_3, J_4, F$
10	Wall-W, Wall-S, Wall-SW	01010	$J_3, J_4, F$
11	Wall-W, Wall-NW	11001	$J_1, J_2, J_4, F$
12	Wall-W, Wall-N, Wall-NW	11000	$J_1, J_2, F$
13	Wall-N	10000	$J_1, J_2, J_3, F$
14	Wall-N, Wall-NE	10001	$J_2, J_3, J_4, F$
15	Wall-N, Wall-NE, Wall-NW	10011	$J_2, J_3, J_4$
16	Wall-S	01111	$J_1, J_2, J_3, F$
17	Wall-S, Wall-SW	01110	$J_2, J_3, J_4, F$
18	Wall-S, Wall-SW, Wall-SE	01100	$J_2, J_3, J_4$
19	Wall-NW	11011	$J_1, J_2, J_3, J_4$
20	Wall-SE	00100	$J_1, J_2, J_3, J_4$

### 2.3 可动块体运动形式分析

由于调压井处于三面临空的长条形单薄山脊中,河谷下切作用已使山体内的构造应力释放殆尽,岩体应力场主要受自重应力控制。工区处在地下水位以上,裂隙岩体的力学特性不受地下水的影响。因此,围岩块体所受的主动合力  $\vec{r}$  仅考虑为块体自重  $G$ ,其矢量形式为  $(0, 0, -G)$ 。按照块体理论赤平投影法对块体运动形式的判定方法,分析各可动块体的运动形式。

#### 1) 块体脱离岩体运动

在全空间赤平投影图上,若主动合力的投影点落在某个  $JP$  内,则该  $JP$  对应块体的运动形式为脱离岩体的运动。

#### 2) 块体沿单面滑动

全空间赤平投影中,沿结构面  $i$  滑动的块体对应的  $JP$  的投影区域必在包括  $s_i$  ( $\vec{r}$  在结构面  $i$  上的投影点)的圆弧的一侧,且在平面  $i$  不包括  $\vec{r}$  的岩体半空间内。

#### 3) 块体沿双面滑动

块体沿双面滑动,必沿两平面的交线滑动,滑动方向应与  $\vec{r}$  同处在以  $\vec{r}$  ( $\vec{r}$  的单位向量)为法线的平面  $P_r$  的同一个半空间内。在全空间赤平投影图上,相应于沿双平面  $i$  和  $j$  滑动的块体对应的  $JP$  投影区域必以二平面的交线的投影点  $s_{ij}$  为一个角点,同时该  $JP$  必在平面  $j$  不包括  $s_i$  的半空间和平面  $i$  不包括  $s_j$  的半空间内。当块体主动合力仅为自重时,  $P_r$  为赤道圆,滑动方向应指向平面  $i$  和  $j$  的赤平投影在赤道圆外的交点。

通过分析,本工程中未出现脱离岩体运动的块

体,沿单面滑动块体有5种滑动形式,沿双面滑动块体有10种滑动形式。块体的运动形式分析结果见图2。

为保持图表清晰,图2中仅列出东、西、南、北四个方位边墙的投影。

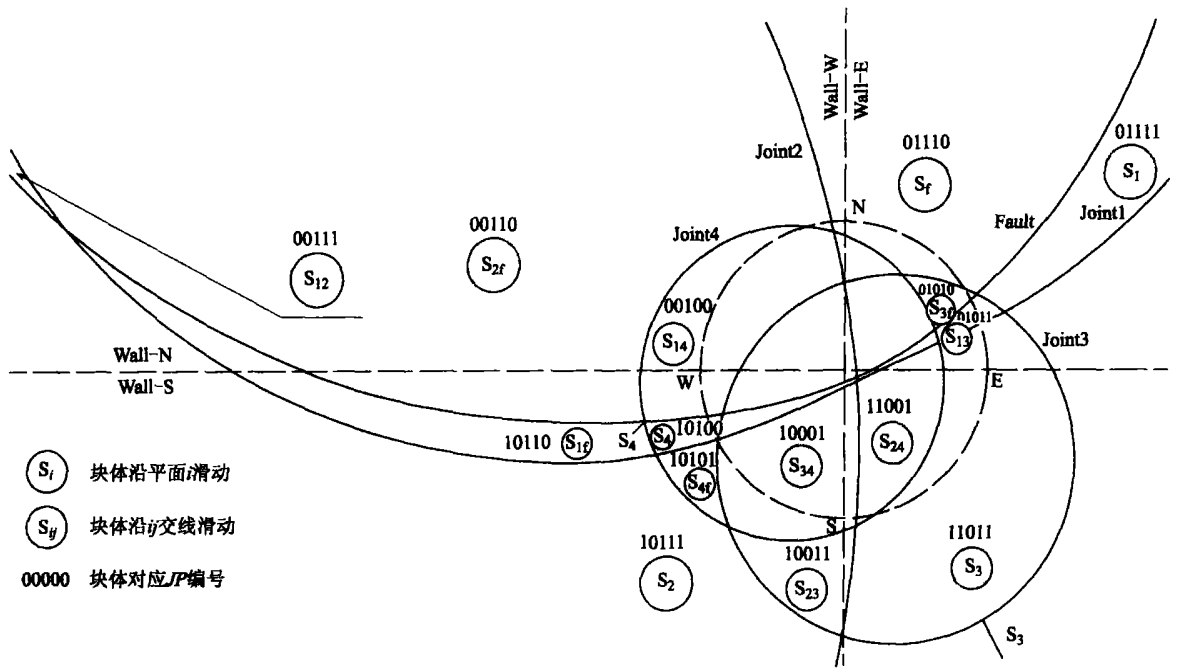


图2 可动块体运动形式分析成果图

2.4 可能失稳块体和关键块体净滑力计算

通过可动块体运动形式分析,排除了可动块体中的稳定块体,仅对可能失稳块体和关键块体作出力学分析。

根据地勘资料,调压井下部以Ⅲ类围岩为主,岩体结构面摩擦系数为0.65~0.75,取平均值0.7进行计算,结构面粘聚力c值为0。

五组结构面法线向量分别为:

- $\hat{n}_f = (-0.457\ 439, \ 0.860\ 318, \ 0.224\ 951)$
- $\hat{n}_1 = (-0.304\ 322, \ 0.936\ 608, \ 0.173\ 648)$
- $\hat{n}_2 = (-0.986\ 500, \ -0.086\ 308, \ 0.139\ 173)$
- $\hat{n}_3 = (0.201\ 034, \ -0.552\ 337, \ 0.809\ 017)$
- $\hat{n}_4 = (-0.330\ 366, \ -0.088\ 521, \ 0.939\ 693)$

块体沿单面滑动时,净滑力F按下式计算:

$$F = |\hat{n}_i \times \vec{r}| - |\hat{n}_i \cdot \vec{r}| \tan \varphi_i \quad (1)$$

块体沿双面滑动时,净滑力F按下式计算:

$$F = \frac{1}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|^2} [ |\vec{r}(\hat{n}_i \times \hat{n}_j)| |\hat{n}_i \times \hat{n}_j| - |(\vec{r} \times \hat{n}_j)(\hat{n}_i \times \hat{n}_j)| \tan \varphi_i - |(\vec{r} \times \hat{n}_i)(\hat{n}_i \times \hat{n}_j)| \tan \varphi_j ] \quad (2)$$

式中:F为块体净滑力,N;

$\hat{n}_i, \hat{n}_j$ 为结构面i和j的单位法线向量;

$\varphi_i, \varphi_j$ 为结构面i和j的内摩擦角;

$\vec{r}$ 为块体主动力的合力,N。

可能失稳块体和关键块体净滑力和安全系数计算分析结果见表3。

表3 可能失稳块体和关键块体运动形式及净滑力计算分析成果

序号	运动形式	JP 编号	块体可能出现部位	净滑力 F/N	安全系数 $F_s$
1	沿 $J_1$ 滑动	01111	Wall-S	0.86 G	<1
2	沿 $J_2$ 滑动	10111	Wall-E, Wall-NE	0.89 G	<1
3	沿 $J_3$ 滑动	11011	Wall-NW	0.02 G	<1
4	沿 $J_4$ 滑动	10100	Wall-E, Wall-N, Wall-NE, Wall-SE	-0.32 G	1.9
5	沿 F 滑动	01110	Wall-S, Wall-SW	0.82 G	<1
6	沿 $J_1 J_2$ 交线滑动	00111	Wall-E, Wall-S, Wall-SE	0.80 G	<1
7	沿 $J_1 J_3$ 交线滑动	01011	Wall-S, Wall-W, Wall-NW, Wall-SW	-1.2 G	54.5
8	沿 $J_1 J_4$ 交线滑动	00100	Wall-SE	-0.32 G	1.9

续表

序号	运动形式	JP 编号	块体可能出现部位	净滑力 $F/N$	安全系数 $F_s$
9	沿 $J_1F$ 交线滑动	10110	Wall-E, Wall-NE, Wall-SE	-1.31 $G$	2.4
10	沿 $J_2J_3$ 交线滑动	10011	Wall-N, Wall-NE, Wall-NW	-0.12 $G$	1.2
11	沿 $J_2J_4$ 交线滑动	11001	Wall-W, Wall-NW	-0.98 $G$	15.8
12	沿 $J_2F$ 交线滑动	00110	Wall-E, Wall-SE	0.80 $G$	<1
13	沿 $J_3J_4$ 交线滑动	10001	Wall-N, Wall-NE	-0.40 $G$	2.3
14	沿 $J_3F$ 交线滑动	01010	Wall-S, Wall-W, Wall-SW	-1.1 $G$	13.6
15	沿 $J_4F$ 交线滑动	10101	Wall-E, Wall-N, Wall-NE	-0.36 $G$	2.1

注:  $G$  为重力,  $N$

参照一般工程经验,将安全系数大于 1.5 的可动块体视为稳定的块体。

以上计算方法和过程均用面向对象程序设计语言 C++ 编写了分析计算程序,实现了分析计算过程的规范化、系统化和自动化。

从分析计算结果可以看出,调压井中下部北西侧、北侧、北东侧、东侧、南东侧、南侧、南西侧围岩稳定性较差。北西侧可能产生沿  $J_3$  及  $J_2J_3$  交线滑动的关键块体;北侧可能产生沿  $J_2J_3$  交线滑动的关键块体;北东侧可能产生沿  $J_2$  及  $J_2J_3$  交线滑动的关键块体;东侧可能产生沿  $J_2$ 、沿  $J_1J_2$  交线和沿  $J_2F$  交线滑动的关键块体;南东侧可能产生沿  $J_1J_2$  交线和  $J_2F$  交线滑动的关键块体;南侧可能产生沿  $J_1$ 、沿  $F$  和沿  $J_1J_2$  交线滑动的关键块体;南西侧可能产生沿断层  $F$  滑动的关键块体。各部位关键块的净滑力大多在 0.8  $G$  以上。西侧围岩稳定性较好,在五组结构面切割下,未产生大规模的关键块体。

在此基础上,可根据构成关键块体的各组结构面的长度和间距,确定关键块体的体积和重力  $G$  值,并据此作出锚固设计。关键块体的实际大小,必须根据开挖实际揭示的结构面相对位置作出准确计算,并根据计算结果修改锚固方案。

### 3 结 论

1)根据块体理论分析结果,调压井施工开挖和支护设计时应应对中下部北西侧、北侧、北东侧、南东侧、南侧和南西侧围岩稳定性高度重视。

2)将调压井圆柱形临空面抽象简化为内接正八棱柱面,按八个方位的边墙加以研究,可使开挖面在赤平投影图上得到合理的表达,实现井周围岩随机块体稳定性分析。

3)运用块体理论分析裂隙化岩体的稳定性,能够抓住稳定性问题的主要控制因素,所得成果对工程施工有一定的指导意义。块体理论是解决此类工程问题的合理可靠的分析方法。

### 参 考 文 献

- [1] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京:科学出版社,1988.
- [2] 刘锦华,吕祖珩. 块体理论在工程岩体稳定分析中的应用[M]. 北京:水利电力出版社,1988.
- [3] 黄正加,邬爱清,盛 谦. 块体理论在三峡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,20(5):684-652
- [4] 张奇华,邬爱清,石根华. 关键块体理论在百色水利枢纽地下厂房岩体稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(15):2609-2614

收稿日期:2006-07-14