

在大型地下开挖中围岩块体稳定性分析

谢 晔¹, 刘 军², 李仲奎³, 张倬元¹

(1. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 北京市政工程研究院, 北京 100037;
3. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 由于关键块体是地下工程开挖后首先失稳的块体, 因此被引起高度重视。关键块体理论最初是由石根华提出的, 该理论未深入探讨复杂多面体块体及块体出露位置的确定。Unwedge 程序是由 E. Hoek 等依据关键块体理论而开发的用于分析块体稳定性的软件, 该软件考虑的块体形态简单、仅考虑自重作用而不能确定块体的出露位置, 使其应用受到较大的限制。结合大型地下工程, 依据块体理论编制程序, 该程序考虑动荷载的影响及复杂形态的块体, 并能准确地判断块体的出露位置。最后将二者的计算结果进行比较。

关键词: 岩石力学; 关键块体; 稳定性分析; Unwedge 程序; 地下开挖

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2006)02-0306-06

STABILITY ANALYSIS OF BLOCK IN SURROUNDING ROCK MASS OF LARGE UNDERGROUND EXCAVATION

XIE Ye¹, LIU Jun², LI Zhong-kui³, ZHANG Zhuo-yuan¹

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;
2. Beijing Municipal Engineering Research Institute, Beijing 100037, China;
3. Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The key block has received a lot of attention in underground engineering because it loses stability first after excavation. The block theory originally proposed by Shi doesn't deeply discuss the geometric characteristics and explain how to determine the precise locations of the key block. Therefore, the Unwedge program based on key block theory can not predict complicated polyhedral block and determine its precise location. In this paper, the stability of key block of a large underground excavation is analyzed in detail. First, the Unwedge program (Ver.2.35) is used to identify possible key blocks and some limitations are discussed. Then, many kinds of geometric models of polyhedral key block are set up and a new computer program is developed to search key blocks and determine their precise locations considering the action of gravity and dynamic loadings. Finally, the results of the two methods are compared and the differences between them are analyzed.

Key words: rock mechanics; key block; stability analysis; Unwedge program; underground excavation

1 引言

岩体是一种复杂的地球介质, 包含有各种结构面。这些结构面将岩体切割成各种形态的空间结构

体——块体。在地下开挖中, 岩体主要的破坏方式就是由不稳定块体的运动造成的。实地调研表明, 块体不稳定性是开挖工程失稳的最主要的形式^[1]。H. Park 和 T. R. West(2001)^[2]提出了一种模拟程序对岩体楔形破坏进行概率分析。然而, 不能将该程序

收稿日期: 2005-08-22; **修回日期:** 2005-09-21

作者简介: 谢 晔(1976-), 女, 1996 年毕业于成都理工大学水文地质与工程地质专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: xy@cdu.edu.cn.

用于现场不稳定块体的研究，因为随机信息基本上只显示了总趋势，而没有表明现场的条件^[3]。R. E. Goodman 和 G. H. Shi(1985)^[4]指出开挖设计应基于单个关键块体的状况，他们的方法可以确定洞室周围的临界块体。在关键块体理论上，E. Hoek 等^[5]开发了 Unwedge 程序。该程序被设计成一种快速的、互动的、简单的开发工具，可用于分析地下块体的几何特征和其稳定性。然而，在设计地下洞室的支撑系统时，不仅应了解其几何特征，而且应知道在洞室中自由层面的准确位置。本文运用块体理论对西南某大型水电站的地下厂房进行了研究，厂房尺寸为 436.0 m×33.8 m×57.4 m(长×宽×高)。首先运用 Unwedge 程序找出这次开挖中围岩的可能的关键块体，并论述了其局限性，接着以 SASW 程序(在边坡工程中用来研究块体稳定性的计算机程序)和块体理论为基础，开发了一个程序，在全面考虑到重力和动力荷载的作用下，在地下开挖工程中寻找关键块体，并确定其精确位置；最后，比较两种方法的计算结果，并分析其差异性。在研究关键块体的核心算法时，建立了多种多面岩块的几何模型，包括其平面结构、四面结构和其组成形式。这些多面块体可能会出现出现在洞室的顶拱部、边墙部或顶拱与边墙交界处。

2 结构面的现场调查研究

拟建水电站的主厂房、主变室和尾调室三大地下洞室与进水压力管道及尾水洞紧密布置在两岸坝肩附近，构成复杂的地下洞室群。坝址区为高山峡谷地形，崖壁陡峭。坝址区主要由二叠系后期玄武岩岩流层构成，可以辨别出 14 层，此次地下开挖主要是在第 3~6 层进行的，在洞室的周围除了出现 3 类结构面，例如层间错动带(C)、层内错动带(Lc)和陡倾向基体裂隙(J)，没有发现断层。第 1 类结构面 C 的分布范围最广，是整个地区的控制性结构面；第 2 类结构面 Lc 的范围比第 1 类要小些，它主要集中在岩流层内部的构造错动带；第 3 类结构面 J 的范围是最小的。以实地调查为基础，块体主要是由 Lc 或 Lc 和 J 构成的，因此 Lc 层为该地区最重要的结构面，如图 1 所示，显示出 Lc 层的优势方向。由图 1 可知，有两个 Lc 层，倾向都是 SE，倾角不同，一个为 15°~30°，另一个为 40°~55°，Lc 层的

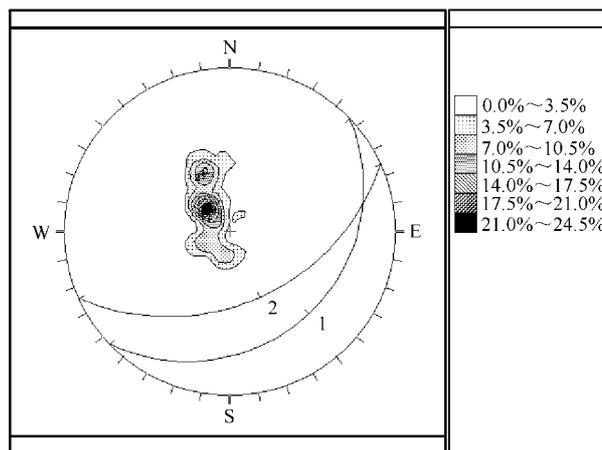


图 1 Lc 的优势方向

Fig.1 Preferred orientations of Lc

伸展长度为 30~150 m。若 J 层的扩展长度足够大，J 层对块体稳定性是非常重要的，通过详细的现场研究，J 层的伸展长度为 3~25 m。

3 Unwedge 程序的应用

作为实例研究，Unwedge 程序被用于此大型地下开挖工程的块体，块体稳定分析结果如表 1 所示。

表 1 块体稳定分析结果

Table 1 Results of block stability analysis

块体编号	结构面	块体特性			离洞口距离/m
		底滑面	质量/(1 000 kg)	稳定性系数	
a	Lc3(3), Lc4(3), Lc1(6)	Lc1 (6)	1 845.80	1.36	160
b	Lc5(3), Lc4(3), Lc1(6)	Lc4 (3)	658.12	0.89	200
c	Lc6(3), J21, J22	J22	42.35	0.63	240
d	Lc10(3), Lc11 (3), Lc13(3)	Lc13 (3)	82.54	0.60	310
e	Lc1(3), Lc2(3), J11	J11	30.41	1.24	60
f	Lc3(3), J18, J19	崩塌	9.57	0.00	130

注：离洞口距离代表开挖工程沿 x 轴的零点到开挖的距离。

图 2 所示为地下洞室的块体类型。

尽管 Unwedge 程序能方便、有力地确定洞室中的块体，但由于忽略了爆破的地震的影响，并且块体的几何结构简单，位置不确定，因此应谨慎地使用。实例表明，在大型开挖中的围岩，像五面块体

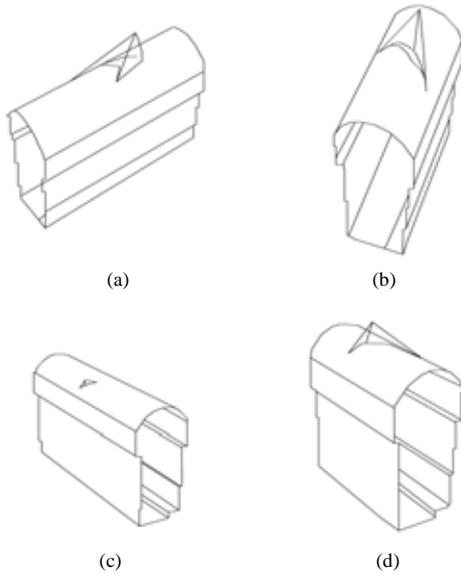


图 2 地下洞室的块体类型
Fig.2 Typical blocks of underground cavern

和六面块体这样具有复杂几何构成的块体是非常普遍的，另外，可能的不稳定块体由于其不确定的位置仍可能导致在设计所需的支撑系统时误入盲区。因此，对于该程序确定的块体应在实地调研过程中进一步选择和分析。

4 依块体理论编制的程序

作为实例研究，为了消除 Unwedge 程序的一些局限性，开发了另一套可以建立可能的不稳定块体几何特征和决定其位置的程序，该程序以 1998 年由许强^[6]开发的 SASW(边坡块体稳定性分析程序)为基础。

在此，提出如下假设，其中一些假设同 Unwedge 程序中的假设相似：每一个间断层可以被描述成完全平面的；所有的由间断层交错构成的岩块是刚性的，忽略岩块本身的破坏；岩块的破坏性是由于在各种载荷下沿着结构面的剪切位移造成的。

4.1 块体的几何特征

图 3 所示为本文所选坐标系。H 为边墙高；L 为洞室的长度；a, b 分别指代椭圆顶的半径。因此，洞室的顶拱可表示如下：

$$\left(\frac{z}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1 \tag{1}$$

两侧边墙方程：

$$y = \pm b \tag{2}$$

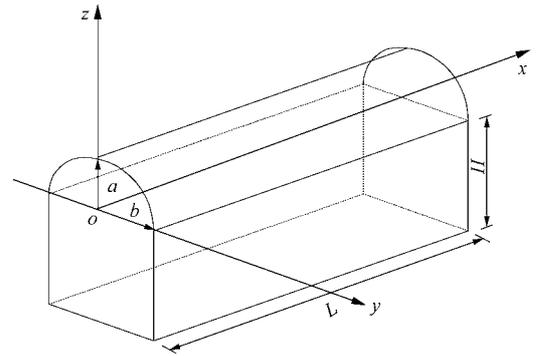


图 3 本文所选坐标系
Fig.3 Coordinate system selected in this paper

由解析几何可知，在直角坐标系中空间平面可表示为

$$Ax + By + Cz = D$$

在立体空间中，结构面的方向可由其倾角及倾向来表示。若已知倾角 α_i 、倾向 β_i 和一结构面的正向量 $\vec{n}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ，可知结构面 i 的方程如下：

$$A_i x + B_i y + C_i z = D_i \tag{3}$$

其中，

$$A_i = \sin \alpha_i \sin \beta_i$$

$$B_i = \sin \alpha_i \cos \beta_i$$

$$C_i = \cos \alpha_i$$

当在实地调查中，通过测量 $\alpha_i, \beta_i, \vec{n}_i$ 和确定结构面的坐标系，可得如下方程：

$$D_i = A_i x_i + B_i y_i + C_i z_i \tag{4}$$

式中： D_i 为常量，且在数学中有非常重要的意义。在平面几何中， D_i 被用于确定平面的位置，因此，可用它代表结构面的位置。实际上， $D_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 在洞室中代表了块体的精确位置。

实际上，由式(4)求出的点(面和面相交的点)代表了块体的边界条件。确定块体的界限条件是为了研究是否可以由结构面和开挖面形成块体。因此，可以认为块体的边界条件就是包括其形状、体积和位置在内的几何特征。

块体的形状可分为四面体、五面体、六面体等，四面体是最基本的形状，可以用于建立混合块体。多面体的暴露面可能是平面的、曲面的或两者兼有的形式。平面块体在边墙中可见，曲面块体在顶部可见。包括了顶部和边墙部的一些岩石在内的混合形状多见于洞室的拱顶与边墙交界部分，如图 4 所示的四面块体。无论怎样，混合块体都可被分为两

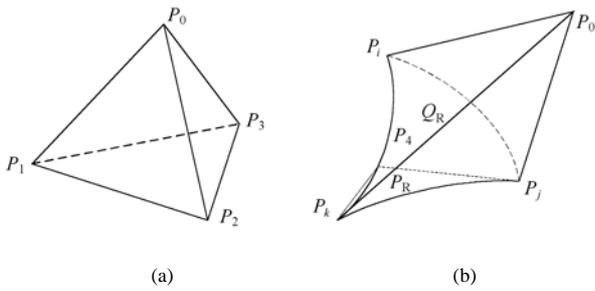


图 4 块体组成的基本要素
Fig.4 Basic elements for block

个四面块体，例如四面块体 $IHJG$ 和 $HAEF$ ，图 4 中也是一样。因此，总的体积(图 5)可以用 $IHJG$ 的体积加上 $HAER$ 的体积。图 6 所示为边墙上的多面块体，其中只有棱锥的 1 个顶点在围岩块上，其他的 2 和 3 个顶点在洞室的顶部或边墙位置。

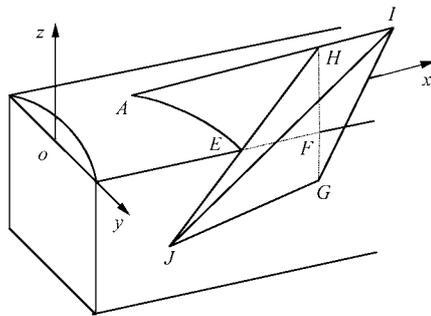


图 5 四面块体组成
Fig.5 Composition of tetrahedral block

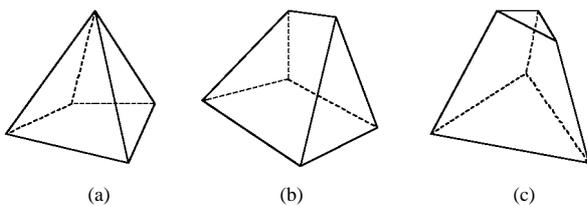


图 6 边墙上的多面块体
Fig.6 Polyhedral blocks with plane faces on side wall

假设 4 个交点为 $P_0(x_0, y_0, z_0)$, $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 和 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ ，图 4(a) 中四面块体体积^[7, 8]计算如下：

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_0 & y_0 & z_0 & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} \quad (5)$$

图 4(b)中四面块体体积计算如下：

$$V = V_0 - V_{11} - V_{12} - V_{13} \quad (6)$$

式中： V_0 由 P_0, P_i, P_j 和 P_k 组成； V_{11} 由 4 个交点 P_4, P_i, P_j 和 P_k 组成，其中 P_4 为平面 $y = y_i$ 和 $z = z_j$ 在结构面 J 上的一个交点， V_{11} 可由式(5)计算出； V_{12} 由 P_4, P_j 和 P_k 以及暴露面 P_R 构成，若 $A_k \neq 0, A_j \neq 0$ ，则 V_{12} 可表示为

$$V_{12} = \frac{2}{3} \left(\frac{a+b}{2} \right)^3 \left(\frac{B'_k}{A_k} - \frac{B'_j}{A_j} \right) \sin^3 \alpha_0 \quad (7)$$

式中： α_0 为 X 轴和北方向的夹角。

若 $A_k = 0$ 或者 $A_j = 0$ ，则 $V_{12} = 0$ 。

V_{13} 由 P_4, P_i, P_j 和暴露面 Q_R 构成，若 $A_i \neq 0$ 且 $A_j \neq 0$ ， V_{13} 计算如下：

$$V_{13} = \frac{2}{3} \left(\frac{a+b}{2} \right)^3 \left(\frac{B'_i}{A_i} - \frac{B'_j}{A_j} \right) \sin^3 \alpha_0 \quad (8)$$

若 $A_i = 0$ 或者 $A_j = 0$ ：

$$V_{13} = 0$$

则

$$\begin{aligned} B'_i &= B_i \cos \alpha_1 + C_i \sin \alpha_1 \\ B'_j &= B_j \cos \alpha_1 + C_j \sin \alpha_1 \\ B'_k &= B_k \cos \alpha_1 + C_k \sin \alpha_1 \\ \alpha_1 &= \arccot \left(\frac{z_j + z_i}{y_j + y_i} \right) \end{aligned}$$

以详细研究四面块体为基础，在设计程序中，其他的多面块体能够非常方便地集合起来。本文只介绍了五面块体岩块的结构。

从洞室边墙所见的五面块体如图 6 所示，图 6(a) 所示五面块体的 1 个顶点在围岩上，图 6(b) 和图 6(c) 分别展示了在围岩上的 2 和 3 个顶点。

4.2 块体的滑动形式

如上所述，块体的滑动形式包括崩塌、沿一个面滑动、沿两个面滑动。显然，开挖面不能成为滑动面。在滑动过程中，块体沿一直处于重荷之下的一个或两个面滑动。这些面才是真正的滑动面。决定块体的滑动模式的方法是在石根华的定理中提出的^[4]。

4.2.1 崩塌

块体从顶部垂直落下， \hat{s} 为岩块的滑动方向，如图 7(a) 所示，则

$$\bar{r} \cdot \hat{v}_i > 0 \quad (9)$$

式中： \hat{v}_i 为结构面的内倾角向量， \bar{r} 为合力方向。

4.2.2 沿一个面滑动

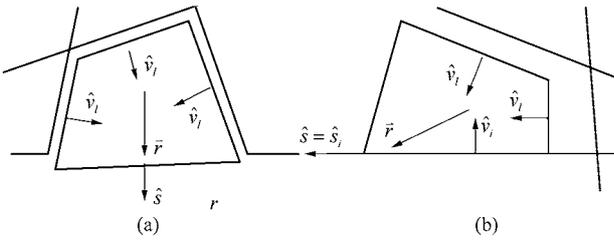


图 7 块体滑动

Fig.7 Sliding forms of block

如图 7(b)所示，块体只在一个表面之上滑动。在这种情况下，滑面由如下方程表示：

$$\begin{cases} \hat{v}_i = -\text{sgn}(\bar{r} \cdot \hat{n}_i) \cdot \hat{n}_i \\ \hat{v}_j = \text{sgn}(\hat{s} \cdot \hat{n}_j) \cdot \hat{n}_j \end{cases} \quad (10)$$

其中，

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ 0 & (x = 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases}$$

其他符号同前，且 $i \neq l$ 。

4.2.3 沿两个平面的相交线滑动

在这种情况下，块体会同时沿着两个层面滑动，滑动方向与合力方向相交成一个锐角。当两个结构面 i 和 j 符合下列等式：

$$\begin{cases} \hat{v}_i = -\text{sgn}(\hat{s}_j \cdot \hat{n}_i) \cdot \hat{n}_i \\ \hat{v}_j = -\text{sgn}(\hat{s}_i \cdot \hat{n}_j) \cdot \hat{n}_j \\ \hat{v}_{ij} = \text{sgn}(\hat{s}_{ij} \cdot \hat{n}_i) \cdot \hat{n}_i \end{cases} \quad (11)$$

式中： \hat{s}_i 为 \bar{r} 在结构面 i 上的投影， \hat{s}_j 为 \bar{r} 在结构面 j 上的投影， $i \neq j \neq l$ 。此时这两个结构面可被当作滑面，因此， \hat{s}_{ij} 可计算如下：

$$\hat{s}_{ij} = \frac{\hat{n}_i \times \hat{n}_j}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|} \text{sgn}[(\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot \bar{r}]$$

4.3 安全系数的计算和评估

确立了块体的几何结构，破坏模式和岩块的滑动面后，应估算其安全系数。由于块体破坏性不同，应采用不同的计算方式。

当沿一个面滑动时，安全系数 K 应计算如下：

$$K = \frac{|\bar{r}| \cos \theta \tan \varphi + c S_v}{|\bar{r}| \sin \theta} \quad (12)$$

当沿两面滑动时，安全系数 K 应计算如下：

$$K = \frac{\sum_i (N_i \tan \varphi_i + c_i S_{v_i})}{|\bar{r}| \sin \theta} \quad (13)$$

式中： c ， φ ， S_v 分别为黏聚力、内摩擦角、滑动面面积； \bar{r} 为合力； N 为正应力； θ 为 \bar{r} 和 N 之间的夹角。

4.3.1 在自重的作用下

在这种情况下，只有自身重力作用于块体，则

$$\bar{r} = \bar{W} = 0\bar{i} + 0\bar{j} + \gamma V g \bar{k} \quad (14)$$

式中： γ 为比重， V 为块体积， g 为重力加速度， \bar{k} 为单位矢量。

4.3.2 在爆破作用下

爆破是地下开采中常用的手段，也可以说爆破是地下开挖中最主要的外界动力荷载。因此，在分析块体稳定性时应考虑到爆破的因素。爆破对块体的影响是非常复杂的，因为爆破过程中产生的水平方向和垂直方向的加速度受到很多因素的影响。目前，计算加速度只有根据经验公式^[9]。水平和垂直方向的加速度如下所示：

$$\left. \begin{aligned} a_h &= 4.418(R/\sqrt[3]{Q})^{-1.15074} \\ a_v &= 19.864(R/\sqrt[3]{Q})^{-1.8306} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中： a_h ， a_v 分别为水平和垂直方向的加速度； R 为爆炸中心到块体重心的距离(m)； Q 为炸药的质量(kg)。因此，水平和垂直方向的力可表示为

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_{bh} &= \gamma V a_h \bar{r}_{bh} \\ \bar{F}_{bv} &= \gamma V a_v \bar{r}_{bv} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中： \bar{r}_{bh} 和 \bar{r}_{bv} 分别为水平方向和垂直方向的单位矢量。因此，在爆破中，作用于块体的合力可由如下方程所示：

$$\bar{r} = \bar{W} + \bar{F}_{bh} + \bar{F}_{bv} = \gamma V (g\bar{k} + a_h \bar{r}_{bh} + a_v \bar{r}_{bv}) \quad (17)$$

4.3.3 在地震作用下

分析在地震作用下块体的稳定性和爆破下块体的稳定性类似，作用于块体的水平和垂直方向的力可通过水平和垂直方向的震动系数来计算，则其在地震作用下的合力如下所示：

$$\bar{r} = \bar{W} + \gamma V K_{eh} g \bar{r}_{eh} + \gamma V K_{ev} g \bar{r}_{ev} \quad (18)$$

式中： K_{eh} 和 K_{ev} 分别为在水平和垂直方向的地震系数。

4.4 所编制程序的结果分析

综上所述，在地下开挖中，该程序可以寻找并确立大型开挖中的关键块体。首先，对照了 Unwedge 程序下的结果，接着研究了可能出现在洞室顶部、边墙和拱腰部份的四面块体、五面块体和六面块体。

只发现了一个由 Lc3, Lc4 和 Lc1 所构成的关键块体, 该块体为四面块体, 顶部有一弧面。在拱腰和边墙部分没有发现五面块体或六面块体。通过对比在 Unwedge 程序下的结果, 该程序可以通过两个常量计算出在爆破和地震作用下的安全系数和确定其精确位置, 因此, 可以方便地设计出地下洞室所需的支撑系统, 在只考虑自重的情况下, 由两个程序计算出的安全系数是不同的(由新程序算出的为 1.16, 用 Unwedge 算出为 1.36), 但是滑动面是一样的, 如图 8 所示, 为由该程序确定的关键块体, 块体重心位置为(219 m, -5 m, 9 m)。Unwedge 程序不能计算在爆破和地震作用下的安全系数, 而由新程序算出的爆破作用下安全系数为 0.65, 地震作用下安全系数为 0.76。

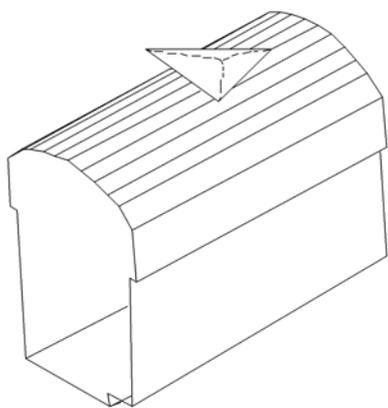


图 8 由该程序确定的关键块体

Fig.8 Key block identified by the developed program

5 结 语

综上所述, 在 Unwedge 系统中, 只考虑了结构面的特征而忽略了其空间位置, 并且容许结构面平行移动, 因此结构面可以形成几乎同向但倾角不同的狭长的楔形块体。在该程序下, 不允许结构面移动, 因此关键块体的可能性降低了。

以实地调研为基础, 论述了在大型地下开挖中块体的稳定性, 在使用 Unwedge 程序的过程中, 发现了用其确定地下开挖关键块体的局限性。研究表明, 由 Unwedge 程序所得出的结果, 由于只考虑了四面块体和自重, 并且可能的不稳定块体的位置不确定, 应该谨慎选择其结果。为了消除这些局限性,

在石根华的定理基础上开发了一种程序, 该程序可确定并找到在地下洞室中顶部、边墙部和拱腰部的可能的不稳定性块体的位置, 并且论述了包括四面块体、五面块体和六面块体在内的各种各样的块体, 同时, 也分析了包括爆破和地震作用的其他外在荷载。

参考文献(References) :

- [1] Boyle W J, Goodman R E, Yow J L. Field cases using key block theory[A]. In : Proceedings of the International Symposium[C]. Helsinki, Finland : [s. n.], 1986. 1 183 - 1 199.
- [2] Park H, West T R. Development of a probabilistic approach for rock wedge failure[J]. Engineering Geology, 2001, 59 : 233 - 251.
- [3] Mito Y, Kikuchi K, Hirano I, et al. Stochastic block theory for initial support decision of large slope[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34 : 511 - 515.
- [4] Goodman R E, Shi G H. Block Theory and Its Application to Rock Engineering[M]. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1985, 338.
- [5] Hoek E, Joe C, Bin L. Unwedge user's guide[R]. [s. l.] : Rocscience, Inc., 1999. 77.
- [6] 许 强. 边坡块体稳定性分析系统用户手册(Ver.1.0)[R]. [s. l.] : [s. n.], 1998. 15 - 40.(Xu Qiang. Users' manual of stability analysis system of slope wedge(Ver1.0)[R]. [s. l.] : [s. n.], 1998. 15 - 40.(in Chinese))
- [7] 刘 军. 地下工程围岩块体稳定性研究[博士学位论文][D]. 成都 : 成都理工大学, 2001. 73 - 116.(Liu Jun. A study on blocks stability in the surrounding rock mass of underground excavation[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu : Chengdu University of Technology, 2001. 73 - 116.(in Chinese))
- [8] 王思敬, 杨志法, 刘竹华. 地下工程岩体稳定性分析[M]. 北京 : 科学出版社, 1984. 282.(Wang Sijing, Yang Zhifa, Liu Zhuhua. Stability Analysis of Underground Engineering Rock Mass[M]. Beijing : Science Press, 1984. 282(in Chinese))
- [9] 许 强, 黄润秋. 考虑地应力的洞室围岩块体稳定性分析的理论与实践[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(4) : 1 - 6.(Xu Qiang, Huang Runqiu. The theory and application of stability analysis of surrounding rock in consideration of geostress[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1996, 7(4) : 1 - 6.(in Chinese))