

基于块体理论赤平解析法的地下水封油库围岩稳定性分析

张子新^{1,2}, 廖一蕾^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 针对块体理论赤平解析法在实际应用过程中存在的不足, 对原赤平解析法进行完善和补充。在此基础上升级赤平解析法软件 Block V1.0, 研发 Block V2.0, 新增结构面特性选择、洞室断面选型等功能, 并分析锦州地下水封油库在自重力、地下水和油压不同情况下的围岩稳定性。分析结果表明: (1) 地下水封油库开挖面中顶板最危险, 6组主要节理面中 J_1 , J_2 为优势结构面, 在施工期和运营期应加强监测; (2) 地下水较大幅度地增大块体失稳的可能性, 而油压则在某种程度上对块体保持稳定起到有利作用。

关键词: 岩石力学; 赤平解析法; 地下水油库; 稳定性; 块体理论; 软件开发

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)07 - 1339 - 09

STABILITY ANALYSIS OF SURROUNDING ROCK MASS OF WATER-TIGHT OIL STORAGE USING BLOCK THEORY BASED ON STEREO-ANALYTICAL METHOD

ZHANG Zixin^{1,2}, LIAO Yilei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the modified stereo-analytical method of block theory, a new software is developed, updated from Block V1.0 to Block V2.0. The new version added some strong functions, such as the choosing of discontinuity property and available excavation shape. An application to the stability analysis of the surrounding rock mass of the water-tight oil storage in Jinzhou is presented, considering the action of gravity, water and oil pressures comprehensively. The block identification results show: (1) the roof of the cavern is the most dangerous zone, and joint J_1 and J_2 are the dominant joints, which should be paid close attention during construction and running periods; (2) underground water greatly increased the sliding probability to a certain extent, however, the oil has a favourable effect on the cavern stability.

Key words: rock mechanics; stereo-analytical method; underground oil storage; stability; block theory; software development

1 引言

目前, 考虑岩体不连续性的理论方法较多, 主

要包括 D. H. Trollope^[1]的块体力学, P. A. Cundall^[2]的离散单元法, T. Kawal 和 Y. Toi^[3]的刚弹元法以及 R. E. Goodman 等^[4-7]共同创立的块体理论等。其中, 块体理论以其鲜明的特点和实用性在岩石力学研

收稿日期: 2010 - 02 - 26; **修回日期:** 2010 - 04 - 01

基金项目: 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金资助(2010); 上海市重点学科建设项目(B308)

作者简介: 张子新(1966 -), 男, 博士, 1994年于中国矿业大学土木工程学院获岩土工程专业博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事隧道及地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: zxzhang@tongji.edu.cn

究领域里独树一帜，多年来一直受到国际岩石力学界的普遍赞誉和推崇，在水利、矿山、地下工程等领域已得到广泛应用^[8~10]，是非连续岩体力学研究中的热点之一。其中，P. M. Warburton^[11]提出块体稳定性矢量分析方法；D. Z. Lin^[12]采用了拓扑学同调论确定块体的几何参数；J. Lu^[13]提出系统算法用于寻找包括凹块体在内的多面体；C. Gonzalez-Palacio 等^[14]提出几何分析法，用于辨识岩体中的非锥体关键块体；张奇华和邬爱清^[15]研究了随机结构面切割下的全空间块体拓扑搜索一般方法；Y. T. Zhang 等^[16]将有限元法应用于块体的辨识和稳定性分析中。事实上，块体理论的关键问题之一就是如何找出几何上和力学上均可动的块体，即所谓的关键块体。传统的块体理论分析方法主要是矢量分析法和赤平投影法^[5~7]，但矢量法复杂，且不能分析凹块体，赤平投影法简单直观，但需要一一作图，结构面组数较多时应用并不方便。为此，张子新^[17]提出建立了块体理论赤平解析法，该法集矢量分析法和赤平投影法的优点于一身，近年也得到了广泛应用^[18~21]。

本文将基于块体理论赤平解析法，并对原块体理论赤平解析法计算投影圆交点坐标、块体移动方向判断等方面进行必要拓展和修正。在 Block V1.0 基础上研发了 Block V2.0 分析软件，新增了结构面特性选择、开挖面选型等功能，分析了锦州地下水封油库围岩的稳定性，为该油库实施合理有效的加固措施提供了更有力的依据。

2 块体理论赤平解析法的补充

2.1 问题提出

块体理论赤平解析法有机结合了块体理论的传统分析方法——矢量法和赤平投影法，可将有限块体的结构面作为一个整体考虑，既克服了赤平投影法不便于计算机程序实现的缺点，又解决了矢量分析法不能分析凹块体的不足，大大扩展了块体理论的适用范围。但原赤平解析法在投影圆交点坐标、块体移动方向判断等方面尚需要进一步完善。

(1) 计算投影圆交点坐标

现有一洞室 SN 走向(见图 1)，左右边墙倾角为 90° ，倾向分别为 90° ， 270° ；洞室周边有一结构面 P_i ，倾角为 $\alpha_i \neq 90^\circ$ ，倾向 β_i 。计算左边墙与结构面 P_i 的投影圆交点时，由于左边墙为竖直平面，根据原赤平解析法理论^[22]，左边墙与结构面 P_i 正交点坐标计算公式为

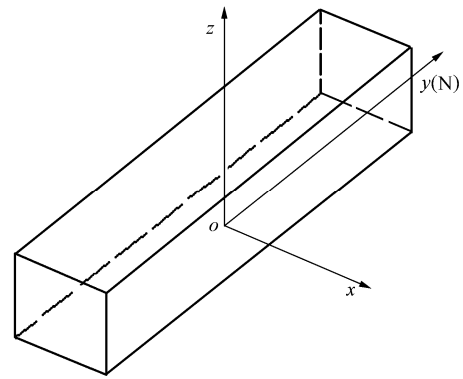


图 1 洞室示意图

Fig.1 Sketch of a cavern

$$\left. \begin{aligned} x &= R \cos^2 \beta_j \left[\tan \alpha_i (\sin \beta_i - \cos \beta_i \tan \beta_j) \pm \sqrt{\tan^2 \alpha_i (\cos \beta_i \tan \beta_j - \sin \beta_i)^2 + \sec^2 \beta_j} \right] \\ y &= -0.5R \sin(2\beta_j) \left[\tan \alpha_i (\sin \beta_i - \cos \beta_i \tan \beta_j) \pm \sqrt{\tan^2 \alpha_i (\cos \beta_i \tan \beta_j - \sin \beta_i)^2 + \sec^2 \beta_j} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中：下标 i 为非竖直面，j 为竖直面。左边墙倾向为 90° ，即 $\tan \beta_j \rightarrow \infty$ ，则由式(1)可知左边墙与结构面 P_i 交点坐标值亦无穷大，从而导致最终分析结果与实际相差较大。

(2) 块体移动方向判断

如图 2 所示块体，由结构面 P_1 上盘、 P_2 上盘、 P_3 下盘和竖直临空面一侧半空间相交而得，记作 $U_1 \cap U_2 \cap L_3 \cap U_q$ 。 P_1, P_2, P_3 产状分别为 $60^\circ/300^\circ, 60^\circ/150^\circ, 40^\circ/300^\circ$ ，块体赤平投影图如图 3 所示阴影部分。

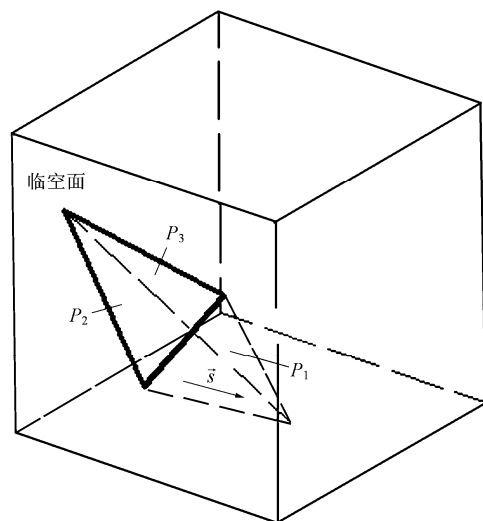


图 2 块体 $U_1 \cap U_2 \cap L_3 \cap U_q$ 示意图

Fig.2 Sketch of the block $U_1 \cap U_2 \cap L_3 \cap U_q$

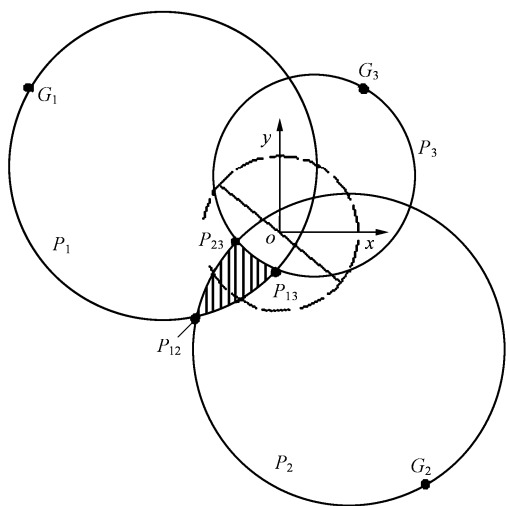


图 3 块体 $U_1 \cap U_2 \cap L_3 \cap U_q$ 赤平投影图
Fig.3 Stereo-projection of the block $U_1 \cap U_2 \cap L_3 \cap U_q$

根据块体赤平投影图 3 可知, P_1, P_2, P_3 投影最低点均未在块体投影区内, 块体投影区最低点为结构面 P_1 和 P_2 交线的投影点。根据原赤平解析法所述, 该块体将沿 P_1, P_2 滑动, 滑动方向即为 P_1, P_2 交线方向, 如图 2 中 \bar{s} 所示。但由图 2 可知该块体滑动方向并没有指向临空面方向, 而是指向岩体内部, 根据块体理论对块体分类及定义^[23]可知, 块体 $U_1 \cap U_2 \cap L_3 \cap U_q$ 实为稳定块体。

2.2 计算投影圆交点坐标的补充

为正确计算投影圆交点坐标, 首先要正确建立竖直平面的投影方程。事实上, 当空间竖直平面倾向为 90° 或 270° 时, 该竖直平面的赤平投影方程不再是 $x \tan \beta_i + y = 0$, 而是 $x = 0$, 即左边墙 P_j 与结构面 P_i 赤平投影方程为

$$\left. \begin{aligned} (x - R \tan \alpha_i \sin \beta_i)^2 + (y - R \tan \alpha_i \cos \beta_i)^2 &= \frac{R^2}{\cos^2 \alpha_i} \quad (\text{结构面 } P_i) \\ x &= 0 \quad (\text{左边墙 } P_j) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: R 为参照圆半径。联立求解得, 交点坐标为

$$\left. \begin{aligned} x &= 0 \\ y &= R \tan \alpha_i \cos \beta_i \pm \frac{R}{\cos \alpha_i} \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_i \sin^2 \beta_i} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

因此, 在计算投影圆交点坐标时, 不仅要区分 2 个平面倾角不同、两者投影圆交点坐标计算公式不同, 还应注意对于竖直平面, 倾向不同, 其与其

他面投影圆交点公式也应不同。对于倾向 90° 或 270° 的竖直平面与倾斜面的投影交点坐标应采用式(3)来计算, 而非式(1)。

2.3 块体移动方向判断的补充

根据块体理论对块体稳定性的判断可知, 如果块体单面滑动或双面滑动, 那么该块体必位于滑动面的上盘, 同时块体滑移方向矢量必指向开挖面方向。换句话说, 块体失稳的必要条件是: (1) 块体界面中有块体位于其上盘的结构面; (2) 块体滑移方向必须指向开挖面方向, 即满足

$$s \cdot v_q \geq 0 \quad (4)$$

式中: v_q 为开挖面指向洞室内部的法向矢量。

条件(1)在判断块体的有限性时, 已自动满足, 无需验证; 条件(2)需在初步判断出块体移动方向后, 计算 $s \cdot v_q$ 值, 以进一步确定块体为可能失稳块体还是稳定块体。

3 洞室围岩稳定性分析软件开发

3.1 软件功能

洞室围岩稳定性分析软件 Block V2.0 由 Block V1.0 发展而来, 其计算内核参照修正后的赤平解析法编制, 用于地下洞室的围岩稳定性分析。根据工程分析需要以及目前软件用户对软件界面友好等方面的要求, 软件 Block V2.0 功能主要有:

(1) 具有友好的参数输入界面, 包括:

① 结构面特性的创建、修改及删除。结构面特性包括结构面的剪切强度计算模型及其相关的参数。Block V2.0 分析中, 结构面的剪切强度计算采用莫尔-库仑模型, 相关参数为 c, φ 值。实际工程中, 洞室围岩中往往有数组结构面, 每组结构面的 c, φ 值由于填充物、粗糙度等因素的不同而不同, 各结构面的剪切强度也就有所差异。软件为力求分析结果与实际情况接近, 支持用户根据工程实际情况创建和修改结构面特性相关参数值, 使每个结构面的特性与实际相吻合。

② 结构面相关参数输入。根据块体理论赤平解析法的分析过程要求, 结构面的有关参数主要包括倾角、倾向及其所属的结构面特性标识。用户在输入结构面相关参数时, 可进行结构面的增加和删除以及相关参数的修改等。

③ 洞室相关参数输入。洞室的相关参数主要包括洞室走向、倾角、断面类型及其相关几何参数，其中洞室断面类型包括矩形、圆形、拱形 3 种。用户可根据实际情况对洞室断面进行选择，完成分析过程。

(2) 软件支持不同的洞室断面围岩稳定性分析。实际工程中，因工程类别、地质条件不同等原因而采用不同的洞室断面，围岩稳定性亦随洞室断面的不同而不同。为使分析结果更贴近实际，软件支持不同洞室断面的围岩稳定性分析，即分析过程中根据不同的洞室断面，采用不同的分析参数，从而得到更符合工程实际的计算结果。通过总结诸多地下洞室断面的断面形式，软件将主要分析矩形、圆形和拱形这 3 种洞室断面类型。

(3) 完整地实现块体理论赤平解析法的整个分析过程，找出洞室不同面上所有的可动块体和关键块体，并自动进行统计不同开挖面上的可动块体和关键块体个数，以及不同结构面形成的可动块体和关键块体个数，为后期分析优势结构面、评价洞室围岩稳定性、确定最佳洞室走向等提供数据库。

(4) 分别以文件和窗口显示的方式，输出软件分析结果，便于用户对分析结果进行保存和查看。

(5) 实现 Word, Excel, PowerPoint 等常用 Microsoft Office 程序对象的嵌入功能和保存功能，便于用户对分析结果进行处理和编辑。在软件使用过程中，用户可插入 Word, Excel, PowerPoint 等程序对象，直接将软件所得的分析结果在本软件的运行环境下进行分析与编辑。

3.2 软件开发

洞室围岩稳定性分析软件 Block V2.0 基于块体理论赤平解析法编制，其开发思路与 Block V1.0 基本一致，但 Block V2.0 既为洞室围岩稳定性分析软件，则必须考虑不同的洞室形状，目前地下洞室断面可以简化为矩形、拱形和圆形 3 种形式进行分析，因此 Block V2.0 所分析的洞室断面类型亦为这 3 种。但洞室断面确定后，如何针对不同的洞室断面进行分析又是本软件开发过程中的一个必须解决的问题，尤其是拱形和圆形为有曲面的洞室断面。下面将三种断面的实现方法分述如下：

(1) 矩形洞室

矩形断面是块体理论赤平解析法分析中最为常

见的断面形式，该断面形式分析前首要解决的问题是要清楚洞室产状，即走向、倾角与各开挖面倾向、倾角之间的关系以及块体在开挖面的空间位置关系。为此，定义洞室走向 β 为洞室轴线水平投影与指北针间的夹角，其取值范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$ ；洞室倾角 α 为洞室轴线与水平面的夹角，取值范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$ ，如图 4 所示；各开挖面和结构面的倾向、倾角取值范围分别为 $[0^\circ, 360^\circ]$ ， $[0^\circ, 90^\circ]$ 。

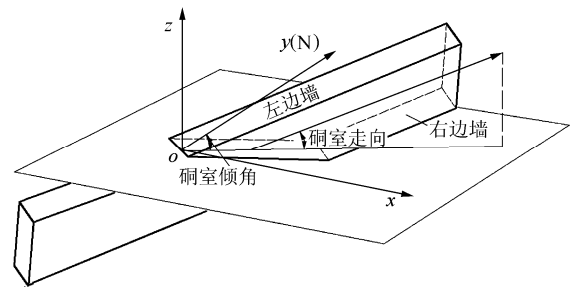


图 4 矩形洞室断面示意图

Fig.4 Sketch of cross-section of a rectangular cavern

根据图 4 中几何关系可知，顶底板倾角等于洞室倾角 α ，倾向等于洞室走向 $\beta \pm 180^\circ$ ，矩形洞室左右边墙分析参数如表 1 所示。

表 1 矩形洞室左右边墙分析参数表

Table 1 Parameters of the left and right walls of a rectangular cavern

洞室走向 $\beta(^{\circ})$	左边墙			右边墙		
	倾角 $\lambda(^{\circ})$	倾向 $\lambda(^{\circ})$	块体位置	倾角 $\lambda(^{\circ})$	倾向 $\lambda(^{\circ})$	块体位置
$(0, 180]$	90	$\beta + 90$	下盘	90	$\beta + 90$	上盘
$(180, 270]$	90	$\beta + 90$	上盘	90	$\beta + 90$	下盘
$(270, 360]$	90	$\beta - 90$	上盘	90	$\beta - 90$	下盘

(2) 拱形洞室

拱形洞室断面因其结构良好的力学性能而常为工程实际所采用，由于顶板开挖面为曲面，也给块体理论赤平解析法分析带来不便，实际分析中往往将顶板开挖面简化为 2 个或 1 个平面，如图 5 所示。然而多个工程实际表明，简化为 1 个平面或 2 个平面的分析结果相差较大，也就是说洞室顶板可动块体分析结果与简化平面个数和简化后平面产状有较强的相关性。根据块体理论的理论基础可知，顶板可动块体在结构面产状、洞室轴线确定的情况下应该是确定的，即顶板可动块体与顶板曲面如何简化无关，而仅与洞室轴线相关。

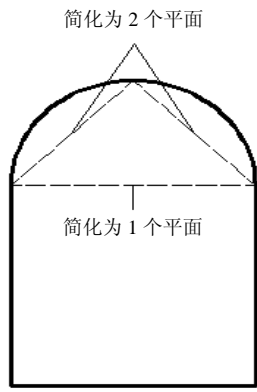


图 5 拱形洞室断面简化示意图
Fig.5 Sketch of a simplified arched cavern section

为此, 拱形洞室的顶板可动块体拟采用石根华博士提出的轴线定理进行分析, 即裂隙锥 JP 与洞室顶板构成可动块体的充要条件是洞室轴线矢量 \hat{a} 及其反向矢量 $-\hat{a}$ 均不属于该 JP 。

(3) 圆形洞室

圆形洞室断面与拱形断面一样, 同属于曲面断面类型, 分析时将圆形断面按水平轴线一分为二, 如图 6 所示, 水平轴线的上半部分同样可采用轴线定理进行分析, 而下半部分的可动块体可根据块体理论的对称性定理得到。

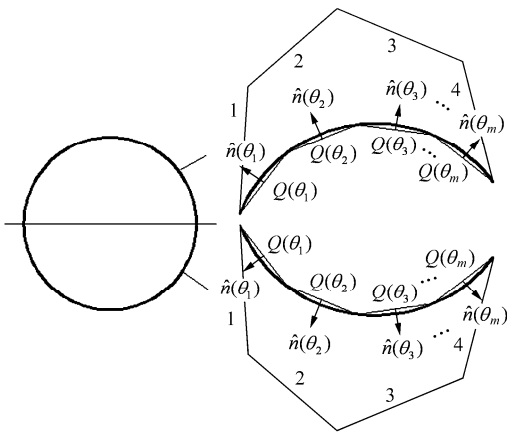


图 6 圆形洞室断面可动块体示意图
Fig.6 Sketch of removal blocks adjacent to a circular cavern

4 锦州地下水封油库围岩稳定性分析

锦州 $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 地下水封岩洞储油库系国家二期储油基地, 处辽宁省锦州市境内, 距锦州港 10 km, 面积约 1 km^2 。油库的建设及运营过程所要解决的首要问题是地下水封岩洞储油库的围岩稳定性问题。根据库区勘察报告, 库区所处位段, 岩石较

为完整, 整体稳定性较好, 主要破坏形式为局部块体坍塌, 无大型断层却有数组节理发育, 给工程安全带来较大的隐患, 迫切需要对其块体稳定性进行分析。

4.1 结构面及储油库开挖面资料

根据勘察资料, 优势节理主要有 3 组, 即 NNE 走向($0^\circ \sim 30^\circ$)、NE 走向($40^\circ \sim 70^\circ$)及 NW-NNW 走向($320^\circ \sim 360^\circ$)。节理的倾角主要有 2 组, 一组是 $25^\circ \sim 55^\circ$, 另一组是 $70^\circ \sim 90^\circ$ 。分析节理面个数取走向组数与倾角组数的乘积, 即 6 个, 走向值和倾角值均取范围值的均值, 具体参见表 2。节理面的 c , ϕ 值分别为 20.16 MPa, 45° , 岩石密度为 2.62 g/cm^3 。

表 2 结构面(节理)产状
Table 2 Orientation of discontinuities(joints)

编号	倾角/(°)	倾向/(°)	走向/(°)
J_0	40	105	NNE15
J_1	80	105	NNE15
J_2	40	145	NE55
J_3	80	145	NE55
J_4	40	70	NW-NNW340
J_5	80	70	NW-NNW340

洞室断面如图 7 所示, 走向 90° , 倾角 0° 。由图 7 可知洞室顶板为三心圆曲面, 左右边墙为折面。为便于分析, 将洞室顶板简化为一心圆曲面, 圆半径 20.4 m, 左右边墙简化为一个平面, 如图 8 所示。

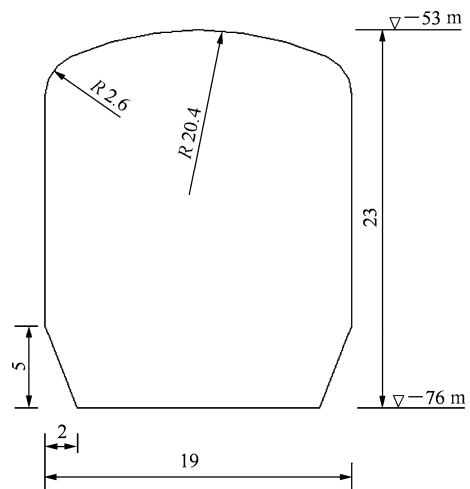


图 7 锦州地下水封储油洞室断面(单位: m)
Fig.7 Cavern section of the water-tight oil storage in Jinzhou (unit: m)

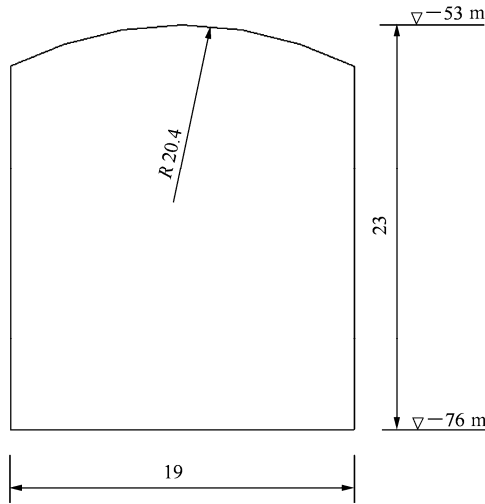


图 8 锦州地下水封储油洞室断面简化(单位: m)

Fig.8 Simplified cavern section of the water-tight oil storage in Jinzhou (unit: m)

4.2 稳定性分析

锦州地下水封岩洞储油库围岩稳定性的分析按以下 3 种工况进行考虑: 无油无水、有水无油、有油有水。具体分析如下:

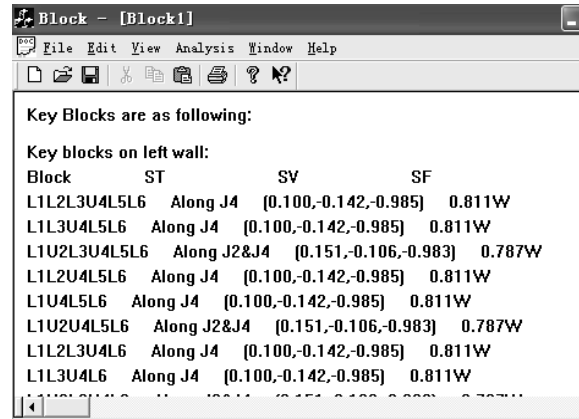
(1) 无油无水

在无油无水的情况下, 块体只受自重作用。采用 Block V2.0 分析所得可动块体和关键块体分析结果如图 9 所示, 分析结果如表 3~5 所示。值得说明的是, 可动块体是几何上可动的块体, 与油和水无关。

(2) 有水无油

在锦州地下水封油库尚未投入运营时, 围岩可动块体主要受到地下水压力和自重的作用。对于地下水压力的分布, 本文基于如下假设进行考虑:

- ① 地下水压以静水压力分布形式作用于块体;
- ② 开挖面与结构面相交处, 水压为 0;
- ③ 忽略块体大小对水压分布的影响。



(b) 关键块体

图 9 锦州地下水封岩洞油库关键块体分析结果

Fig.9 Analytical results of blocks adjacent to the water-tight oil storage cavern in Jinzhou

表 3 可动块体分析结果

Table 3 Analysis results of removal blocks

开挖面	块体数量/块		
	无油无水	有水无油	有油有水
顶板	434	434	434
左边墙	96	96	96
底板	65	65	65
右边墙	96	96	96

表 4 关键块体分析结果

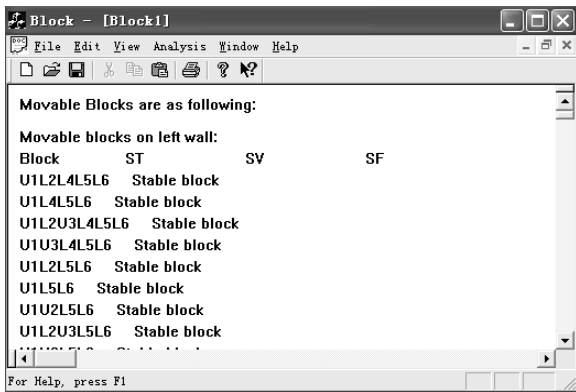
Table 4 Analytical results of key blocks

开挖面	块体数量/块		
	无油无水	有水无油	有油有水
顶板	94	112	85
左边墙	16	31	13
底板	0	0	0
右边墙	8	23	8
合计	118	166	106

表 5 块体节理分布表

Table 5 Blocks distribution with aspect to joints

块体节理	可动块体数量/块	关键块体数量/块		
		无油无水	有水无油	有油有水
J ₁	519	85	114	76
J ₂	489	96	128	84
J ₃	492	65	87	56
J ₄	492	89	121	79
J ₅	492	65	87	56
J ₆	492	87	122	78



(a) 可动块体

图 10 为某块体地下水压分布示意图, 根据假

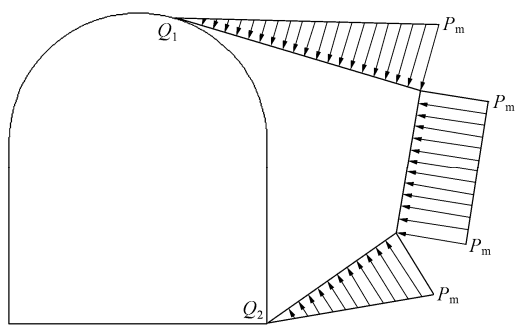


图 10 块体地下水压分布示意图

Fig.10 Illustration of water pressure distribution

设③可知图 10 中 $P_m = \gamma_w H$, 其中 γ_w 为水的容重, H 为洞室埋深, Q_1, Q_2 处的水压为 0。锦州地下水封岩洞储油库埋深 53 m, $P_m = 5.3 \times 10^4$ Pa。

(3) 有油有水

当锦州地下水封油库投入运营后, 洞库范围内充满石油, 则块体受到油压、水压和自重的共同作用, 如图 11 所示, 其中油压 P_{oil} 在库内充满油的情况下分布形式与管道内水压分布一致, 即垂直断面均匀分布。根据目前地下水封油库的运营情况, 取 $P_{oil} = 2.0 \times 10^4$ Pa, 储油库围岩稳定性分析结果如表 3~5 所示。

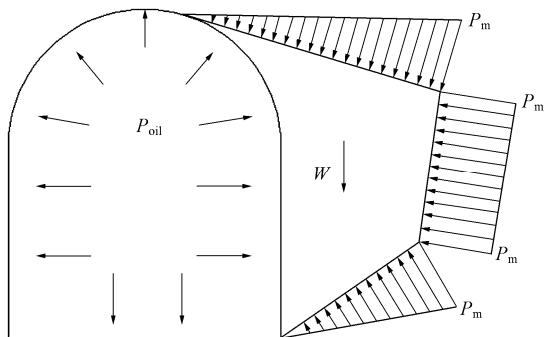


图 11 锦州地下水封油库运营期块体受力示意图

Fig.11 Force diagram of the block adjacent to the water-tight oil storage cavern in Jinzhou during the operation

4.3 结果分析

将锦州地下水封岩洞储油库在 3 种工况下的围岩稳定性分析结果进行统计, 如图 12, 13 所示。由图可知, 在 3 种工况下, 锦州地下水封油库的可动块体和关键块体分布情况是: 顶板可动块体和关键块体所占比例最大, 数量最多; 底板可动块体最少, 关键块数量为 0; 左右边墙可动块体数量相同, 关键块体则稍有差异; 从相关节理角度分析, 节理面 J_1 形成的可动块体最多, 节理面 J_2 形成的可动块

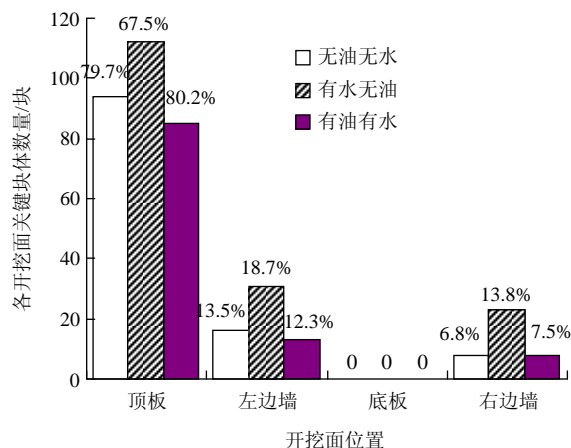
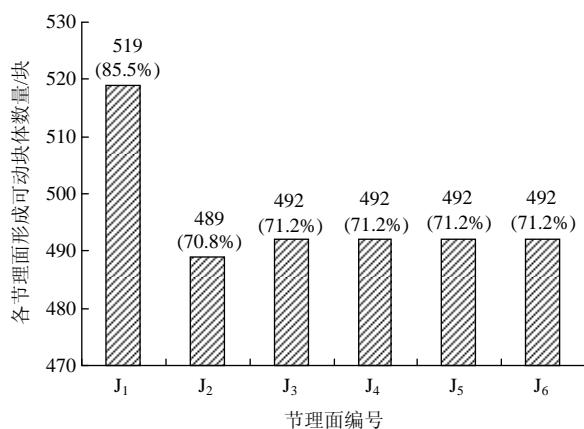
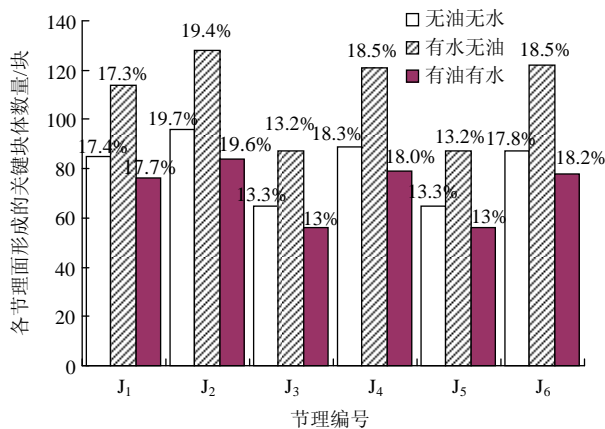


图 12 各开挖面关键块体数量柱状图

Fig.12 Histogram of key blocks of each excavation face



(a) 可动块体



(b) 关键块体

图 13 各节理面形成块体数量柱状图

Fig.13 Histogram of blocks with respect to each joint

体最少, J_3, J_4, J_5, J_6 形成的可动块体数量相同, J_2 形成的关键块体最多, J_3, J_5 形成关键块体最少。为此, 在施工期和运营过程中, 顶板发生局部坍塌的可能性最大, 因而从安全经济的角度应加强对顶板的支护; 同时, J_2 虽然形成可动块体数量最少,

但形成的关键块体却最多,因而 J_2 出露之处发生局部失稳的可能性最大,施工和运营中应特别加以注意。 J_1 形成的关键块体数虽不是最为突出,但由于形成可动块体数约占总数的 85.5%,为优势结构面,为防止关键块体滑落而带来大规模失稳,在施工和运营中应对 J_1 出露之处特别加强监测。

另一方面,油压和地下水压的存在对关键块体数量产生了较大影响,且较大程度地影响了块体的失稳形式和滑动力的大小。如图 14 所示为顶板和左、右边墙处的可动块体,块体①,②在无油无水的情况下失稳形式分别为铅垂下落、沿 J_2 和 J_4 双面滑动,块体③为稳定块体;在水压作用下,块体③失稳,沿 J_3 发生滑动;块体①,②则在油压作用下,净滑力由正转负。从 3 种工况下的关键块体数量来看,水压较大程度地增大了块体失稳的可能性,而油压则对块体保持稳定起到有利作用。

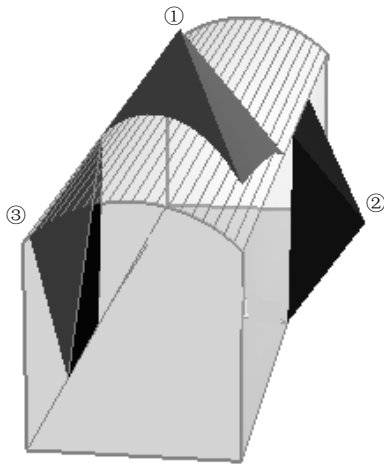


图 14 锦州地下水封油库块体示意图

Fig.14 Sketch of blocks adjacent to the water-tight oil storage cavern in Jinzhou

5 讨 论

将张子新和廖一蕾^[21]采用 Block V1.0 的分析结果与本文 Block V2.0 的对锦州地下水封岩洞储油库的围岩稳定性分析结果进行比较可知,两者差别较大,主要原因有 2 个:

(1) Block V2.0 内核对块体移动方向的判断进行了补充,排除了原赤平解析法分析得到的伪可动块体,从而减少了洞室左右边墙的可动块体数量。

(2) Block V2.0 增加了洞室断面选型功能。Block V1.0 只能支持开挖面为平面的情况,为此在

分析锦州地下水封油库的围岩稳定性时,只能将洞室曲面顶板假定为平面,从而导致了分析结果的偏差。Block V2.0 分析结果表明,曲面顶板虽提高了顶板的受力性能,但同时也增大了顶板处形成可动块体的可能性。

6 结 论

本文通过对原块体理论赤平解析法的补充,在 Block V1.0 的基础上,编制了软件 Block V2.0,并对锦州地下水封油库围岩稳定性进行了分析。基于上述分析可得以下结论:

(1) 锦州地下水封油库开挖面中,顶板形成可动块体和关键块体的数量最多,均超过了总数的一半,在施工期和运营过程中顶板发生局部坍塌的可能性最大。

(2) 锦州地下水封油库各节理面中, J_2 形成的关键块体最多。同时, J_1 形成的关键块体数虽不是最为突出,但由于形成可动块体数占总数的 85.5%,因此 J_1 和 J_2 为优势结构面,在施工期和运营期应加强对 J_1 , J_2 出露之处的监测。

(3) 锦州地下水封油库在无油无水、有水无油、有油有水 3 种工况下的稳定性分析结果表明,水压较大程度地增大了块体失稳的可能性,而油压则在某种程度上对块体保持稳定起有利作用。

(4) Block V2.0 基于完善后的块体理论赤平解析法编制,并新增洞室断面选型功能,因而较 Block V1.0 分析结果更符合实际,可较好地应用于地下洞室的围岩稳定性分析。

参考文献(References):

- [1] TROLLOPE D H. The mechanics of discontinuous or elastic mechanics in rock problems[C]// Proceedings of Rock Mechanics in Engineering Practice. London: Wiley, 1969: 275 - 320.
- [2] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems[C]// Proceedings of International Symposium on Rock Fracture. Nancy: [s.n.], 1971: 2 - 8.
- [3] KAWAL T, TOI Y. A new element in discrete analysis of plane strain problems[J]. Production Technology, 1977, 294(4): 204 - 207.
- [4] GOODMAN R E. Methods of geological engineering in discontinuous rock[M]. New York: John Wiley and Sons, 1976.
- [5] 石根华. 岩体稳定分析的赤平投影方法[J]. 中国科学(A 辑), 1977,

- (3): 269 - 271.(SHI Genhua. Stereographic projection method of stability analysis of rock mass[J]. Science in China(Series A), 1977, (3): 269 - 271.(in Chinese))
- [6] 石根华. 岩体稳定分析的几何方法[J]. 中国科学(A 辑), 1981, (4): 487 - 495.(SHI Genhua. Geometric method of stability analysis of rockmass[J]. Science in China(Series A), 1981, (4): 487 - 495.(in Chinese))
- [7] GOODMAN R E, SHI G H. Block theory and its application to rock engineering[M]. Englewood Cliffs: Prentic-Hall, Inc., 1985.
- [8] 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, 2001, 20(5): 648 - 652.(HUANG Zhengjia, WU Aiqing, SHENG Qian. Usage of block theory in the Three Gorges projects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 648 - 652.(in Chinese))
- [9] MENÉNDEZ-DÍAZ A, GONZÁLEZ-PALACIO C, ÁLVAREZ-VIGILA E, et al. Analysis of tetrahedral and pentahedral key blocks in underground excavations[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(6): 1 009 - 1 023.
- [10] 廖国燕, 伍佑伦, 徐东升. 块体理论在金属矿山关键块体辨识中的应用[J]. 金属矿山, 2007, (5): 21 - 24.(LIAO Guoyan, WU Youlun, XU Dongsheng. Application of block theory to key block identification in metal mines[J]. Metal Mine, 2007, (5): 21 - 24.(in Chinese))
- [11] WARBURTON P M. Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral rock block with any number of free faces[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(5): 415 - 427.
- [12] LIN D Z, FAIRHURST C, A M STARFIELD. Geometrical identification of three-dimensional rock block systems using topological techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1987, 24(6): 331 - 338.
- [13] LU J. Systematic identification of polyhedral rock blocks with arbitrary joints and faults[J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(1): 49 - 72.
- [14] GONZALEZ-PALACIO C, MENÉNDEZ-DÍAZ A, ÁLVAREZ-VIGILA E, et al. Identification of non-pyramidal key blocks in jointed rock masses for tunnel excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(3): 179 - 200.
- [15] 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): 2 043 - 2 048.(ZHANG Qihua, WU Aiqing. General methodology of spatial block topological identification with stochastic discontinuities cutting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2 043 - 2 048.(in Chinese))
- [16] ZHANG Y T, XIAO M, CHEN J T. A new methodology for block identification and its application in a large scale underground cavern complex[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(2): 168 - 180.
- [17] 张子新. 分形块体理论及其岩体工程中的应用研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 1994.(ZHANG Zixin. Fractal block theory and its application to rock engineering[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1994.(in Chinese))
- [18] 郑 虎, 王 俊, 陈良波. 赤平解析法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 低温建筑技术, 2009, 31(12): 56 - 61.(ZHENG Hu, WANG Jun, CHEN Liangbo. Application of stereo-analytical method to the partial stability of slope[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009, 31(12): 56 - 61.(in Chinese))
- [19] 毛海和, 夏才初, 张子新, 等. 块体理论赤平解析法在龙滩水电站地下厂房洞室群稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1 308 - 1 314.(MAO Haihe, XIA Caichu, ZHANG Zixin, et al. Application of stereo-analytical method for block theory to the stability of Longtan Hydropower Station underground powerhouse[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1 308 - 1 314.(in Chinese))
- [20] 梁 宁, 伍法权, 刘 彤, 等. 块体理论赤平解析法在锦屏二级水电站皮带机隧道稳定分析中的应用[J]. 工程地质学报, 2009, 17(3): 383 - 388.(LIANG Ning, WU Faquan, LIU Tong, et al. Application of block theory based stereo-analytical method to stability analysis of conveyor tunnel at Jinping II Hydropower Station[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(3): 383 - 388.(in Chinese))
- [21] 张子新, 廖一蕾. 赤平解析法软件开发及其在水封油库中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(11): 1 452 - 1 456.(ZHANG Zixin, LIAO Yilei. Software development based on stereo-analytical method for block theory and its application to water-tight oil storage[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2009, 37(11): 1 452 - 1 456.(in Chinese))
- [22] ZHANG Z X, KULATILAKE P H S W. A new stereo-analytical method for determination of removal blocks in discontinuous rock masses[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2003, 27(10): 791 - 811.
- [23] 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: 中国水利水电出版社, 1988.(LIU Jinhua, LU Zuheng. Block theory and its application to rock engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 1988.(in Chinese))