

开挖卸荷条件下大型地下硐室块体稳定性的对比分析

黄 达¹, 黄润秋¹, 王家祥²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 长江水利委员会三峡勘测研究院, 湖北 宜昌 443003)

摘要: 运用 FLAC^{3D} 软件对三峡地下电站主厂房的典型边墙和顶拱块体分别进行三维数值模拟分析, 对比分析其模拟结果表明: (1) 边墙块体在水平垂直厂房轴线(x 方向)和铅直(y)方向上应力均表现出卸荷特征, 特别是 x 方向。其变形主要以向开挖区卸荷回弹变形为主; (2) 顶拱块体在 x 方向表现为压应力, 其值随开挖逐渐增加, 而 y 方向只是在开挖初期卸荷, 但随后面的开挖有逐渐回升的趋势。其变形在 x 方向为挤压变形, y 方向块体下部向下变形, 而上部因挤压而表现出向上变形; (3) 大型地下硐室开挖过程中, 块体的应力 - 形变场特征对顶拱块体稳定是有利的, 而对边墙块体是不利的。因此, 通常的极限平衡分析结果, 对边墙块体是偏高的, 而对顶拱块体是偏于保守; (4) 提出通过变形特征来定性判断块体整体稳定性和通过塑性区分布规律来定量评价块体的局部稳定性的方法。

关键词: 岩石力学; 卸荷; 地下硐室; 块体; 应力; 变形; 稳定性; 数值模拟

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 4115 - 08

CONTRASTIVE ANALYSIS OF STABILITY OF BLOCK IN LARGE UNDERGROUND CAVERNS UNDER CONDITIONS OF EXCAVATION AND UNLOADING

HUANG Da¹, HUNAG Runqiu¹, WANG Jiexiang²

(1. *Stated Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China*; 2. *Institute of Three Gorges Exploration Design, Changjiang Water Resources Commission, Yichang, Hubei 443003, China*)

Abstract: 3D numerical simulation of typical sidewall and crown blocks is carried out for underground powerhouse of the Three Gorges Project. The following results can be drawn. (1) The sidewall block is in unloading stress state in vertical direction(y -direction) and horizontally perpendicular to powerhouse axis(x -direction), especially the latter and its main deformation is horizontally unloading rebound to excavated zone. (2) The compressive stress of the crown block is gradually increased in x -direction along with excavation, but the vertical stress is in unloading state in initial excavation stages and gradually increases along with latter excavation. Its main deformation is compressive in x -direction, but in y -direction, the lower part of block goes down because of unloading and the upper part goes up because of x -direction extrusion. (3) The stress-deformation field of blocks in process of excavation is beneficial to the stability of crown blocks, but unfavorable to the sidewall blocks. So, the calculation result based on rigid body limit equilibrium theory is over-estimated to sidewall blocks, but conservative to crown blocks. (4) The authors present that the method of qualitatively judging block general stability by its deformation and of quantificationally evaluating local stability by plastic zone characteristics.

收稿日期: 2006 - 06 - 28; **修回日期:** 2006 - 08 - 30

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司“雅砻江水电开发联合研究基金”资助项目(50539050)

作者简介: 黄 达(1976 -), 男, 2001年毕业于太原理工大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程和地质工程方面的研究工作。

E-mail: hdcqy@126.com

Key words: rock mechanics; unloading; underground cavern; block; stress; deformation; stability; numerical simulation

1 引言

地下洞室的块体稳定性问题是其围岩稳定性的主要问题之一,以往一般是采用只考虑重力条件下刚体极限平衡分析方法,并通过其计算的稳定性系数来评价块体的稳定状态,这种方法在工程中得到了广泛的应用,并编制了较多相应的软件^[1~4]。但这种方法存在着明显的缺陷:(1)没有考虑构造应力场及开挖卸荷对块体稳定性的影响;(2)把块体作为刚体来考虑,无法了解其局部的应力和变形特征。

本文选取三峡水电站地下厂房开挖存在的典型块体(顶拱和边墙各一块),运用FLAC^{3D}(fast Lagrangian analysis of continua in 3D version 2.1)^[5]对开挖卸荷过程中块体的二次应力场和变形特征进行了三维数值模拟分析,在此基础上,对开挖卸荷条件下顶拱和边墙块体的应力、变形和塑性区进行了对比分析,并提出了通过变形和塑性区分布特征来评价块体稳定性的方法。

FLAC^{3D}是一种利用拖带坐标系分析大变形问题的数值方法,并用差分格式按时步积分求解,可考虑岩土体的复杂性、可变性以及非均质、不连续、大变形、非线性和应变软化特性等。与有限元软件相比,FLAC^{3D}有以下优点:采用混合离散化法正确模拟了塑性破坏及塑性流动;采用动态方程求解,克服了系统模型内的不安定因素;采用显式解析法,不需要建立刚性矩阵,节省内存,在解决非线性问题时大大提高了运算速度。FLAC是力学计算的数值方法之一,源于流体动力学,把拉格朗日法移植到固体力学中,将所研究的区域划分成网格,其节点就相当于流体质点,然后按时步采用拉格朗日法来研究网格节点的运动。该软件可以有效地模拟岩土体及其他材料结构的工程力学行为,具有能满足岩土工程结构分析的基本单元模式。

2 工程概况及基本地质条件

三峡水利枢纽地下电站布置于右岸白岩尖山体内,主厂房共安装6台700 MW水轮发电机组。厂房洞室断面为直墙曲顶拱型,顶拱高程105.3 m,机

窝开挖高程18.0 m,厂房最大高度87.3 m,全长329.5 m,厂房吊车梁以上跨度为32.60 m,吊车梁以下为31.00 m,轴线方位为43.5°。

地下电站区基岩为前震旦系闪云斜长花岗岩和闪长岩包裹体混合岩带,以II类围岩为主,块状~次块状结构,主要为微新岩体。厂房区断层按走向主要分为NNW, NE~NEE, NWW及NNE四组,以陡倾角为主。根据对开挖顶拱的裂隙统计表明:裂隙以走向NNW最为发育,其次为NNE, NE~NEE, NWW~EW向最少,倾角以陡倾角为主。

厂房区围岩条件较好,但断层和长大裂隙较发育,由这些软弱结构面构成的块体稳定性问题成为围岩稳定的主要问题,特别是主厂房区最发育的两组断层为NNW及NNE~近EW向,前者主要倾向SW,后者主要倾向NW,因此,当这两组方向的断层相邻出现时,容易在主厂房的下游边墙组合切割构成不利块体。

3 模型建立

3.1 模型中选的块体的几何特征

本文选取厂房下游边墙1#块体和顶拱21#块体两典型块体进行对比分析。

下游边墙1#块体由断层 $f_{285}(255^\circ \angle 85^\circ)$, $f_{10}(320^\circ \angle 50^\circ)$, $F_{84}(340^\circ \angle 70^\circ)$ 及断层型裂隙 $Tf_1(131^\circ \angle 35^\circ)$ 切割而成,块体最大高度61.77 m,最大深度24.97 m,沿厂房轴线最大长度50.4 m,体积约21 400 m³。顶拱21#块体由 $f_{143}(340^\circ \angle 57^\circ)$, $F_{22}(254^\circ \angle 72^\circ)$ 、断层型裂隙 $Tf_0(325^\circ \angle 56^\circ)$ 及长大裂隙 $T_2(47^\circ \angle 52^\circ)$ 切割而成,块体最大宽度(水平垂直厂房轴线方向)12 m,最大深度14.5 m,沿厂房轴线最大长度13 m,体积约920 m³。两块体均为单滑面块体,底滑面分别为 f_{10} , f_{143} 。块体的空间分布见图1。

3.2 计算范围及岩体的物理力学参数

顶拱和边墙块体分别建立两个相似的模型,模型的几何形态及大小一样,只是断层或裂隙切割不同。厂房轴线方向(模型z方向)取100 m;垂直厂房轴线的水平方向(模型x方向),上下游侧各取100 m,洞室跨度31 m,共231 m;沿直方向(模型

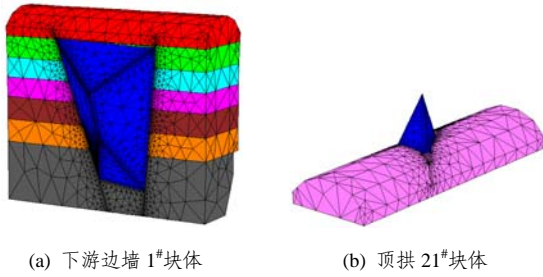
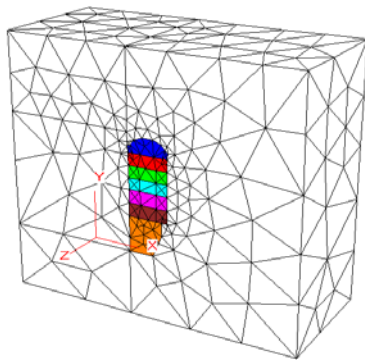
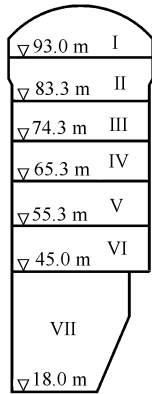


图 1 块体的空间分布图
Fig.1 Space distribution of blocks

y 方向)取海拔 168~−32 m。结构面按实际平均宽度采用软弱岩层进行模拟。为了减小模型边界影响,块体位于模型的中心部位。厂房分 7 步开挖,见图 2。



(a) 计算模型及网格划分



(b) 开挖步骤

图 2 计算模型及开挖步骤

Fig.2 Calculating model and stage of excavation

数值模拟中,采用理想弹塑性岩体材料,岩体和结构面的物理力学参数取值见表 1,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 准则,即

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} \quad (1)$$

$$f_t = \sigma_3 - \sigma_t \quad (2)$$

表 1 岩体的物理力学参数

岩体类型	密度 (/kg · m ⁻³)	变形模量 (/GPa)	抗拉强度 (/MPa)	黏聚力 (/MPa)	摩擦角 (/°)	泊松比
微新岩体	2 700	30.00	3.50	1.80	56	0.20
断层或裂隙	2 560	1.05	0.07	0.15	31	0.35

式中: σ_1, σ_3 分别为最大、最小主应力; c, ϕ, σ_t 分别为材料的黏聚力、内摩擦角和抗拉强度; $N_\phi = (1 + \sin \phi)/(1 - \sin \phi)$ 。当 $f_s = 0$ 时,材料将发生剪切破坏;当 $f_t = 0$ 时,材料将发生拉伸破坏。

对于 FLAC^{3D} 数值计算所要求的参数体积模量 K 和剪切模量 G 可以通过下式进行换算:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

式中: E 为变形模量, ν 为泊松比。

3.3 模型的边界条件

厂房区原岩应力随深度增加而增加,最大水平主应力 σ_1 为 7.0~12.5 MPa,最小水平主应力 σ_2 为 3.2~9.0 MPa,两者差值 3~5 MPa,垂直应力 σ_3 为 2~6 MPa, σ_1 与厂房轴线的夹角为 80°。为了更好地模拟原岩应力场,本文参照李仲奎等^[6]的方法,在模型的上、下游边界(x 向)、左、右端面(z 向)及顶面施加应力边界,模型底部法向位移约束。经反复反演计算,使其与原岩应力达到较佳的似合效果。开挖计算之前,将原岩应力反演计算过程中的节点位移全部归零,而且卸除模型边界上的应力(除顶部重力应力外),并将相应面的边界条件改为法向位移约束。

4 计算结果对比分析

因为两块体的潜在滑面走向均与厂房轴线基本一致,因此,分析块体水平垂直厂房轴线方向(x 方向)和铅直方向(y 方向)的应力(σ_x, σ_y)和位移(U_x, U_y)变化比较具有实际意义。模型中分别对两块体设置了跟踪点:块体临空面中心(A)、块体潜在滑面中心(B)、块体中心(C),下面的应力和位移动态变化曲线的波动是受开挖影响的。

4.1 开挖过程中块体的应力特征

FLAC^{3D} 中的应力方向约定:压为负、拉为正。

从开挖过程中边墙块体应力变化特征可以看出(见图 3, 4): (1) 边墙块体的 σ_x 在块体开挖暴露之前变化不大, 甚至出现一定程度的升高; 待开挖暴露后, 临空面 σ_x 迅速降为 0, 随开挖进行, 在临空表面出现较大范围的拉应力, 最大拉应力值约为 0.6 MPa; 滑面 f10 中心的 σ_x 在第 VII 步开挖之前均为压应力, 并有少量升高, 但第 VII 步开挖后迅速卸荷, 并在结构面交接部位出现一定的拉应力区; 块体中心部位的 σ_x 在第 V 步开挖后, 随开挖进行急剧卸荷, 完全开挖结束后, 其值约为-0.5 MPa。(2) 边墙块体的 σ_y 在开挖的一定阶段出现 σ_y 升高的现象, 但滑面 f10 处却为持续的卸荷状态, 开挖到一定程度后, 均表现为卸荷, 完全开挖结束后甚至在临空表面出现大范围的拉应力区^[7,8], 最大拉应力约为 0.9 MPa; 临空面中心部位 σ_y 在第 V 开挖时出现急剧卸荷, 在第 VI 步开挖时出现最大拉应力值(约 0.8 MPa), 完全开挖后拉应力值略有降低; 块体滑面 f10 和块体中心均在第 VII 步开挖时出较大的卸荷。(3) 完全开挖后, 边墙块体在 x 和 y 方向均表现出卸荷特征, 且卸荷程度由临空表面向内部逐渐减小, 由临空面附近的拉应力状态向内部逐渐变为压应力状态。

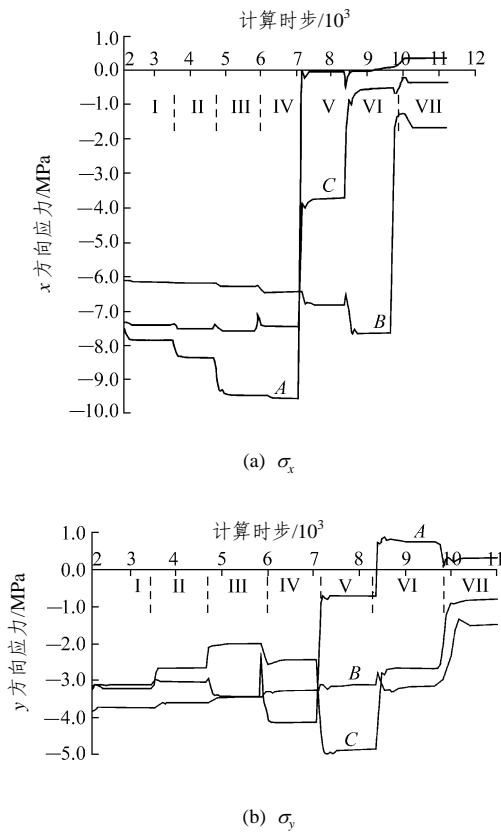


图 3 边墙块体应力随开挖卸荷动态变化
Fig.3 Dynamic curves of stress of side wall block

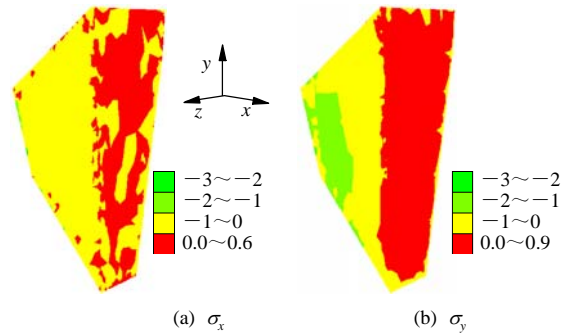


图 4 完全开挖后边墙块体应力等值线图(单位: MPa)
Fig.4 Contours of stress of side wall block after completely excavated(unit: MPa)

开挖过程中顶拱块体应力的变化特征表明(见图 5, 6): (1) 顶拱块体的 σ_x 随开挖进行逐渐增加, 平均增加量约 4 MPa, 在第 VII 步开挖之前, 其值大小为临空面中心最大, 其次为块体中心, f143 滑面

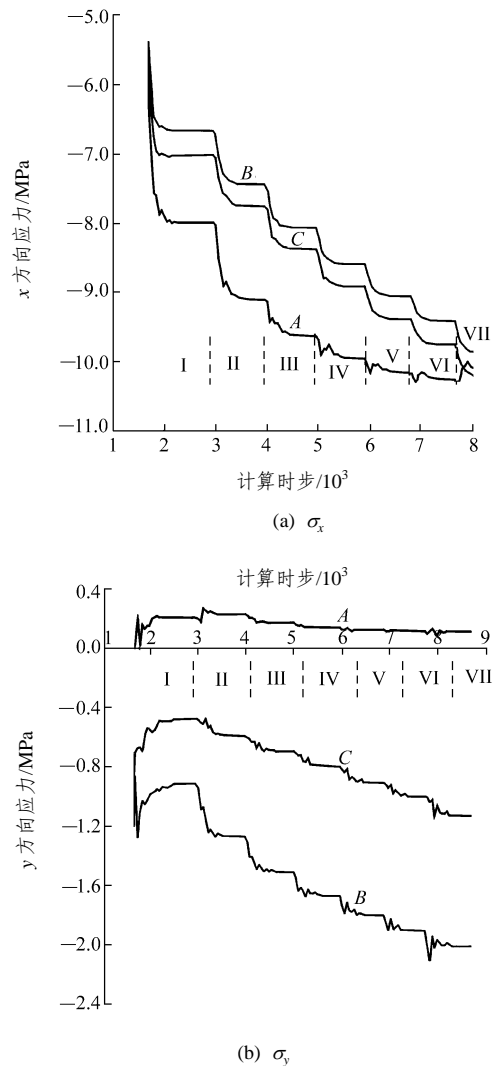


图 5 顶拱块体应力随开挖卸荷动态变化
Fig.5 Dynamic curves of stress of crown block

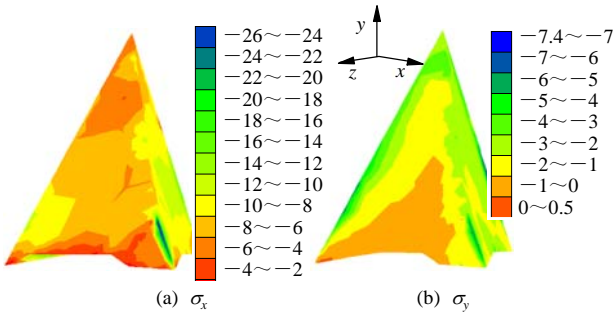


图 6 完全开挖后顶拱块体应力等值线图(单位: MPa)
Fig.6 Contours of stress of crown block after completely excavated(unit: MPa)

中心最小, 由于第 VIII 步开挖高度相对较大, 临空面中心的 σ_x 发生少量的相对卸荷; 完全开挖后, 在块体切割面与临空面的交接处及其顶部尖端处为应力相对较低区(约 -4 MPa), 而在各切割面交接线的下端为应力相对集中区(约 -24 MPa)。(2) 顶拱块体的 σ_y 在第 I 步顶拱开挖后急剧卸荷, 在块体临空表面出现拉应力, 但随后面的开挖块体较深部位的 σ_y 出现不同程度升高, 特别是 f_{143} 滑面中心附近, 但块体临空面附近一直为拉应力, 这是因为高边墙逐渐形成, 迫使顶拱块体再次发生应力重分布的结果^[8]; 开挖结束后, 块体的垂直应力 σ_y 明显分带, 从临空面向内部逐渐升高, 在 σ_x 出现应力集中的部位同样 σ_y 也相对较高。(3) 完全开挖后, 顶拱块体在 x 方向压应力增加, 而在 y 方向也只有临空面附近区域卸荷相对较大。

4.2 开挖过程中块体的变形特征

如图 7 所示: (1) 在第 I 步顶拱开挖后, 由于边墙块体还没有暴露, 边墙块体向开挖区发生少量变形; 第 IV 步开挖后, 块体较上的部位出露, 此部分向临空面水平卸荷回弹变形, 而块体下部继续向开挖区少量变形; 完全开挖后, 块体边界完全出露, 块体变形基本上为水平卸荷回弹变形, 且变形量相对较大(最大达 22.81 mm)。(2) 随开挖进行, 顶拱块体较上的部位由铅直下沉转向向上变形, 但其值相对较小; 块体较下部位的位移矢量随开挖逐渐由近垂直方向转向块体中心变形, 且在块体走向与厂房轴线近平行的切割边界上变形最大, 这是 x 方向上压应力持续增加而挤压块体变形的结果。

由于三峡地下厂房正处在施工期, 现在还只挖到第 II 步, 故其下游边墙 1#块体基本没有出露, 因此还不能收集监测资料, 顶拱 21#块体只对其进行了表观变形监测(块体临空表面中点的 y 方向位移),

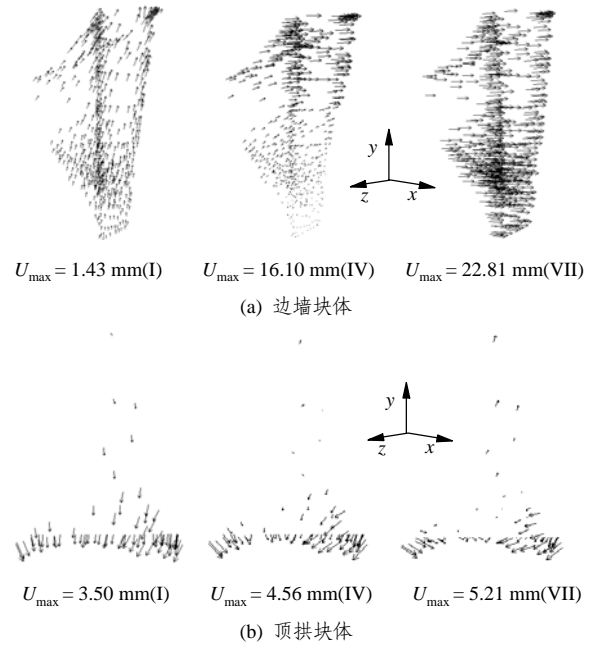


图 7 块体位移矢量图随开挖动态变化
Fig.7 Displacement with vector maps of block with different stages of excavation

其结果与计算结果基本一致。

由图 8 和 9 可知: (1) 边墙块体的 U_x 随开挖进行增加相对较快, 在第 V 步开挖之前块体的跟踪点的 U_x 增加相对较慢, 之后随开挖块体边界出露增多, 位移在开挖时出现较大值的跳跃性增加; 在最

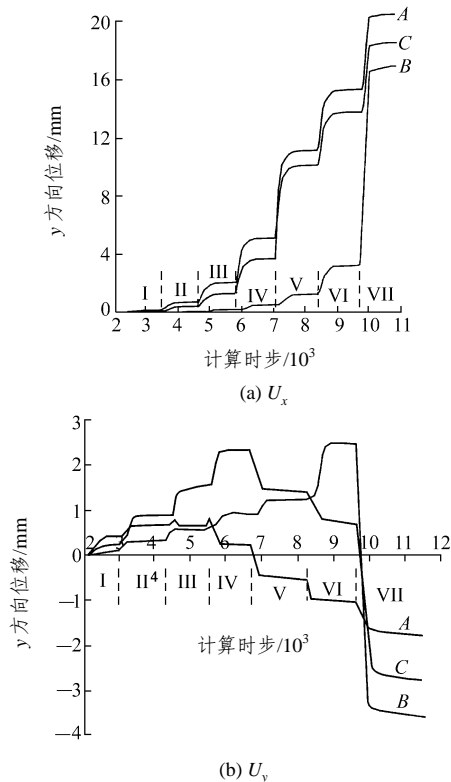


图 8 边墙块体位移随开挖卸荷动态变化
Fig.8 Dynamic curves of displacement of side wall block

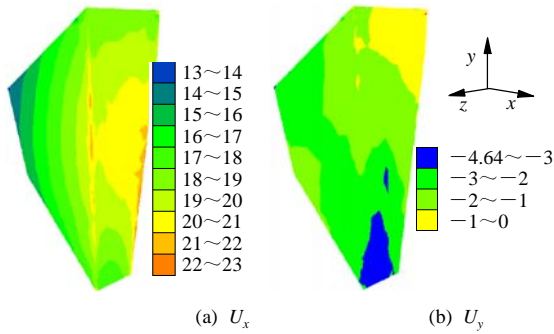


图9 完全开挖后边墙块体位移等值线图(单位: mm)
Fig.9 Contours of displacement of side wall block after completely excavated(unit: mm)

后一步开挖时, 块体滑面的 U_x 突然增加约 12 mm, 这是 f10 滑面完全出露的原因; 开挖到一定程度后, 块体的 U_x 从临空面向内部逐渐减小, 完全开挖后, 块体的临空面中心区域及 f_{285} , F84 与临空面的交接处的水平位移相对较大(最大约 23 mm)。(2) 边墙块体没有开挖出露部位的 U_y 向开挖区卸荷变形, 表现为向上变形, 而当这些部位开挖暴露后, U_y 转为向下变形; 块体 y 方向的变形比其 x 方向上的变形小得多, 完全开挖后, 块体的 U_y 在垂直方向从下至上依次减小(向下变形), 在块体下部及滑面 f10 处垂直变形相对较大(最大达到 -4.64 mm)。

图 10 和 11 显示: (1) 顶拱块体因为 σ_x 随开挖而显著增加, 在这种压应力作用下, 块体在 x 方向表现为压缩变形, 因此最大压缩变形出现在 f_{143} 和 Tf_9 与顶拱面交接处附近, 而在块体垂直 x 方向的中心面附近 U_x 最小。(2) 顶拱块体在垂直方向因为开挖初期 σ_y 卸荷明显, 因此其 U_x 向下发生卸荷变形, 但随开挖进行, σ_y 逐渐回升, 块体又转为逐渐向上变形; 完全开挖结束后, 块体的变形特征与其 σ_y 的分布相似, 呈明显的分带特征, 从下至上由垂直位移向下逐渐变为向上。

4.3 块体的塑性区分布特征

由图 12 可知: 边墙块体在块体边界和下部出现剪切塑性区, 而且在临空面附近出现一定拉张塑性区; 顶拱块体在其下部和 T_2 与 $F22$ 的交接处出现剪切塑性区, 而出现拉张塑性区的部位很少, 只在 f_{143} 和 Tf_9 与相交的局部部位出现。这种塑性区的分布特征与前面的应力、变形分析效应是一致的。

5 块体稳定性评价

5.1 二次应力场对块体稳定性的影响

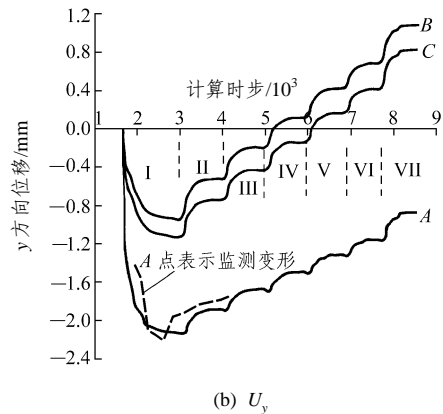
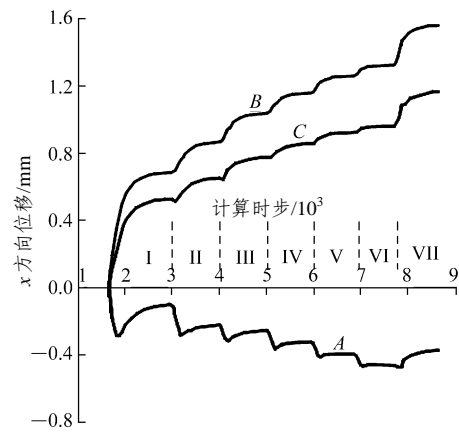


图 10 顶拱块体位移随开挖卸荷动态变化

Fig.10 Dynamic curves of displacement of crown block

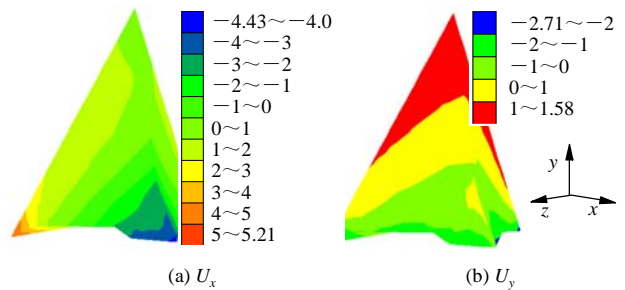


图 11 完全开挖后顶拱块体位移等值线图(单位: mm)
Fig.11 Contours of displacement of crown block after completely excavated(unit: mm)

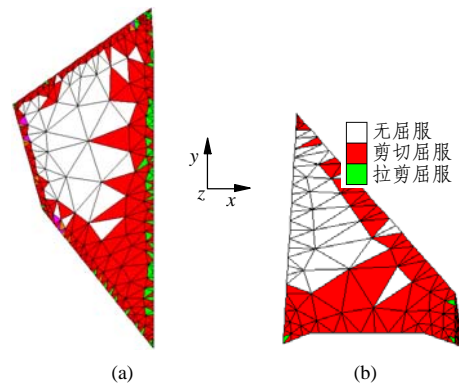


图 12 完全开挖后块体塑性区分布图

Fig.12 Distributions of block plastic zone after completely excavation

通过上面对卸荷过程中块体的二次应力场分布特征对比分析可知：地下硐室在开挖过程中，顶拱块体在水平垂直厂房轴线方向上(x 方向)处于受压状态，并且压应力随开挖逐渐增加，而铅直方向(y 方向)在开挖初期卸荷，开挖到一定程度后， σ_y 开始回升。对边墙块体，开挖过程中水平方向(x 方向)却严重卸荷，并局部出现拉应力，完全开挖后，在铅直方向(y 方向)也是处于卸荷状态。这种应力状态对块体稳定性的影响主要表现在：(1) 由于顶拱块体在 x 方向处于受压状态，围岩中的部分结构面将被压密，特别对于那些走向与厂房轴线方向基本一致的中陡倾角结构面^[9, 10]，这必定会为块体顶拱滑面提供一定的附加抗剪阻滑力，同时也使得顶拱块体很难象边坡块体一样可通过小角度的“爬坡”产生失稳^[9, 11, 12]，这为合理利用结构面的起伏对稳定性的贡献提供了支持。(2) 边墙块体在 x, y 方向均处于卸荷状态(特别是 x 方向)，这使得块体在开挖卸荷后向开挖区卸荷回弹变形，进而减小滑动面的阻滑力；(3) 地下硐室在开挖卸荷过程，块体的二次应力场对边墙块体是不利的，而对顶拱块体是有利的，因此，传统的块体极限平衡方法计算的稳定性系数，对顶拱块体而言，偏于保守，而对边墙块体，则是偏高的。按照本文的参数，利用极限平衡理论计算边墙和顶拱块体的安全系数分别为 1.26 和 1.19。

5.2 块体整体稳定性的定性评价

可以基于弹塑性数值分析的块体变形特征(或者现场的变形监测数据)来判断块体的整体稳定性，边墙块体在失稳前是以向开挖区水平卸荷变形为主，铅直方向的变形相对较小，故边墙块体的变形失稳过程为：水平卸荷回弹→沿滑面变形急剧增大→沿滑面整体滑移失稳(见图 13(a))；而顶拱块体在水平方向为挤压变形，铅直方向自下而上呈现明显分带，下部向下变形，上部向上变形，故顶拱块体的变形失稳过程一般为：挤压碎裂→差异变形拉裂→局部掉落失稳(见图 13(b))，当然卸荷带内的小块体可能在重力作用下整体掉落)。显然，块体如果整体失稳的话，是沿潜在滑面滑移的，因此，判断块体是否可能产生整体失稳应该以块体沿滑面方向的变形是否出现急剧的变化为标准。本文所分析的边墙块体在最后一步开挖时潜在滑面的位移在 x, y 两个方向上均出现了急剧的增加(见图 8，实际工

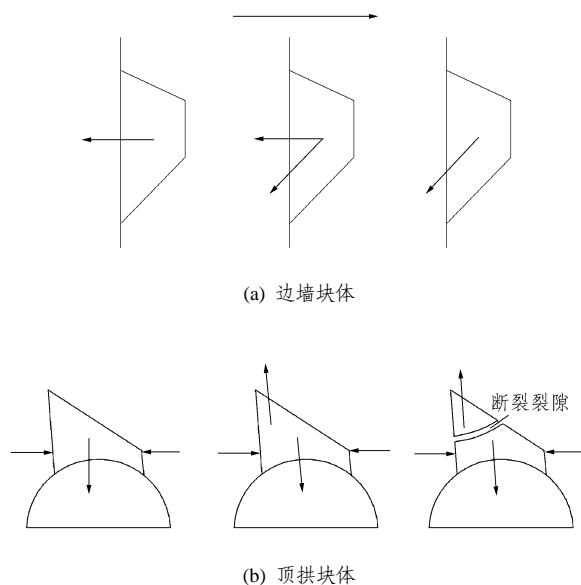


图 13 块体的变形失稳演化过程示意图

Fig.13 Sketch maps of deformation failure process of blocks

程中滑面 f10 的工程特征比计算的情况要差得多，本文为了对比分析，没有对其进行细化处理)，故此块体整体稳定性较差(但极限平衡计算的结果显示其稳定性较好)，而本文所研究的顶拱块体在两个方向均没有出现变形突变的特征(见图 10)，因此其整体稳定性较好(但极限平衡计算的稳定性一般)。

5.3 块体局部稳定性的定量评价

块体有时失稳并非是整个滑移失稳，而有可能是先局部失稳，进而使得块体其他部位跟着失稳，因此应对块体容易进入塑性区的部位加强监测，观测这些部位(块体的下部、滑面出露处及临空面附近)是否出现新的裂缝或大的变形特征。

在这里作者提出一个表征塑性单元的分布比例特征的变量稳定度 β 来定量判断块体的局部稳定性的方法(此法要求模型网格的精度较高)，稳定度的定义：块体未进入塑性区的体积与块体总的体之比，因此，块体稳定度越大表示其局部稳定性越好，其值的范围为[0, 1]，用数学表达式可表示为

$$\beta = \frac{V_{\text{非塑性区}}}{V_{\text{总}}} = \frac{V_{\text{总}} - \sum_{i=1}^n V_i}{V_{\text{总}}} \quad (5)$$

式中： n 为塑性单元数目， V_i 为某一塑性单元体积， $V_{\text{总}}$ 为某一块体总的体积。

在 FLAC^{3D} 中可以通过软件内置的 fish 语言编程来搜索和计算塑性单元的体和块体总的体积，即用弹塑性状态判断变量 $Z_state(p_z, ind)$ ，通过循

环语句在块体中搜索塑性单元,进而利用单元体积变量 $Z_volume(p_z)$ 计算其体积。通过计算可知本文分析的边墙和顶拱块体的稳定度分别为 0.67 和 0.54,因此顶拱块体的局部稳定性稍差,容易出现下部掉块或局部坍塌,而边墙块体容易出现整体滑移失稳或下部(或表层)的局部掉落。

6 结 论

本文借助大型岩土数值计算软件 FLAC^{3D},对开挖过程中,地下硐室边墙和顶拱块体的二次应力场、变形场及塑性区的分布特征进行了对比分析,发现地下硐室开挖过程中,其不同部位的块体的应力-形变特征存在着明显的差异,这种应力-形变特征的差异说明了地下硐室不同部位的块体对开挖卸荷的响应是不同的。因此应用仅考虑重力条件的刚体极限平衡计算硐室不同部位的块体的稳定性存在着不同的偏差。而比较科学的方法是:把块体的变形规律及塑性区分布特征(现场监测数据或数值计算结果)与极限平衡计算的安全系数进行比较分析,即先用极限平衡计算块体的稳定性,然后对重点的块体进行现场监测和数值分析,从而综合确定其稳定状态和加固设计。

参考文献(Reference):

- [1] BOYLE W J, GOODMAN R E, YOW J L. Field cases using key block theory[C]// Proceedings of the International Symposium. 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(3/4): 233 - 251.
- [3] HOEK E, JOE C, BIN L. Unwedge user's[R]. [S. l.]: Rocscience, Inc., 1997.
- [4] 谢 晔, 刘 军, 李仲奎, 等. 在大型地下开挖中围岩块体稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 306 - 311.(XIE Ye, LIU Jun, LI Zhongkui, et al. Stability analysis of block in surrounding rock mass of large underground excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 306 - 311.(in Chinese))
- [5] Itasca Consulting Group, Inc.. FLAC^{3D} (version 2.1) user's manual[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 2002.
- [6] 李仲奎, 戴 荣, 姜逸明. FLAC^{3D} 分析中的初始应力场生成及在大型地下洞室群计算中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 387 - 2 392.(LI Zhongkui, DAI Rong, JIANG Yiming. Improvement of the initial stress field by using FLAC^{3D} and application in a huge underground cavern group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2 387 - 2 392.(in Chinese))
- [7] 杨为民, 陈卫忠, 李术才, 等. 快速拉格朗日法分析巨型地下洞室群稳定性[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 230 - 234.(YANG Weimin, CHEN Weizhong, LI Shucai, et al. Analysis of stability of surrounding rock mass of Longtan large underground powerhouse with FLAC^{3D}[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 230 - 234.(in Chinese))
- [8] CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 833 - 847.
- [9] 张俾元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 2 版 北京: 地质出版社, 1994.(ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. Principle of engineering geology analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [10] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering geology[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [11] 黄润秋, 王士天, 张俾元, 等. 中国西南地壳浅表层动力学过程及其工程环境效应研究[M]. 成都: 四川大学出版社, 2001.(HUANG Runqiu, WANG Shitian, ZHANG Zhuoyuan, et al. The dynamic process of earths superficial crust and its engineering environmental effects[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2001.(in Chinese))
- [12] HOEK E, BRAY J W. 岩石边坡工程[M]. 卢世宗, 李成村, 夏继祥译. 北京: 冶金工业出版社, 1983.(HOEK E, BRAY J W. Rock slope engineering[M]. Translated by LU Shizong, LI Chengcun, XIA Jixiang. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1983.(in Chinese))