

缓倾层状砂泥岩地下洞室块体失稳模式及稳定性分析

张琪雪,肖先焯,许模,郭健,邵玮玺,李京天

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,成都 610059)

摘要: 缓倾层状砂泥岩地层地下洞室开挖过程中,块体失稳将威胁施工安全并造成巨大经济损失。研究缓倾层状岩体地下洞室围岩稳定性具有重要意义。论文以某水电工程的砂泥岩地层地下洞室围岩为研究对象,通过对现场勘探平洞进行精细化地质调查确定了工程区内控制块体稳定的关键节理裂隙发育特征。基于力学分析提出了几种块体典型失稳模式,采用块体理论计算了失稳块体的潜在规模。在此基础上,进一步利用三维数值模拟对工程关键部位稳定性进行计算分析。研究表明:(1)砂泥岩岩层倾角在 $11^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 之间,地下工程岩体主要的优势结构面共3组: $N60^{\circ}W/SW\angle 88^{\circ}$ 、 $N38^{\circ}W/SW\angle 87^{\circ}$ 和 $N71^{\circ}W/NE\angle 86^{\circ}$;(2)缓倾层状砂泥岩地下洞室块体失稳模式包括边墙单面剪切滑移-掉块、边墙双面剪切滑移挤出、顶拱层状剥离、顶拱掉块等4种模式;(3)块体失稳最大方量为 23.667 m^3 ,最小稳定性系数为0.695;(4)岩体的变形主要集中在洞室顶拱,距离砂泥岩地层交界位置越近,开挖影响越大,位移越大。本研究可为缓倾层状砂泥岩地下洞室施工安全提供技术支撑。

关键词: 缓倾层状岩体;砂泥岩地层;围岩稳定性分析;块体理论;失稳模式

中图分类号: P642;P694;TU457 **文献标识码:** A

UNSTABLE MODES AND STABILITY CALCULATION OF SLOWLY DIPPING LAYERED SANDSTONE AND MUDSTONE IN UNDERGROUND CAVERN BLOCKS

ZHANG Qi-xue, XIAO Xian-xuan, XU Mo, GUO Jian, SHAO Wei-xi, LI Jing-tian

(State Key Laboratory of Geological Hazards and Geological Environment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: During the excavation of underground caverns in gently dipping stratified sandstone-mudstone strata, block instability will threaten construction safety and cause great economic losses. It is of great significance to study the stability of underground cavern enclosure in gently dipping stratified rock. The thesis takes the underground cavern surrounding rock of sandy mudstone stratum of a hydropower project as the research object, and determines the key joints and cracks development characteristics that control the block stability in the project area through the refined geological investigation of the flat hole explored on the site. Based on the mechanical analysis, several typical destabilization modes of blocks are proposed, and the potential size of the destabilized blocks is calculated by using the block theory. On this basis, the stability of the key parts of the project was further calculated and analyzed using three-dimensional numerical simulation. The conclusions drawn are as follows:(1) the dip of the sandstone mudstone rock layer is between 11° and

15°, and there are three groups of main dominant structural surfaces in the underground engineering rock body, which are N60°W/SW∠88°, N38°W/SW∠87° and N71°W/NE∠86°; (2) the modes of block destabilization in underground caverns with gently dipping laminated sandy mudstone include four modes: one-sided shear-slip-drop of sidewalls, two-sided shear-slip-extrusion of sidewalls, laminated stripping of the top arch, and drop of the top arch; (3) the maximum square volume of block destabilization is 23.667 m³, and the minimum stability coefficient is 0.695; (4) the deformation of the rock mass is mainly concentrated in the roof arch of the cavern, in which the closer to the junction position of the sandstone and mudstone strata, the greater the impact of excavation and the greater the displacement. This study can provide technical support for the construction safety of underground caverns in gently dipping laminated sandy mudstone.

Key words: gently dipping layered rock mass; sandstone formation; stability analysis of surrounding rock; block theory; instability mode

随着我国西部山区经济快速发展,水电工程项目建设日益增多。在建设前期,一项重要的工作是对工程建设场地的工程勘察。众所周知,地下洞室开挖可导致洞壁、顶拱围岩失稳,威胁着施工安全和后期运行安全^[1-3]。在地下洞室修建过程中避免不开缓倾层状岩体的复杂地质环境,由于软岩强度低,承载力差,层状岩体在变形、强度上具有明显不同于均质岩体的各向异性状。因此,深入对缓倾层状砂泥岩块体稳定性进行研究是保障地下洞室安全施工和运营的重要前提。

缓倾层状岩体系指岩层倾角在 0°~15°^[4],这种岩层常见于山地、丘陵和钝角的山脉中,是构造岩层的主要形态。缓倾层状岩体是具有层次结构的岩体,它的形成通常与沉积环境、后期地壳运动等因素有关,其内部结构和性质对地质工程的设计和施工有重要影响^[5]。

Lu^[6]通过计算得到隧道掘进方向与层理面夹角大小对隧道工作面破坏模式的影响。Li 和 Mostafa 等^[7-8]讨论了层理面倾角对隧道围岩破坏的影响。张鹏飞等^[9]对 15°以内缓倾层状岩石开展单轴压缩和巴西劈裂试验,表明裂纹扩展的应力阈值受到层理角度的影响较大,缓倾层理岩体更易发生裂纹扩展。此前研究多针对层状岩体,较少涉及缓倾层状砂泥岩组合地层,且大多未能精细化研究地下洞室块体变形规律。因此,分析缓倾层状条件下的地下研究区的工程地质条件,评价块体稳定性,在此基础上提出有针对性的防护或支护措施,是保障施工安全的重要前提。

余天成等^[10]通过调查发现,在中陡倾角层状地层中,地层倾向和倾角较大,岩层之间的接触面多为不整合面。缓倾角、水平岩层条件下的地下洞室施

工时,洞室顶拱容易受到张拉及剪切内部应力作用,从而导致洞室顶拱出现发生弯曲内鼓、滑动、塌方或者块体掉落。张倬元等^[11]提出了缓倾角、水平岩层条件下的围岩变形的破坏主要为弯折内鼓。Alagha 等^[12]认为均质层状软土地基下的隧道围岩具有明显的非对称变形特征。张恩宝等人^[13-14]和国外众多学者^[15-17]皆采用有限元分析、数值模拟等手段,对洞室围岩的力学特性和稳定性开展过相关研究。

本研究所在工程区岩层缓倾,总体倾角在 11°~15°之间,受构造活动的影响,岩层层面与裂隙结构面之间的组合情况十分复杂,控制着工程开挖过程中块体形成和失稳条件。缓倾层状是一个主要的控制块体稳定性的重要结构面,一般而言,具有缓倾层状的地层稳定性相对较好,但存在砂泥岩软弱夹层的条件下,其稳定性有明显变化。论文以某水电工程为依托,通过开展野外地质调查确定了研究区的基础地质条件和水文地质条件,采用统计学理论分析了工程区的优势结构面类型及其组合特征。在此基础上,利用块体理论计算,初步预测工程区的潜在块体方量及其分布位置,提出几种这些关键块体的典型失稳模式。并采用数值分析,对工程区块体稳定性做初步计算分析,旨在为工程建设中的施工方法和支护措施提供指导,具有重要意义。

1 研究区地质略况

研究区处于构造侵蚀形成的一斜坡地带,整体属于构造侵蚀中山地貌。近场区断裂构造主要有近南北向、北东向、北西向 3 组 6 条断裂。研究区 5 km 范围内构造简单,不存在断层地表错动的影。所出露的地层主要包括上白垩统赵家店组(K₂z¹)地

层,岩层产状为 $N12^{\circ}W/NE\angle 15^{\circ}$,岩性为紫红色、灰紫色中厚层状-巨厚状砂岩、粉砂岩,局部夹薄层状泥质粉砂岩、粉砂质泥岩。根据地质测绘及钻孔揭露,砂岩、粉砂岩比例占 73.7%,泥质粉砂岩比例约占 16.2%,粉砂质泥岩比例占 10.1%。总体上,砂质岩类与泥质岩类比例约为 3:1。根据前期勘察,白垩系上统赵家店组 1 段的第 3 层(K_2z^{1-3})为中厚层状-厚层状砂岩、粉砂岩夹少量泥质粉砂岩,整体属于中硬岩,是完整性最好的岩体,适用于工程布置。地下洞室开挖将处于该层位之中,地下洞室开挖区过程中所揭露的地层岩性如图 1 所示。

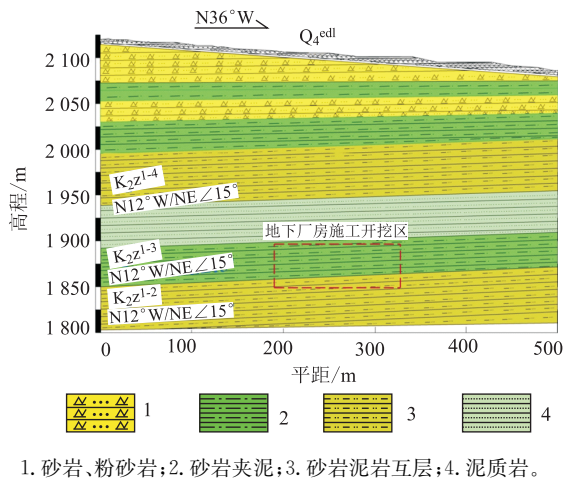


图 1 拟建地下厂房区工程地质剖面示意图

2 岩体结构特征

2.1 结构面特征描述

国内外的学者对结构面做了大量的监测和研究实验,探索结构面与工程岩体的影响^[18-20]。结构面在岩体构造中占据着关键的地位,是控制工程荷载作用下岩体变形、破坏模式以及其力学特性的主要因素之一。对于涉及低软化系数的缓倾层状砂泥岩的工程而言^[21],结构面组合形式和结构面特征是决定着工程岩体(坝肩开挖边坡、抗力体、地下厂房洞室围岩等)稳定性的主要因素。

根据勘探,研究区的断层结构面仅存在 IV 级结构面,其规模较小。通过对平洞所揭露的断层进行编录,工程区内 IV 级结构面可分为两类,分别为 IV₁ (小断层)级和 IV₂ 级(长大裂隙)。

IV₁ 级结构面主要发育在平洞 150~1 000 m 发育 25 条小断层,针对主要发育在平洞 0~1 097 m 内的 IV₁ 级结构面进行了统计,倾向优势方向为 SW 向与 NE 向,倾角中-陡倾,总体介于 80°~88°之间(图 2a)。

对主要发育在平洞 100~280 m 内 IV₂ 级(长大

裂隙)结构面进行统计,倾向的优势方向为 SW、NW 与 NE 向,倾角总体介于 65°~87°之间(图 2b)。勘探平洞内的几组优势结构面产状如图 3 所示。

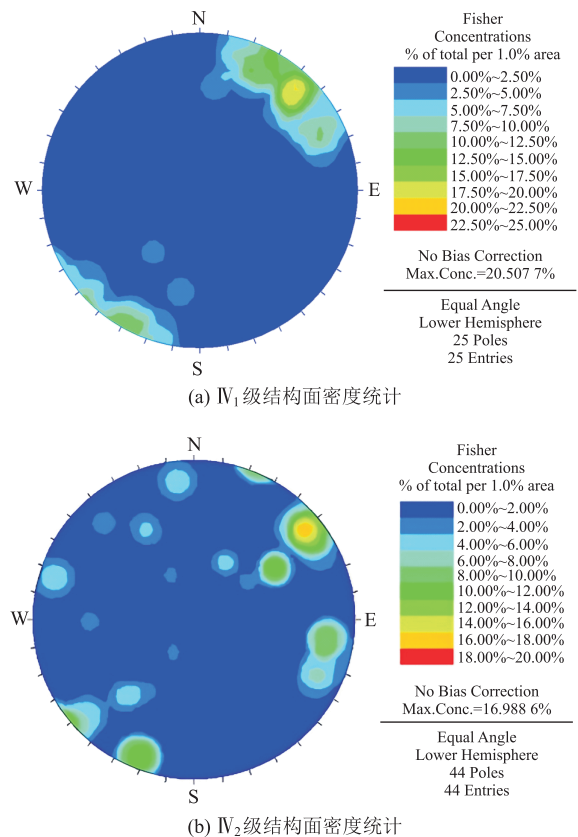


图 2 IV 级结构面密度统计

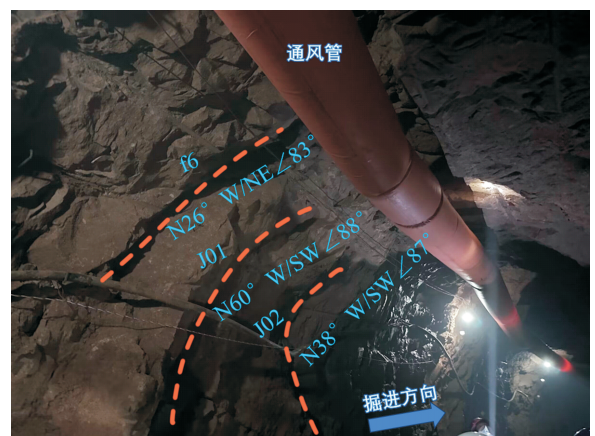


图 3 现场勘探平洞内几组优势结构面发育情况

2.2 结构面性状

洞室内的 V 级结构面主要为各种物理作用(构造、卸荷、风化)产生的节理,主要包括横节理和反倾向节理。其中,横节理走向以东北东向为主,产状约 $N60^{\circ}\sim 80^{\circ}E, NE\angle 70^{\circ}\sim 88^{\circ}$,间距约在 50~100 cm 间,节理面平直粗糙,近地表横节理多张开度好,无充填或岩屑充填。反倾向节理与岩层走向基本相

同,倾向相反,倾角近直立,产状约 N20°~50°W、SW∠70°~85°,节理间距约在 20~100 cm 之间,延伸长度大于 2 m。地表反倾向节理面平直粗糙,节理张开度也较好,无充填或岩屑充填。通过统计平

洞内 100~1 097 m 的范围内的 1 492 条基体裂隙发现,它们的倾向优势方向分别为 NE、SWW 及 SW(表 2)。裂隙结构面的倾角大,其中倾角在 82° 以上的占总节理数量的 50.1%。

表 1 平洞 PD01 的优势结构面分布及基本特征

工程部位	编号	出露位置/m	产状	宽度/m	主要特征及描述
PD01 平洞	fp-6	PD01 深 240.8	N26°W/NE∠83°	0.04~0.08	碎裂岩夹断层泥,胶结较差
	fp-23	PD01 深 1 016	N30°W/SW∠88°	0.04~0.07	碎裂岩、断层泥,胶结较差,断面起伏粗糙
	g1	PD01 深 196.2	N39°W/SW∠82°	0.08~0.1	贯穿平洞,裂隙张开度好,平直粗糙,泥质充填,从洞顶沿裂隙滴渗水
	g3	PD01 深 265.5	N69°W/NE∠84°	0.05~0.08	贯穿平洞,裂隙张开度好,平直粗糙,泥质充填
岩层	/	/	N12°W/NE∠15°	/	为中厚层状-厚层状砂岩、粉砂岩夹少量泥质粉砂岩,整体属于中硬岩

表 2 洞室内优势节理统计表

平洞编号	组序	优势节理产状	占比/%	数据来源
PD01	J01	N60°W/SW∠88°	26	据勘察资料
	J02	N38°W/SW∠87°	52	
	J03	N71°W/NE∠86°	22	

3 围岩块体失稳模式及稳定性计算

3.1 块体理论

块体理论是由 20 世纪 70 年代末 Goodman 和石根华^[22]共同提出了块体理论。该理论是岩土工程领域中用于分析和评估围岩稳定性的一种重要方法。它假定结构面为平面,由结构面切割而成的块体为刚体,利用几何拓扑方法分析岩体在不同开挖面上可能失稳的块体类型,并研究相应块体的稳定性支护措施。块体理论的核心就是找出临空面上的关键块体。

块体理论具体分析手段有两种:一是作图法:采用全空间赤平投影方法直接作图求解;二是矢量运算法:将空间平面合力系以矢量表示,通过矢量给出全部关键块体理论分析结果。

3.1.1 作图法

全空间赤平投影法是一种在岩土工程中广泛应用的图形学方法,用于简化和直观地表示三维空间中的结构面和块体运动。该方法通过将三维空间中的结构面投影到二维平面上,从而便于观察和分析块体的稳定性和潜在的滑动模式。

3.1.2 矢量运算法

当块体失稳运动表现为平行移动时,块体的运动模式有 3 种,即直接塌落、单面滑动和双面滑动^[23](图 4)。在对可动块体进行矢量分析时,假定块体仅受重力 \vec{r} 作用,且其大小 $W = w(v, y)$,方向 $\vec{r} = (0, 0, -1)$,可动块体运动方向为 \hat{s} ,各结构面向内单位法向矢量为 \hat{v}_i ,滑面指向块体内部的单位法

向矢量为 \hat{v}_i ,合力在结构面 i 和 j 上的投影为 \hat{s}_i, \hat{s}_j 。各模式的判断可按如下公式进行:

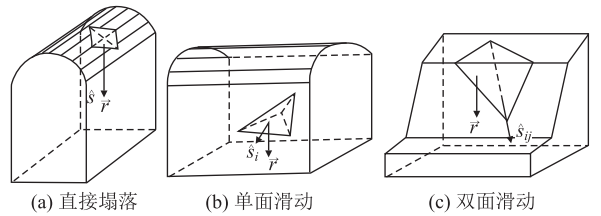


图 4 块体的运动模式

(1) 直接塌落

当块体为脱离岩体运动时,其运动学条件必须满足 $\hat{r} \cdot \hat{r}_i > 0$,块体运动方向 \hat{s} 与主动力合力 \vec{r} 的方向 \hat{r} 一致,即:

$$\hat{s} = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} = \hat{r} \quad (1)$$

(2) 单面滑动

若可动块体沿单面 i 滑动,其运动学条件必须满足 $\vec{r} \cdot \hat{v}_i \leq 0$ 且 $\hat{s} \cdot \hat{v}_i > 0$ 。其方向 \hat{s} 与主动力合力 \vec{r} 在该平面上的投影方向 \hat{s}_i 一致,即^[24]:

$$\hat{s} = \hat{s}_i = \frac{(\hat{n}_i \times \vec{r}) \times \hat{n}_i}{|\hat{n}_i \times \vec{r}|} \quad (2)$$

式中, \hat{n}_i 为结构面 i 的向上法向矢量。

(3) 双面滑动

若可动块体沿两个结构面 i 和 j 双面滑动,其运动学条件必须满足 $\hat{s}_i \cdot \hat{v}_i \leq 0, \hat{s}_j \cdot \hat{v}_j \leq 0$ 及 $\hat{s} \cdot \hat{v}_l \leq 0$ (l 为可动块体的各结构面,且 $l \neq i \neq j$)。块体沿两结构面的交线运动,即^[24]:

$$\hat{s} = \hat{s}_{ij} = \frac{\hat{n}_i \times \hat{n}_j}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|} \text{sign}[(\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot \vec{r}] \quad (3)$$

式中, \hat{n}_j 为结构面 j 的向上法向矢量。

全空间赤平投影在确定可动块体时具有的简便性,其直观的图示能避免矢量法较为繁琐的计算步骤,极大地简化了分析流程。在判定可动块体的运动模式时,两者必须相互补充,共同发挥作用,确保

了分析的准确性和完整性。

3.2 块体组合形式

由于陡倾裂隙发育的随机性,在块体形成情况分析中,只考虑优势裂隙与Ⅳ级结构面的组合。据调查,结构面的主要优势方位如表 2 所示。因此,可根据隧道开挖方向形成的临空面、岩层层面及优势陡倾结构面三者的空间交切关系,分析最有可能形成的块体。采用全空间赤平投影法,求解了形成块体的组合模式(图 5)。

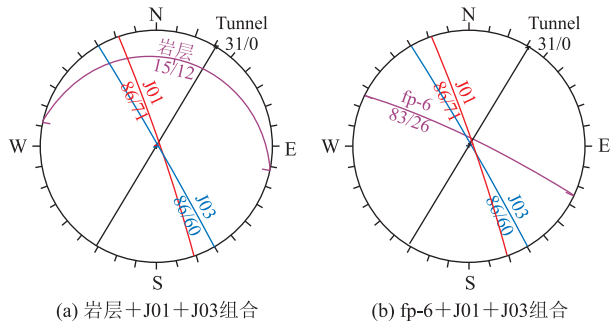


图 5 基于赤平投影的地下厂房区洞室边墙优势结构面分析

3.3 洞室块体失稳模式

根据块体理论,采用地质过程-量化分析的思想,对工程区的围岩失稳模式进行了深入分析。分析认为,考虑洞顶和洞边墙是主要的失稳位置,将块体失稳模式分为边墙单面剪切滑移-掉块、边墙双面剪切滑移挤出、顶拱层状剥离、顶拱掉块等 4 类。其主要失稳过程分析如下:

(1) 模式一:边墙单面剪切滑移-掉块

砂泥岩互层的地层中,工程开挖后,由于边墙岩体的抗剪强度不足,导致边墙局部发生剪切滑移并掉落,这种情况通常出现在边墙中下部。由陡倾结构面切割而成的岩层,其受力模式可以类比为典型压杆受力模型,地下洞室围岩在压杆受力模型的受力条件下,受到上覆岩体压力和边墙部位围岩的挤压导致岩层向内变形破坏。当围岩受到压杆破坏时,缓倾层面会加剧这种破坏过程。同时,受到几组结构面的切割,岩体会形成楔形块体(图 6a)。块体的几个主要结构面虽然受到法向支持力,但其支持力不足以抗衡上覆岩体压应力,如图 6b 中结构面 2 和 3,块体沿结构面 1 单面向下滑动,从而导致洞壁块体滑移破坏。

(2) 模式二:边墙双面剪切滑移挤出

边墙双面剪切滑移挤出模式是岩层受到上覆岩层和侧向岩层的重力作用,岩层向边墙内侧弯曲变形。缓倾岩层受到岩石自重应力和早期构造应力的作用,由隧道开挖方向形成的临空面、岩层层面及几

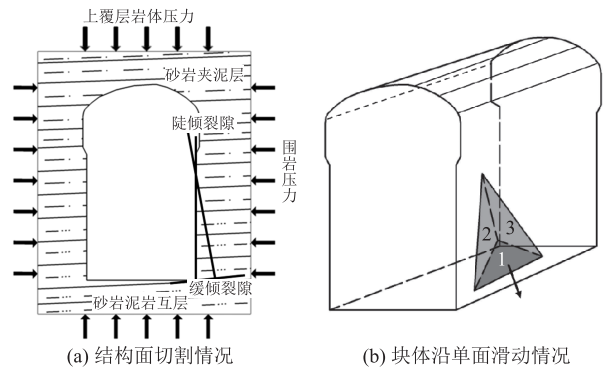


图 6 边墙单面剪切滑移-掉块模式

组优势陡倾结构面互相切割形成块体,块体同时沿结构面 2 及 3 运动逐渐滑落挤出(图 7),并沿洞室边墙两平面的交线运动,它们的运动方向与主动力合力呈锐角相交。

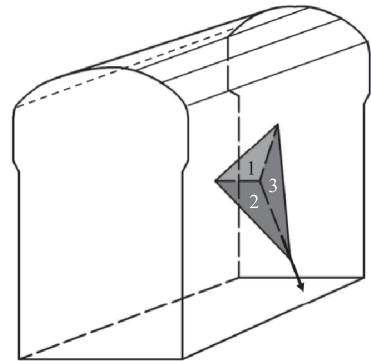


图 7 边墙双面剪切滑移挤出失稳模式

(3) 模式三:顶拱层状剥离

层状缓倾岩层地下洞室中,洞室顶拱部位围岩块体的变形破坏主要由岩层层面和与岩层层面近垂直发育的系列陡倾结构面所控制。洞室顶拱在受上覆岩层自重应力作用和顶拱临空条件下,块体发生层状剥离现象,此破坏过程可概化成简支梁受力模型。如图 8a 所示,由于岩体的抗拉性能较弱,在简支梁承受弯矩最大区域内很容易发生张拉破坏,这样的区域内会出现应力集中的情况,产生裂纹。随时间延续,裂纹朝顶拱上部方向延伸扩展,并最终贯通(图 8b)。此时,简支梁断裂,转变成了悬臂梁,悬臂梁随后会继续弯曲并下沉,当其挠度超出特定阈值时,岩层会发生弯剪破坏,出现掉块现象(图 8c)。

(4) 模式四:顶拱掉块

洞室拱形结构的最大特点是能够将外部的荷载转移成压应力及压扭力,这些力通过顶部传递,最终形成水平反力。由于隧洞开挖后薄层状砂泥岩岩层所受的拉应力在顶拱附近增大,压应力在拱肩附近增大,在顶拱产生受力(张力)变形,顶拱张应力超过

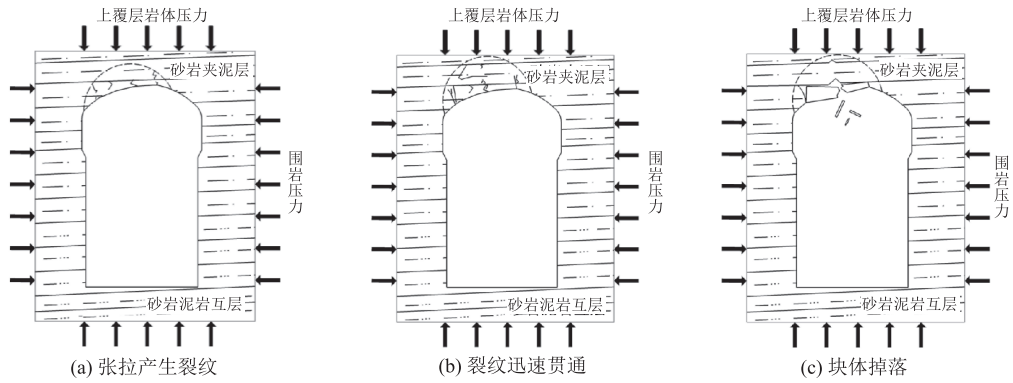


图 8 顶拱层状剥离过程示意图

岩石抗拉强度时,将产生横向裂缝(图 9a)。随着变形的持续增长,裂缝扩展延伸形成缓倾角张性裂隙,洞室内顶部的缓倾角张性裂隙在陡倾构造裂隙的切

割作用下形成不规则块体(图 9b),同时该部位塑性区扩大,块体在自身重力作用下发生掉落现象(图 9c)。

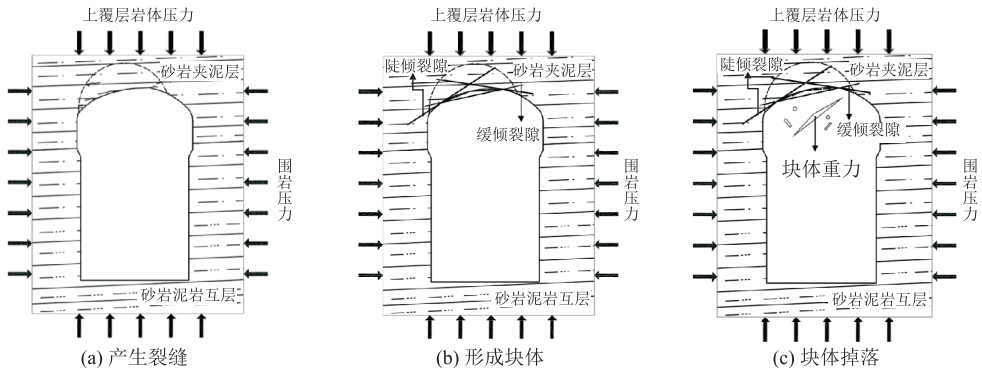


图 9 顶拱掉块过程示意图

3.4 块体稳定性计算

块体失稳模式主要有块体沿单面滑动、双面滑动和直接塌落 3 种方式。在不同的块体运动方式下,考虑滑移面的黏聚力作用,块体的稳定系数按下面的公式求出^[25]:

(1) 直接塌落

块体脱离岩体时,块体只受主动力合力 \bar{T} 的作用,无抗滑力作用,稳定系数为 0。

(2) 沿单面滑动块体

$$F_S = \frac{N_i \cdot \tan\varphi_i + c_i \cdot S_i}{P_i} \quad (4)$$

(3) 沿双面滑动块体

$$F_S = \frac{N_i \tan\varphi_i + N_j \tan\varphi_j + c_i S_i + c_j S_j}{P_{ij}} \quad (5)$$

符号说明: c 、 φ 、 S_i 、 S_j 分别为主滑动面的黏聚力、内摩擦角及块体沿 i 、 j 方向滑移面积; $\tan\varphi_i$ 、 c_i 、 $\tan\varphi_j$ 、 c_j 分别表示滑面 i 、 j 的摩擦系数和黏聚力; N_i 、 N_j 为合力在 i 、 j 面法向方向上的分量; P_i 为合力在 i 上沿切向上的滑动力分量; P_{ij} 为块体沿 i 、 j 交线方向上的滑动力。

根据现场勘察和室内岩石力学实验,结合《工程岩体分级标准》,块体计算分析的主要力学参数包括,节理的内摩擦角为 30° ,黏聚力为 $0.1 \text{ (kN/m}^2\text{)}$;断层的内聚力为 31° ,黏聚力为 $0.15 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ 。

参考不同块体计算公式、参数取值和已有资料,计算得出了工程区可能出现不稳定块体的体积大小和稳定性系数(表 3)。结果显示,工程区半确定性块体规模基本在 $1 \sim 40 \text{ m}^3$ 以内,最大为 23.667 m^3 ,随机性块体规模在 10 m^3 以下的占总数的 70%,其中关键块体有 5 处,潜在失稳块体有 5 处。延伸性好的缓倾层状结构面和两组陡倾结构面结合易产生不稳定块体,且多发生在顶拱和洞室右边墙上部,但块体规模较小。

4 地下洞室开挖中岩体变形稳定性分析

针对上述地下洞室块体稳定性问题,提出了 4 种块体失稳模式,其中边墙双面剪切滑移挤出和顶

表 3 洞室各块体稳定性分析

位置	块体编号	组成块体结构面组合形式		体积/ m^3	稳定性系数	滑动方式	稳定性	块体失稳模式	
主厂房	左边墙	1-1#	岩层	J01 J03	18.548	0.695	双滑	欠稳定	边墙双面剪切滑移挤出
	右边墙	2-1#	岩层	J01 J03	5.954	0.650	单滑	欠稳定	边墙单面剪切滑移-掉块
	右边墙	2-2#	岩层	J02 J03	14.238	0.675	双滑	欠稳定	边墙双面剪切滑移挤出
	顶拱	3-1#	岩层	J01 J03	1.582	0	塌落	欠稳定	顶拱层状剥离
	顶拱	3-2#	f23	J02 J03	23.667	0	塌落	基本稳定	顶拱掉块
平硐	左边墙	4-1#	f6	J01 J03	4.012	1.135	双滑	基本稳定	边墙双面剪切滑移挤出
	左边墙	4-2#	g1	J01 J03	1.825	1.320	单滑	基本稳定	边墙单面剪切滑移-掉块
	右边墙	5-1#	f6	J01 J03	9.838	1.176	双滑	基本稳定	边墙双面剪切滑移挤出
	右边墙	5-2#	g1	J02 J03	1.875	1.441	单滑	基本稳定	边墙单面剪切滑移-掉块
	顶拱	6-1#	g1	J02 J03	8.158	0	塌落	欠稳定	顶拱掉块

拱掉块这两种模式产生的块体体积大,但稳定性总体较好,而顶拱层状剥离模式产生的块体体积小,处于不稳定状态(表 1)。由于工程部位的缓倾岩层洞室的顶拱位置比较特殊,相对于陡倾角和中倾角地层,中缓倾结构面的空间延展性更好,特别是在顶拱部位,由于缓倾结构面的控制,在开挖过程中易发生顶拱塌落,导致围岩块体失稳。洞室在开挖后应力场得到了调整和重分布,导致洞室围岩产生损伤,塑性区的范围大小指示着围岩损伤程度,因此,通过对地下洞室块体失稳模式的分析,利用三维数值模拟分析研究区岩体在洞室开挖过程中顶拱围岩应力应变响应特征,可更深层次认识缓倾岩体在工程施工开挖工况下的变形破坏特征和稳定性。

工程部位以 K_2z^1 砂岩和泥岩地层为主,根据前期资料,其分为 12 个工程岩组。按照主厂房、主变室、母线洞的布置方案来建立三维数值模型,主厂房与主变室之间岩柱厚度 40 m。以 $N51^\circ E$ 方向(平行于厂房纵轴线方向)为 X 轴正方向;以 $N39^\circ W$ 方向(垂直于厂房轴线方向)为 Y 轴正方向;以铅直方向向上为 Z 轴正方向,其负方向即重力方向。模型尺寸为 $400\text{ m} \times 560\text{ m} \times 800\text{ m}$ 。厂房开挖区属特殊工

程部位应采用自动网格加密,模型计算采用四面体实体单元,模型总单元数 493 040 个,节点总数 88 288 个。根据现场勘察和室内岩石力学实验,对各层进行单独赋值,数值模拟中关键岩层(第 1~4 及第 10 层)的主要力学参数见表 4,其他岩层(第 5~9 及第 11~12 层)参数均依照室内土工试验和岩石力学测试得到,与关键岩层总体相似,不逐项列示。主厂房、主变室、母线洞主要位于模型的砂岩夹泥岩分层,模型构建结果如图 10 所示。

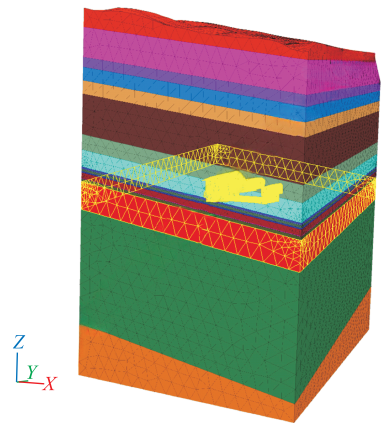


图 10 三维数值模型分层构建示意图

表 4 工程区数值模型岩体力学参数参照表

地层序号	岩体类别	级别	重度 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	泊松比	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	抗剪断 C'/MPa	摩擦角 $f'/^\circ$	抗拉强度 $/\text{MPa}$	变形模量 E_0/GPa
第 1 层	砂岩、粉砂岩	IV	2.4	0.3	10.42	4.81	0.4	26.6	1.5	5
第 2 层	砂岩夹泥岩	IV	2.35	0.32	13.94	3.84	0.6	21.8	1.8	4.45
第 3 层	砂岩、粉砂岩	III	2.55	0.26	17.36	9.92	1	45.0	2	6.50
第 4 层	砂岩、泥岩互层	III	2.45	0.27	13.04	7.09	0.65	38.7	2.89	5.57
第 10 层	砂岩夹泥岩	III	2.62	0.27	14.49	7.87	1	45.0	2.5	5.56

工程厂区天然状态初始应力(图 11),从高到低呈现逐渐增大的趋势,对应越往地层深部,自重作用越明显。主应力值随深度的增加而增大,直至模型底部最大主应力达到 25 MPa 左右,最小主应力达到 14 MPa 左右。从应力场和塑性区的分布情况来看(图 12~13),顶拱绿色塑性区以剪切状态为主,

而在地层与厂房顶拱斜交处呈张剪性。在厂房揭露的岩层交界处,下层岩层出现了张剪状态,发生了变形破坏。这是由于岩层产状的控制,岩层走向基本与厂房横轴线方向平行,且倾角较小,加之厂房顶拱是水平的,造成在厂房开挖揭露的地层交界处存在砂泥岩软弱控制面,距离地层交界位置越近,岩层厚

度越薄,力学性质越低。

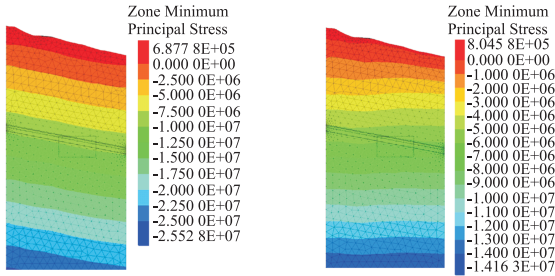


图 11 最大主应力分布和最小主应力分布图

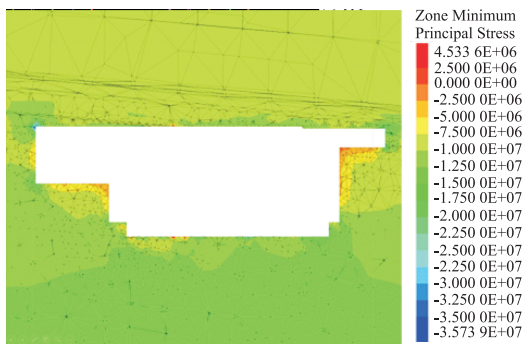


图 12 主厂房纵剖面最大主应力场特征

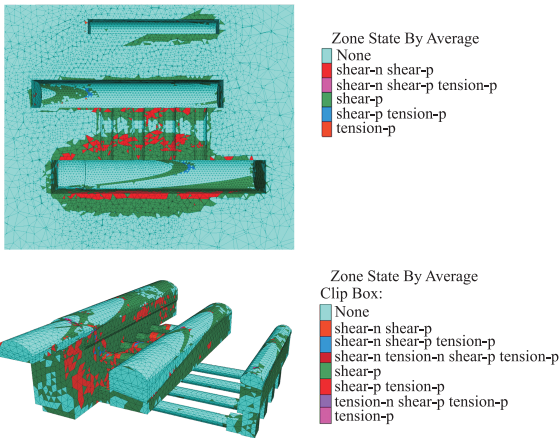


图 13 地下洞室顶拱塑性区分布特征图

地下厂房洞室群开挖时,对主厂房易发生顶拱层状剥离模式的关键点 A、B 和易发生边墙块体失稳模式的关键点 C 进行位移实时监测(图 14)。从监测数据可以分析出,开挖主厂房对关键点的位移影响较大,而开挖主变室和母线洞时位移影响很小。具体来说,对主厂房进行开挖的过程,处于洞室顶拱张剪状态的关键点 A 位移最大,此处受到较大的应力集中,距离地层交界处越远的关键点 C 位移最小,说明开挖影响逐渐减弱。

根据模拟结果来看,开挖厂房揭露的岩层在交界处,下伏岩层均出现过拉张塑性区,对应的这些部

位应力值较小,受厂房开挖方向和缓倾岩层的影响,距离岩层交界部位越近,下伏岩层厚度越薄,开挖影响越大,位移越大,单层粉砂质泥岩力学性质越低,稳定性越差,越易发生顶拱层状剥离。因此,在开挖缓倾岩层洞室的过程中需要对洞室顶拱加强监测,同时采取相应的支护措施。

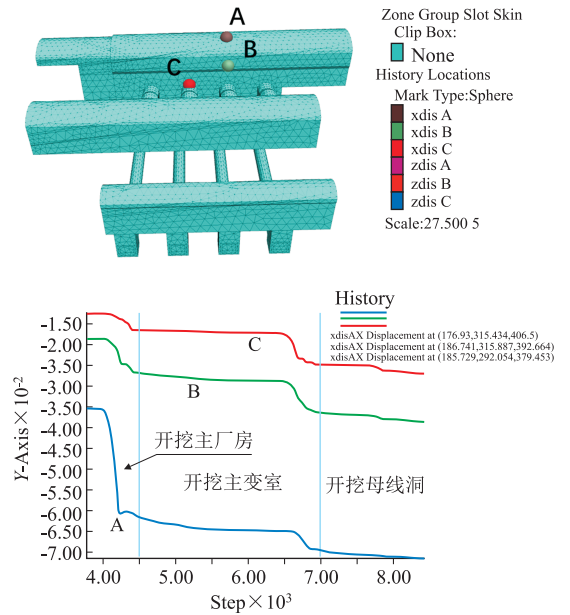


图 14 开挖洞室时几个关键点的位移实时监测图

5 结论

通过本研究,总体获得如下基本认识:

(1) 通过现场地质勘察和分析,确定了工程部位的主要优势结构面,其中工程区横节理、反倾向节理和缓倾岩层面是控制块体失稳的主要结构面。

(2) 块体分析认为,各优势裂隙面在开挖后虽形成的块体数量多但规模总体不大。半确定性块体规模基本在 1~40 m³ 以内,最大为 23.667 m³,随机性块体在 10 m³ 以下占总数的 70%,其中关键块体有 5 处,潜在失稳块体有 5 处。

(3) 缓倾岩层砂泥岩地下洞室块体失稳模式主要包括:边墙单面剪切滑移-掉块、边墙双面剪切滑移挤出、顶拱层状剥离和顶拱掉块。

(4) 顶拱岩体变形应力场位移场特征分析认为,顶拱塑性区以剪切状态为主,而在地层与厂房顶拱斜交处呈张剪性。数值模拟结果显示,在开挖主厂房时对关键点的位移影响较大,但开挖主变室和母线洞时位移很小。此外,对主厂房进行开挖的过程,易发生顶拱层状剥离模式的关键点 A 位移最大,而易发生边墙块体失稳模式的关键点 C 位移最小,开挖影响最小。说明在缓倾层状岩体厂房开挖

揭露的砂泥岩地层交界处,距离砂泥岩地层交界位置越近,开挖影响越大,位移越大。

参考文献

- [1] 陈铭. 哈德布特水电站地下厂房施工期洞室围岩稳定性分析及处理措施[J]. 广东水利水电, 2022, 51(10): 52-57.
- [2] 王涛. 乌东德水电站右岸地下洞室群围岩稳定性及其洞群效应分析[D]. 宜昌: 三峡大学, 2021: 64-67.
- [3] 闫兴田, 段伟锋, 杨日昌. 杨房沟水电站地下厂房围岩稳定分析[J]. 四川水力发电, 2021, 40(1): 83-87.
- [4] 谭学林. 重庆地区缓倾角岩层隧道上覆岩体变形破坏研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017: 2-3.
- [5] 田宝华, 张彪, 余龙文, 等. 水平缓倾岩层隧道爆破参数优化研究[J]. 爆破, 2023, 40(3): 52-58.
- [6] Lu X L, Zeng S, Zhao Y C, et al. Physical model tests and discrete element simulation of shield tunnel face stability in anisotropic granular media [J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(10): 3017-3026.
- [7] Li Zhigang, Xu Guangli, Dai Yunyun, et al. Effects of foliation on deformation and failure mechanism of silty slates [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 141(5): 1-8.
- [8] Mostafa N, Sharifzadeh M, Sahriar K, et al. A new classification of failure mechanisms at tunnels in stratified rock masses through physical and numerical modeling[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019, 91(9): 103017-103017.
- [9] 张鹏飞, 王立川, 李地元, 等. 缓倾层状砂岩拉压力学特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(10): 2955-2965.
- [10] 余天成, 原野. 陡倾地层大型洞室群岩体质量评价分析[J]. 中国矿业, 2023, 32(S1): 121-125+138.
- [11] 张倬元, 王士庆, 王兰生. 工程地质分析原理(第4版)[M]. 中国地质大学出版社, 2016.
- [12] Alagha S A, Chapman N D. Numerical modelling of tunnel face stability in homogeneous and layered soft ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2019, 94(C): 103096-103096.
- [13] 张恩宝, 孔张宇, 王兰普, 等. 丰宁抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性分析[J]. 人民长江, 2021, 52(8): 151-157.
- [14] 王逸良, 马宁. 多洞室群围岩稳定性数值模拟研究[J]. 中国新技术新产品, 2023, 31(14): 108-110.
- [15] Sun N, Liu C, Zhang F, et al. Accurate Identification of Broken Rock Mass Structure and Its Application in Stability Analysis of Underground Caverns Surrounding Rock [J]. Applied Sciences, 2023, 13(12): 3-17.
- [16] HaiPing M, Nik N N D, Md Z Y, et al. Stability Analysis of Surrounding Rock of an Underground Cavern Group and Excavation Scheme Optimization: Based on an Optimized DDARF Method[J]. Applied Sciences, 2023, 13(4): 2152-2152.
- [17] Guimin Z, Hao Z, Yuxuan L, et al. Surrounding rock stability of horizontal cavern reconstructed for gas storage[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 54(11): 106534-106534.
- [18] 刘开强. 大断面、缓倾角节理Ⅱ、Ⅲ级围岩隧道开挖支护施工技术[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(2): 28-29.
- [19] Bandpey K A, Shahriar K, Sharifzadeh M, et al. Comparison of methods for calculating geometrical characteristics of discontinuities in a cavern of the Rudbar Lorestan power plant [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(2): 1073-1093.
- [20] Sundar S K, Kumar R M. Stability Analysis and Design of Rock Support for Tunnel and cavern of Kathmandu University Geo-lab [J]. Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology, 2018, 13(1): 1-19.
- [21] 张延威, 高尚. 软弱夹层厚度对巷道围岩稳定性影响研究[J]. 山东煤炭科技, 2024, 42(1): 11-15.
- [22] 石根华. 岩体稳定分析的赤平投影方法[J]. 中国科学, 1977, 28(3): 260-271.
- [23] 张奇华, 张煜, 李利平, 等. 块体理论在地下洞室围岩稳定分析中的应用进展[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(4): 9-18.
- [24] 龚芯磊. 基于块体理论的多结构面控制下岩质边坡关键块体研究[J]. 贵州地质, 2023, 40(2): 193-200.
- [25] 张雨霆, 丁秀丽, 卢波. 基于数值分析的岩石块体稳定性评价一般性方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 78-92.

作者简介: 张琪雪(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: zqx409815660@163.com

通讯作者: 肖先焯(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水文地质与工程地质教学科研方面的工作。E-mail: sassoon1123@126.com