

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.06.005

基于块体理论的地下洞室施工期定位块体 稳定性分析研究

刘登学¹, 黄书岭¹, 李 坚², 董志宏¹, 张 练¹

(1. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010;

2. 云南省滇中引水工程有限公司, 云南 丽江 674199)

摘要: 块体理论是近年来发展和完善的一种适用于岩体稳定性分析的有效方法。以阳江抽水蓄能电站地下厂房洞室群为例, 阐述了块体理论解决实际工程问题的关键技术和思路, 应用块体理论重点对主厂房施工期存在的定位块体问题进行了分析。根据地下厂房实际开挖揭示的地质条件和块体分析结果, 在现有支护措施下, 阳江抽水蓄能电站主厂房施工期揭露的块体基本上有一定的安全裕度, 部分块体的埋深较浅, 结构面受开挖爆破影响较大, 考虑一定的支护措施后, 可保证块体的稳定性。研究成果可为同类工程提供借鉴。

关键词: 块体理论; 抽水蓄能电站; 地下厂房; 围岩稳定性

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)06—0028—05

Stability Analysis of Positioning Block in Construction Period of Underground Cavern Based on Block Theory

LIU Dengxue¹, HUANG Shuling¹, LI Jian², DONG Zhihong¹, ZHANG Lian¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources,
Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China;

2. Yunnan Dianzhong Water Diversion Engineering Co., Ltd., Lijiang, Yunnan 674199, China)

Abstract: Block theory is an effective method which is suitable for the rock mass stability analysis. Based on the cavern group of the underground powerhouse of Yangjiang Pumped Storage Power Station, the key technologies and ideas of block theory to solve practical engineering problems is presented. Block theory is adopted to analyze the block problems existing in the construction period of the main powerhouse. According to the geological conditions revealed by the actual excavation of underground powerhouse and the results of block analysis, under the existing support measures, the blocks exposed during the construction period of the main powerhouse basically have a certain safety margin. The buried depth of some blocks is relatively shallow, and the structural plane is greatly affected by excavation and blasting. Considering certain supporting measures, the stability of the block can be ensured. The research results can provide reference for similar projects.

Keywords: block theory; pumped storage power station; underground powerhouse; stability of surrounding rock

我国多个已建大型地下洞室的工程实践均表明, 及时快速的块体失稳风险评估是确保洞室施工

期围岩安全的重要工作内容之一, 是工程现场加强局部支护措施的一项重要依据。由石根华与 Good-

收稿日期: 2020-07-12

修稿日期: 2020-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809014); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2019434/YT; CKSF2019169/YT)

作者简介: 刘登学(1989—), 男, 山东曲阜人, 工程师, 博士, 主要从事工程岩体稳定性分析与安全性评价方面的研究工作。

E-mail: liudengxue123@sina.cn

man 等^[1]合作建立的块体理论是一种可以有效识别块体并评估其稳定性的方法。该方法自提出以来,已在地下洞室、边坡^[2]等岩体工程稳定性分析中得到了广泛应用。裴觉民等^[3]应用该理论分析了水电站的地下厂房洞室稳定问题,邬爱清等^[4-5]和黄正加等^[6]对块体理论应用于工程问题中所涉及到的凹形块体问题,块体水压模拟等问题进行了研究,并将块体理论应用于三峡船闸高边坡及地下厂房块体稳定性分析。盛谦等^[7]应用块体理论对三峡地下厂房围岩中裂隙可能构成的随机块体问题进行了分析。张奇华等^[8-9]、周伟^[10]和张靖杰等^[11]针对块体理论开发了相关软件并成功应用于地下工程岩体稳定性分析中。李红旭等^[12]利用块体理论对某水电站地下厂房区可能构成的块体类型进行了研究,并统计分析了块体的几何特征与稳定性。胡义等^[13]将块体理论应用于大渡河大岗山水电站的主厂房围岩稳定性分析中。有些学者还将随机理论引入其中,分析块体系统的可靠度问题^[14-15]。

本文阐述了基于块体理论的地下洞室施工期定位块体稳定性分析策略,并将其应用于阳江抽水蓄能电站地下厂房洞室群施工期围岩稳定性分析中,根据阳江抽水蓄能电站地下洞室群实际开挖揭露的地质条件,在现场施工地质研究工作的基础上,结合现场踏勘对开挖揭露地质条件和岩体结构特征的认识,首先对地下厂房围岩岩体结构特征进行全面的量化分析和比较,其次基于块体理论对主厂房施工期存在的定位块体问题进行分析。

1 基于块体理论的地下洞室施工期定位块体稳定性分析策略

1.1 块体理论简介

块体理论将结构面和开挖临空面假定为空间平面,块体则由由空间平面相互切割而形成的几何凸体,将块体所受的自重、裂隙水压力及锚固力等作用荷载看成空间向量,然后应用几何方法(拓扑学和集合论)判断岩体内可形成块体的类型及其可动性。最后通过静力平衡计算,求出各类可动块体的安全系数以找出开挖面上所有的关键块体,并计算出所需锚固力,作为工程加固措施的设计依据。

地下洞室、边坡等岩体工程开挖之前,结构面的具体位置信息不能确定,此时可进行不定位或半定位块体分析。岩体工程开挖后,通过对实际揭露的结构面性状及位置进行统计描述,可进行定位块体分析,此时块体的体积、埋深及几何形态均是确定

的,因此可根据块体稳定性分析结果对设计支护方案进行校核并在必要时提出修改意见,以保证块体的稳定性。

1.2 地下洞室施工期定位块体稳定性分析基本思路

地下洞室施工期定位块体稳定性分析基本思路为:首先根据地下洞室施工期实际开挖揭露的地质结构面信息,寻找在洞室顶拱或边墙部位可能形成不稳定块体的结构面组合,并进行全空间赤平投影分析,利用块体理论中的有限性定理和可动性定理判断块体是否为有限可动块体,并进一步判断有限可动块体潜在的失稳模式;然后利用所揭露结构面的位置信息进行块体的空间几何形态描述,获得有限可动块体的方量、滑动面的面积以及块体的埋深等信息;最后,基于块体的失稳模式、几何形态及相应结构面力学参数等,计算有限可动块体的安全系数,对于块体安全系数不满足设计要求的,则需计算块体达到允许最小安全系数所需支护力。块体稳定性分析流程见图 1^[16]。

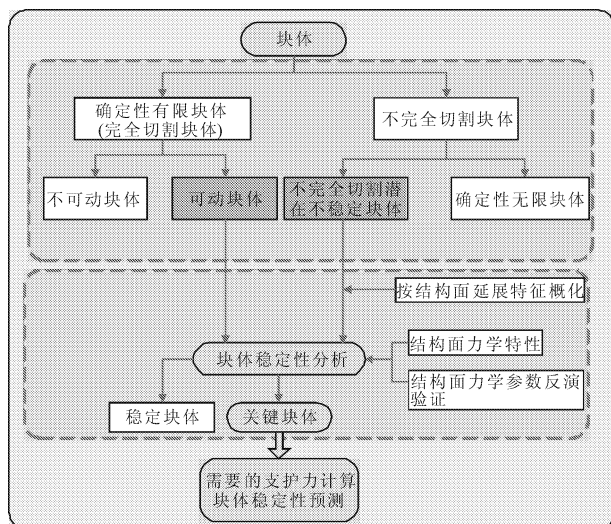


图 1 块体稳定性分析流程图^[16]

2 工程概况及厂区岩体结构特征

2.1 工程概况

阳江抽水蓄能电站位于广东省西部的阳江市一阳春八甲镇高屋村,属漠阳江的二级支流白水河流域。电站总装机规模 2 400 MW,采用近、远两期建设,近期装机规模 1 200 MW,远期装机规模 1 200 MW,为 I 等大(1)型工程。地下厂房系统由主副厂房、主变洞、母线洞、尾水闸门廊道、尾闸运输洞、高压电缆洞、交通洞、进风竖井、排风竖井、排水廊道以

及地面开关站等组成,地下厂房各部位主要尺寸:主机间长 88.5 m、宽 27.5 m、高 60.2 m;安装场长 44.0 m、宽 27.5 m、高 26.95 m;副厂房长 24.0 m、宽 27.5 m、高 50.9 m。

根据地质测绘、钻孔及探洞揭露,厂房区地层岩性主要以燕山三期($\gamma 52(3)$)灰白色中粗粒黑云母花岗岩和混合岩为主,断裂不发育,具有整体和块状结构,围岩类别以 I 类—II 类为主,占 85% 以上^[17],见图 2。

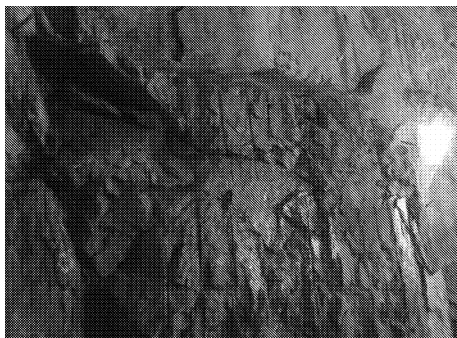


图 2 开挖揭露的围岩

2.2 岩体结构特征

根据阳江抽水蓄能电站主厂房开挖后的地质资料,对主厂房出露的结构面进行了统计。主厂房共揭露 1 条断层,该断层在顶拱及上下游边墙均有出露。主厂房出露的裂隙共计 326 条,其中顶拱 56 条,上游边墙 152 条,下游边墙 118 条。就结构面对地下洞室稳定性的影响而言,一般来讲,围岩中发育的陡倾角结构面对高边墙的稳定不利;而缓倾角结构面对于大跨度的洞室顶拱稳定非常不利。正是因为存在这种差别,针对洞室顶拱和高边墙不同特点,在研究结构面时关注的侧重点有所不同。因此在分析主厂房岩体结构特征时,应针对主厂房不同部位进行分别统计分析。下面以主厂房上游侧边墙为例。

主厂房上游边墙共揭露 153 条结构面,包含 1 条断层和 152 条裂隙,断层与洞轴线夹角为 47° ,倾角 80° ,在上游边墙出露长度 44.83 m。图 3 为主厂房上游边墙出露裂隙的投影极点图和走向玫瑰花图。可以看出,投影极点的分布比较离散,相对的优势集中方位为 NE/NW 向的陡倾角裂隙、SN/E 向的陡倾角裂隙,此外 NW/NE 和 NW/SW 向的陡倾角裂隙也较为发育。

(1) 对裂隙的走向与主厂房轴线夹角进行统计,结果表明:走向与洞轴线夹角大于 40° 的裂隙有 73 条,约占 48%;走向与洞轴线夹角在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 之

间的裂隙有 35 条,约占 23%;走向与洞轴线夹角小于 20° 的裂隙有 44 条,约占 29%。可以发现,主厂房上游边墙存在一部分裂隙与洞室轴线呈小角度相交。

(2) 对裂隙的倾角进行统计,结果表明:倾角大于 60° 的裂隙有 129 条,约占 84%;倾角在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间的裂隙有 14 条,约占 9%;倾角小于 30° 的裂隙有 9 条,约占 6%。由此可见,主厂房上游边墙的裂隙以陡倾角裂隙为主。

(3) 对裂隙的延展长度进行统计,结果表明:延展长度大于 30 m 的裂隙有 16 条,约占 11%;延展长度 20 m ~ 30 m 的裂隙有 26 条,约占 17%;延展长度 10 m ~ 20 m 的裂隙有 53 条,占约 35%;裂隙延展长度小于 10 m 为 57 条,占约 37%。从裂隙的延展长度来看,主厂房上游边墙延展长度大于 10 m 的裂隙为 63%,以长大裂隙为主。

总体来看,对于主厂房上游边墙,发育的裂隙以陡倾角长大的裂隙为主,超过一半裂隙走向与厂方轴线夹角小于 40° ,对高边墙的稳定存在一定的不利影响。另外,存在的不利的陡倾裂隙与断层组合也会影响上游边墙围岩的局部稳定。

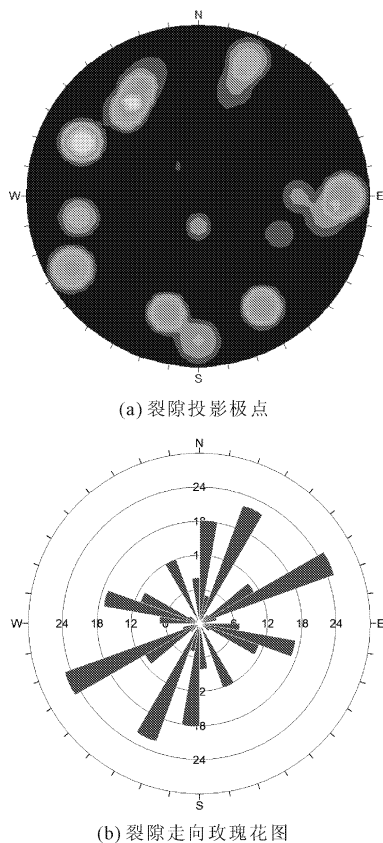


图 3 主厂房上游边墙出露裂隙产状特征

3 定位块体稳定性分析

3.1 块体搜索结果

对主厂房边墙的不利结构面组合进行了全空间赤平投影分析,上下游边墙共存在 13 个块体(BQ-1—BQ-13),其中块体 BQ-1—BQ-12 位于上游侧边墙,主要分布在上游边墙厂横 0+100—厂横 0+130 段岩壁吊车梁高程附近及厂横 0+007—厂横 0+030 段岩壁吊车梁下部,块体 BQ-12—BQ-13 位于下游侧边墙,分布在下游侧边墙 0+025—厂横 0+035 段。13 个定位块体的块体方量不大,在 $0.95 \text{ m}^3 \sim 96.24 \text{ m}^3$ 之间,块体埋深在 0.83 m ~ 12.16 m 之间。块体的具体位置见图 4 和图 5。

3.2 块体稳定性分析

根据每个块体的失稳模式、几何形态及相应结构面力学参数,计算块体的安全系数。

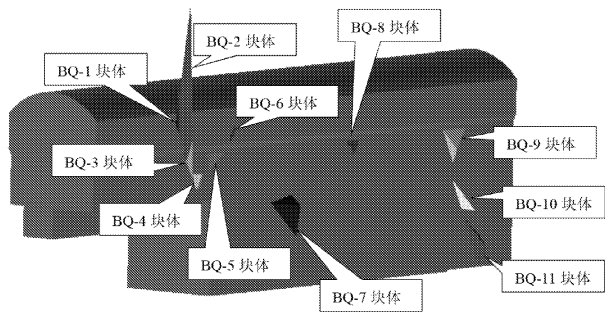


图 4 主厂房上游边墙块体位置

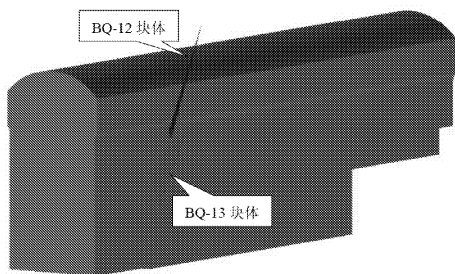


图 5 主厂房下游边墙块体位置

对于单面滑动模式,块体的安全系数为:

$$K = \frac{N_i \cdot f_i + C_i \cdot A_i}{T_i} \quad (1)$$

式中: f_i 为滑动面 i 的摩擦系数; C_i 为滑动面的黏聚力; A_i 为滑动面面积; N_i 为合力在滑动面上沿法向上的分量; T_i 为合力在滑动面上沿滑动方向上的分量。

双面滑动的块体安全系数计算公式与单面滑动时类似,块体的安全系数为:

$$K = \frac{N_i \cdot f_i + C_i \cdot A_i + N_j \cdot f_j + C_j \cdot A_j}{T} \quad (2)$$

式中: f_i 和 f_j 分别为滑动面 i 和 j 的摩擦系数; C_i 和 C_j 分别为滑动面 i 和 j 的黏聚力; A_i 和 A_j 分别为滑动面 i 和 j 面积; N_i 和 N_j 分别为合力在滑动面 i 和 j 法向方向上的分量; T 为块体沿滑动面 i 和 j 交线方向上的滑动力,可按合力矢量分解及相应平衡条件计算。

结构面力学取值参数见表 1。

表 1 结构面力学参数表

结构面类别	摩擦系数 f	黏聚力 c /kPa
断层	0.50	100
裂隙	0.65	100

主厂房边墙处定位块体稳定性分析结果汇总见表 2。边墙处块体的控制标准为其安全系数不小于 1.5。当计算得到的无支护条件下的块体安全系数小于以上控制标准时,视为关键块体,对该块体进一步计算达到允许最小安全系数所需的锚固力。由于部分块体的埋深较浅(埋深 $< 5 \text{ m}$),结构面受开挖爆破影响较大,故在块体稳定性分析中,计算了两种工况下(考虑黏聚力和不考虑黏聚力)块体的安全系数。在考虑滑面的黏聚力作用的情况下,13 个定位块体安全系数均满足设计要求,在不考虑滑面的黏聚力作用的情况下,部分浅埋块体安全系数不在满足设计要求,且部分块体的安全系数小于 1,但块体方量较小,考虑一定的支护措施后,可保证块体的稳定性。

4 结论

块体理论是一种可以解决水利水电工程地下洞室顶拱或边墙局部稳定性的有效方法。本文基于块体理论介绍了地下洞室施工期定位块体稳定性分析的基本思路,并应用于阳江抽水蓄能电站地下厂房洞室群施工期局部围岩稳定性分析中。主要结论为:

(1) 从开挖揭露的地质条件来看,阳江抽水蓄能地下厂房一个显著特点是陡倾裂隙相对发育,缓倾角裂隙不发育,但存在少部分裂隙走向与洞轴线呈小角度相交,对边墙稳定相对不利。

(2) 虽然阳江抽水蓄能电站地下厂房区域结构面发育,但能够完全切割围岩形成不稳定块体的不利结构面组合不多。在主厂房边墙共搜索到 13 个定位块体,部分块体的埋深较浅,结构面受开挖爆破影响较大,不考虑黏聚力条件下的块体安全系数不

满足安全控制标准,但块体方量较小,考虑一定的支护措施后,可保证块体的稳定性。

表 2 块体稳定性计算结果

块体编号	块体体积 /m ³	埋深 /m	失稳 模式	考虑 <i>c</i> 值时 安全系数	考虑 <i>c</i> 值时 需锚固力/kN	不考虑 <i>c</i> 值时 安全系数	不考虑 <i>c</i> 值时 需锚固力/kN
BQ-1	0.95	2.45	单滑	20.57	0	0.29	26.27
BQ-2	96.24	12.16	单滑	4.77	0	—	—
BQ-3	1.82	2.00	单滑	12.66	0	0.29	50.32
BQ-4	1.60	1.80	双滑	25.98	0	0.32	42.89
BQ-5	9.97	2.44	双滑	12.84	0	1.02	98.12
BQ-6	0.56	1.77	双滑	26.88	0	0.60	11.63
BQ-7	71.02	5.18	双滑	5.80	0	—	—
BQ-8	2.40	0.83	双滑	11.15	0	0.77	34.49
BQ-9	16.25	1.49	双滑	5.58	0	0.39	409.46
BQ-10	4.20	1.93	稳定	—	—	—	—
BQ-11	30.92	3.05	双滑	10.39	0	1.14	227.26
BQ-12	5.74	9.24	双滑	25.39	0	—	—
BQ-13	90.71	9.09	双滑	5.79	0	—	—

参考文献:

- [1] Goodman R E, Shi G H. Block Theory and Its Application to Rock Engineering [M]. Englewood, USA: Prentice - Hall Inc, 1985.
- [2] 罗光财,齐 龙,王 震,等. 基于块体理论的岩质高边坡稳定性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(5):178-182.
- [3] 裴觉民,石根华,Goodman R E. 水电站地下厂房洞室的关键块体分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(1):11-21.
- [4] 邬爱清,周火明,任 放. 岩体三维网络模拟技术及其在三峡工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(6):15-18.
- [5] 邬爱清. 基于关键块体理论的岩体稳定性分析方法及其在三峡工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2):1-7.
- [6] 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):643-647.
- [7] 盛 谦,黄正加,邬爱清. 三峡工程地下厂房随机块体稳定性分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(6):747-749, 753.
- [8] 张奇华. 块体理论的应用基础研究与软件开发[D]. 武汉:武汉大学, 2004.
- [9] 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.
- [10] 周 伟. 基于块体理论的洞室围岩块体稳定性分析程序[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5):73-77, 96.
- [11] 张靖杰,李云龙,郭 龙,等. 基于块体理论的岩体隧道可视化实现及其工程应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(2):1-3, 26.
- [12] 李红旭,盛 谦,张勇慧,等. 某水电站地下厂房关键块体稳定性分析[J]. 人民长江, 2011, 42(1):42-46.
- [13] 胡 义,徐光黎,申艳军,等. 块体理论在水电站洞室围岩稳定分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(S1):1370-1374, 1378.
- [14] 黄由玲,张广健,张思俊. 随机块体理论及其在地下工程中的应用[J]. 河海大学学报, 1993, 21(3):106-111.
- [15] 王学英,王建宇. 考虑节理尺寸的随机块体可靠度及其出现概率分析[J]. 铁道工程学报, 1999(3):73-77.
- [16] 王张鹏. TBM 隧洞围岩结构面测量方法与关键块体分析研究[D]. 武汉:长江科学院, 2019.
- [17] 宋安瑞,郭子超,董树荣. 阳江抽水蓄能电站地下厂房顶拱开挖质量控制[J]. 四川水利, 2019, 40(6):107-110.