

考虑卸荷效应的秘鲁圣加旺 III 水电站地下洞室块体稳定性分析

万启洲¹ 徐伟杰¹ 徐枫¹ 周德志¹ 彭立嵩²

1.中国水利电力对外有限公司 北京 通州 101149

2.三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室 湖北 宜昌 443002

【摘要】：以秘鲁圣加旺 III 水电站气垫调压室为研究对象，对岩体裂隙组合进行块体稳定性分析。研究表明：在考虑地下洞室开挖卸荷效应时，块体的安全系数会因黏聚力和内摩擦角作用效果的差异而产生不同幅度的降低；当裂隙组合中包含断层时，块体安全性显著降低，存在直接掉落风险；改变锚杆间距以及提升混凝土强度等级与喷射厚度可有效地提升洞室稳定性。

【关键词】：地下工程；块体稳定性；开挖卸荷；裂隙组合；支护优化

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.026

1 引言

由于地下岩体在漫长的地质作用过程中会发育大量的天然结构面，这些结构面与洞室开挖形成的临空面相互切割，极易形成具有失稳风险的关键块体^[1-2]。在地下洞室的开挖与运营过程中，块体的稳定性直接关系到洞室结构的安全^[3-4]。因此，准确识别地下洞室中的关键块体，并对其稳定性进行科学分析，是保障洞室安全的关键环节^[5-6]。目前，众多学者对于关键块体对地下洞室稳定性的影响已经开展了诸多研究。李海轮等^[7]采用正交设计方法对节理组产状进行多方案设计；王开诚等^[8]提出了基于力学和能量角度的随机块体影响下的地下洞室开挖面安全评价方法。孙增兵^[9]考虑节理岩体的随机特性，在关键块体理论中应用概率分析方法对地下洞室随机块体进行稳定性分析和预测。然而，现有研究在分析块体稳定性时，对洞室开挖过程中产生的卸荷效应关注不足，难以准确反映关键块体的稳定状态。因此，本文以南美秘鲁圣佳旺III水电站气垫调压室为例。通过块体分析对洞室周边多组裂隙组合进行分析，对比卸荷前后块体的安全系数，探究开挖卸荷效应与块体稳定性之间的联系，对失稳的块体进行支护，并对预定支护方案进行优化。

2 关键块体稳定性分析

气垫调压室洞室位于 Sangaban 河右岸坡中部，为 Sangaban 河与 Blanco 河所夹持的山体间。整个洞室群围岩岩性为奥陶系圣何塞组（O-sj）薄层-厚层夹中厚层石英绢云母板岩。板理产状 300°-330°∠60°-85°，倾下游偏右侧，为陡倾结构面，板理走向与气垫调压室轴线大角度相交。该洞室顶部共有 62 条裂隙、24 条断层，存在 1 条优势结构面，产状为 140°~150°∠16°~26°。

2.1 可能形成块体的裂隙组合

通过对地质编录图的分析，对可能形成块体的裂隙组合进

行搜寻。在地质编录图上表示为三组结构面切割形成的近似三角形的封闭或即将封闭的区域。对各区域的裂隙断层进行组合分析，初步得到以下 5 组可能形成块体的裂隙组合，如表 1 所示。

气垫调压室地下洞室的横截面为城门洞形，宽 13.8 m，高 18.5 m，洞室长 92.4 m；计算中采用 Mohr-Coulomb 准则。根据直接剪切试验结果，取结构面的粘聚力 c 和内摩擦角 φ 分别为 0.1 MPa、16.70°；法向卸荷条件下的 c 和 φ 分别为 0.91 MPa、34.84°。鉴于本工程是水利水电工程，为一级风险工程，将安全系数临界值定为 2.0。

表 1 洞室各组合裂隙产状

| 组合编号 | 裂隙组合 | 产状 |
|------|------|-----------|
| 1 | f07 | 335° ∠70° |
| | J1 | 50° ∠80° |
| | J2 | 140° ∠80° |
| 2 | J3 | 80° ∠75° |
| | J4 | 220° ∠45° |
| | J5 | 325° ∠75° |
| 3 | J6 | 220° ∠45° |
| | J7 | 80° ∠75° |
| | J8 | 160° ∠75° |
| 4 | J9 | 230° ∠80° |
| | J10 | 80° ∠75° |
| | f15 | 325° ∠70° |
| 5 | f17 | 325° ∠65° |
| | J11 | 240° ∠80° |
| | J12 | 160° ∠70° |

2.2 各组合块体稳定性分析

输入各裂隙组合的裂隙产状、岩石的抗剪强度参数，得到5个组合块体的分布图如图1所示。以及各组合块体在常规条件与卸荷条件下的安全系数对比如表2所示。

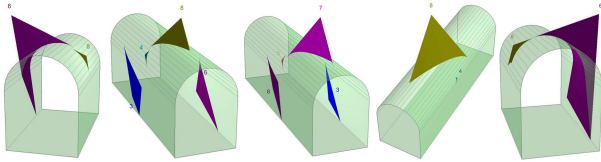


图1 1~5号组合块体分布图

表2 各组合块体卸荷前后安全系数对比

| 组合序号 | 块体编号 | 常规条件安全系数 | 卸荷后安全系数 | 安全系数降低幅度/% |
|------|------|----------|---------|------------|
| 1 | 6 | 2.92 | 2.73 | 6.44 |
| | 8 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 3 | 5.88 | 5.72 | 2.82 |
| | 4 | 16.12 | 14.78 | 8.29 |
| | 6 | 3.02 | 2.86 | 5.49 |
| | 8 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 3 | 3.15 | 2.99 | 4.86 |
| | 5 | 28.19 | 25.85 | 8.33 |
| | 6 | 6.90 | 6.40 | 7.36 |
| | 7 | 1.15 | 1.14 | 0.96 |
| 4 | 4 | 36.98 | 33.72 | 8.80 |
| | 8 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 6 | 2.83 | 2.65 | 6.35 |
| | 8 | 0 | 0 | 0 |

2.3 关键块体稳定分析评价

根据计算结果，可以得到：

(1) 组合1、2、4、5的对应8号块体的安全系数为0；组合3的7号块体的安全系数在卸荷前后差距不大，且均小于临界值2.0，因此需要对这5个块体进行重点分析。

(2) 在4个直接掉落的块体组合中，三个结构面中均有一条断层存在，分别为组合1的f07断层、组合2的J5断层、组合4的f15断层和组合5的f17断层。

(3) 各组合的块体（除安全系数为0直接掉落的块体，以及组合4的4号块体）在经过开挖卸荷后的安全系数会有不同幅度的下降。产生这一现象的可能原因有：各块体独特的几何形态与空间位置决定了其主导的稳定机制不同。此外，由于粘聚力和内摩擦角对于不同的块体主导程度不同，所以在粘聚力和内摩擦角共同影响的作用下，块体的安全系数的降低幅度会有所不同。

3 关键块体支护

气垫调压室在设计支护措施时，采用喷锚支护。锚杆参数：长6m；入岩深度5m，延洞室纵向间距2m、环向2m布置。混凝土参数：强度等级为C25，喷射厚度10cm。混凝土抗剪强度为1.78MPa，重度2500kg/m³。

由前述可知，1、2、4、5号组合的对应8号块体的安全系数均为0，滑动方式为直接掉落。对这5个块体进行加固，加固后的块体安全系数如表3所示。

表3 加固后的块体安全系数

| 组合序号 | 加固后安全系数 |
|------|---------|
| 1 | 82.152 |
| 2 | 3.484 |
| 3 | 2.849 |
| 4 | 0.806 |
| 5 | 30.156 |

在进行设计要求的支护措施后，1、2、3、5号组合的关键块体安全系数均达到了2.0以上，会达到稳定状态。只有4号组合的安全系数仍不满足要求，需要对其支护措施进行改进。

4 改进支护措施

对支护措施改进的方法有：①增加锚杆长度；②缩小锚杆的纵向、环向间距；③提高混凝土强度等级；④增加喷射混凝土厚度。

4.1 改进锚杆支护

(1) 在不进行喷射混凝土、且不改变锚杆纵向、环向间距的情况下，仅通过改变锚杆长度进行支护。安全系数随锚杆长度的变化如图2所示。

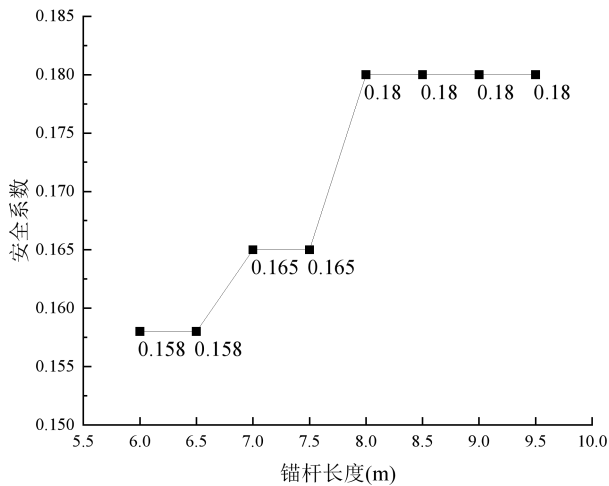


图2 安全系数随锚杆长度的变化

从图中可以得出,在仅改变锚杆长度时,每增加1 m 锚杆长度,安全系数的提高幅度不大,且在锚杆长度超过8m后,安全系数不再提高。结合实际工程,每增加1 m 的锚杆长度,施工难度和施工成本也在提高。因此,在改进支护措施时,不增加锚杆长度,仍采用设计施工时的6 m。

(2)在不进行喷射混凝土、且不改变锚杆长度的条件下,仅通过改变锚杆纵向、环向间距进行支护。安全系数随锚杆环向与纵向间距的变化如图3所示。

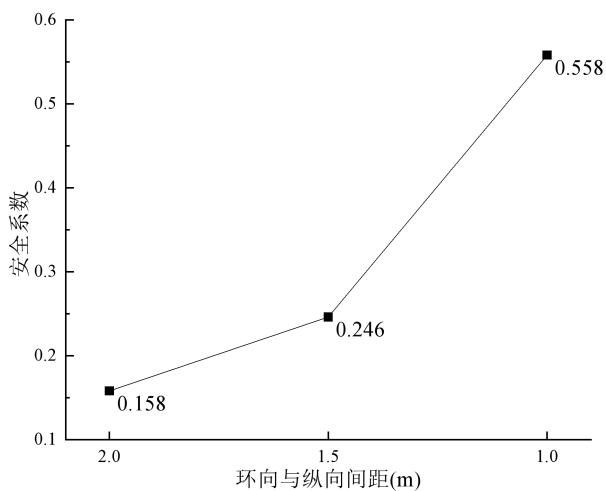


图3 安全系数随锚杆间距的变化

从图中可以得出,锚杆的纵向、环向间距从2 m 缩小为1 m 时,安全系数从0.158 增加到0.588,增幅达到272%,增幅可观。因此在进行改进支护措施时,可以考虑缩小锚杆的纵向、环向间距。

4.2 改进混凝土支护

(1)在不进行锚杆支护、不改变混凝土喷射厚度的情况

下,仅通过改变混凝土强度等级进行支护(混凝土喷射厚度均为10 cm)。安全系数随混凝土的变化如图4所示。可以看出,在相同的喷射厚度下,混凝土强度等级从C25 提高到C30 时,安全系数的增幅大约为18%,从C30 提高到C35,安全系数增幅为12%。因此,在进行支护时,综合经济因素,可以考虑将混凝土强度等级从C25 提高至C30。

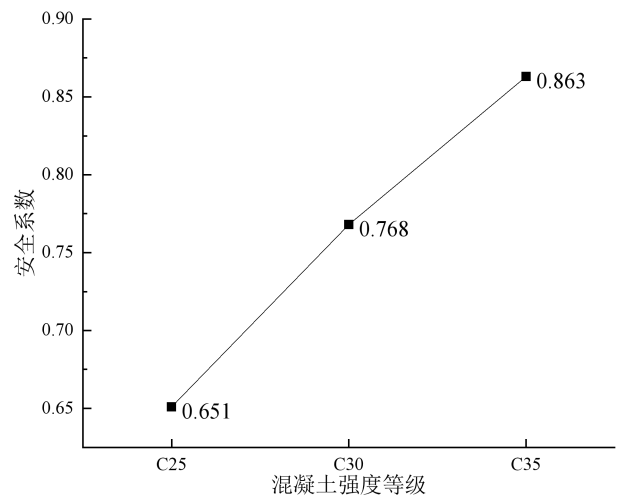


图4 安全系数随混凝土强度等级的变化

(2)在不进行锚杆支护、不改变混凝土强度等级的情况下,仅通过改变喷射混凝土的厚度进行支护。安全系数随混凝土喷射厚度的变化如图5所示。可以看出,在使用C25 混凝土时,喷射厚度从10 cm 增加到20 cm,安全系数的增幅为96%。在使用C30 混凝土时,喷射厚度从10 cm 增加到20 cm,安全系数的增幅为96.1%,二者增幅相差甚微。在仅使用C30 混凝土喷射20 cm 厚度时,安全系数能达到1.506,距离安全系数临界值较近,因此可采用喷射20 cm 的C30 级混凝土作为支护方法。

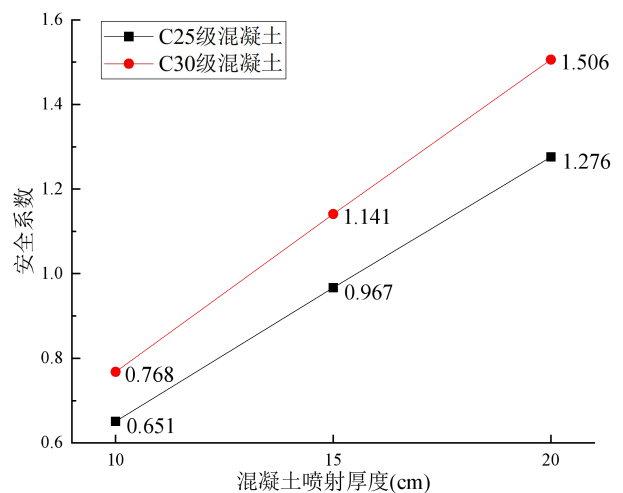


图5 安全系数随混凝土喷射厚度的变化

5.3 采用锚杆与混凝土支护

在5.1与5.2节中,通过分析决定不改变锚杆长度,仍采用长度为6m的锚杆。混凝土的强度等级与喷射厚度分别为C30和20cm。现改变锚杆的纵向、环向间距,判断组合4的8号块体的安全系数是否达到要求。经过不同锚杆间距支护后的安全系数如图6所示。可以看出,在锚杆纵向、环向间距均为1m时,组合4的8号块体的安全系数才勉强达到2.041,得以稳定。但考虑到其块体的质量与体积均较大,在进行支护时仍可以通过增加锚杆长度,进一步缩小锚杆间距,提高混凝土强度等级以及喷射厚度使其更加稳定。

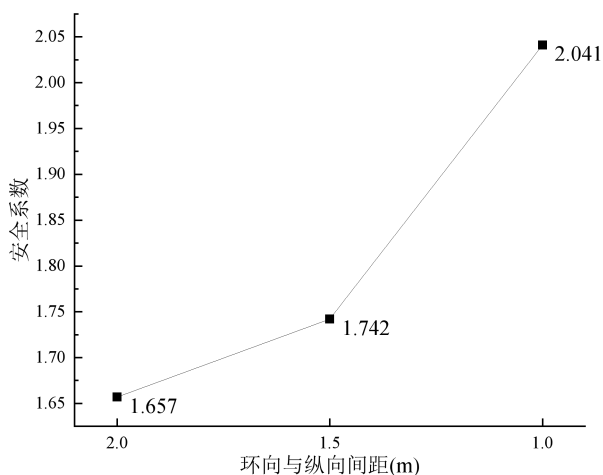


图6 安全系数随锚杆间距的变化

6 结论

本文通过对地下洞室5组裂隙组合形成的块体进行分析,对比开挖卸荷前后各块体安全系数。洞室在经过开挖卸荷后,块体的安全系数会降低,安全系数的降低幅度会因为黏聚力和内摩擦角对块体的作用程度不同而产生差异。其次,出现失稳掉落的块体其裂隙组合中均有一条断层的存在,所以,断层是导致块体失稳的重要因素。

因此,在进行地下洞室开挖时,应时刻注意开挖卸荷效应对洞室稳定性的影响,出现断层的部位应进行重点监测,以防块体直接掉落对工程与施工人员的安全造成威胁。对于稳定性较低的块体,可通过增加锚杆长度,减小锚杆间距,提高混凝土的强度等级以及增加喷射厚度等方法,加强对该部位的支护措施,保证工程与人员的安全。

参考文献:

- [1] 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(04):9-18.
- [2] 任爱武,伍法权,范永波,等.复杂地质条件下顶拱大型不稳定块体分析与预测[J].工程地质学报,2008,16(06):788-792.
- [3] 许强,黄润秋,巨能攀,等.边坡岩体块体稳定性分析系统的开发与研究[J].工程地质学报,2001,(04):408-413.
- [4] 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(01):42-46.
- [5] 赵建海,李福佳,刘艳章,等.基于关键块体的井巷围岩稳定性分析及支护研究[J].中国矿业,2024,33(S1):304-311.
- [6] 邵明磊,徐明,余磊,等.大型地下洞室群节理岩体关键块体识别与稳定性分析[J].水力发电,2025,51(04):12-17+24.
- [7] 李海轮,李刚,李奇,等.基于半定位块体统计分析的地下洞室不稳定区域识别研究[J].水电能源科学,2021,39(02):105-108+85.
- [8] 王开诚,肖明,陈俊涛.随机块体影响下地下洞室开挖面安全评价方法研究[J].水力发电,2023,49(02):29-34+49.
- [9] 孙增兵.节理岩体地下洞室随机块体稳定性分析研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(04):1125-1132.