

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.01.007

# 考虑围岩类别的地下厂房锚杆支护优化仿真分析

刘鑫升<sup>1</sup>, 陈焕杰<sup>2</sup>, 罗滔<sup>2</sup>, 傅少君<sup>3</sup>

- (1. 中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066;
2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;
3. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 地下洞室的支护措施及参数选择影响围岩稳定性及工程效益等诸多方面。为优化某水电站地下厂房锚杆支护方案, 基于有限差分法, 建立洞室的简化三维模型, 探究预应力锚杆与普通砂浆锚杆在Ⅲ<sub>1</sub>、Ⅲ<sub>2</sub>、Ⅳ类岩体中支护效果差距, 随后对该地下厂房不同围岩类别区域锚杆分别进行优化。结果表明: 在Ⅲ类围岩区域, 普通砂浆锚杆作用下的围岩变形仅比预应力锚杆支护增加0.3~0.5 mm。提出的某地下厂房建议支护方案较原支护方案围岩变形仅增加0.1 mm, 锚杆应力增大2~4 MPa, 仍存在较大安全余量。在保证围岩稳定的前提下, 建议对地下洞室中主要由Ⅲ类围岩组成的区段选择普通砂浆锚杆替换预应力锚杆进行支护。

**关键词:** 地下厂房; 围岩类别; 有限差分法; 锚杆支护优化

中图分类号: TV731.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)01-0057-08

## Optimization Simulation Analysis of Bolt Support for Underground Powerhouses Considering Different Surrounding Rock Classifications

LIU Xinsheng<sup>1</sup>, CHEN Huanjie<sup>2</sup>, LUO Tao<sup>2</sup>, FU Shaojun<sup>3</sup>

(1. Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610066, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** The support measures and parameter selection could affect the stability of the surrounding rock and the engineering benefits of underground caverns. In order to optimize the bolt support of the underground powerhouse of a hydropower station, a simplified three-dimensional model of the cavern is established, and the finite difference method is used to explore the difference in supporting effect between prestressed rock bolt and mortar anchor-bolt in Ⅲ<sub>1</sub>, Ⅲ<sub>2</sub>, and Ⅳ rock masses. The rock bolt in different surrounding rock classifications of the underground powerhouse is optimized respectively. The results show that in the area of Class III surrounding rock, the surrounding rock deformation under the action of ordinary rock bolts is only 0.3~0.5 mm higher than that of prestressed rock bolt support. The recommended support scheme for an underground powerhouse only increases the surrounding rock deformation by 0.1 mm compared with the original support scheme, and there is still a large safety margin when the anchor stress increases by 2~4 MPa. Therefore, under the premise of ensuring the stability of the surrounding rock, it is recommended to use ordinary rock bolts to replace the prestressed rock bolts for the sections of the underground cavern that are mainly composed of Class III surrounding rock.

**Keywords:** underground powerhouses; surrounding rock classifications; finite difference method; bolt support optimization

收稿日期: 2025-07-06

修稿日期: 2025-08-16

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(19JK0913); 中国水利水电第五工程局有限公司科研项目(2023-05-031)

作者简介: 刘鑫升(1985—), 男, 工程师, 主要从事水利水电工程施工研究。E-mail: 408188082@163.com

通讯作者: 罗滔(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水工结构安全与耐久性等方面研究。E-mail: luotao19870426@126.com

我国西南地区拥有丰富的水能资源,2000 年以来,在金沙江、大渡河、雅砻江等诸多流域上建设大量水电站<sup>[1-3]</sup>,如白鹤滩<sup>[4-5]</sup>、锦屏一级<sup>[6]</sup>、溪洛渡<sup>[7]</sup>等,为我国西南地区水电开发事业提供宝贵的工程经验。由于西南地区地形地貌以高山峡谷为主,故大型发电机组一般安装在两岸山体中的地下厂房内,但山体中地质条件多变,使地下厂房建设施工需要考虑围岩变形、塑性发展、卸荷失稳等诸多问题。探究围岩破坏机理、进行合理的工程设计、形成高效的施工方法,为厂房的建设运行提供安全保障和经济效益成为学者们关注的重点<sup>[8-10]</sup>。

地下厂房建设施工过程中,围岩受开挖扰动影响导致应力重分布,岩体一般向洞室内卸荷发生变形。因厂房整体规模较大,且地质条件多变,所以断层节理发育、岩体完整性较弱、岩体力学参数较差区域会出现局部变形过大、岩体剥落,甚至失稳现象<sup>[11-12]</sup>。对于施工过程中出现的诸多围岩稳定性问题,学者们采取地质勘探、现场监测、数值模拟分析预测相结合的方法对不同工程中围岩破坏机理进行总结分析,并对地下厂房结构设计、施工方法、支护措施等方面进行及时性优化<sup>[13-16]</sup>。Liu 等<sup>[17]</sup>以双江口水电站地下厂房为工程基础,通过地质勘探、现场监测、数值模拟相结合的方法对工程区地应力场进行反演修正,并探究高地应力硬岩地下洞室围岩变形破坏机理与相应加固措施;Yuan 等<sup>[4]</sup>基于现场监测数据对白鹤滩水电站左岸地下厂房受断层 C<sub>2</sub> 影响导致块体剥落的机理进行分析,运用离散元程序 3DEC 对断层 C<sub>2</sub> 周围岩体剪切变形机理进行了数值模拟研究,并提出相应加固措施;Wang 等<sup>[18]</sup>结合现场监测数据与数值模拟方法对白鹤滩水电站左岸地下厂房围岩变形破坏机理进行探究分析,将其分为应力主导与结构主导两种类型,并针对不同类型变形破坏区提出加固建议。在地下厂房开挖施工过程中,支护措施是保证围岩稳定性的重要因素之一,其也成为主要研究优化对象。开挖支护过程中,合理的支护参数及支护时机能够最大化发挥锚杆锚索的支护效果,提高施工效率及工程效益,并保证围岩稳定。在诸多地下厂房工程建设中,学者们运用现场监测、数值模拟、室内试验等手段对支护构件在不同工程地质中的作用效果及机理进行研究,根据施工中特定问题提出针对性建议,积累了丰富的支护优化经验。陆健健等<sup>[19]</sup>运用离散元计算软件 3DEC 对白鹤滩水电站左岸地下厂房进行初拟支

护效果评价,计算结果经与实际监测数据对比能比较客观的反映围岩变形情况,并对高应力及断层节理发育部位进行针对性支护参数设计;徐俊祥等<sup>[20]</sup>在基于隐式弹粘塑性本构关系对某抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性进行有限元分析及支护参数优化研究中,得出锚杆长度在一定范围内变化,对围岩变形及应力的影响并不显著的结论;张玉敏等<sup>[21]</sup>使用 Unwedge 岩体工程分析软件对某水电站主副厂房不同块体类型进行支护优化,结果表明,锚杆密度增加对拱顶块体安全性更有利,而锚杆长度改变的影响效果并不明显。但以往研究大多针对已经出现破坏的围岩损伤区域进行破坏机理分析并提出加固支护建议,其存在一定的滞后性,且对安全区域支护体系很少进行支护措施合理性探讨及优化。

本文通过有限差分程序 FLAC<sup>3D</sup> 进行某水电站地下厂房开挖支护围岩稳定性数值模拟分析,随后建立简单洞室开挖模型,探究不同级别围岩中预应力锚杆与普通砂浆锚杆支护效果差异,基于此对地下厂房进行不同围岩类别区段的支护措施选择优化,既保证洞室施工运行安全性,又减少工程建设成本,可为某水电站地下厂房设计施工提供参考。

## 1 洞室群围岩稳定性分析

### 1.1 工程概况

某水电站地下厂房位于我国西南地区,布置于雅砻江中游右岸山体内,厂房轴线为 N30°E,上覆岩体厚度 98~291 m。厂区围岩以Ⅲ、Ⅳ类围岩为主,其中Ⅲ<sub>1</sub>类、Ⅲ<sub>2</sub>类围岩占比约为 80%。地下厂房工程区主要发育断层有 F152、F75,厚度均在 2 m 以上。厂房区最大主应力量值为 5.68~11.30 MPa,方向为 N44°W~N81°W,属于低—中等应力区。图 1 为该水电站地下厂房结构布置图。

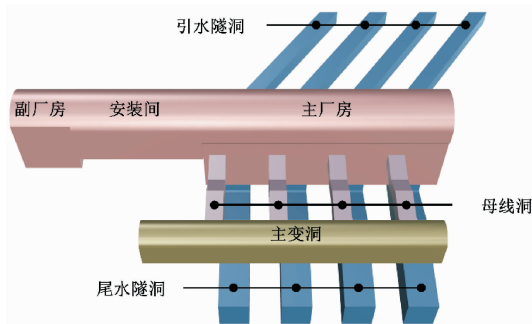


图 1 地下厂房结构布置图

### 1.2 三维模型建立

三维模型以主厂房及主变洞两个主要洞室为中

心建立,整体向四周各取 200 m,向上取至地表,向下取 300 m 作为模型考虑的山体范围。主副厂房纵轴线由副厂房指向机组段方向为模型  $y$  轴正方向,铅直向上为  $z$  轴正方向( $x$  轴正方向由右手法则确

定)。模型中考虑断层 F152 和 F75,并对厂房附近围岩进行网格加密。三维模型以六面体网格为主,共划分了 1 129 362 个网格单元和 571 677 个节点,如图 2 所示。

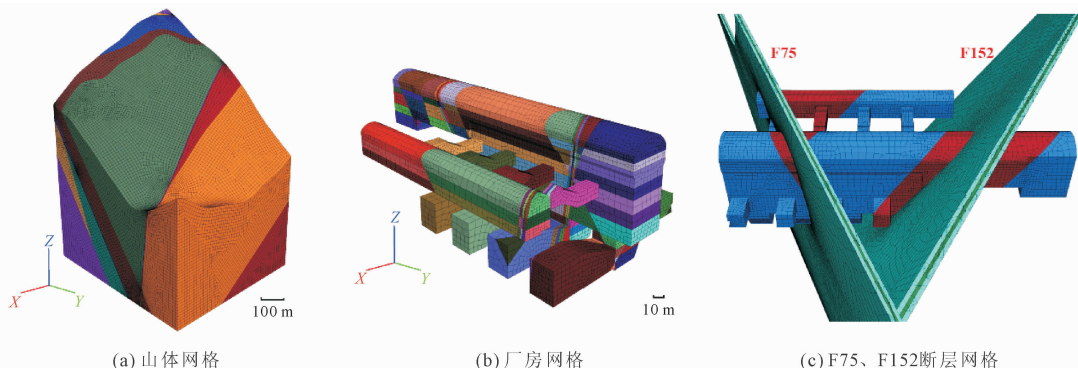


图 2 有限差分网格模型

根据实测地应力数据,采用多元线性回归方法对模型初始地应力场进行反演,通过边界条件设置模拟该地区西南两侧构造应力及自重应力,多元线性回归复相关系数达 0.834,相对误差大部分在 20% 以内,其精度满足工程要求<sup>[20,22-23]</sup>。

隧洞(VIII~X)简化为同层开挖。初拟支护方案对主副厂房、主变洞、母线洞及尾水隧洞按照不同部位及不同围岩类别采取不同支护措施,支护参数如表 2 所示。

在赋予初始地应力场的三维模型基础上,进行地下厂房开挖支护稳定性模拟计算,模型围岩整体采用 Mohr-Coulomb 本构模型,岩体力学参数参考现场地勘资料,取值如表 1 所示。

表 1 岩体物理力学参数

岩体类型	密度 / (g · cm <sup>-3</sup> )	弹性模量 / GPa	泊松比	黏聚力 / MPa	摩擦角 / (°)	抗拉强度 / MPa
III <sub>1</sub>	2.65	14.0	0.25	1.35	49.0	1.08
III <sub>2</sub>	2.60	8.0	0.28	1.05	46.4	0.84
IV	2.50	3.5	0.30	0.45	35.0	0.36
V 及断层	2.30	1.5	0.40	0.10	24.2	0.08

### 1.3 开挖支护稳定性分析

地下洞室群按照主副厂房分 10 层开挖,主变洞分 3 层开挖,在数值计算中,主厂房蜗壳部分及尾水

表 2 地下厂房主要洞室支护参数

洞室	部位	围岩类别	支护参数
主副厂房	顶拱	—	预应力锚杆,交错布置 $\Phi 32, L=9$ m/6 m, @ 1.0 m × 1.0 m, $T=100$ kN; 预应力锚索, $T=2000$ kN/3000 kN, $L=25$ m/30 m, @ 4.0 m
	边墙	III <sub>1</sub>	预应力锚杆与普通砂浆锚杆,交错布置, $\Phi 32, L=9$ m, @ 1.2 m × 1.2 m, $T=100$ kN; 预应力锚索, $T=2000$ kN/3000 kN, $L=20$ m/25 m/30 m, @ 4.0 m × 4.0 m (III <sub>2</sub> 、IV 锚索参数相同)
		III <sub>2</sub>	预应力锚杆, $\Phi 32, L=9$ m, @ 1.2 m × 1.2 m, $T=100$ kN
		IV	预应力锚杆, $\Phi 32, L=9$ m, @ 1.0 m × 1.0 m, $T=100$ kN
主变洞	顶拱	—	预应力锚杆与普通砂浆锚杆, $\Phi 32, L=7$ m/5 m, @ 1.2 m × 1.2 m, $T=100$ kN; 预应力锚索, $L=20$ m, @ 4.0 m × 4.0 m, $T=2000$ kN
	边墙	—	同主变洞顶拱支护参数
母线洞及尾水隧洞	顶拱	—	预应力锚杆与普通砂浆锚杆,交错布置, $\Phi 28/32, L=6$ m/7 m, @ 1.2 m × 1.2 m, $T=100$ kN
	边墙	—	普通砂浆锚杆, $\Phi 28, L=6$ m, @ 1.2 m × 1.2 m

图 3 为施加初拟支护参数后地下厂房开挖支护施工后,3#机组中心线典型断面围岩整体变形、应

力、塑性区分布情况。由图 3 及计算结果可知:开挖支护完成后洞室整体围岩稳定状态符合一般规律。

变形分布方面,最大水平位移出现在洞室边墙中部,量值为 30~40 mm 之间,最大竖向位移出现在主变洞上游拱肩处,量值为 11.4 mm,其由于此处位于 III<sub>1</sub>、III<sub>2</sub> 类围岩交界面和母线洞与主变洞连通处;地应力受开挖扰动重分布后,第一主应力最大量值为 25.6 MPa,主厂房顶拱偏下游及蜗壳底板转角部位

出现应力集中现象,第三主应力在主厂房边墙中部存在局部 0~1 MPa 拉应力区;厂房整体塑性区随开挖进程均匀发育,支护体系对顶拱及边墙塑性区发育有着显著的限制作用,边墙平均塑性区发育深度 6~8 m,主厂房与母线洞连接处塑性区较发育。综上所述,洞室开挖支护完成后围岩整体稳定。

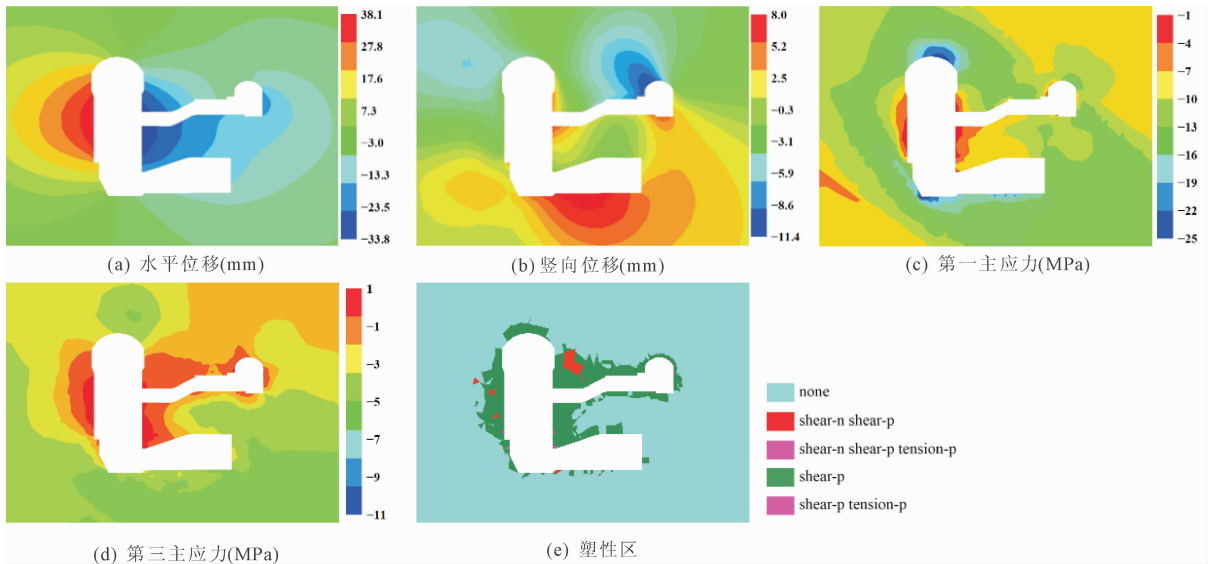


图 3 围岩位移、应力及塑性区分布情况

## 2 简化模型围岩类别对锚杆支护效果的影响

### 2.1 简化模型建立

参照一般地下厂房工程区结构设计及所处山体中部位,建立 200 m × 200 m × 20 m 山体模型,中心为 60 m × 20 m × 20 m 圆拱直墙结构厂房洞。根据《水力发电工程地质勘察规范》(GB 50287—2016)<sup>[24]</sup>中围岩分类标准,及工程初期地下洞室工程区地质勘探所得,在模型中考虑更贴近实际工程中围岩状态的三组倾向、倾角、走向、间距各不相同的节理:①N70°W, SW ∠80°~85°,间距 20~25 m,平行发育多条;②N10°E, NW ∠40°~45°,间距 65~68 m,平行发育多条;③N25°W, SW ∠50°,间距 40~43 m,平行发育多条。模型如图 4 所示。

### 2.2 参数选取

简化模型围岩整体采用 Mohr-Coulomb 本构模型,围岩开挖支护数值模拟过程中整体考虑为同一类别,分别赋予 III<sub>1</sub>、III<sub>2</sub>、IV 类岩体力学参数进行不同类别锚杆支护稳定性计算,具体岩体参数如表 1 所示。节理参数参考现场地质勘测结构面形状及参数建议取值,如表 3 所示。

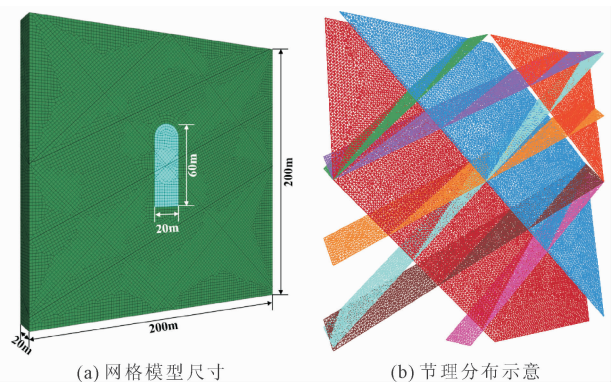


图 4 简化三维网格模型

表 3 节理主要力学参数取值

容重 /(kN · m <sup>-3</sup> )	法向刚度 /(GPa · m <sup>-1</sup> )	切向刚度 /(GPa · m <sup>-1</sup> )	黏聚 力 /MPa	摩擦 角 /(°)	抗拉 强度 /MPa
22	1	1	0.5	24.2	0.4

分别模拟三种模型开挖支护工况。工况一:毛洞工况,洞室开挖后不进行支护;工况二:全预应力锚杆支护工况,洞室开挖后布置直径 32 mm,长度 9 m,间排距 1.0 m × 1.0 m,预紧力 100 kN 的预应力锚杆;工况三:全砂浆锚杆工况,洞室开挖后布置直径、长度、间排距均与工况二相同的普通砂浆锚杆。

### 2.3 不同类别围岩支护效果对比

模拟结果显示各类围岩变形分布情况基本一致,整体呈现为上下游变强中部及节理发育处出现最大水平位移,顶拱中部下沉位移最大,底板向上隆起。表 4 为各类岩体在三种工况下竖向位移及水平位移最大量值对比情况。由表 4 可知,各类围岩洞室变形呈现出由毛洞工况、全砂浆锚杆工况、全预应力锚杆工况依次减小的趋势,Ⅲ<sub>1</sub>类围岩整体位移量值处于 5~7 mm 之间,三种工况最大位移差值小于 0.5 mm;Ⅲ<sub>2</sub>类围岩位移量较Ⅲ<sub>1</sub>类略有增加,处于 10~13 mm 之间,预应力锚杆工况较砂浆锚杆工况位移改善 0.3~0.4 mm;Ⅳ类围岩整体变形量激增,毛洞工况下边墙位移 90.5 mm,顶拱竖向位移 49.8 mm,各工况变形呈现明显的阶梯分布,预应力锚杆支护工况较毛洞工况减小 20~30 mm,较

砂浆锚杆支护工况减小 10~18 mm。就围岩变形控制效果而言,两类锚杆对Ⅲ类围岩支护效果差异微小。

表 4 不同类别围岩位移量值对比 单位:mm

围岩类别	部位	毛洞工况	全预应力锚杆支护工况	全砂浆锚杆支护工况
Ⅲ <sub>1</sub>	边墙	6.326	5.887	6.208
	顶拱	6.758	6.646	6.739
Ⅲ <sub>2</sub>	边墙	12.830	12.090	12.460
	顶拱	11.050	10.580	10.920
Ⅳ	边墙	90.500	57.100	74.300
	顶拱	49.800	28.200	40.400

图 5 为各类围岩条件下不同支护工况洞周塑性区分布情况。

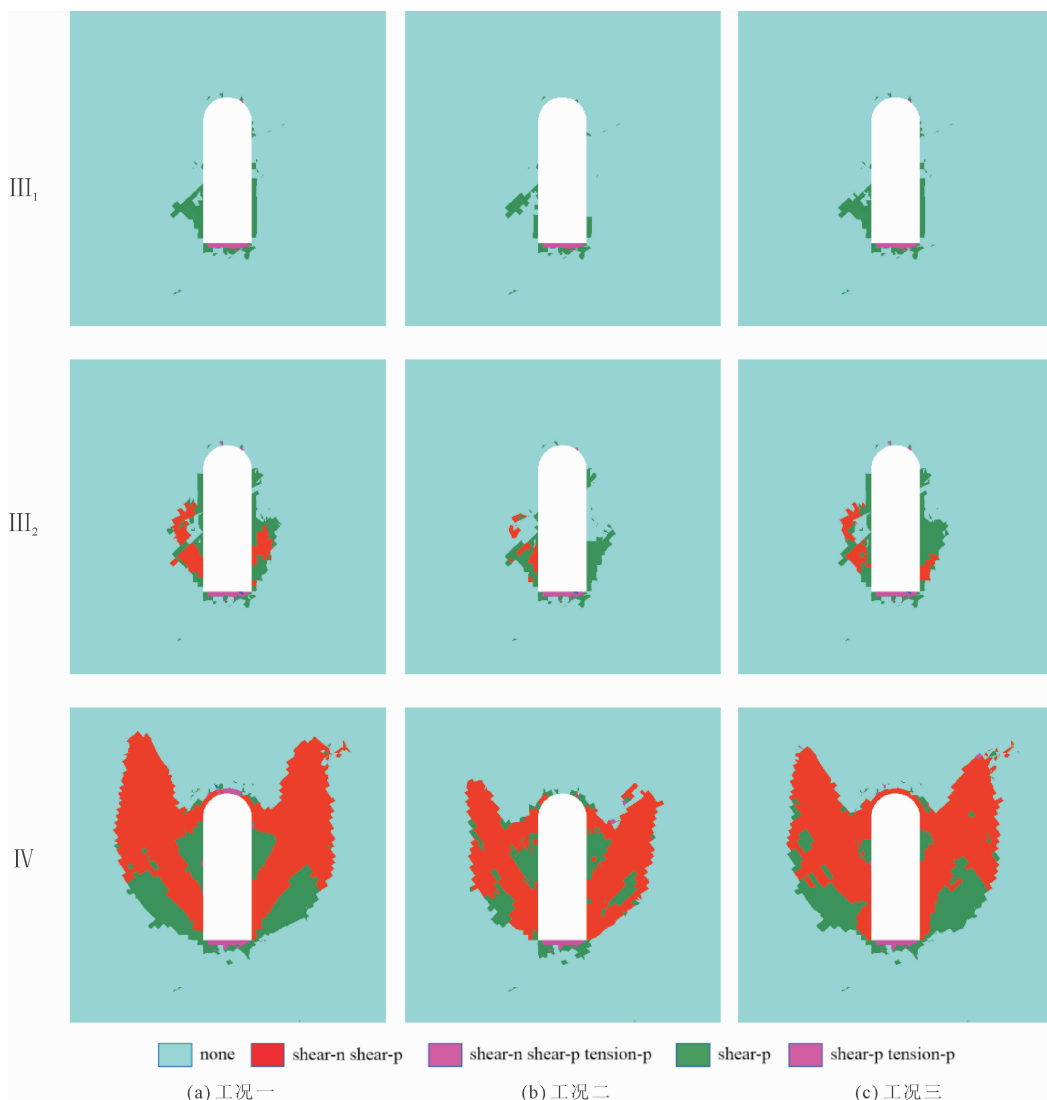


图 5 各类围岩不同工况塑性区分布情况

围岩塑性区整体发育范围随岩体力学参数削弱逐渐增大,Ⅲ类围岩塑性区发育范围较小,主要集中在边墙中下部及节理发育的洞室临空面附近,Ⅳ类围岩塑性区发育明显。Ⅲ类围岩中预应力锚杆支护工况对塑性区控制效果略优于砂浆锚杆支护工况及毛洞工况,各工况塑性区最大深度均为 10~12 m;Ⅳ类围岩三种工况塑性区发育存在明显差距,工况二明显优于其他工况。故就围岩塑性区控制效果而言,两类锚杆对Ⅲ类围岩支护效果差异不明显。

不同类别围岩应用砂浆锚杆支护工况的锚杆应力随岩性下降而增长,应力分布情况如图 6 所示。锚杆自身呈现两端小中间大的应力分布形式,洞室

顶拱、边墙中下部及节理发育区域锚杆应力明显大于其他部位。Ⅲ<sub>1</sub>类围岩砂浆锚杆最大应力处在上游边墙中下部节理发育区域,约为 40 MPa;Ⅲ<sub>2</sub>类围岩锚杆应力分布情况与Ⅲ<sub>1</sub>类基本一致,应力增大至 80 MPa;Ⅳ类围岩边墙中下部及节理发育区域锚杆应力明显增大,应力较大锚杆数量明显增加,且应力处于 400 MPa 左右。以上结果说明,围岩使砂浆锚杆受力变形,使锚杆承受轴向拉力。Ⅲ类围岩中的砂浆锚杆能够满足支护要求,锚杆应力处在合理范围内,而Ⅳ类围岩中砂浆锚杆应力过大,存在失效风险。

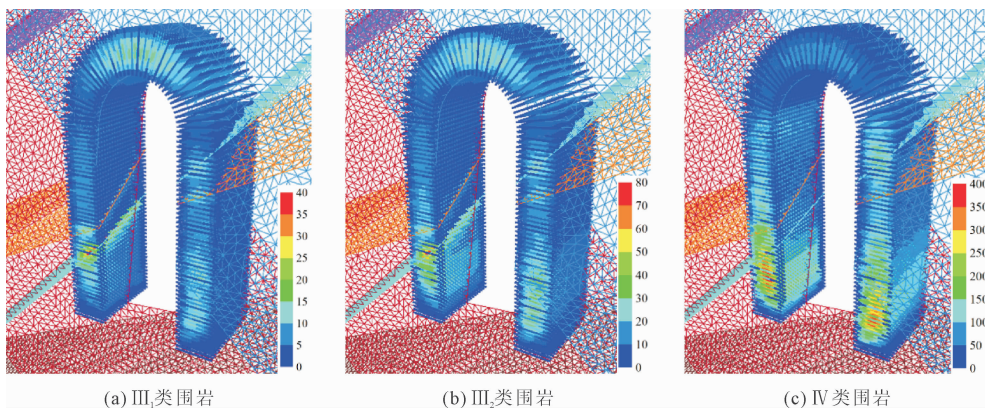


图 6 各类围岩砂浆锚杆应力分布情况(单位:MPa)

综上所述,对于较差岩体力学参数的围岩而言,预应力锚杆对围岩稳定性控制效果明显好于普通砂浆锚杆。但作用在岩体力学性能较好的岩体中时,由于此类围岩本身毛洞开挖情况变形量不大,围岩卸荷程度低,塑性区发展较弱,故两种锚杆对于此类围岩稳定性控制效果没有明显差距。

### 3 某水电站地下厂房工程锚杆支护优化分析

#### 3.1 方案设定

某水电站地下厂房机组段、副厂房段、安装间部

分区段围岩以Ⅲ类为主,以初拟支护方案为基础,对主副厂房洞室此区段边墙支护参数进行优化。不改变锚索支护设计,在锚杆长度,直径、间排距不变的情况下,将机组段、副厂房段、安装间部分区段边墙预应力锚杆更改为全长粘结型砂浆锚杆,进行数值模拟计算(下文统称为优化支护方案),具体支护参数如表 2 所示。各区段代表性断面围岩分布情况如图 7 所示,支护方案优化数值模拟结果各区段围岩稳定性变化规律基本一致,故主要以主副厂房中体积占比最大、边墙最高的机组段模拟结果进行优化分析。

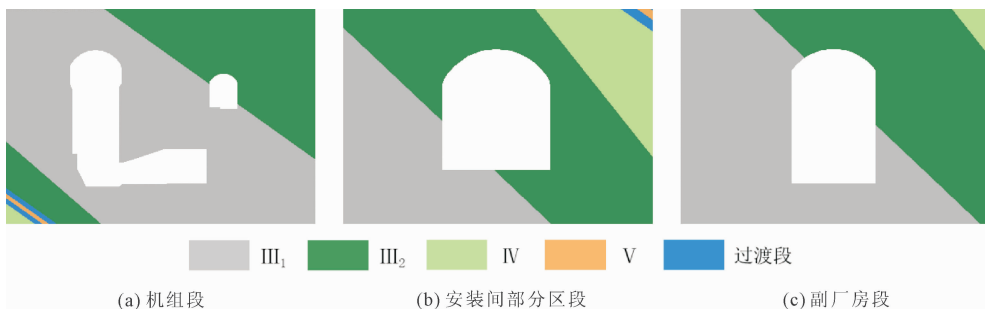


图 7 某地下厂房各区段代表性断面围岩分布情况

### 3.2 优化结果分析

两种支护方案机组段洞室围岩变形情况如表 5 所示。由表 5 可知,不同点位变形量值及位移分布规律一致,顶拱下沉最大值约 5 mm,上游拱肩位移大于下游拱肩,上下游边墙位移量 30~35 mm,上游边墙位移较下游略大 1 mm。顶拱下沉量值较小,优化支护方案较初拟支护方案仅增大 0.03 mm;上游边墙两方案相差位移 0.01~0.11 mm 之间,且底高程部位出现优化方案变形小于初拟方案现象;下游边墙优化方案较初拟方案增加量值为 0.07~0.1 mm 之间。整体而言,洞室开挖支护完成后,临空面位移量值较小,砂浆锚杆支护较预应力锚杆支护工况位移增大量级仅为 0.1 mm。

模拟结果显示初拟支护方案与优化支护方案洞室开挖支护后围岩应力、塑性区分布规律相同,预应力锚杆支护较砂浆锚杆支护效果提升微小。图 8 所示两支护方案下机组段典型断面开挖完成后围岩第一主应力、第三主应力及塑性区分布情况。由图 8

可知,顶拱偏下游及蜗壳底板转角存在应力集中现象,两支护方案第一主应力最大值均为 24~25 MPa;第三主应力于上下游边墙中部区域临空面出现拉应力区,平均深度约为 1.5 m,拉应力大小为 0~0.8 MPa;洞室上游边墙平均塑性区发育深度 7 m,下游边墙中上部受母线洞围岩卸荷影响塑性区较发育,但并未与主变洞塑性区连通。

表 5 不同支护方案围岩位移对比 单位:mm

部位	初拟支护方案工况	优化支护方案工况
顶拱	-5.026	-5.056
上游拱肩	23.710	23.716
下游拱肩	-16.391	-16.374
上游边墙	34.102	34.112
	34.787	34.673
下游边墙	-33.750	-33.824
	-33.089	-33.180

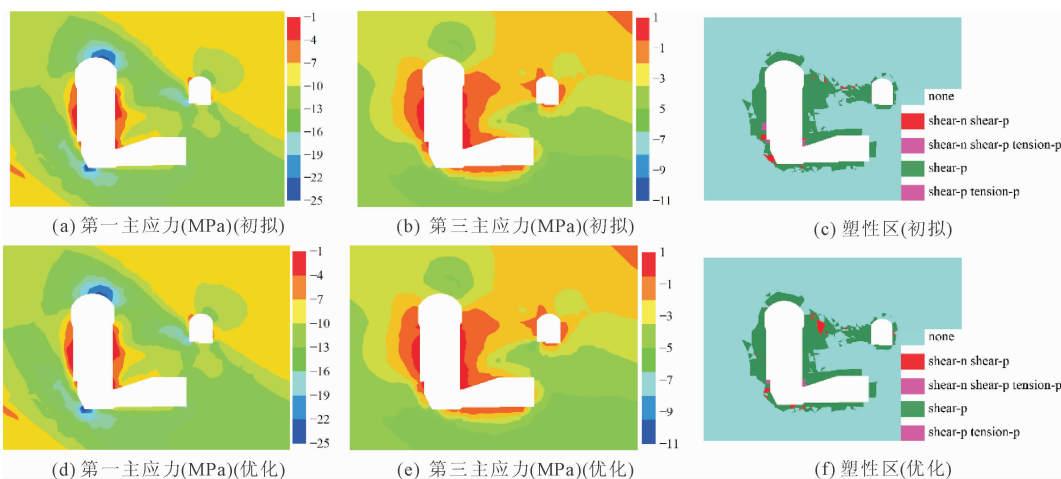


图 8 两种方案围岩应力塑性区分布情况

锚杆受力情况能够反应出围岩卸荷变形程度,与围岩应力及空间变形分布情况相对应,在此分析岩体受锚杆支护作用效果:初拟支护方案与优化支护方案中机组段典型断面附近砂浆锚杆受力情况如图 9 所示。两工况锚杆应力分布情况相同,最大应力出现在上游边墙下部锚杆中间段,应力值均为 180 MPa 量级,其余绝大多数锚杆应力均小于 90 MPa。优化支护方案中锚杆应力较初拟支护方案略增大 2~4 MPa。

## 4 结论

结合现场勘测与数值模拟方法,利用有限差分程序 FLAC<sup>3D</sup> 进行某水电站地下厂房初拟支护方案

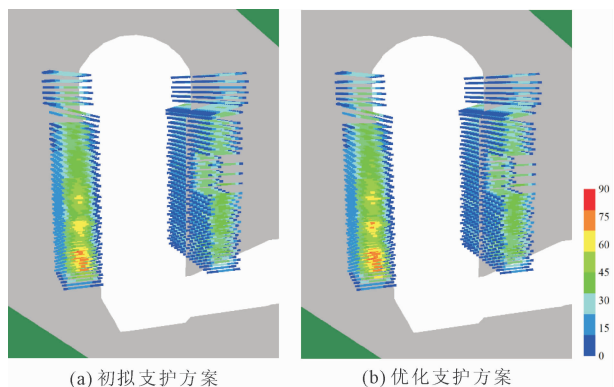


图 9 不同支护方案砂浆锚杆应力对比 (MPa)

下开挖施工围岩稳定性分析,建立简化洞室模型探究预应力锚杆与砂浆锚杆在不同类别围岩中支护效

果差距,并基于此进行某水电站主厂房Ⅲ类围岩区域边墙锚杆类别优化,得到如下结论:

(1) 中低地应力场条件下,普通砂浆锚杆能够保证岩性较好的Ⅲ类及以上围岩的稳定性,对Ⅳ类及以下的较差围岩预应力锚杆对围岩稳定性的控制效果则明显更好。

(2) 地下厂房洞室群采用初拟支护方案开挖支护后,洞室整体稳定,位移量值为 30~40 mm,第一主应力最大为 25.6 MPa,局部第三主应力呈现 0~1 MPa 受拉状态,塑性区平稳发育,具备支护参数优化条件。

(3) 对于岩性较好的Ⅲ类围岩,普通砂浆锚杆作用下围岩变形较预应力锚杆增加 0.3~0.5 mm,两类锚杆支护条件下围岩变形差小于 0.5 mm,而Ⅳ类围岩中预应力锚杆支护效果明显优于普通砂浆锚杆,变形差大于 10 mm。

(4) 优化支护方案较初拟支护方案洞室围岩稳定性差异不明显,相同关键点位移差仅为 0.1 mm,锚杆受力差值为 2~4 MPa,故建议对洞室边墙Ⅲ类围岩区域采用普通砂浆锚杆代替预应力锚杆。

#### 参考文献:

- [1] 樊启祥,陆佑楣,周绍武,等.金沙江水电工程智能建造技术体系研究与实践[J].水利学报,2019,50(3):294-304.
- [2] Huang Xiang, Xu Dingping, Chen Dongfang, et al. Damage assessment of High-Stress brittle surrounding rock masses in a deep Large-Span High-Sidewall underground Cavern: In situ measurement and numerical simulation [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024,161:108273.
- [3] Mao Haoyu, XU Nuwen, Zhou Zhong, et al. Failure mechanism and deformation forecasting of surrounding rock mass in an underground cavern based on engineering analogy method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2024,143:105497.
- [4] Yuan Fei, Shi Anchi, Zhou Jiawen, et al. Deformation and failure analyses of the surrounding rock mass with an interlayer shear zone in the baihetan underground powerhouse[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021,2021:2988998.
- [5] 段涛,段杭,任大春,等.白鹤滩水电站左岸地下厂房施工期围岩稳定安全监测分析[J].长江科学院院报,2021,38(6):37-44,66.
- [6] Qian Qihu, Zhou Xiaoping. Failure behaviors and rock deformation during excavation of underground cavern group for jinping I hydropower station[J]. *Rock Mechan-*

- ics and Rock Engineering*, 2018,51(8):2639-2651.
- [7] 李新平,陈俊桦,李友华,等.溪洛渡电站地下厂房爆破损伤范围及判据研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(10):2042-2049.
- [8] 黄润秋.论中国西南地区水电开发工程地质问题及其研究对策[J].地质灾害与环境保护,2002,13(1):1-5.
- [9] 唐军峰.大型水电站地下洞室群施工力学行为研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [10] Li Songrui, Hu Yitang, Zhang Lihui. Coupling coordination relationship of pumped storage power station and eco-environment system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022,52:105029.
- [11] Xiao Xinhong, Xiao Peiwei, Dai Feng, et al. Large deformation characteristics and reinforcement measures for a rock pillar in the houziyan underground powerhouse [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018,51(2):561-578.
- [12] 陈治,杨凡杰,周辉,等.考虑施工期应力调整的浅埋地下厂房围岩破坏模式分类[J].岩石力学与工程学报,2023,42(6):1434-1449.
- [13] 江权,冯夏庭,李邵军,等.高应力下大型硬岩地下洞室群稳定性设计优化的裂化-抑制法及其应用[J].岩石力学与工程学报,2019,38(6):1081-1101.
- [14] Luo Jiwei, Zhang Dingli, Sun Zhenyu, et al. Numerical modelling and field monitoring study on large-span tunnelling using pretensioned bolt-cable combined support system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2023,132:104911.
- [15] Li Ang, Dai Feng, Wu Wei, et al. Deformation characteristics of sidewall and anchorage mechanisms of prestressed cables in layered rock strata dipping steeply into the inner space of underground powerhouse cavern[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022,159:105234.
- [16] 韩前龙,张国强.大型地下厂房运行期安全监测与围岩稳定反演分析[J].人民长江,2020,51(S2):325-328.
- [17] Liu Xiuyang Y, Xu Dingping, Jiang Quan, et al. Excavation response and reinforcement practice of large underground caverns within high-stress hard rock masses: The case of Shuangjiangkou hydropower Station, China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2024,147:05698.

- [24] 薛伟辰. 环氧涂层钢筋混凝土结构的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(7): 812-816.
- [25] Narayanan T S N S, Selvakumar S, Stephen A. Electroless Ni-Co-P ternary alloy deposits: preparation and characteristics [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2003, 172(2-3): 298-307.
- [26] 杨志, 张翼, 杨慧敏. 增韧环氧树脂、多元醇分子量及有机硅改性聚氨酯的制备及对复合涂层防护性能的研究[J]. *现代化工*, 2025, 45(4): 180-189.
- [27] 曹禅. 基于熵值法的融资效率评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014: 56-67.
- [28] 吴开亚, 金菊良. 区域生态安全评价的熵组合权重属性识别模型[J]. *地理科学*, 2008, 28(6): 754-758.
- [29] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 23-32.
- [30] 杨虎, 明浩, 杨玥含. 统计数据分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2024: 13-24.
- [31] 武永新, 杨天生, 曹楚生. 微坍塌度混凝土技术在碾压混凝土筑坝中的应用[J]. *水利水电施工*, 2009(2): 15-18.
- [32] Wypych G. *Handbook of plasticizers* [M]. Toronto: ChemTec Publishing, 2023: 313-471.
- [33] 王正熙. 高分子材料剖析实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016: 45-55.
- [34] Tunsuda Suparanon, Neeranuch Phusunti, Worasak Phetwarotai. Properties and flame retardancy of polyacetaldehyde composites incorporating tricresyl phosphate and modified microcrystalline cellulose from oil palm empty fruit bunch waste[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 127580.
- [35] 秦宏兵, 范苓, 顾海东. 固相萃取-气相色谱/质谱法测定水中6种有机磷酸酯类阻燃剂和增塑剂[J]. *分析科学学报*, 2014, 30(2): 255-258.
- [36] 辛忠. 材料添加剂化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 67-74.
- [37] 王智. 热固性树脂增韧方法及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018: 123-134.
- [38] 高峰, 杨锦飞. 双酚A双(二甲苯基磷酸酯)阻燃剂的合成[J]. *江南大学学报(自然科学版)*, 2009, 8(2): 233-237.

(上接第56页)

- [9] 张雄水. 软土地区超长PHC管桩承载力加固效果分析[J]. *建筑科学*, 2024, 40(7): 42-48.
- [10] 王卿, 盖永斌, 李瑜, 等. 洞庭湖区高速公路桥梁PHC管桩适应性研究[J]. *公路交通科技*, 2023, 40(9): 99-105.
- [11] 李旺昌. PHC管桩在高速公路桥梁工程中的应用分析[J]. *建筑技术开发*, 2021, 48(14): 89-90.
- [12] 凌造, 唐孟雄, 胡贺松, 等. 非挤土嵌岩预应力高强度混凝土管桩的桩端承载性能研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(1): 97-107.
- [13] 唐孟雄, 凌造, 刘春林, 等. 桩端型式对嵌岩随钻跟管桩承载性能的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(S1): 3053-3062.
- [14] Xu Dongsheng, Liu Zhuowen, Chen Bo, et al. Bearing capacity analysis of offshore pipe piles with CPTs by considering uncertainly [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 126: 103731.
- [15] Zhou Jiajin, Zhang Rihong, Yu Jianlin, et al. Field tests on installation effects of cast-in-situ pile and pre-bored grouted PHC pile [J]. *Acta Geotech (in press)*, 2025: 1-14.

(上接第64页)

- [18] Wang Meng, Shi Anchi, Li Haibo, et al. Deformation and failure mechanism of surrounding rock mass in a large-scale underground powerhouse under high in-situ stress [J]. *Results in Engineering*, 2024, 21: 101638.
- [19] 陆健健, 方丹, 李良权. 白鹤滩水电站左岸地下厂房支护优化设计[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(8): 128-135.
- [20] 徐俊祥, 王艳强, 李旭, 等. 某抽水蓄能电站地下厂房洞室群三维有限元稳定性分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2024, 22(2): 26-31.
- [21] 张玉敏, 朱付广. 地下厂房围岩块体稳定分析及支护优化研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2011, 7(1): 150-154, 167.
- [22] 周佐健, 陈焕杰, 罗滔, 等. 地下厂房初始地应力简易FLAC3D反演方法[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2024, 57(S2): 11-15.
- [23] 赵雨, 白金朋. 基于FLAC3D的多元线性回归法地下厂房初始地应力场反演重构[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(3): 149-152, 185.
- [24] GB 50287—2016 水力发电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.