叶巴滩水电站主变室顶拱塌方机理及治理措施研究

张 利[1]， 何 周[1]， 何建华[2]
（1. 华电金沙江上游水电开发有限公司波罗（岗托）水电站建设公司筹备处，四川 成都 610095；
2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，四川 成都 610072）

摘 要：针对叶巴滩水电站主变室顶拱塌方现象，从塌方岩体物理力学性质入手，综合考虑地应力、断层、地下水、施工扰动等因素，深入开展塌方机理及及工程治理措施的研究。研究结果表明：塌方段岩体力学特性较原岩体显著弱化，岩石的承载能力被大幅削弱；在岩体力学性能弱化、断层、高地应力、地下水及强开挖扰动综合因素作用下，导致了顶拱的塌方；本文提出的综合治理措施包括了塌腔体本身及周边岩体，由近及远，空间上层次分明，针对性强，可为类似工程提供参考意义。

关键词：地下洞室；主变室；顶拱塌方；蚀变岩；围岩稳定；治理措施
中图分类号：U453.2；TU94＋3.4 **文献标志码**： B **文章编号**：1001-2184(2024)06-0104-05

Mechanism and Measures Research on the Crown Overbreak in Yebatan Hydropower Project's Main Transformer Room

ZHANG Li[1], HE Zhou[1], HE Jianhua[2]
(1. Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610095;
2. Powerchina Chengdu Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610072)

Abstract: In response to the crown overbreak in the main transformer room in Yebatan Hydropower Project, from its physical and mechanical properties of the collapsed rock mass, combined with factors such as geostress, faults, groundwater, and construction disturbance, in-depth research is conducted on the collapse mechanism and engineering treatment measures. The research results indicate that the mechanical properties of the collapsed rock mass are significantly weakened compared to the original rock mass, and the bearing capacity of the rock greatly weakened; the crown overbreak was resulted from the combined effects of weakened rock mechanics, faults, high ground stress, groundwater, and strong excavation disturbance; Comprehensive governance measures proposed in this article include the collapse cavity itself and the surrounding rock mass, with clear spatial hierarchy from near to far, strong targeting, and can provide reference significance for similar projects.

Key words: Underground caverns; Main transformer room; Crown overbreak; Altered rock; Stability of surrounding rock; Governance measures

1 工程概况

叶巴滩水电站是金沙江上游规划 13 级开发方案中的第 7 级，上游为波罗水电站，下游为拉哇水电站。电站位于四川白玉县与西藏贡觉县交界的金沙江干流降曲河口以下约 350 m 河段上。洞室群主要包括三大洞室（主厂房、主变室、尾调室）以及进风系统、排风系统、出线系统、防渗排水系统、进厂交通系统等附属洞室，形成了空间上纵横交错的大规模的地下洞室群。三大洞室平行布置，轴线方向为 N50°W，地下厂房洞室群平面布置见图 1[1]。

叶巴滩地下洞室岩性为石英闪长岩，主变室总体地质条件较复杂，断层结构面发育，地应力水平高。根据现场开挖揭示条件，地下厂房区域主要发育有 f_9、f_{85}、f_{87}、f_{89}、f_{90}、f_{511} 等 11 条断层，其中Ⅲ级结构面 6 条，Ⅳ级结构面 5 条。通过应力孔径变形法对地下洞室地应力进行了测量。成果表明：地应力最大值达 37.57 MPa，属高偏极高应力区。施工过程中出现了高地应力引起的岩爆现象[2]见图 2，同时还出现了因断层、裂隙影响而形成的围岩松弛现象，节理型破坏见图 3。

收稿日期：2024-10-15

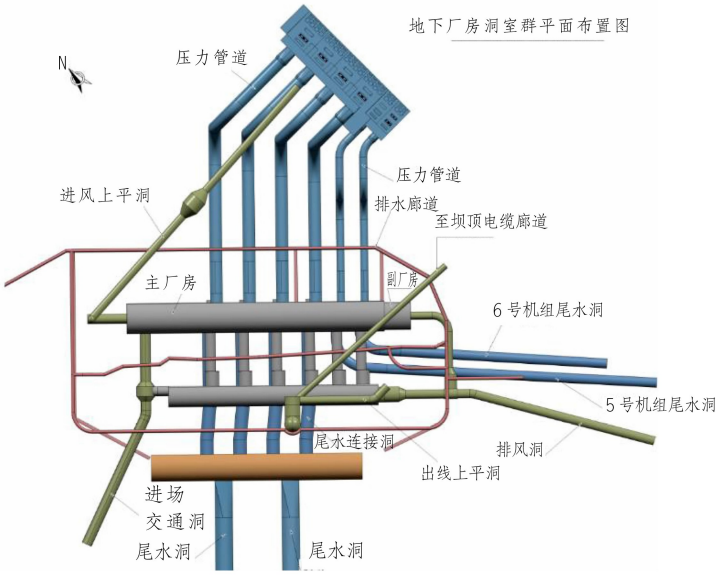


图 1　地下洞室群平面布置图

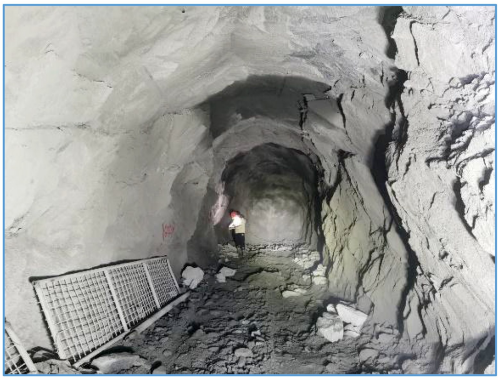


图 2　高地应力岩爆现象

图 3　节理型破坏

2　主变室顶拱塌方

高地应力岩和节理型破坏两种围岩失稳现象在叶巴滩地下洞室较为常见,总体规模不大,因此采取常规喷锚支护可以顺利通过上述洞段。但对于叶巴滩主变室顶拱出现的塌方,塌方规模和范围更大,治理难度也更大。

叶巴滩主变室开挖跨度 19.4 m,总长 198 m,高 25.7 m,为大型地下洞室。在桩号为 0+007 附近,开挖揭示该部位地应力较高,且 f_{90} 断层在此出露,形成了蚀变岩-高地应力-断层共同作用下的不良地质条件。此处蚀变岩体破碎,在开挖过程中不止一次发生塌方,形成顶拱空腔,塌腔深度约 8 m,环向跨度约 9 m,沿洞轴向跨度约 12.5 m,且若不及时处理,空腔后续有进一步扩大的趋势,严重威胁着洞室的安全施工。

主变室顶拱塌腔见图 4。f_{90} 断层在主变室顶拱附近出露,其主断带及上下盘影响带岩体质量差,岩体破碎。在主变室中导洞开挖过程中,上游拱肩曾先后发生过两次小规模塌方。在第一层上下游开挖过程中,发生多次塌方。为了探讨塌方机理,分析塌方岩体对围岩稳定的影响,有必要开展其相关的物理力学性质研究。

3　主变室顶拱塌方机理研究

3.1　岩体物理力学性能弱化的影响

为了研究主变顶拱塌方段岩体的物理力学特征,现场选取了主变室内开挖爆破后的完整岩块与垮塌后的岩块,开展室内试验,图 5 为典型的叶巴滩水电站地下洞室完整原岩与塌方部位岩块的形态对比。

相比于原岩,塌方部位岩块表观形态有两点

不同：(1)岩体表面呈现出了锈染状态，高岭土化；(2)出现了类似土颗粒状的蓬松状态，表明岩体带有一定的蚀变，总体上表现为构造改造形成的蚀变岩体。

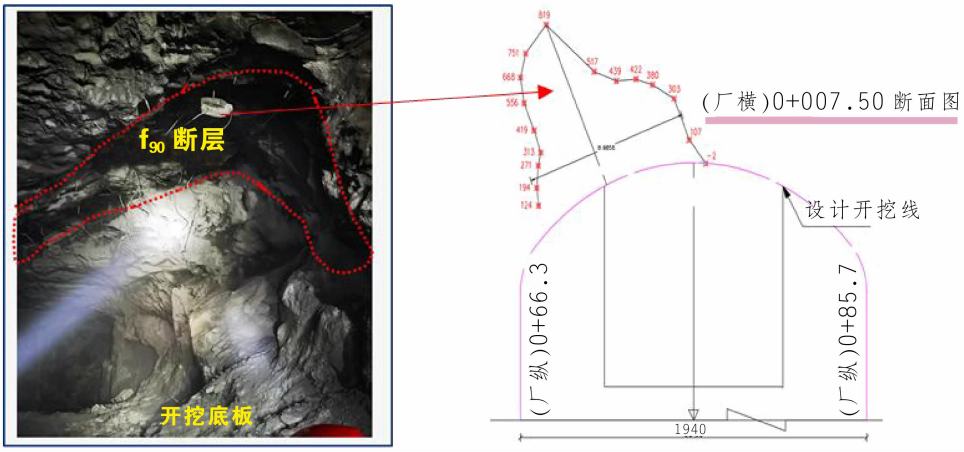


图 4　主变室顶拱塌腔

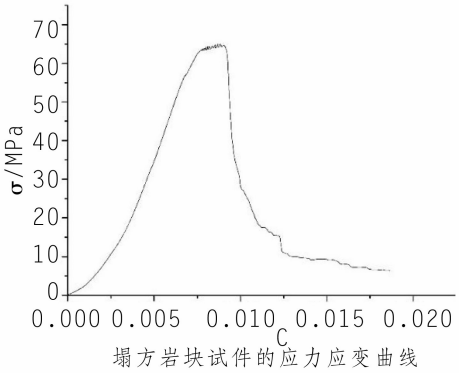
(a)石英闪长岩原岩　　(b)塌方部位岩块

图 5　叶巴滩地下洞室原岩与塌方部位岩块的形态对比图

为进一步得到完整岩体与塌方部位岩块的变形破坏特征，开展了室内单轴压缩试验[3-4]。结合岩石力学试验规范，为防止岩石在加工过程中破碎，采用线切割的方式对岩体进行取样，试件为 ϕ25 mm×50 mm 的圆柱形体。加载试验仪器为 SANS 600 kN 试验机，采用力控制方式进行加载。塌方试件常规单轴试验见图 6，完整岩块常规单轴试验见图 7。

从图 6～图 7 可以看出，塌方岩块的应力应变曲线均具有与完整岩石相似的规律，均可大致分为孔隙裂隙压密阶段、弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段、非稳定破裂发展阶段和破裂后阶段，但在峰残余阶段变现出了明显的塑形特征。且其峰值强度仅为 65 MPa 左右，较完整干燥原岩，其强度下降了 100 MPa 以上，岩石的承载能力被大幅削弱，当遇高地应力和断层等不良地质条件时，易从围岩塌落而形成空腔。且从图 6 可以看出，岩石破坏时，虽仍具有一定的脆性破坏特征，但颗粒状的破坏特征也已出现，说明其粘聚力较小，较原岩而言，脆性也得到了弱化，而塑性增强。

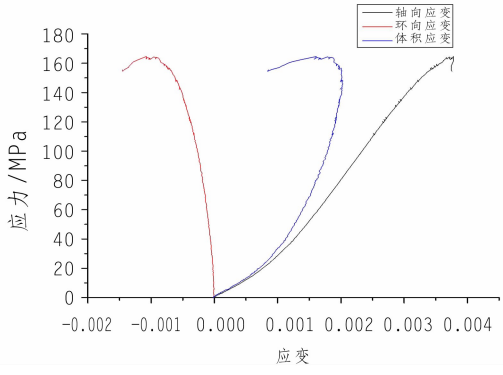
因此，塌方部位岩体的力学性能弱化，岩石的承载能力大幅下降，岩石处于坚硬岩体向软岩的过渡阶段，岩体本身的粘聚力较小，故在发生破坏的时候呈现出了颗粒状的形态。现场空腔塌落的岩体较为破碎，不能产生完整的“拱效应”以确保围岩稳定。



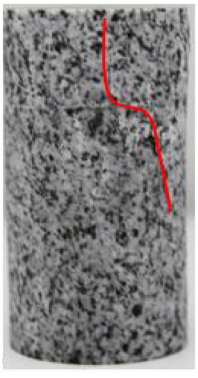
(a)塌方岩块试件的应力应变曲线

(b)塌方岩块试件破坏图

图 6　塌方试件常规单轴试验



(a)完整岩块应力－应变曲线



(b)完整岩块事件破坏图

图 7　完整岩块常规单轴试验

3.2　其他因素的影响

1)高地应力作用

叶巴滩地下洞室围岩地应力整体较高,最大值为 37.57 MPa,原岩中积聚了大量的能量,洞室的大规模开挖,将导致能量的释放,具体表现在围岩发生变形。而围岩变形总是优先发生在软弱结构面或软弱岩体,对于蚀变岩所形成的软弱岩体带,能量也易通过其掉块、塌落所形成的空腔而得以释放,而在能量释放的过程中,破坏了原岩应力状态,反过来也必将促进蚀变岩体的进一步失稳[5]。故文中的主变室蚀变岩所形成的空腔有进一步扩大趋势,原因也在于此。

2)断层影响

由图 4 可以看出,主变室顶拱由 f_{90} 断层出露,其主断带及上下盘影响带岩体质量差。根据前期勘探资料,主变室第Ⅰ层围岩呈次块状结构,较完整,围岩类别以Ⅱ类为主,但当洞室埋深大时,围岩强度应力比 $S\approx3$,围岩强度应力比小于 4,详细围岩分类为Ⅲ1 类围岩,围岩局部稳定性差,断层及其影响带为Ⅳ～Ⅴ类围岩。其中主变室顶拱(厂横)0－020.95～0－002.79 m 段发育 f90 断层,主要为Ⅳ类围岩。

故当断层穿越蚀变岩时,岩体破碎,进一步破坏了蚀变岩体的完整性,使其能力得到进一步的削弱;且断层穿越部位本身就易形成弱面效应,蚀变岩体断层穿越部位粘聚力进一步减弱,损伤向上发展形成空腔。

3)开挖扰动

叶巴滩地下洞室群规模巨大,在空间上纵横交错。为追求工期,不同位置的洞室同时施工,使得应力集中现象频繁发生,围岩也更易发生变形破坏。而某处的围岩发生了变形破坏,应力状态发生改变,可能会导致其临近的围岩也发生相应破坏。就文中的主变室顶拱而言,由于主变底导洞(厂横)0＋039 m 以里开挖影响,第Ⅰ层底板发生较大规模垮塌,导致主变室顶拱(厂横)0－010.

00～0＋005.00 m 段发生变形，沿 f_{90} 断层带发生局部垮塌，加剧块体稳定问题，强开挖扰动直接导致了主变室蚀变岩的进一步塌落。

4）地下水

叶巴滩地下洞室地下水丰富，虽采取了防渗排水廊道等措施，地下水出露已大幅减弱，但在断层等位置，仍可能具有零星的点状水出露可能，而该文蚀变岩的典型特征是遇水易膨胀软化，承载能力进一步减弱，促进了围岩失稳的发展。

综上笔者所述主变室顶拱大空腔即为以上各因素综合作用所致，若单纯的考虑少部分影响因素，或导致后续的治理措施缺乏针对性，应进一步对相关治理措施开展研究。

4　典型治理措施及效果评价

4.1　典型治理措施

针对叶巴滩主变室塌方，基于前文所述的影响机理，并结合岩体本身的力学性质及现场围岩体形态，提出了一套系统的围岩加强支护措施[4]，以确保不发生进一步失稳，具体如下：

1）总体原则采用柔性支护，以喷锚支护为主，采用锚杆、锚索等锚固措施进行加强支护；

2）考虑塌腔范围较大，顶部形态尖角明显，对空腔进行喷 C30 钢纤维混凝土处理，喷钢纤维混凝土厚度不小于 40 cm，喷混凝土厚度以尽量保证与岩体平顺衔接，避免受力尖角为原则，具体厚度根据现场实际确定；

3）为了确保塌腔体孔口周边岩体的稳定性，在塌腔体孔口周边增设置“预应力锚索＋钢筋混凝土圈梁”进行锁口，锚索参数：T＝2 000 kN，L＝30.0 m，间距约 3 m，锚索之间设置锁口梁，尺寸 40 cm×60 cm（宽度 x 高度），梁体钢筋伸入锚墩，加强受力整体性。

4）为了避免下挖过程中，应力调整引起塌腔体进一步发生破坏，设置 1 500 kN，L＝25 m，间距约 3 m 的系统锚索进行支护以治理远端岩体，预防断层再次滑移；同时施加系统锚杆、挂龙骨钢筋等措施以治理内部可能的松散岩体。

可以看出，以上综合治理措施分别包括了塌腔体孔口治理、塌腔体内部治理、塌腔体远端岩体治理，空间上层次分明，将空腔可能失稳的因素均予以考虑，针对性强。

4.2　治理效果评价

为了评价以上加强支护措施的效果，现场追加了一组多点位移计于空腔体内，多点位移计测得的顶拱变形数据见图 8。

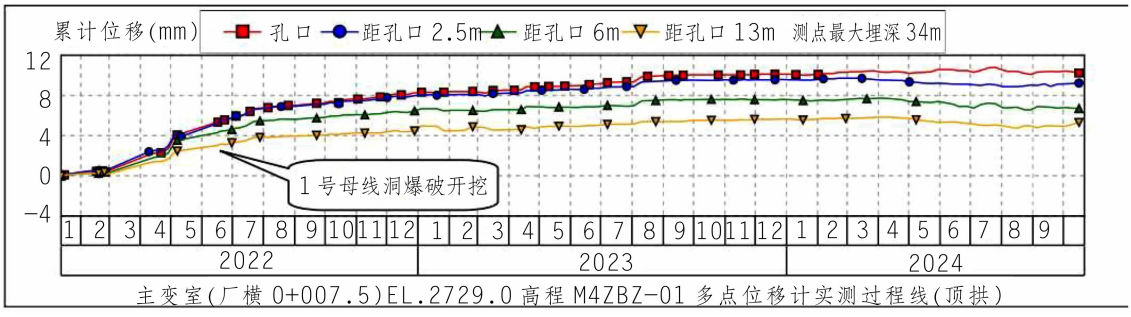


图 8　多点位移计测得的顶拱变形数据（2022 年以来）

从图 8 可以看出，经处理后，多点位移计显示围岩变形较小，围岩趋于稳定。处理后围岩的整体性得到了显著增强，因此，监测数据表明，针对叶巴滩主变室顶拱塌落空腔所采取的综合治理措施是有效的，既没有采取过度支护等保守措施，又使变形得到了有效遏制，是一种可为类似背景下塌方治理提供借鉴的典型治理措施。

5　结　论

1）叶巴滩主变塌方段岩带有明显的蚀变特征，其力学特性较未蚀变原岩显著弱化，岩石的承载能力被大幅削弱，岩体破坏时，虽仍具有一定的脆性破坏特征，但颗粒状的破坏特征也已出现，说明岩体粘聚力较小，较原岩而言，脆性也得到了弱化，而塑性增强。

2）叶巴滩地下洞室蚀变岩对围岩的影响机理包括蚀变岩力学性能弱化、断层、高地应力、地下水及强开挖扰动等，笔者所述主变室顶拱塌腔即为以上各因素综合作用所致，若单纯的考虑少部分影响因素，或导致后续的治理措施缺乏针对性。

（下转第 124 页）

带来不同程度的有毒有害气体风险。

4　结　语

依托国家水网建设加速的契机，对在四川盆地红层地区修建的一大批水利工程地下洞室开挖过程中出现的问题进行了较系统的梳理。

借助已修建和正在修建项目在各阶段积累的岩体试验成果资料，对四川盆地红层地区砂岩和粉砂质泥岩的化学成分、矿物成分、力学特征、风化特性和膨胀崩解特性进行了归纳总结。

四川盆地红层地区地下洞室开挖后在地下水和机械设备的综合作用下，对底板造成反复的破坏，最终导致底板超挖严重，造成工程的巨大浪费，应在开挖后及时做好保护处理。

对边墙垮塌的原因和过程进行了较深入的分析和阐述，尤其要对粉砂质泥岩的时间效应引起足够的重视。

随着毗河供水和亭子口灌区工程的陆续修建，来自于深部生烃层油气经断裂或裂隙向上运移，在浅部孔隙、裂隙中形成气源型次生气藏和气囊型次生气藏，为隧道施工带来不同程度的有毒有害气体风险。

参考文献：

[1]　王子忠. 四川盆地红层岩体主要水利水电工程地质问题系统研究[D]. 成都理工大学，2011：43-46.

[2]　彭华，邱卓炜，潘志新. 丹霞山顺层洞穴风化特征的试验研究[J]. 地理科学，2014，34(4)：460-463.

[3]　张翔，李宗龙，马显光. 滇中引水工程隧洞软岩工程地质特性研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 2015 年全国工程地质学术年会论文集. 北京：科学出版社，2015：305-309.

[4]　陈载林，陈玉梁. 浅谈四川盆地石油天然气资源[J]. 江西能源，2009(1)：19-22.

[5]　张健，张奇. 四川盆地油气勘探—历史回顾及展望[J]. 天然气工业，2002(增刊 1)：3-7.

作者简介：

王玉秦(1980-)，男，陕西宝鸡人，正高级工程师，硕士，从事水利水电工程地质勘察工作.

（编辑：吴永红）

（上接第 108 页）

3)针对叶巴滩大型洞室蚀变岩空腔所提出的综合治理措施以柔性支护为总体原则，分别包括了塌腔体孔口治理、塌腔体内部治理、塌腔体远端岩体治理，空间上层次分明，针对性强，监测数据表明，文中所提综合治理措施效果显著。

参考文献：

[1]　牛传星，秦哲，冯佰研，等. 水岩作用下蚀变岩力学性质损伤规律[J]. 长江科学院院报，2016，33(8)：75-79.

[2]　Chen BR，Feng XT，Zeng XH，et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during tbm tunneling in deep－buried tunnel. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2011；30(2)：275-283.

[3]　杨根兰，黄润秋，蔡国军，等. 岩石破坏前后曲线分类及脆—延转换围压研究——蚀变岩常规三轴压缩试验Ⅰ[J]. 岩土力学，2008，29(10)：2759-2763.

[4]　Zhao JS，Feng XT，Wang PF，et al. Analysis of microseismic characteristics and fracture mechanism of underground caverns induced by blasting excavation. Rock and Soil Mechanics. 2018；39(7)：2563-2573.

[5]　范庆龙，聂亮，吴少儒，等. 复杂蚀变岩体隧洞施工特性及安全措施探讨[J]. 水电站设计，2021，37(4)：29-33.

作者简介：

张　利(1984-)，女，贵州习水人，工程师，管理学硕士，从事水利水电工程招标及合同管理工作；

何　周(1981-)，男，四川蓬溪人，高级工程师，工程硕士，从事新能源工程招标及合同管理工作；

何建华(1975-)，女，四川蓬溪人，正高级工程师，项目总工，主要从事水电工程设计研究工作；

（编辑：廖益斌）