

大型洞室分层开挖围岩位移释放率与支护效用探讨

揭秉辉¹, 江 权²

(1. 二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 6100511; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 针对大型洞室从上往下分层开挖和每一层从一端到另一端沿水平方向分步开挖的空间开挖特点, 基于应力反转法研究了大型洞室分层分步开挖过程中不同部位围岩位移释放规律, 基于摩尔应力圆法提出了围岩支护效用的定量评价方法。工程实例研究表明, 大型洞室顶拱和边墙不同部位围岩在当前层开挖前、开挖过程中和开挖后的位移释放率都不一样; 开挖过程中围岩屈服区体积演化是一个与应力释放系数相关的非线性变化过程; 不同位移释放率条件下, 支护系统对提高围岩强度的作用效用可通过支护前后围岩摩尔应力圆到强度特征曲线的距离来定量表述。
关键词: 位移释放率; 支护效应; 分层开挖; 大型地下洞室

Discussion on Displacement Release Ratio and Supporting Effectiveness of Wall Rock in the Excavation of Large Underground Cavern

Jie Binghui¹, Jiang Quan²

(1. Ertan Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, CAS, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: Considering the characters of trenching layer by layer from up to down and tunneling from out to out in every layer in the excavation course of large underground cavern, the displacement release ratio of wall rock is studied based on the stress inversion method, and the supporting effectiveness of supported structure is also quantitatively evaluated based on Mohr stress circle. The case study of an large hydropower underground powerhouse shows that, (a) the displacement release ratios of wall rock in different crown and side position are different before, during and after excavation; (b) the yield volume of wall during excavation is a typical nonlinear process, which is related to the stress release ratio; and (c) the system supporting effectiveness in different displacement release condition can be evaluated by contrasting the distances of Mohr stress circle of supported wall rock to strength characteristic line before and after excavation.

Key Words: displacement release ratio; supporting effectiveness; stage excavation; large underground cavern

中图分类号: TV731.6; TU458.4

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2012)08-0051-04

0 引 言

对于长度达几百米、高度达 60~70 m 的大型地下洞室而言, 其开挖过程有别于掌子面水平连续推进的隧洞。一方面, 大型洞室分层下卧建造是一个从上往下的开挖过程; 另一方面, 洞室每一层开挖都是一个掌子面沿水平方向连续推进的过程。这一开挖的空间特点决定了大高宽比的地下洞室围岩位移模式与通常的隧洞位移模式存在较大差别。同样, 围岩不同部位位移模式的差异性也决定了大型洞室

围岩支护时机也应有别于一般隧洞支护。

针对这一问题, 本文借助 Duncan 和孙钧院士提出的应力反转方法, 通过控制围岩表面反向荷载释放系数, 分析了大型洞室分层开挖过程中围岩位移释放演化过程, 总结了洞室不同部位围岩位移释放率规律, 研究洞室应力释放过程中围岩屈服规律。

收稿日期: 2012-3-12

作者简介: 揭秉辉(1969—), 男, 江西南丰人, 教授级高工, 主要从事水利水电工程施工管理工作。

同时，通过对比围岩加固前后摩尔应力圆到岩体强度特征曲线的距离，提出了评价围岩加固效果的定量方法。

1 工程实例

黄河流域上的某水电站拥有该流域最大的地下发电厂房，其主厂房开挖尺寸为 30.0 m×73.9 m×311.8 m（宽×高×长），围岩为 III 类花岗岩。实测地应力最大主应力 22~29 MPa，倾向河谷，倾角约 10°；中间主应力约 15 MPa，作用方向 NEE~SEE，倾向山体，倾角约 20°；最小主应力约 10 MPa，近直立。采用摩尔-库仑屈服准则，通过快速拉格朗日法模拟了厂房分层下卧开挖支护过程（机窝以上共分 8 层开挖）中位移释放率特征。洞室分层与计算观察点示意图 1。岩体基本力学参数见表 1。

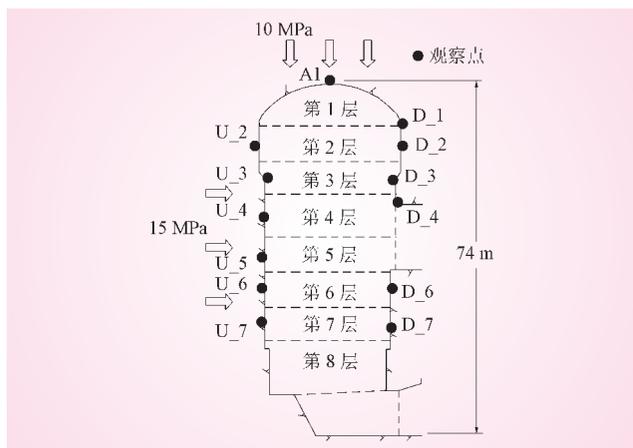


图 1 洞室分层与计算观察点示意

表 1 岩体基本力学参数

岩体类别	弹性模量/GPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
	25	0.22	3.0	45	1.0
	20	0.26	2.4	41	0.5

1.1 洞室围岩位移释放率特征

基于应力反转原理，通过改变应力释放系数，模拟洞室每一层开挖卸荷过程（应力释放系数 = [0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、0.85、0.9、0.93、0.95、0.97、0.98、0.99、1.0]），对每一次应力释放都作一次平衡计算，从而获得每一层应力释放过程中围岩位移。为便于分析整个洞室开挖的围岩位移释放率规律，文中将多层开挖应力释放系数-位移释放率关系曲线连接到一起，见图 2。图 2 中横坐标应力释放系数范围为 0~800%，如横坐标为 795%时意为第 7 层开挖中本层围岩应力释放系数为 95%）。在表 1 给定的围岩力学参数和初始应力条件下，该洞室位移释放率具有如下典型规律：

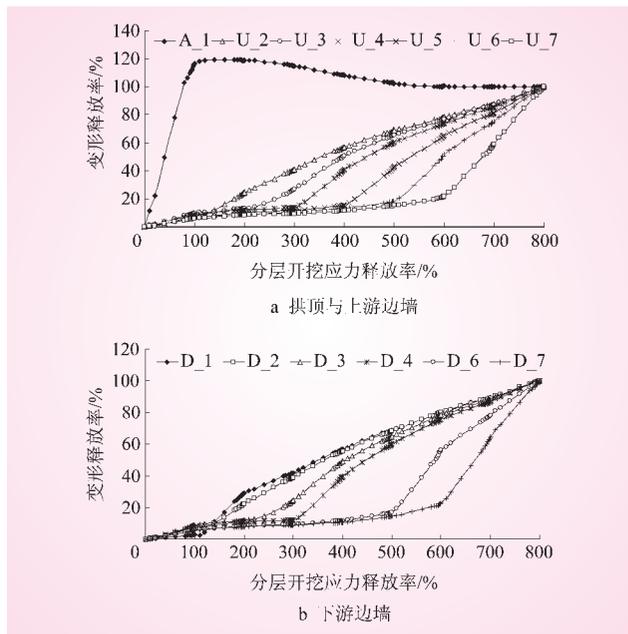


图 2 洞室不同位置应力释放系数-位移释放率关系

(1) 在第一层开挖过程中，拱顶围岩位移释放率大于 100%，达到最大，然后随后续开挖逐渐表现出一定的回弹。这与地下厂房拱顶实际监测变形结果一致。

(2) 洞室高边墙围岩位移释放率一方面表现出随本层开挖的应力释放过程而增大，也表现为随后续开挖逐步增大的特点。

(3) 总结洞室高边墙各观察点位移释放率可知，高边墙围岩在当前层开挖前位移释放率一般约为 10%~25%，而当前层开挖围岩位移释放率可达 30%~40%。这与隧道变形模式存在较大差别。

(4) 下卧开挖对洞室高边墙上部围岩位移释放存在着持续的影响。如在第 6 层开挖过程中，观测点 U₂ 的位移释放率就增长了 11.4%，而观测点 D₃ 增长了 15.6%。

由此可见，大型洞室群分层开挖过程中，围岩的位移释放模式明显不同于一般隧洞掌子面连续推进过程中围岩的位移释放特征。同时，对比围岩实际监测位移-时间曲线和围岩应力释放系数-位移释放率计算特征曲线，可基本把握实际洞室开挖过程中围岩应力释放特征，预测洞室后续开挖围岩位移演化规律，为选取合理的围岩支护时机提供参考。例如，在无粘结预应力锚索支护设计中，不同层的预应力锚索的张拉锁定吨位就可以根据洞室不同部位的位移释放率来确定，从而确保锚索预留合理的荷载裕度来适应后继围岩位移的需要。

在洞室实际开挖过程中，围岩位移监测数据表现为随洞室开挖高程台阶状下降而呈现良好的台阶

状上升, 这与采用应力释放计算获得的围岩位移基本一致。厂右 0+140 断面 M406-A4 多点位移监测位移与开挖进度及计算位移对应关系见图 3。

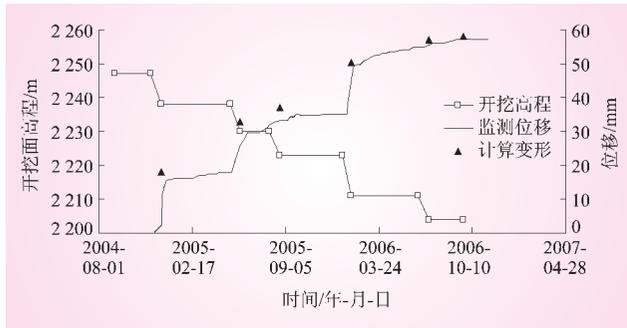


图3 监测位移与开挖进度及计算位移对应关系

2.2 围岩塑性区演化特征

在洞室开挖应力释放过程中, 围岩屈服并非随着应力释放系数增大而线性增大, 而是随应力释放系数呈似指数式的增长, 尤其是当前层开挖应力释放系数达到 85% 以后, 围岩塑性屈服区面积 (塑性区统计分析时沿厂房轴线方向上选取单位长度) 将出现较大的增长。围岩塑性区随分层开挖应力释放演化过程见图 4。这一方面表明在地下工程支护时, 采用一定的手段施加较小的表面荷载, 部分恢复围岩表面边界“支撑力”, 对于控制洞室围岩大范围屈服是可能的; 另一方面通过分析围岩塑性区面积的演化过程也为选择合理的支护时机提供了依据。

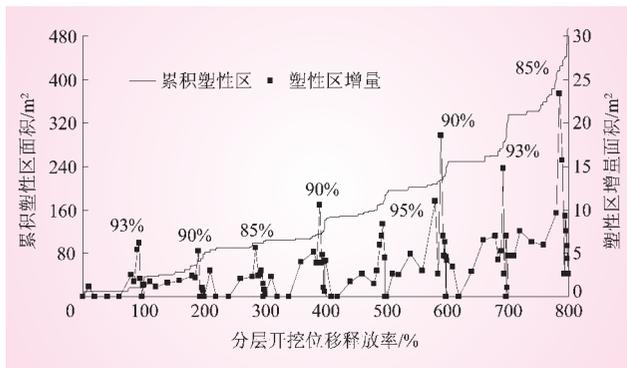


图4 围岩塑性区随分层开挖应力释放演化过程

2.3 围岩支护效用分析

各种加固措施在加固岩体时都是与围岩支护前特定的应力状态相联系的, 这就决定了在评述砂浆锚杆、预应力锚杆、喷射混凝土等支护手段对改善围岩的自支撑能力时应考虑加固前岩体特定的应力特征。

该水电站地下厂房第 3 层开挖时观测点 D_3 位置围岩加固前后摩尔应力圆与特征强度曲线变化过程见图 5。当边墙一点应力摩尔圆变迁到接近围岩初始强度特征曲线 L_1 的 C_1 形态前, 及时施加系统

支护 (包括砂浆锚杆、预应力锚索和钢纤维喷射混凝土), 使得围岩的表面围压有一定升高 (围岩最小主应力增大) 和围岩力学强度有一定提高 (假定粘聚力提高 0.4 MPa, 内摩擦角增大 4°), 则图 5 中的强度特征曲线将变化到 L_2 位置, 从而使得支护状态下的围岩应力摩尔圆远离 L_2 直线。这种加固效果可以通过 C_2 圆到 L_2 直线的最小距离表示, 即 $\overline{P_3P_4}$ 。此外, 为了进一步评价加强支护对提供围岩自支撑能力的工程效果, 可通过支护效用, 即加固后 C_2 圆到 L_2 的最小距离 $\overline{P_3P_4}$ 与加固前 C_1 圆到 L_1 的最小距离 $\overline{P_1P_2}$ 的比值来表示。

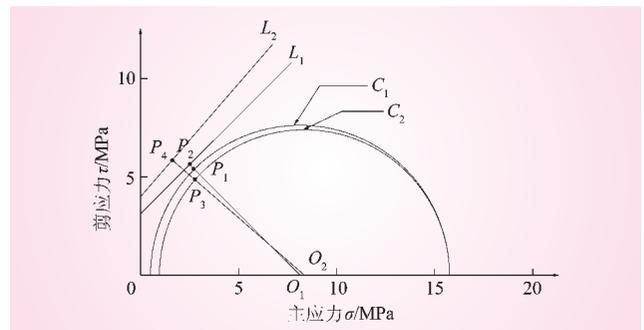


图5 围岩加固前后摩尔应力圆与特征强度曲线变化过程

3 侧压系数对洞室位移模式的影响

上文是针对侧压系数约为 1.5 这一特定初始应力条件下厂房位移模式的分析。实际上, 不同侧压系数对洞室的位移模式存在着明显的影响。同样对于图 1 中的洞室, 当侧压系数从小于 1 变化到大于 1 时, 拱顶观察点 (A_1) 的位移从无回弹特征转变到逐渐出现明显的回弹。同样, 上游第 3 层边墙观测点 U_2 位移释放率特征曲线也随侧压系数的不同表现出不同的规律。不同侧压系数条件下围岩位移释放率特征曲线见图 6。

4 结论

通过分析大型洞室在分层分步开挖应力释放过程中的位移模式与支护效用, 获得如下结论:

(1) 采用应力反转方法计算, 可获得了大型洞室分层分步开挖过程中不同部位围岩位移释放全过程特征曲线, 为研究大型洞室围岩位移模式提供了途径。

(2) 大型洞室分层开挖过程中, 不同开挖层围岩的位移释放率是不一样的。每层围岩的位移释放同时受上部多层开挖和下卧开挖的影响, 这与一般隧洞掌子面连续推进时的位移模式存在较大差别。

(3) 洞室开挖过程中, 围岩屈服随岩体应力释放系数呈指数式增长, 而不是通常认为的线性变化。

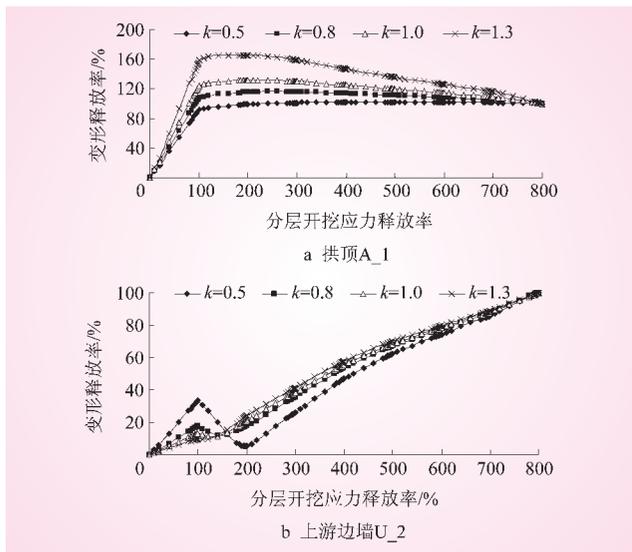


图6 不同侧压系数条件下围岩位移释放率特征

(4) 洞室的支护时机可以通过分析围岩摩尔应力圆到岩体初始强度特征曲线之间的距离确定；围岩加固效果可以通过加固后围岩的摩尔应力圆到加固后围岩的强度特征曲线的距离来评价。

(5) 不同侧压系数对洞室位移模式存在较大影响，在分析特定地应力和开挖尺寸的洞室位移模式和支护时机时应做具体分析。

参考文献：

[1] K 赫尼施. 世界大型水电站地下厂房洞室 (一)[J]. 水利水电

报, 1998, 19(2): 30-33.
 [2] 曾静, 盛谦, 廖红建, 等. 佛子岭抽水蓄能电站地下厂房施工开挖过程的FLAC^{3D}数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 637-642.
 [3] 陈卫忠, 李术才, 朱维申, 等. 急倾斜层状岩体中巨型地下洞室群开挖施工理论与优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3281-3287.
 [4] Duncan J M, Dunlop P. Slopes in stiff-fissured clays and shales [J]. Soil Mechanics and Foundations, 1969, 95(2): 467-492.
 [5] 孙钧, 侯学渊. 地下结构[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
 [6] 江权, 冯夏庭, 向天兵, 等. 大型洞室群稳定性分析与智能动态优化设计的数值仿真研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 524-539.
 [7] 张兴武, 徐小武, 彭立彬, 等. 地下洞室安全监控分析模型探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(S2): 2370-2374.
 [8] 杨强, 陈新, 周维垣. 岩土工程加固分析的弹塑性力学基础 [J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 553-557.
 [9] 张向阳, 顾金才, 沈俊, 等. 洞室预应力锚索加固效果研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 271-275.
 [10] 朱维申, 李术才, 陈卫忠. 节理岩体破坏机理和锚固效应及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
 [11] Sharma J S, Hefny A M, Zhao J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001(9): 93-98.
 [12] 李晓红, 李登新, 靳晓光, 等. 初期支护对软岩隧道围岩稳定性和位移影响分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1207-1210.

(责任编辑 杨 健)

“300 m 级高面板堆石坝安全性及关键技术研究”课题及专题启动会召开

2012年6月16日, 中国水电工程顾问集团公司在北京组织召开“300 m 级高面板堆石坝安全性及关键对策研究”课题及专题启动会, 有关单位的专家及代表参加了会议。

该课题是中国水电工程顾问集团公司与华能澜沧江水电有限公司、云南华电怒江水电开发有限公司、黄河上游水电开发有限公司共同牵头组织的一项重大工程技术研究课题, 主要目的是攻克300 m 级高面板堆石坝安全性及关键技术难题, 为300 m 级高面板堆石坝的建设提供有力技术支撑。为做好课题研究工作, 中国水电顾问集团组织编制了课题研究大纲, 并在会议上做了介绍。该课题拟设置6个专题, 分别为300 m 级高面板堆石坝的安全性评价方法、结构材料设计及变形控制、堆石料工程特性及本构关系、变形特性及工程措施、抗震安全性及工程措施、大坝安全监测关键技术等。中国水电顾问集团北京院、西北院、贵阳院、昆明院, 以及水利水电科学研究院、大连理工大学等单位分别针对有关专题研究进行了汇报。

会议围绕课题主要研究内容、预期目标、专题设置、研究方法和路线、进度计划安排等进行了认真讨论。会上, 马洪琪院士从西部水电开发面临的复杂环境条件、面板堆石坝的技术优势和工程需求, 阐述了课题研究工作的重点和方向, 并希望参研工程技术人员与学者密切合作, 在解决基础科学与工程关键技术中, 不断创新与突破, 为定量评价300 m 级高面板堆石坝安全性提供技术支撑。

周建平副总经理对会议进行了总结, 强调了开展该课题研究工作的必要性, 并指出课题研究时间紧、任务重、要求高, 希望各单位加强沟通与协调, 精心组织、共同努力, 充分发挥产学研联合攻关优势, 积极开展阶段成果咨询与考核, 高水平、高质量完成课题研究工作, 为依托工程重大技术方案的决策提供科学依据。

此次会议的召开, 标志着300 m 级高面板堆石坝安全性及关键技术研究全面启动, 为深入开展专题、子题研究工作奠定了良好基础。

(刘 娟)