

软硬互层试样卸荷蠕变变形及强度特征研究

闫兴田¹, 周会信¹, 石豫川², 张波²

(1. 华东勘测设计院(福建)有限公司, 福建 福州 350003;

2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:以卡拉水电站为背景,人工浇筑软硬互层试样,通过卸荷蠕变试验研究卡拉水电站坝址卸荷岩体长期变形及强度特征。研究表明:软硬互层状试样在卸荷蠕变条件下,主要产生沿层面方向及垂直于层面方向的裂纹,以拉张破坏为主,局部发生剪切破坏;当初始围压相同时,卸荷蠕变条件下的内聚力和内摩擦角约为常规三轴条件下的60.9%和56.4%。考虑卸荷蠕变条件下的强度参数折减,选取卡拉水电站典型剖面进行稳定性分析,计算结果表明边坡稳定性较好,但由于水电站运行时间较长,建议对潜在不稳定块体开展监测工作。

关键词:卸荷岩体;卸荷蠕变;软硬互层;变形特征

中图分类号:TV223.2⁺1

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2020)06-0202-06

Deformation Characteristics and Strength Characteristics of Soft and Hard Interlayer Under Unloading Creep Deformation

YAN Xingtian¹, ZHOU Huixin¹, SHI Yuchuan², ZHANG Bo²

(1. East China Investigation and Design Institute Co., Ltd. (Fuzhou), Fuzhou, Fujian 350003, China;

2. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: In this paper Kala hydropower station was taken as an example, manual casting of hard and soft interbedded samples, the long-term deformation and strength characteristics of the unloading rock mass at the dam site of Kara hydropower station are analyzed by unloading creep test. The results show that under the condition of unloading creep, the soft and hard interlayer specimens mainly generate cracks along the plane direction and perpendicular to the plane direction, and are mainly tensile failures, and local shear failures occur. When the initial confining pressure is the same, the cohesion and internal friction angle of the specimen under unloading creep conditions are approximately 60.9% and 56.4% under the conventional triaxial conditions. Considering the reduction of strength parameters under the condition of unloading creep, the typical profile of Kara hydropower station is selected for stability analysis. The calculation results show that the slope stability is good, but since the hydropower station has long operating time, it is recommended to monitor the potentially unstable blocks.

Keywords: unloading rock mass; unloading creep; soft and hard interlayer; deformation characteristics

岩体的卸荷蠕变在工程中十分常见,特别是在一些大型的水电站及硐室内,岩体的卸荷蠕变常常带来潜在的安全问题,威胁工程及人员设备的安全。

对于岩体的蠕变特性,目前国内外已经有了较

为丰富的研究成果。费文平等^[1]依托西南某拱坝右坝肩高边坡工程,对边坡卸荷岩体的节理进行分区统计,划分出可能的局部不稳定块体,并对其整体稳定性进行定性评价;黄书岭等^[2]根据锦屏一级地

收稿日期:2020-08-05

修稿日期:2020-09-11

作者简介:闫兴田(1981—),男,山东临沂人,工程师,主要从事水电工程地质、岩土工程等领域的生产、科研工作。

E-mail:1320898824@qq.com

通讯作者:张波(1995—),男,四川绵阳人,硕士研究生,研究方向为岩体变形及稳定性。E-mail:1665002261@qq.com

下厂房层状岩体力学特性,对地下厂房洞室群进行三维数值模拟分析,提出适时工程调控措施与建议;李新平等^[3]对锦屏二级水电站引水隧洞内的大理岩开展常规三轴压缩试验及峰前、峰后卸围压试验,研究其强度变形特征及破裂机制,揭示了其在加、卸载应力路径下的力学特性差异;石海荣等^[4]根据地质勘察资料,对某电站厂房后边坡松动卸荷岩体进行工程地质研究,并对变形发生机理及其稳定性进行分析;郭印同等^[5]结合金坛地下盐穴储气库工程,以腔体围岩实际受力状态为研究依据,进行了盐岩卸围压力学特性试验,得到其在卸围压过程的变形特征及其规律;夏天等^[6]分别采用二维、三维的刚体极限平衡法和有限元法,分析猴子岩水电站右坝肩卸荷岩体在天然工况和开挖工况下的稳定性,模拟了分级开挖边坡的应力以及塑性区分布特征;姜德义等^[7]对岩盐进行单轴压缩和三轴卸荷扩容试验,他认为卸荷试验的扩容特征与常规单轴试验在扩容阶段划分基本一致,但卸荷试验的稳定扩容段在整体扩容中所占比例更小,扩容速率和扩容幅度也较单轴试验小;曾锋等^[8]用极限平衡法和有限元法,对库什塔依水电站左坝肩卸荷岩体破坏模式和稳定性进行了研究分析;王宇等^[9]以贯通裂隙岩体为试验对象进行不同卸荷路径下的流变试验,研究节理、裂隙岩体卸荷流变力学特性;王兴霞^[10]通过卸荷试验发现,卸荷作用引起了岩样变形模量、内摩擦角、黏聚力等力学参数的劣化;李业等^[11]研究了如美水电站花岗岩卸荷条件下的力学参数劣化特征;胡斌等^[12]以沪蓉高速公路某软硬互层边坡为例,运用 FLAC^{3D} 软件,研究分步开挖卸荷作用对软硬互层边坡稳定性的影响规律。闵勇章等^[13]通过对川西某水电站的定性分析及定量计算,对右岸坝前卸荷松动岩体的变形机制及稳定性进行研究。

目前,对于岩体的卸荷的研究多集中于岩体在快速卸荷条件下的变形及强度特征,且多为块状试样,而对于软硬互层试样在卸荷蠕变条件下的特征研究较少,但在工程中常常遇见这类岩体^[14-21],研究这类岩体的卸荷蠕变特征具有很强的现实意义。

1 试样设计与制作

1.1 相似材料的选取

在实际工程中制取均匀的互层状岩样较困难,且所取同一试样难以保障一致性,本文采用相似材料进行人工浇筑获得试样。综合比较各种相似材料的性能、特点、操作的可行性等方面特征,最终以水

泥、石膏、石英砂、及重晶石粉作为主要材料,水泥、石膏是良好的胶结剂,且二者强度差异较大,可满足模拟软岩、硬岩的要求,石英砂及重晶石粉是良好的骨料。并以复合早强剂、颜料等作为添加剂配制模拟材料。

1.2 试样设计

本次试验主要探索陡倾软弱互层状岩体在加卸荷条件下的变形及力学特性,并针对此目的设计实验试样,试样层厚为 1 cm,层面倾角为 75°(见图 1)。

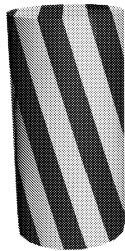


图 1 层状试样示意图

考虑物理力学性质,通过配比实验,最终确定软岩及硬岩相似材料配比,如表 1 所示。

表 1 相似材料质量配比

材料类型	水泥	石膏	石英砂	重晶石粉
软岩	5	1	3	3
硬岩	2	0	1	1

为了区分两种相似材料,在试样浇注时分别添加少量不同颜色的颜料(软岩相似材料添加黄色颜料,硬岩相似材料添加红色颜料,添加量为固体总重的 1%)。

根据国际岩石力学学会对岩石力学实验试样制作标准的要求,浇筑成直径 50 mm × 高度 100 mm 的标准圆柱试样。养护完成后采用标准岩石两端面磨光机将试样两个端面磨平;试样满足制作精度要求:试件两端面不平行度误差不应大于 0.05 mm,沿试件高度、直径的误差不应大于 0.3 mm,端面应垂直于试件轴线,最大偏差不应大于 0.25°。

2 实验设备及试验方案

2.1 实验设备

常规三轴试验采用以 MTS815 Teststar 程控伺服岩石刚性试验机为主体组成的多功能的程控伺服岩石力学试验系统完成;三轴卸荷蠕变试验采用 YSJ-01-00 岩石三轴蠕变试验机进行。

2.2 实验方案

为探究软弱互层试样在卸荷蠕变条件下的变形

及强度特征,设计了不同应力环境下的常规三轴试验及三轴卸荷蠕变试验,常规三轴实验主要为三轴卸荷蠕变实验提供数据参考,且能与三轴卸荷实验进行对比。基于试验结果,分析探讨复杂应力状态下软硬互层状试样的卸荷流变力学特性与破裂机制。

首先对试样进行常规三轴压缩实验,然后对每组试件进行不同围压下的卸荷试验,见表 2。加卸荷条件下的应力路径与加载过程图见图 2。

表 2 实验方案统计表

试样编号	实验方式	初始围压/MPa
A	常规三轴实验	2
B		4
C		6
D	三轴卸荷实验	2
E		4
F		6

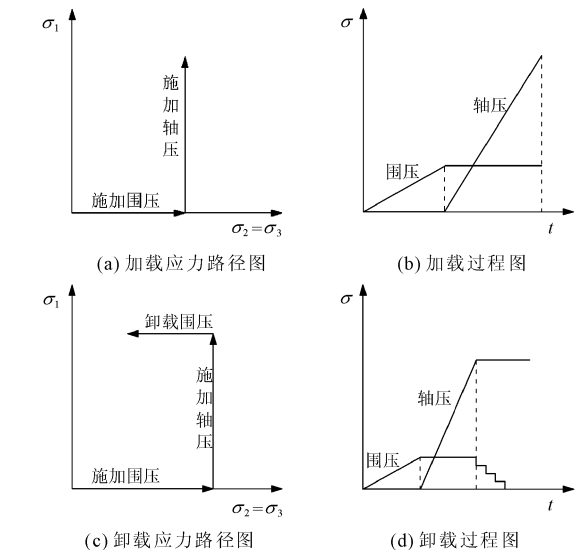


图 2 加卸荷试验应力路径与加载过程

3 加卸荷条件下试样变形及强度特征

3.1 常规三轴压缩实验

在每次实验结束后,对破坏后的试样进行拍照分析(见图 3),对比不同围压下试样的破坏照片可以发现:在常规三轴压缩条件下,裂纹主要沿层面方向产生。当围压越大时,塑性变形越强,裂纹越不发育,且试样的破坏面大多沿层面方向。

对数据处理得到加载条件下的应力-应变曲线(见图 4)。

由图 4 可知:在常规压缩条件下,软硬互层试样的应力-应变曲线基本可分为 4 个阶段,即孔隙压密阶段、弹性变形阶段、弹塑性变形阶段和应变软化

阶段,但当围压较大时,试样的塑性变强,且不会出现应变软化阶段,这与典型的岩石应力-应变曲线基本相符。

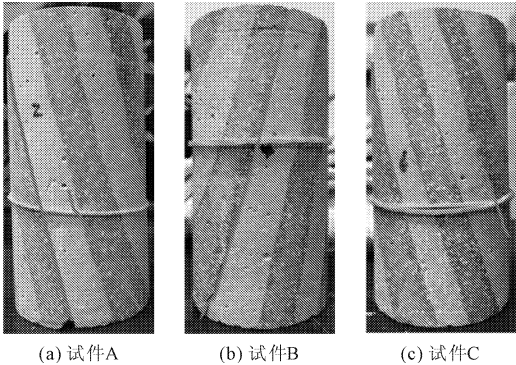


图 3 常规三轴条件下试样破坏情况

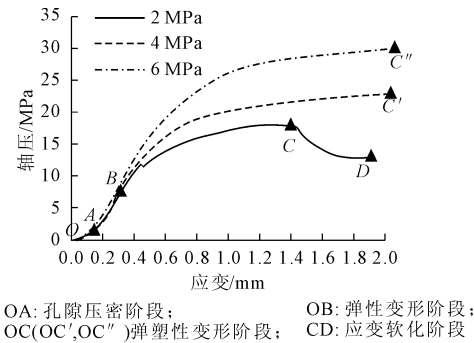


图 4 常规三轴实验试样应力-应变曲线图

将实验数据处理得到加载条件下试样破坏时的轴压和围压,见表 3。

根据 Mohr - Coulomb 准则分析破坏强度。以轴向应力 σ_1 为纵坐标值,围压 σ_3 为横坐标值,建立直角坐标系,作出加载条件下摩尔应力圆(见图 5),计算得到试样的 c, φ 值分别为 1.33 MPa、 39° 。

表 3 常规三轴条件下试样破坏时围压及轴压

试件编号	初始围压 /MPa	破坏围压 /MPa	破坏时轴压 /MPa
A	2	2	18.40
B	4	4	23.32
C	6	6	32.11

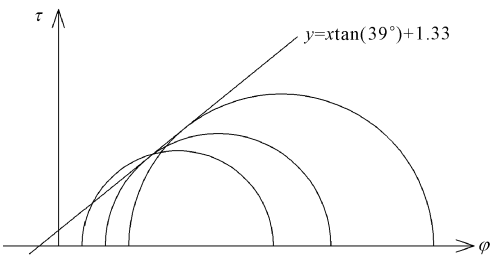


图 5 常规三轴实验条件下摩尔应力圆

3.2 三轴卸荷蠕变实验

对 D、E、F 组试样进行分级卸荷,待第一级卸荷稳定后,再进行下一级卸荷。图 6 为三轴卸荷蠕变条件下试样破坏后的情况,与常规三轴压缩实验一样,当围压越大时,裂纹发育越少。

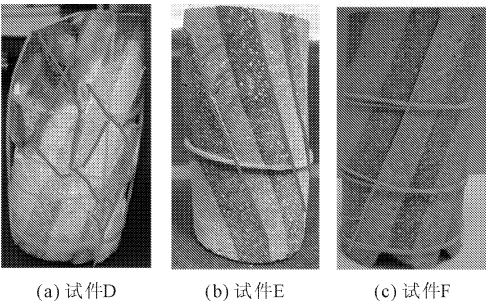


图 6 三轴卸荷蠕变条件下试样破坏情况

对裂纹进行分析发现:在卸荷条件下,裂纹主要沿层面方向及近似垂直于层面方向产生,且沿层面破坏的破坏面光滑平整,局部可见擦痕,表明在卸荷时,破坏面主要发生拉张破坏,局部发生剪切破坏(见图 7(a));近似垂直于层面的裂隙发育短而多,多张开,裂缝中基本无碎屑物质充填,主要是由于岩体在卸荷时体积扩容产生(见图 7(b))。

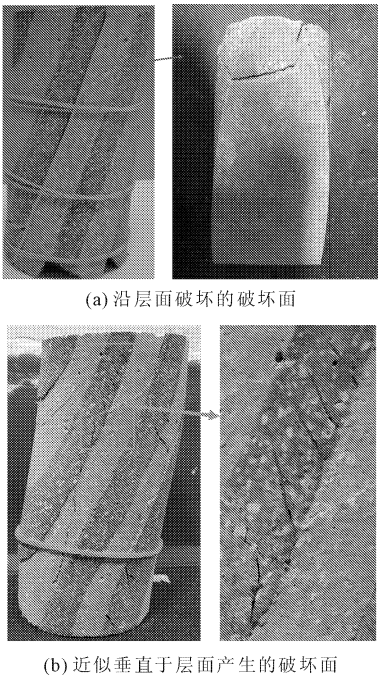


图 7 试样破坏面特征

对数据处理得到卸荷蠕变条件下试样的应力 - 应变曲线(见图 8)。

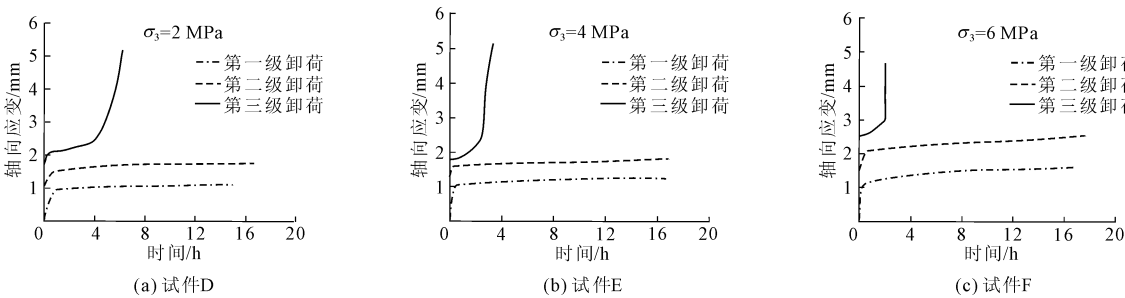


图 8 三轴卸荷蠕变条件下轴向应变 - 时间曲线

由图 8 可知随着围压逐渐减小,试样的蠕变变形越来越显著,并在最后一级发生了非线性加速蠕变现象直至试样破坏。在第一级卸荷时,轴向应变增量较大,这主要是由于试样中存在较多的微裂隙及空隙,开始卸荷时,试样内部微裂隙迅速闭合,宏观表现为应变增大。

同样将实验数据处理得到加载和卸荷条件下试样破坏时的轴压和围压,见表 4。

根据 Mohr - Coulomb 准则作出卸荷条件下摩尔应力圆(见图 9),计算得到三轴卸荷蠕变实验条件下 c 、 φ 分别为 0.81 MPa、 22° 。

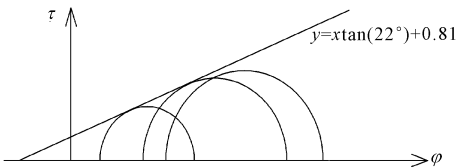


图 9 三轴卸荷蠕变实验条件下摩尔应力圆

将不同条件下的 c 、 φ 值进行比较可得,三轴卸载蠕变实验条件下的内聚力 c 及内摩擦角 φ 分别为常规三轴条件下的 60.9% 及 56.4%。

表 4 三轴卸荷蠕变条件下试样破坏时围压及轴压			
试件编号	初始围压 /MPa	破坏围压 /MPa	破坏时轴压 /MPa
D	2	1.1	4.8
E	4	2.8	8.4
F	6	3.7	10.0

4 典型边坡稳定性分析

4.1 工程概况

卡拉水电站坝址区沿江两岸属高山峡谷地貌,坝址区两岸边坡上部宽谷形态,谷坡坡度一般大于 40° 。研究区分布地层主要为三叠系上统杂谷脑组,岩性以薄—中厚层状变质砂岩、砂质板岩、大理岩互层为主,总体产状为 $N20^{\circ}\sim 40^{\circ}WNE\angle 45^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。因此卡拉坝址区岩体的一个特点就是陡倾互层。

工程区岩石建造类型复杂,构造改造强烈,岩体不同类型的构造结构面发育,与层面组合往往控制着危岩发育的边界和规模。通过地表调查,左右两岸岩体有所差异:右岸边坡为顺层坡,表层岩体呈层状延展,以层状—互层状结构为主;而左岸边坡强烈倾倒变形与卸荷作用使坡表岩层延展性遭受破坏,多呈块裂化、板裂化、碎裂化改造特征。

4.2 计算模型

卡拉水电站坝址区环境边坡具有典型的粘结层状结构,岩层与岩层之间粘结紧密,力学性质较好,由于边坡的这种特点,可能构成卡拉边坡岩体稳定性分析的二种结构面:(1) 长大的分化卸荷裂隙、断

层构成的边界条件;(2) 平行坡面岩体质量界线边界条件,这是由于在岩体质量分级界限附近,界限两侧岩体的透水性差异较大,地下水易在界限附近富集,使得岩体质量参数降低,形成软弱带,甚至发展为潜在滑坡的底滑面。

本文取卡拉水电站坝址区 II—II'剖面的左岸进行分析(见图 10)。根据其结构面组合特征分析其可能失稳的块体(见图 11)。

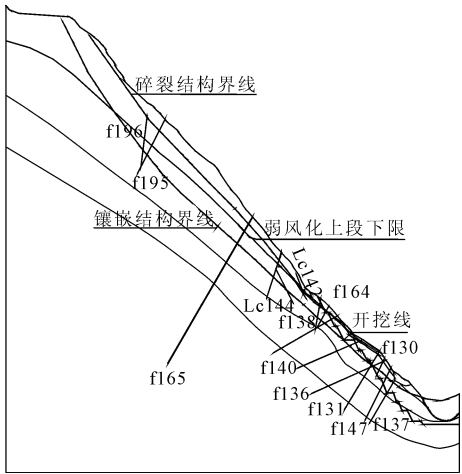


图 10 卡拉水电站坝址区 II—II'左岸剖面简图

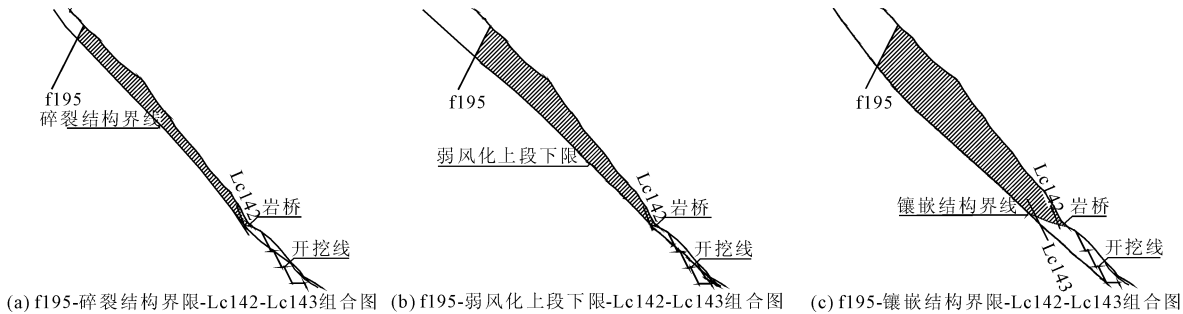


图 11 卡拉水电站坝址区 II—II'左岸可能失稳块体

4.3 计算参数

在自然边坡变形破坏中,失稳岩体会沿着软弱面形成滑面产生滑移。因此,在边坡稳定分析中研究岩体的抗剪强度和变形特性时,必须在研究岩体和不连续结构面的破坏机理的基础上,进一步确定岩体和结构面共同构成的节理岩体的综合抗剪强度及变形指标,显然这是一个非常困难的问题,边坡物理力学参数的选取对岩质边坡的稳定性计算中非常重要。据文联勇^[21]的研究成果可知,卡拉水电站坝址区岩体具备的良好的层间粘结作用,这种粘结层状岩体具有较高的岩体强度,且岩层层厚相对较薄,故在对岩体参数进行取值时,不对不同岩性的岩体强度进行单独考虑,结合本工程的工程及水文地质条件和类似工程经验,提出本工程岩体工程地质分

类及各类岩体的建议指标(见表 5)。

表 5 卡拉水电站坝址区岩体力学参数取值表

岩体类型	密度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	变形 模量 /MPa	泊松 比	抗拉 强度 /MPa	内摩 擦角 /($^{\circ}$)	内聚 力 /MPa
Q4	20.0	800	0.35	0.00	28	0.05
强风化层	22.5	4800	0.30	0.06	35	0.45
弱上风化岩体	25.0	7000	0.26	0.10	41	0.65
弱下风化岩体	25.5	11000	0.24	0.50	45	0.90
微新岩体	26.0	13000	0.23	0.70	50	1.30

在计算长期蠕变条件下稳定性时,根据前文中的实验结果,其内聚力 c 和内摩擦角 φ 分别取当前强度下的 60.9% 和 56.4%,确定其力学参数按照表

6 选取。

4.4 计算结果及分析

本论文采用极限平衡法进行计算,根据前面得到的自然斜坡弱面组合块体,建立自然斜坡弱面组合块体极限平衡法计算模型,分别采用 Morgenstern – Price 法、Janbu 法和 Bishop 法计算当前条件下及长期蠕变条件下块体的稳定性,计算结果见表 7。

表 6 长期蠕变条件下岩体力学参数取值			
岩体类型	重度 /(kN·m ⁻³)	内摩擦角 /(°)	内聚力 /MPa
Q4	20.0	15.8	0.0305
强风化层	22.5	19.7	0.2741
弱上风化岩体	25.0	23.1	0.3959
弱下风化岩体	25.5	25.4	0.5481
微新岩体	26.0	28.2	0.7917

表 7 卡拉水电站坝址区岩体力学参数取值表

不稳定块体	稳定性系数					
	当前条件下			长期蠕变条件下		
	Morgenstern – Price 法	Janbu 法	Bishop 法	Morgenstern – Price 法	Janbu 法	Bishop 法
f195 – 碎裂结构界限 – Lc142 – Lc143 组合块体	2.543	2.556	2.715	1.528	1.545	1.613
f195 – 弱风化上段下限 – Lc142 – Lc143 组合块体	2.327	2.127	2.073	1.152	1.168	1.214
f195 – 镶嵌结构界限 – Lc142 – Lc143 组合块体	—	2.068	2.052	—	—	—

由计算结果可知,在当前条件下,各组合块体的稳定性系数基本上在 2.000 以上,边坡稳定性好;在长期蠕变条件下,各组合块体的稳定性系数基本上在 1.150 以上,边坡稳定性较好。由于水电站运行时间较长,在水电站正常运行时间内坡体可能经历一些不确定因素(如连续强降雨、多次地震等),坡体结构及岩体的参数可能发生变化,故建议对潜在不稳定块体进行监测。

5 结 论

本章主要通过配制相似材料,浇注样品,并通过加卸荷岩体力学实验分析了岩体在加卸荷条件下的变形特征及强度特征,并选取卡拉水电站坝址区典型剖面进行稳定性分析,主要得到如下结论:

- (1) 软硬互层状试样在卸荷蠕变条件下,主要产生沿层面方向及垂直于层面方向的裂纹,且裂隙整体较为平整,以拉张破坏为主,局部发生剪切破坏。
- (2) 当初始围压相同时,在卸荷蠕变条件下,试样内聚力约为常规三轴条件下的 60.9%,内摩擦角约为常规三轴条件下的 56.4%,此强度可作为其长期强度。
- (3) 在卡拉水电站选取典型剖面进行稳定性分析,计算结果表明:在当前条件下,各组合块体的稳定性系数基本上在 2.000 以上,边坡稳定性好;在长期蠕变条件下,各组合块体的稳定性系数基本上在 1.150 以上,边坡稳定性较好。但由于水电站运行时间较长,建议对潜在不稳定块体进行监测。

参考文献:

[1] 费文平,张国强,崔华丽. 高边坡卸荷岩体稳定性分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2010, 43(05): 599-603,612.

[2] 黄书岭,王继敏,丁秀丽,等. 基于层状岩体卸荷演化的锦屏 I 级地下厂房洞室群稳定性与调控[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(11): 2203-2216.

[3] 李新平,肖桃李,汪 斌,等. 锦屏二级水电站大理岩不同应力路径下加卸载试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(5): 882-889.

[4] 石海荣,杨作恒,王 军. 某电站边坡卸荷岩体工程地质研究与稳定性分析[J]. 水利规划与设计,2012(3): 23-27.

[5] 郭印同,杨春和,付建军. 盐岩三轴卸荷力学特性试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(3): 725-730,738.

[6] 夏 天,费文平,肖梦倚. 猴子岩水电站右坝肩卸荷岩体稳定性分析[J]. 中国农村水利水电,2013(10): 96-100,102.

[7] 姜德义,范金洋,陈 结,等. 盐岩在围压卸荷作用下的扩容特征研究[J]. 岩土力学,2013,34(7): 1881-1886.

[8] 曾 锋,练 操. 库什塔依电站坝肩卸荷岩体稳定性研究[J]. 资源环境与工程,2014,28(4): 398-402.

[9] 王 宇,李建林,左 亚,等. 不同卸荷路径下贯通裂隙岩体流变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S1): 2900-2908.

[10] 王兴霞. 复杂应力路径下三峡库区砂岩力学特性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(2): 99-102.

- 报,2020,18(2):256-262.
- [7] 唐红梅,陈洪凯,关明芳. 边坡渗流研究现状及趋势分析[J]. 重庆交通学院学报,2006,25(1):78-83.
- [8] GEO – SLOPE International Ltd. 著. 非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 用户指南[M]. 中仿科技(Cn Tech)公司译,北京:冶金工业出版社,2011:141-143.
- [9] 李佩成. 地下水非稳定渗流解析法[M]. 北京:科学出版社,1990:9-12.
- [10] 陈崇希,林 敏. 地下水动力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1999:30-33.
- [11] 薛定谔 A E 著. 多孔介质中的渗流物理[M]. 王鸿勋,张朝琛,孙书琛,译. 北京:石油工业出版社,1982:156.
- [12] Phanuwat Suriyachat, Pachero Yungyune. Normalized graphs for seepage analyses along sheet pile in double soil layers[J]. Thammasat Int. J. Sc. Tech., 2003,8(1):13-21.
- [13] 吴 丹,陶月赞,林 飞. 复杂函数边界控制下的潜水非稳定流模型及解的应用[M]. 水利学报,2018,49(6):725-731.
- [14] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2003:10-25.
- [15] 尹志刚,范 巍,董思健,等. 基于正交试验设计的再生骨料透水混凝土力学性能研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(4):21-25.

(上接第 207 页)

- [11] 李 业,林 锋,王 川,等. 如美水电站花岗岩卸荷力学特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(2):109-114.
- [12] 胡 斌,姚文敏,余海兵,等. 分步开挖卸荷作用下软硬互层边坡的稳定性分析[J]. 科学技术与工程,2016,16(29):281-286.
- [13] 闵勇章,凡 亚,刘永波. 近坝库岸卸荷松动岩体稳定性分析及入库涌浪计算[J]. 水电站设计,2019,35(3):1-4,20.
- [14] 丁秀丽,付 敬,刘 建,等. 软硬互层边坡岩体的蠕变特性研究及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005(19):12-20.
- [15] 岳建军. 缓倾外软硬互层型滑坡基本特征及失稳机理研究[D]. 成都:成都理工大学,2016.
- [16] 陈红军,刘新荣,王 成,等. 倾斜软硬互层隧道破坏过程的围岩应力研究[J]. 现代隧道技术,2017,54(4):68-76.
- [17] 蒋金阳. 软硬互层边坡倾倒变形破坏特征及支护效果的大型离心机试验研究[D]. 成都:成都理工大学,2017.
- [18] 任 松,欧阳汛,姜德义,等. 软硬互层隧道稳定性分析及初期支护优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(7):17-22.
- [19] 裴 峰,张军工,马庆福,等. 卸荷条件下岩石破坏能量演化试验研究进展[J]. 金属矿山,2017(5):1-6.
- [20] 谢勇谋. 深埋长大隧道软硬互层型围岩分级探讨[J]. 建筑技术开发,2019,46(15):160-162.
- [21] 文联勇. 高陡变质层状斜坡结构特征对斜坡变形、稳定性的影响研究——以雅砻江卡拉水电站顺层斜(边)坡为例[D]. 成都:成都理工大学,2013.