

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.05.18

某水电站左岸坝基岩体卸荷松弛特征与形成机制

胡荣兵,任光明,刘晓宇

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

摘要: 坝基岩体稳定性是水电站建设过程中至关重要的问题,而坝基岩体卸荷松弛现象对其稳定性具有极大的影响作用。因此加强坝基卸荷松弛特征及机制的研究具有重要的工程实际意义。本文以某水电站左岸坝基为研究对象,通过现场调查、勘探,在查明了坝基卸荷松弛特征、影响因素的基础上,结合地质分析及数值模拟方法对坝基松弛机制进行了研究,结果表明该水电站左岸坝基卸荷松弛现象是由爆破作用所产生的瞬时调整以及开挖之后出现的时效性应力调整两者共同作用所导致的,为该坝基的稳定性预测及评价提供了依据。

关键词: 坝基;卸荷松弛特征;形成机制;应力调整

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)05-0139-06

Unloading relaxation characteristics and mechanism of the rockmass at left bank dam foundation of a hydropower station

HU Rongbing, REN Guangming, LIU Xiaoyu

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The stability of the dam foundation rock mass is a crucial issue in the construction process of the hydropower station, and the unloading relaxation phenomenon of the dam foundation rock has a great influence on its stability. Therefore, it is of great engineering practical significance to strengthen the study of the unloading relaxation characteristics and the base mechanism of the dam foundation. In this paper, the dam foundation of the left bank of a hydropower station in China is taken as the research object. Based on the field investigation and exploration, the dam foundation relaxation mechanism is studied in detail based on the geological analysis and numerical simulation methods. The results show that the unloading relaxation phenomenon of the dam foundation on the left bank of the hydropower station is caused by the instantaneous adjustment caused by the blasting action and the time-dependent stress adjustment after the excavation. The combination of the two causes the stability prediction and evaluation of the dam foundation.

Keywords: rockmass of dam foundation; unloading relaxation characteristics; formation mechanism; stress adjustment

0 引言

随着我国水电站的大规模开发,坝基岩体卸荷松弛现象越来越受到重视,大量工程实践表明^[1-4],坝基

岩体卸荷松弛对水电站安全建设起到至关重要的作用。坝基边坡卸荷是伴随边坡开挖或河谷下切过程中,应力释放导致边坡岩体向临空面发生卸荷回弹变形,应力场进行调整,伴随这一过程在边坡浅部一定深

收稿日期: 2019-03-14; 修订日期: 2019-04-15

第一作者: 胡荣兵(1993-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为岩土体稳定性及工程环境效应。E-mail:454456131@qq.com

度范围内所产生的一套变形破裂行为^[5]。国内外学者对岩体卸荷的形成机制、卸荷带的划分、工程岩体卸荷破坏特征等均进行了大量研究,并取得了较大进展,如黄润秋等^[6]将三峡船闸高边坡开挖卸荷作为岩质高边坡卸荷带形成机理研究的实例,从应力变化及力学机制方面进行分析,并提出了数值计算中卸荷带的判别标准;哈秋龄^[7]指出岩体高边坡工程的力学状态主要为卸荷,并提出了“各向异性卸荷岩体力学”的概念;任光明等^[8]综合考虑国内外卸荷岩体大量实测资料及其特征指标,以裂隙开度、纵波速度、透水系数等指标来探讨岩体卸荷带定量划分问题;吴刚^[9]回顾了工程岩体卸荷破坏机制的研究现状,对该方面研究的主要问题和研究方向进行了展望;王运生等^[10]对大渡河谷底卸荷松弛现象及其形成机制进行了探讨,并与谷坡卸荷进行了比较;王吉亮^[11]讨论了坝基岩体开挖后岩体卸荷变形破坏形式,分析了表层卸荷松弛带的划分、空间分布特征及其成因。由于卸荷松弛现象的复杂性及相关地质条件的差异性,对于坝基卸荷松弛机制的研究还有待进一步深入研究。本文在现有研究

基础上,结合某水电站工程实际,详细分析了左岸坝基卸荷松弛特征,并在此基础上结合数值模拟方法对其形成机制进行了分析,以为该类坝基的稳定性研究提供参考。

1 工程区地质环境条件

坝区位于金沙江下游河段,属于中山峡谷地貌,总体地势为北高南低,河谷呈不对称的“V”字形,左岸相对右岸较缓。地质构造上有包括断层、层间错动、层内错动、裂隙等形式在内的断裂构造及隐晶质玄武岩内普遍发育的柱状节理。主要发育有北东向 F17 及北西向的 F14、F16 等断层,左岸同时发育有 C3、C3-1 等层间错动带及较长的层内错动带 LS342、LS3319、LS351 及 LS421 等(图 1)。地层以二叠系上统峨眉山组玄武岩为主,尤以柱状节理玄武岩分布最为广泛,玄武岩属于坚硬岩,抗风化能力较强,风化作用主要沿断层、裂隙及缓倾角错动带进行,以裂隙式和夹层状风化特征为主。

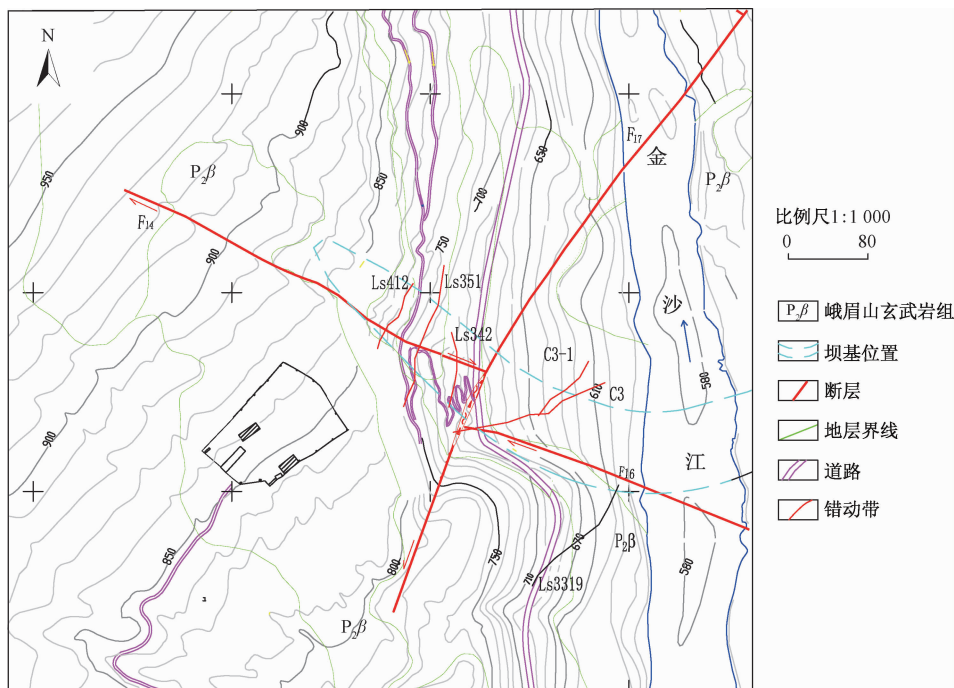


图 1 研究区工程地质平面图

Fig. 1 Engineering geological plan of research area

2 卸荷松弛特征

左岸坝基上覆岩体开挖后,打破了原有应力平衡状态,应力进行二次调整,在这一过程中浅表部岩体产生卸荷松弛现象。现场调查分析发现,这类现象主要

表现为原有裂隙的张开、新裂隙的产生、裂隙密集带、类“板裂”以及“葱皮”等现象:(1)原有裂隙张开。开挖前柱状节理玄武岩柱体间节理、柱内微裂隙处于微张或闭合状态,开挖后可见沿节理裂隙张开现象(图 2),玄武岩柱体内微裂隙主要有两类:近平行柱面的

陡倾裂隙(倾角为 $70^{\circ} \sim 85^{\circ}$)及横切柱面的缓倾裂隙(倾角为 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$)。这种现象分布于左岸整个开挖坝基之上平均发育深度约为0.2 m,属于拉张性质,具有显著的继生性;(2)新裂隙产生。在开挖爆破瞬间产生的高压气体和冲击波使岩体产生新的裂隙,其典型特征为裂隙延伸长度较短,延伸方向具有较强的随机性,裂隙张开度一般2~5 mm,裂面粗糙起伏无充填,具有明显的张性破坏特征,该现象主要见于爆破预裂孔附近,深度约为0.6~0.8 m;(3)裂隙密集带。主要见于缓倾错动带附近,前期构造作用导致周围岩体裂隙发育,在开挖之前处于压密状态,开挖后浅表部约束解除,应力调整,容易在错动带附近产生应力集中,导致裂隙微张从而形成裂隙密集带,尤其是在错动带LS342、LS351及LS421附近更为明显;(4)“葱皮”现象。建基面开挖后岩体应力释放强烈,在岩体表层出现“葱皮”现象(图3)。该现象主要分布于完整或块状微新和新鲜角砾熔岩岩体表层,薄层岩片厚度一般在3~10 cm;裂隙倾向坡外,倾角略小于开挖坡角,总体走向一般同坡面走向一致,走向长度常受炮孔和限制一般为0.2~0.5 m,裂缝向坡内的延伸长度不大,一般小于0.1~0.3 m,裂隙两端常常向上弯曲,影响深度一般在0.2 m以内;(5)类“板裂”现象。柱体沿横向微裂隙贯通面产生剥落,类似“板裂”现象。开挖卸荷后岩体向临空面回弹,应力二次调整,横向微裂隙



图2 应力调整导致微裂隙张开

Fig.2 Stress adjustment leads to micro-crack opening



图3 保护层岩体葱皮现象

Fig.3 Protective layer rock body onion phenomenon

逐渐贯通张开,在重力作用下柱体发生脱落。板裂的厚度约为0.1~0.4 m,而且具有中间厚,向两边逐渐尖灭的特点,该现象主要见于左岸坝基600 m高程以下,在错动带LS3319附近较为明显。

3 卸荷松弛影响因素

卸荷松弛现象的影响因素有许多,针对该水电站左岸坝基总结为以下几个方面:(1)地质条件影响。左岸坝基岩性主要为柱状节理玄武岩,柱体长度一般2~3 m,直径13~25 cm,柱体内节理微裂隙发育且表面完整性差。现场调查发现,玄武岩柱体内发育有近平行柱面及横切柱面的两组微裂隙,为卸荷松弛提供了基础条件。此外,左岸分布有多条断层及错动带,这些部位容易产生应力集中,开挖后结构面作为应力释放的窗口,其附近卸荷松弛现象更显著。(2)爆破影响。爆破的方式、炮孔的孔径、装药量、炮孔之间的距离都会对岩体的松弛产生影响。爆破时瞬间释放高强度应力波施加到岩体上,能量沿着柱玄武岩体内节理微裂隙传播耗散,从而加剧了岩体内部裂隙的张开、扩展。左岸坝基边坡的开挖采用的是预裂爆破方式,即预先沿着设计的轮廓线爆破出一条一定宽度的裂缝,这样可以对保留岩体的破坏降到最小。(3)开挖卸荷影响。边坡开挖改变了岩体原有的应力环境,应力进行二次调整,建基面附近岩体由原先的三向受压状态,转化为二维受力状态。在应力调整过程中,岩体储存的能量释放,柱状节理玄武岩节理裂隙发育,因此沿着原有的节理面、微裂隙张开扩展并产生新的裂隙,从而造成岩体产生松弛。

以上所述是影响卸荷松弛现象的三个方面,其中地质条件是产生卸荷松弛现象的基础条件,爆破是诱发因素,而开挖卸荷则是导致松弛的直接因素。

4 卸荷松弛机制分析

4.1 爆破作用导致松弛

爆破作用造成左岸坝基岩体松弛主要是由于爆破瞬间会产生巨大的能量,这种能量沿着岩体中密集发育的柱状节理面和微裂隙衰减和耗散,对建基岩体施加了一个高强度的应力波^[12],岩体急剧卸荷并向临空面回弹,原有应力场被破坏,应力进行二次调整。在边坡浅表部,最大主应力 σ_1 平行于开挖面,调整相对较慢,而最小主应力 σ_3 垂直于开挖面,降低较快,局部甚至出现拉应力。按照摩尔-库伦准则,摩尔圆逐渐扩大(图4),最终触及甚至突破包络线时,岩体中隐微裂隙张

开相互贯通,最终岩体发生破坏产生结构性松弛。因此在建基面常见裂隙张开、新裂隙产生等卸荷松弛现象。

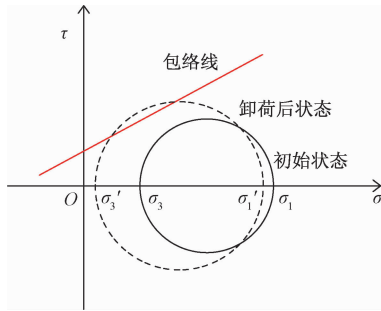


图4 爆破作用导致莫尔圆的变化

Fig. 4 Blasting causes changes in the Moiré circle

4.2 应力调整导致松弛

左岸坝基岩体原本赋存于一定的应力环境中,开挖后原有应力平衡被打破,应力重新调整,这种调整从开挖临空面至岩体内部呈逐渐减弱的趋势^[13-14]。浅表部岩体破坏主要受控于与开挖面平行的最大主应力,当满足格里菲斯准则时就会产生与开挖面近平行的压致一拉裂卸荷。在上述分析基础上,建立数值计算模型来分析卸荷松弛机制。首先按照实际开挖方案进行建模,共分为32个开挖梯段,利用AutoCAD将左岸边坡实际地形及地层导入phase2软件中,数值模型网格选取标准三角形单元,共20 729个单元,10 572个节点,据勘察资料结合工程类比确定的介质参数见表1。从左岸开挖前应力矢量图(图5)可以看出,谷坡浅表部主要受重力场控制, σ_1 竖直, σ_3 水平,坡体内部过渡到受构造应力场控制,靠近坡面最大主应力平行于坡面,最小主应力与之正交,在坡脚和错动带、断层附近应力集中。

左岸坝基开挖后,靠近开挖面 σ_1 方向逐渐与坡面

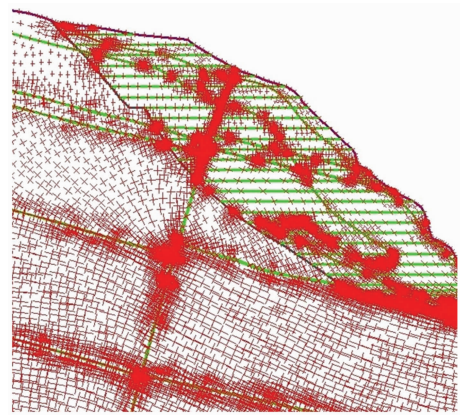


图5 左岸边坡开挖前应力矢量图

Fig. 5 Left bank slope excavation before stress vector

平行, σ_3 方向与之垂直,距开挖面一定深度范围形成应力降低区。以580 m高程为例,其开挖前后 σ_1 、 σ_3 调整如图6、图7所示,从图中可以看出坡面 σ_1 、 σ_3 分别为11.56 MPa、2.50 MPa,开挖后分别降低至4.35 MPa、0.12 MPa。左岸580 m高程靠近河床,开挖前岩体处于高应力状态,开挖后上覆荷载快速解除,而柱状节理玄武岩岩体内节理、裂隙发育,使应力得到较大释放。岩体向临空面卸荷回弹,扰动了原有应力平衡状态,应力重新分布形成“驼峰应力”。为研究开挖前后 σ_1 、 σ_3 值的整情况,比较开挖前后距开挖面不同深度处应力值变化,在距开挖面每隔10 m位置处布置监测点来记录其应力值变化情况(图8),由图8可以看出在距开挖面0~30 m范围形成明显的应力降低区,开挖面以里30~90 m为应力增高区,90 m之后为原岩应力区。在应力降低区,最大主应力值降低幅度较小,平均为30.03%,而最小主应力降低73.49%,幅度显著高于

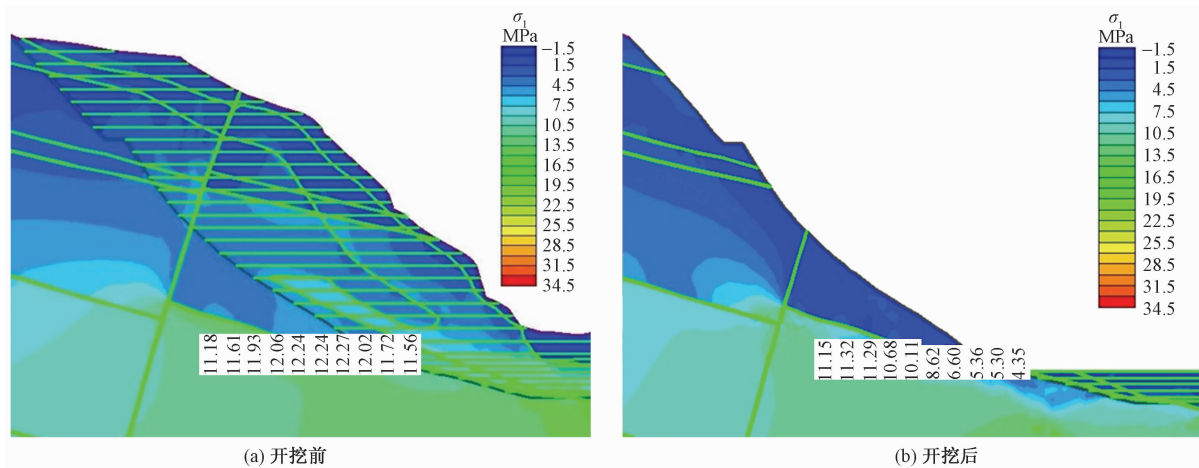


图6 开挖前后最大主应力图

Fig. 6 Maximum principal stress before and after excavation

最大主应力,在开挖面附近最小主应力降低为 0,甚至可能出现拉应力,越往坡体内部应力降幅越小。

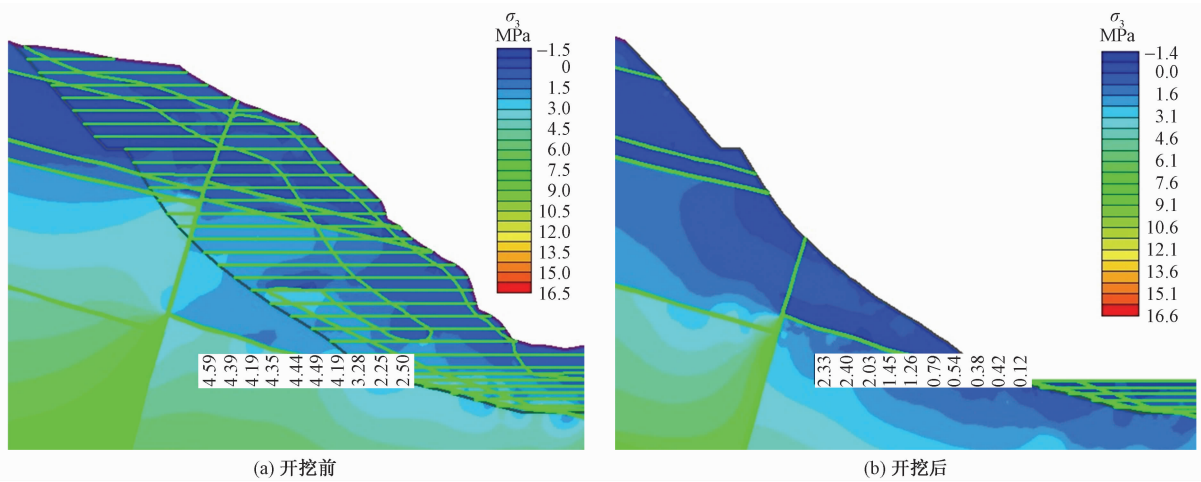


图 7 开挖前后最小主应力图

Fig. 7 Minimum principal stress before and after excavation

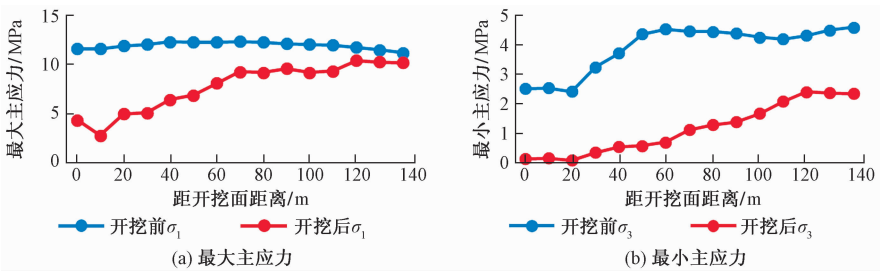


图 8 开挖前后距开挖面不同深度主应力值变化图

Fig. 8 Principal stress value map at different depths from excavation face before and after excavation

表 1 材料参数取值

Table 1 Material parameter value

介质类型	容重 γ / ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形模量 E/MPa	泊松比 μ	内聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	残余内聚力 C_r/MPa	残余内摩 擦角 $\varphi_r/(\circ)$	抗拉强度 σ_t/MPa
强风化玄武岩	0.025	15 000	0.285	0.6	35	0.40	28	1
弱风化玄武岩	0.026	38 000	0.270	0.8	44	0.55	35	4
微新玄武岩	0.028	50 000	0.250	1.2	51	0.90	40	6
断层	0.021	100	0.34	0.02	20	0.005	12	0
错动带	0.023	200	0.32	0.08	25	0.006	18	0

综上所述,开挖之后发生应力调整使得开挖面浅表部产生拉一压应力组合区,建基面表层附近岩体卸荷松弛受最大、最小主应力共同控制,开挖面浅表部最大主应力作用方向始终与横切柱面的裂隙平行,当满足 Griffith 准则时,受拉、压应力影响使得岩体中裂隙扩展、张开相互贯通,最终沿着裂隙贯通面产生剥落从而出现前述各种卸荷松弛特征,其形成机制为压致一拉裂卸荷。

5 结论

(1) 左岸坝基开挖之后应力重新分布形成了原裂

隙的张开、新生裂隙、裂隙密集带、类“板裂”及“葱皮”等卸荷松弛现象。

(2) 左岸坝基卸荷松弛现象是由爆破作用所产生的瞬时调整以及开挖之后出现的时效性应力调整两者共同作用所形成。爆破作用产生的破坏能量沿着柱状节理玄武岩节理面、微裂隙不断衰减、耗散,开挖后坝基岩体表面最大、最小主应力产生调整进行重分布,形成机制为压致一拉裂卸荷。

(3) 以地质分析结合数值模拟方法对坝基卸荷松弛现象进行研究,为坝基稳定性评价提供相关依据,此种方法可以为同类工程提供参考。

参考文献:

- [1] 杨根兰,黄润秋,林峰,等.西南某电站河床坝基开挖卸荷条件下变形破坏的数值分析[J].工程地质学报,2007,15(3):356-361.
YANG Genlan, HUANG Runqiu, LIN Feng, et al. Numerical analysis of deformation and failure of riverbed dam foundation excavation under unloading conditions in a power station in Southwest China[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(3): 356-361.
- [2] 裴向军,黄润秋,李正兵,等.锦屏一级水电站左岸卸荷拉裂松弛岩体灌浆加固研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(2):284-288.
PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, LI Zhengbing, et al. Study on grouting reinforcement of unloading and cracking loose rock mass in left bank of Jinping I Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 284-288.
- [3] SEMIANOW-WEJCHERT J, KSIADZYNA D, NAWROT U, et al. Discussion of several problems on the wave velocity determination of soft intercalations of a dam foundation[J]. Site Investigation Science & Technology, 1997, 10(1):113-125.
- [4] LEONOV M P. Activation of unloading of deep zones of rock foundations of high dams under the effect of a reservoir and other factors[J]. Hydrotechnical Construction, 1998, 32(4):227-233.
- [5] 黄润秋,林峰,陈德基,等.岩质高边坡卸荷带形成及其工程性状研究[J].工程地质学报,2001,9(3):227-232.
HUANG Runqiu, LIN Feng, CHEN Deji, et al. Formation of unloading zone of high rock slope and its engineering behavior[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(3): 227-232.
- [6] 黄润秋.中国西部岩石高边坡应力场特征及其卸荷破裂机理[J].工程地质学报,2004,12(Z1):7-13.
HUANG Runqiu. Stress field characteristics and unloading rupture mechanism of rocky high slope in western China[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(Z1): 7-13.
- [7] 哈秋龄.三峡工程永久船闸陡高边坡各向异性卸荷岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2001,20(5):603.
HA Qiuling. Study on the anisotropic unloading rock mass mechanics of the steep ship slope of the permanent ship lock of the Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 603.
- [8] 任光明,巨广宏,聂德新,等.斜坡岩体卸荷分带量化研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2003,30(4):335-338.
REN Guangming, JU Guanghong, NIE Dexin, et al. Quantitative study on unloading zoning of slope rock mass[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2003, 30(4): 335-338.
- [9] 吴刚.工程岩体卸荷破坏机制研究的现状及展望[J].工程地质学报,2001,9(2):174-181.
WU Gang. Status quo and prospect of research on unloading failure mechanism of engineering rock mass[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(2): 174-181.
- [10] 王运生,罗永红,吴俊峰,等.中国西部深切河谷谷底卸荷松弛带成因机理研究[J].地球科学进展,2008,23(5):463-468.
WANG Yunsheng, LUO Yonghong, WU Junfeng, et al. Study on the genetic mechanism of the unloading relaxation zone in the deep valley of western China[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 463-468.
- [11] 王吉亮.乌东德水电站拱坝坝基岩体松弛特征研究[J].资源环境与工程,2017,31(4):364-370.
WANG Jiliang. Study on relaxation characteristics of rock mass of arch dam foundation of Wudongde Hydropower Station[J]. Resources Environment and Engineering, 2017, 31(4): 364-370.
- [12] 王晗,陈明,卢文波,等.柱状节理岩体爆破开挖松动的数值模拟[J].爆破,2016(1):34-39.
WANG Han, CHEN Ming, LU Wenbo, et al. Numerical simulation of blasting excavation looseness in columnar jointed rock mass[J]. Blasting, 2016(1): 34-39.
- [13] 肖世国,周德培.开挖边坡松弛区的确定与数值分析方法[J].西南交通大学学报,2003,38(3):318-322.
XIAO Shiguo, ZHOU Depei. Determination and numerical analysis method of excavation slope relaxation zone[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(3): 318-322.
- [14] 黄润秋.黄河拉西瓦水电站:高边坡稳定性的系统工程地质研究[M].成都:成都科技大学出版社,1991.
HUANG Runqiu. Yellow River Laxiwa Hydropower Station: system engineering geology study on stability of high slope[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1991.