

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.004

高寒山区深切河谷碎裂松动岩体成因机制分析*

姚青, 郑达, 王宇, 李文龙

(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:以澜沧江某水电站坝址区碎裂松动岩体为研究对象,通过对岩质边坡现场调查,并运用ANSYS有限元软件模拟河谷演化和冻融循环过程,综合分析碎裂松动岩体的成因。调查结果表明,碎裂松动岩体的形成与区域赋存的地应力场、地层岩性、河谷演化及高原冻融风化有关。数值模拟揭示了河谷演化过程中边坡岩体持续经历主应力降低、剪应力增大的状态,应力释放而驱动边坡岩体结构面破裂,形成大量的卸荷拉张裂隙,初现“松动”特征;在大温差冻融循环作用下,原本存在裂隙面的岩体不断扩展延伸直至发生疲劳性损伤裂化。由此,总结了碎裂松动岩体的成因机制,该成果对高寒山区深切河谷碎裂松动岩体的形成机制提供依据。

关键词:高寒山区; 碎裂松动岩体; 成因机制; 河谷演化; 冻融循环

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0706-08

Genetic Mechanism of Cataclastic Loose Rock Mass in the Alpine Mountain Regions and Deep Valley

YAO Qing, ZHENG Da, WANG Yu, LI Wenlong

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

Abstract: The object of the study is the cataclastic loose rock mass in the dam site of a hydropower station in Lancang River. Through site investigation of the rock slope, and by using ANSYS finite element software to simulate the valley evolution and freeze-thaw cycles, the causes of cataclastic rock mass is analyzed comprehensively. The results of the survey show that the formation of cataclastic loose rock mass is related to the in-situ stress field, stratum lithology, valley evolution and plateau frozen-thawed weathering. Numerical simulations reveal that the slope rock mass has experienced a decrease in principal stress and an increase in shear stress during the evolution of the valley. Stress releases lead to structure plane rupture of the slope rock mass, forming a great amount of unloading tensile cracks, showing the start of “loosening”. Under the effect of the severe temperature difference in freeze-thaw cycles, the rock mass with fissured surface continues to expand and extend until the occurrence of fatigue damage cracking, and evolves into the cataclastic shapes apparently. Thus, the genetic mechanism of cataclastic rock mass is summarized, which will provide the basis for the formation mechanism of cataclastic rock mass in the Alpine mountain regions and deep valley.

Keywords: alpine mountain regions; cataclastic loose rock mass; genetic mechanism; valley evolution; freeze-thaw cycle

* 收稿日期:2018-07-07;修回日期:2018-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41772317)、中国华能集团科技项目(HNKJ16-H15)资助

作者简介:姚青(1994-),女,硕士研究生。Email:852268132@qq.com

通讯作者:郑达(1977-),男,教授,博士。主要从事地质灾害防治及高边坡稳定方面的研究。Email:zhengda@cdut.cn

引言

拟建的水电站位于青藏高原横断山区,是澜沧江西藏境内规划中的重点水电工程。由于第四纪以来地壳抬升,河谷下切,以及高地应力环境的原因,澜沧江河谷深切,地形高陡、岸坡岩体卸荷问题突出,再加上区域恶劣气候环境影响,造成河谷两岸浅表岩体冻融风化破坏严重,在河谷两岸形成了大面积的碎裂松动岩体(图1)。如受外营力作用,碎裂松动岩体有可能发生失稳而危及工程安全,此类岩体的分布对水电工程开发的影响较突出,因此,研究其成因机制显得极为必要。

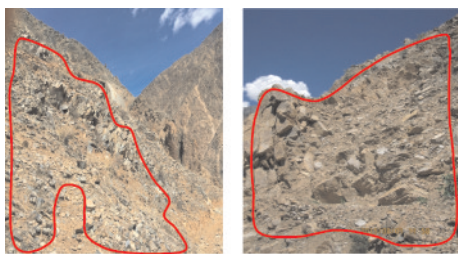


图1 坝址区碎裂松动岩体细部

Fig.1 Details of cataclastic loose rock mass in the dam site

目前,许多学者针对碎裂岩体或松动岩体的工程稳定性进行了研究:谌文武等^[1]研究了大柳树坝址的松动岩体的工程特性;C. Wang等^[2]研究了碎裂岩体边坡的稳定性;田小甫等^[3]针对晋阳西山的松动岩体,分析其在地震作用下的稳定性;周洪福等^[4]分析金沙江和怒江水电站的一些特殊碎裂结构岩体的成因机制;朱志刚等^[5]从微观特征和区域构造特征表征碎裂岩体的形成机理;杨姗姗等^[6]基于内部结构面之间的组合关系,分析了牙根水电站坝区松动岩体的形成原因;赵伟华等^[7]分析了碎裂岩体在强震条件下的崩塌机理;裴向军等^[8]通过对大光包滑坡岩体研究,揭示滑床岩体碎裂化特点。

在已有的研究中,主要是针对碎裂松动岩体的破坏机理,较少提出碎裂松动岩体的成因机制。为此,本文以澜沧江某水电站坝址区碎裂松动岩体为研究对象,通过现场调查并结合数值模拟计算揭示其成因,为解决工程设计和建设阶段所关心的坝址区工程岩体的稳定性问题提供依据。

1 工程地质条件

坝址区两岸河谷呈对称的“V”形谷,区内河道呈不规则的“S”型形态。坝址河流阶地发育,左岸勘探基地及坝址右岸上游一带为Ⅰ级阶地(高程2 640 m);左岸绒曲沟口一带为Ⅱ级阶地(高程2 680 m);左岸绒曲山脊通信基站一带为Ⅲ级阶地(高程2 720 m);左岸绒曲山脊GPS测站一带为Ⅳ级阶地(高程2 850 m)。除绒曲沟口一带见河漫滩发育外,其它地段两岸未见河漫滩发育。地层岩性主要为三叠系中统竹卡组灰白、浅灰色略带肉红色、深灰略带墨绿色的英安岩,另外在两岸发育多条陡倾灰黑色辉绿(玢)岩岩脉(岩墙)及煌斑岩岩脉(岩墙)。坝址区内发育有多条次级小断层和长大裂隙,小断层的倾角在70°以上,长大裂隙的倾角在60°以上,通过勘测平硐发现,左右岸平硐内裂隙多为陡倾角裂隙。两岸自然地质现象表现为山坡高陡、岩体风化和卸荷强烈,在两岸坡表多形成碎裂松动岩体。

碎裂松动岩体主要位于硬岩地段,集中分布在两岸高程2 750~3 330 m,自然坡度为35°~60°,基本沿山脊及下游侧的坡面分布。岩体呈碎裂结构,裂隙间距小于30 cm,整体有明显的松动、扩容现象,松弛分离的块体一般小于1 m,部分为1~2 m。参考规范^[9],研究区发育的结构面划分为Ⅰ~Ⅴ级,经平硐揭露,与碎裂松动岩体密切相关的Ⅳ级结构面整体上出露两组产状:第1组反倾坡内,产状范围为N37°~79°W/SW∠73°~90°;第2组陡倾坡外,产状范围为N30°~76°W/NE∠69°~90°。

据现场调查结果,碎裂松动岩体平面分布(图中以SL表示碎裂松动岩体)如图2所示,碎裂松动岩体主要发育在极强卸荷及强卸荷带中,其发育深度左岸为16~30 m,右岸为5~120 m。

2 碎裂松动岩体成因的地质分析

在斜坡现今岩体现场调查的基础上,初步认为研究区所形成的碎裂松动岩体,是在高地应力环境中经历河谷下切发生应力释放,导致结构面张开,再加上长期冻融风化而形成的一种特殊类型的岩

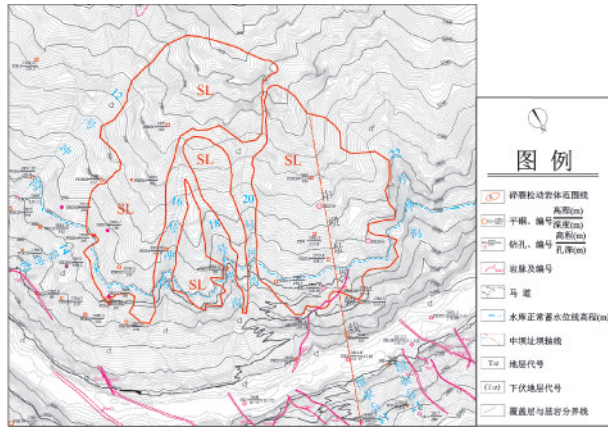


图2 碎裂松动岩体平面分布
Fig.2 Plane view of the fractured rock mass

体。因此,以研究区边坡应力在浅表生改造过程中演化为落脚点,结合英安岩岩性、高原冻融风化、高地应力背景条件及河谷演化四个方面,综合分析碎裂松动岩体的形成原因。

2.1 高地应力

按《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)规定^[9]: $R_c/\sigma_{max} < 7$ 为极高应力; $R_c/\sigma_{max} = 4 \sim 7$ 为高应力。选取研究区右岸的地应力数据为研究依据,采用钻孔应力解除法测量,测得最大主应力值为 $\sigma_{max} = 13.8$ MPa,根据试验获取的英安岩的单轴抗压强度 $\sigma_{max} = 69.68$ MPa,计算 $R_c/\sigma_{max} = 5.04$,研究区地应力属于高地应力。通过现场调查和平硐编录可以发现比较普遍和连续的高应力破坏痕迹,如PDZ06出现内顶拱片帮现象(图3)。



图3 内拱顶片帮现象
Fig.3 Spalling off phenomenon within the vault

已有研究表明^[10],当区域最大主应力方向与河谷走向之间的锐夹角不断增大时,谷坡岩体中最大主应力方向由与区域最大主应力方向一致到不断趋于与河谷走向垂直。此时,谷坡及谷底的应力集中现象明显增强。坝址区最大主地应力总体方向为NE向,坝址区实测方向 $N10^\circ \sim 38^\circ E$ 、 $N45^\circ \sim 62^\circ$

E,与河流方向(S84°E)近于正交,故谷坡岩体将会出现应力集中并与区域构造应力叠加,为研究区赋存高地应力提供条件。当河谷下切卸荷时,英安岩内部集聚的能量释放,受其自身脆性变形破坏的影响,岩体发生变形破坏。因此,研究区高地应力环境是岩体发生碎裂的首要前提。

2.2 河谷演化

青藏地区由于受印欧板块的相互碰撞、挤压作用,从第四纪开始快速隆升造成河源抬升,河流因巨大的坡降地形而对高原面产生快速、剧烈的下切侵蚀作用,成为谷坡强大的卸荷外动力。

在现场调查中可以发现研究区岩体中发育多组陡倾结构面,在河谷经历间歇性快速下切,高地应力释放的过程中,岩体应力环境转为低应力环境,此时结构面对岩体的变形和破坏具有控制作用,原本谷坡岩体中存在的裂隙在应力释放过程中逐渐扩大并显现,并且伴随每次河谷下切卸荷,形成大量的中-陡倾卸荷拉张裂隙。与此同时,斜坡浅表部岩体受原生柱状节理、浅表生改造作用中形成的卸荷拉张裂隙的综合切割,呈现出碎裂结构为主的结构特征(图4)。因此,河谷快速下切是形成碎裂松动岩体的内外力转换条件。

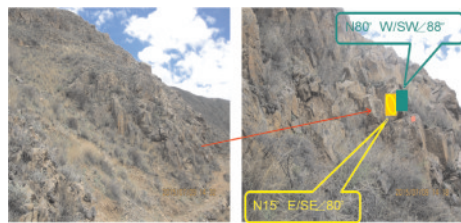


图4 左岸高程被切割的岩体
Fig.4 Rock mass to be cut at high elevations cut of the left bank

2.3 岩性

试验数据显示,研究区出露的英安岩属坚硬岩类,物理力学性质上表现为高密度(2.84 g/cm^3)、高强度(95.1 MPa)和高模量(78.03 GPa)。根据卸载条件下岩石力学特性试验可知,在卸荷条件下,岩石的变形以张性破裂为主,在高围压下呈现出破裂突然发生的典型脆性破坏^[11-12]。

在研究区高构造应力环境条件下,英安岩聚积较高的弹性应变能,在浅表生改造的卸荷作用下,发生应力释放,由于英安岩脆性变形破坏的原因,

其能量释放的过程主要通过岩体的变形破裂所表现。由此可知,地层岩性是决定岩体碎裂松动的物质基础。

2.4 高原冻融风化

研究区气候整体表现为冬寒夏凉、干燥少雨、日温差大,据芒康县气象站资料,县域年平均降雨量为 575.4 mm,蒸发量为 1 632 mm;全年平均气温 4.8 °C,极端最高气温 26.1 °C,最低 -24.6 °C,地面极端最高温度 71 °C,地面极端最低温度 -26.7 °C。在漫长的地质历史时期,由于地表温度发生周期性变化,英安岩中原本存在的裂隙、空隙水在冻结时体积膨胀,水体积膨胀受到周围岩体约束,产生冻胀力,在冻胀力的作用下岩体的裂纹和空隙不断扩展;而边坡岩体长期经历循环荷载作用,在裂隙水冻结与融解的反复过程中,冰劈作用和水压力的作用将导致岩体的破裂和裂隙的扩展,其抗破坏能力也随之降低,岩体逐渐被裂隙带劈裂(图 5)。故高原冻融是岩体碎裂变形破坏的加剧因素。

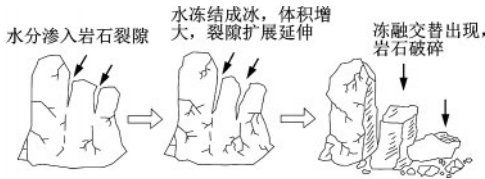


图 5 冻融过程示意

Fig.5 Schematic diagram of the freeze-thaw process

3 碎裂松动岩体成因的数值模拟

为了揭示研究区碎裂松动岩体的形成演化机制,采用 ANSYS 软件对其演化过程进行分析,即先进行河谷下切模拟,得到河谷演化的应力场特征;再进行冻融循环模拟,得到冻融循环后的应力场、位移场特征,以期验证碎裂松动岩体的成因机制。

3.1 河谷演化

3.1.1 模型建立

青藏地区第四纪以来河谷演化发展基本历史进程表明,澜沧江河谷发育经历了宽谷期和峡谷期两个阶段^[13]。研究区发育有两级夷平面(高程为 3 500~4 000m、3 000~3 500m)及四级河谷阶地(高程分别为 2 850m、2 720m、2 680m 及 2 640m),考虑河谷两岸的不对称性和阶地的发育特征,对实际河

谷下切过程进行了概化,初始高程取第 I 级夷平面高程 3 750 m,宽谷期考虑一次成形,取第 II 级夷平面高程 3 250 m,峡谷期考虑下切四次成形,取 IV、III 级、II 级阶地高程 2 850 m、2 720 m、2 680 m 和河谷高程 2 623 m,而第五下切后形成现今河谷。

河谷演化计算模型如图 6 所示。模型长×高=1 761 m×1 470 m,共计 6 个面,7 405 个节点,14 513 个单元。

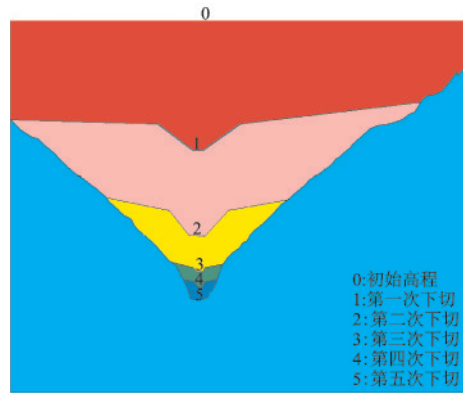


图 6 河谷演化计算模型

Fig.6 Valley evolution calculation model

3.1.2 参数取值

依据岩体物理力学参数资料及工程地质类比经验,参数取值见表 1。

表 1 力学参数取值

Table 1 Mechanical parameters

参数	变形模量/ GPa	泊松比	重度/ (kg·m ⁻³)	黏聚力/ MPa	内摩 擦角/ (°)	抗拉 强度/ MPa
取值	18	0.22	26.5	1.5	52	1.5

3.1.3 结果分析

经多次试算,在模型左右外侧分别施加 X 向位移约束(施加 8 MPa 的水平地应力再叠加自重力引起的水平力),底部施加 Y 向位移约束时与实测地应力结果达到最佳拟合,计算结果与实测结果对比见表 2。

选取 5 个监测点来反映河谷演化过程中的不同部位地应力路径变化(图 7),其中,边坡应力松弛比较突出。河谷演化过程中边坡岩体经历持续的应力松弛,即最大主应力、最小主应力持续降低,而最小主应力降低幅度最大,意味着河谷下切卸荷,边坡岩体围压不断被解除,最大、最小主应力差(最大

表2 计算值与实测地应力值对比

Table 2 Comparison of the caculation stresses with the measured ones

位置	实测值/MPa	计算值/MPa
ZK25 (129.0~153.3 m)	18.83~21.68	18.85~20.03
PD-2 (221 m)	13.80	16.96

剪应力)逐渐增大,量值为1~9 MPa,边坡岩体会同时经历主应力降低、剪应力增大的状态,前者导致边坡岩体松弛卸荷,后者促使结构面产生剪切错动现象。

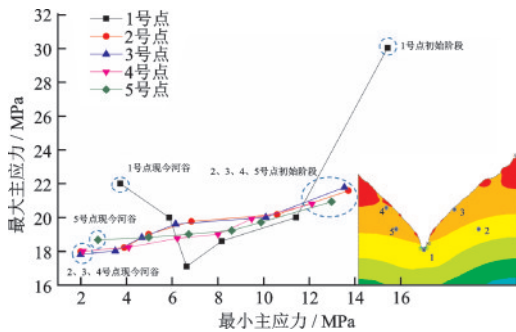
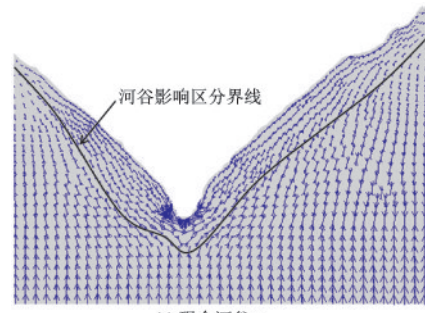


图7 代表性部位的地应力路径

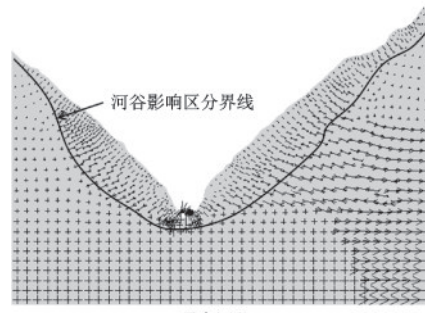
Fig.7 In-situ stress paths of the representative part

谷坡与深部主应力存在明显的应力分异现象。将最大主应力过渡至近竖直向、最小主应力过渡至近水平向的位置定为河谷影响区分界线(图8),河谷岸坡浅表部最大主应力方向趋于坡面平行,最小主应力趋于坡面垂直。计算结果显示河谷影响分界线以上区域(101 m)为应力强烈变化区,现场调查碎裂松动岩体的发育深度为5~120 m,计算结果与实际相符合,说明河谷演化对边坡浅部岩体的影响最明显。

河谷演化过程中边坡岩体持续经历主应力降低、剪应力增大的状态,其中,靠近坡表101 m内为应力强烈变化区,而实际现场调查发现两岸边坡岩体中存在大量的中-陡倾卸荷裂隙,碎裂松动岩体的发育深度达到120 m,结合现场调查的结果,可知河谷下切、应力释放而使得岩体结构面破裂,故河谷演化对边坡浅表层岩体产生的影响可以作为中-陡倾卸荷裂隙的产生机制。研究区主要发育四组优势结构面,在各类结构面的组合切割作用下,岩体



(a) 现今河谷 σ_1



(b) 现今河谷 σ_3

图8 σ_1 、 σ_3 矢量图

Fig.8 Vector diagram of σ_1 、 σ_3

发生张裂或剪切错动而破裂,呈现出碎裂为主的结构特征,并在重力场作用下,发生滑移拉裂破坏,从而造成谷坡岩体呈碎裂松动状态。

3.2 冻融循环

3.2.1 模型建立

根据计算的河谷演化结果,截取右岸中高程部分岩质边坡计算冻融。模型划分应力释放区和应力过渡区两部分,参照乔国文等^[14]对边坡裂隙岩体的数值模型设置,在应力释放区设置多组长大张开裂隙,长大裂隙依据与斜坡岩体卸荷松弛发育特征密切相关的IV级结构面的长度和产状设置,概化后的裂隙长度设定为30~100 m,宽度为0.5~1 m,倾坡内裂隙产状为N70°W/SW∠80°,倾坡外裂隙产状为N70°W/NE∠80°。根据坝址区的气象资料,选取-30~20 °C为温度区间,一次循环24 h,模拟100次。

冻融计算模型如图9所示。模型长×高=306 m×247 m,共计8个面,48 741个节点,24 147个单元。模型底部施加Y向固定约束,右侧施加X向固定约束。

3.2.2 参数选取

岩石及裂隙冰(水)的热学参数参照相关文

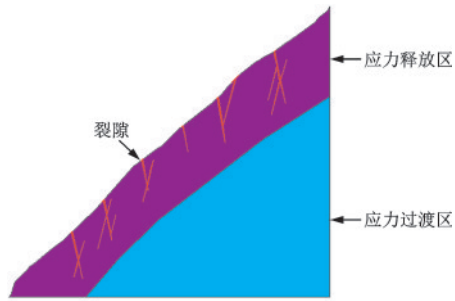


图9 冻融计算模型

Fig.9 Freeze-thaw calculation model

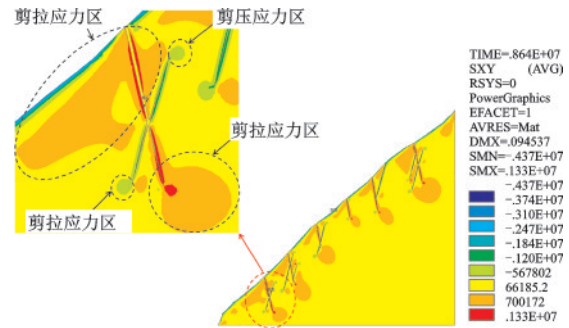


图10 第100次冻融循环的剪应力

Fig.10 Contour of shear stress under 100th freeze-thaw cycle

献^[14-16]及经验综合选取见表3。

表3 热学参数取值

Table 3 Thermal parameters

介质	热膨胀系数/($m \cdot k^{-1}$)	比热/($J \cdot (kg \cdot k)^{-1}$)	导热系数/($w \cdot (m \cdot k)^{-1}$)	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	抗拉强度/Pa
微新岩体	$1.5e-10$	4 200	3.26	26.5	1.5
冰	$-1.5e-5$	1 884	4.20	917	0.38

3.2.3 结果分析

(1) 应力场特征

边坡岩体在经历 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 20\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻融循环温度荷载作用下,裂隙及裂隙两侧产生剪应力集中现象,如图10所示。依据数值正负号的变化情况,当裂隙内的水越来越多时,冻结产生的冻胀力对倾坡外的裂隙壁产生压的效应,在剪应力区域内产生剪压应力集中,由于力的相互性,冻胀力对倾坡内的裂隙壁产生拉的效应,在剪应力区域内产生剪拉应力集中,而剪拉应力、剪压应力集中区是相对应的,因为长期经历冻融循环,每一次施加的循环温度荷载使得裂隙内的应力发生重分布,可使总体上达到静力平衡。

第1、20、40、60、80、100次循环后裂隙内的最大拉应力分别为1.59、1.64、1.60、1.54、1.47、1.40 MPa;最大剪应力分别为1.41、1.47、1.43、1.39、1.36、1.33 MPa,其变化趋势均为先增大后减小。最大拉应力始终大于最大剪应力,裂隙破坏以拉裂破坏为主,剪切破坏为辅。裂隙尖端、顶部附近存在较大范围的拉应力集中区(图11),说明冻融破坏首先从裂隙开始,裂隙内水冰相变体积膨胀后对裂隙

壁产生膨胀力,裂隙因冰劈作用发生拉剪组合破坏,导致裂隙扩展延伸,加深冻融影响范围。

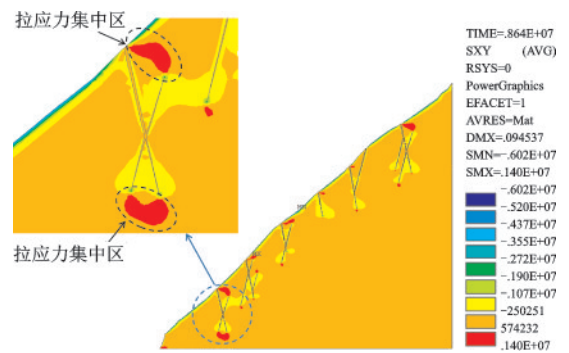


图11 第100次冻融循环的拉应力

Fig.11 Contour of tensile stress under 100th freeze-thaw cycle

(2) 位移场特征

第1、20、40、60、80、100次循环后裂隙内的最大位移分别为0.183、0.301、0.412、0.475、0.503、0.580 cm,位移量逐渐增大。一开始位移变化受重力场控制,裂隙及裂隙两侧的矢量箭头指向坡内(图12),冻融劈裂影响不明显,在第20次循环,裂隙及裂隙两侧的矢量箭头指向坡外(图13)。由应力场可知,在第20次循环裂隙内的冻胀力达到最大,已经超过裂隙的抗拉强度,此时冻融产生的应力变化大于重力场的影响,冰劈作用导致位移增大。模型最大位移出现在裂隙的顶部、底部,是因为裂隙端部是应力集中部位,产生的破坏性位移也就越大。

在大温差循环过程中,因冻融冰劈作用,裂隙内部发生拉剪组合破坏,使原本存在裂隙面的岩体破裂面不断扩大,现场发现不同破碎程度的岩体结构类型,可以作为岩体在经历冻融循环时期的不同表现形式,其中,碎裂结构和散体结构是边坡岩体冻融风化最明显的表现。

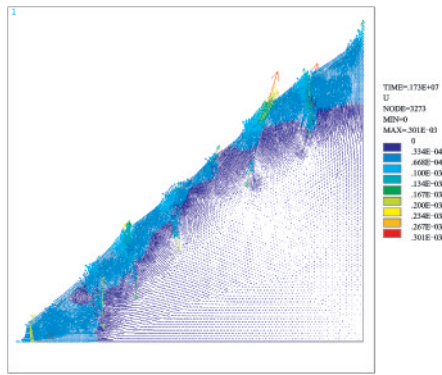


图12 第1次冻融循环后边坡位移分布

Fig.12 Slope displacement distribution after the first freeze-thaw cycle

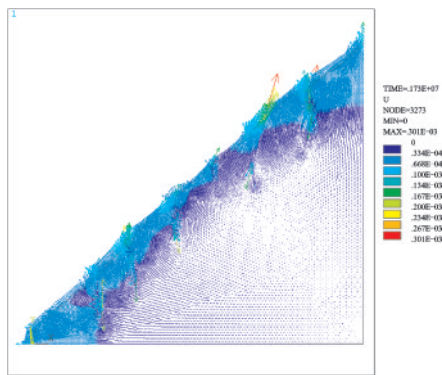


图13 第20次冻融循环后边坡位移分布

Fig.13 Slope displacement distribution after the 20th freeze-thaw cycle

4 结 论

(1) 在河谷演化过程中,随着高地应力的释放,在近坡表区域的岩体产生了大量陡倾卸荷裂隙,初现“松动”特征,受原生柱状节理和后期浅表生改造作用中形成的卸荷裂隙的切割作用,初步具备“碎裂”结构特征,再加上长期经历冻融循环,冰劈作用使得岩体内裂隙不断扩展、延伸,岩体沿裂隙带被劈裂破坏。由此,便形成了研究区规模大小不一的碎裂松动岩体。

(2) 由 ANSYS 数值计算得到,随着河谷下切,边坡岩体经历主应力减小、剪应力增大的状态,其中,靠近坡表 101 m 内为应力强烈变化区,应力释放导致边坡岩体松弛卸荷,产生卸荷拉张裂隙;而裂隙的进一步发展受控于高原冻融影响,在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 20\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻融循环温度荷载作用下,当裂隙内水冰相变产生的冻胀力超过裂隙的抗拉强度时,

裂隙发生拉剪组合破坏,原本存在裂隙面的岩体不断扩展延伸直至发生疲劳性损伤裂化,最后演变成外观上所呈现的碎裂状。

参考文献:

- [1] 谌文武,梁收运,刘高,等.松动岩体的工程特性研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(6):751-755.
Chen W W, Liang Sh Y, Liu G, et al. Study on engineer characteristics of the dynamo-relaxed rock mass [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2000, 19(6): 751-755. (in Chinese)
- [2] Wang C, Tannant D D, Lilly P A. Numerical analysis of the stability of heavily jointed rock slopes using PFC2D [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(3):415-424.
- [3] 田小甫,孙进忠,江进,等.太原晋阳山西大佛松动岩体边坡地震稳定性研究[J].岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 3 432-3 437.
Tian X F, Sun J Zh, Jiang J, et al. Seismic stability of loosened rock slope of grand Buddha rock mass in west Jinyang mountain in Taiyuan [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 3 432-3 437. (in Chinese)
- [4] 周洪福,韦玉婷,聂德新.对碎裂结构岩体似连续介质特征的一点研究[J].工程地质学报, 2008, 16(1): 17-21.
Zhou H F, Wei Y T, Nie D X. Some likely continuous medium features of cataclastic rock mass [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1):17-21. (in Chinese)
- [5] 朱志刚,魏云杰,陶连金,等.北京燕家台碎裂岩体的成因机理及其工程地质意义[J].工程地质学报, 2010, 18(增):71-75.
Zhu Zh G, Wei Y J, Tao L J, et al. Formation mechanism of Yanjiatai cracked rock mass and engineering geological significance in Beijing [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(Sup):71-75. (in Chinese)
- [6] 杨姗姗,王孔伟,王乐华,等.牙根水电站坝区松动岩体成因机理分析[J].水电能源科学, 2010, 28(2):61-64.
Yang Sh Sh, Wang K W, Wang L H, et al. Cause mechanism analysis of dynamo relaxed rock mass in Ya-gen hydropower station [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(2):61-64. (in Chinese)
- [7] 赵伟华,黄润秋,赵建军,等.强震条件下碎裂岩体崩塌机理及崩塌后壁对堆积体稳定性影响研究[J].工程地质学报, 2011, 19(2):205-213.
Zhao W H, Huang R Q, Zhao J J, et al. Rockfall mech

- anism of cataclastic rock mass and influence of back wall up on the stability of accumulation under strong earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19 (2):205-213. (in Chinese)
- [8] 裴向军,黄润秋,崔圣华,等.大光包滑坡岩体碎裂特征及其工程地质意义[J].岩石力学与工程学报,2015,34 (1):3 106-3 115.
Pei X J, Huang R Q, Cui Sh H, et al. The rock mass cataclastic characteristic of Daguangbao landslide and its engineering geological significance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (1) : 3 106-3 115. (in Chinese)
- [9] 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014 [S].北京:中国计划出版社,2014.
Standard for engineering classification of rock masses: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)
- [10] 朱焕春,陶振宇,黄德凡.河谷走向与河谷地应力分布[J].岩石力学与工程学报,1995, 14(1):17-24.
Zhu H Ch, Tao Zh Y, Huang D F. Influence of the trend on rock stress in valley [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(1):17-24. (in Chinese)
- [11] 沈军辉,王兰生,王青海,等.卸荷岩体的变形破裂特征[J].岩石力学与工程学报,2003,22(12):2 028-2 031.
Shen J H, Wang L Sh, Wang Q H, et al. Deformation and fracture features of unloading rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12):2 028-2 031. (in Chinese)
- [12] 黄润秋,黄 达.卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(11):2 206-2 213.
Huang R Q, Huang D. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11):2 206-2 213. (in Chinese)
- [13] 黄润秋.岩石高边坡稳定性工程地质分析[M].北京:科学出版社,2012.
Huang R Q. Engineering geological analysis of rock high slope stability [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [14] 乔国文,王云生,储 飞,等.冻融风化边坡岩体破坏机理研究[J].工程地质学报,2015,23(3):469-476.
Qiao G W, Wang Y Sh, Chu F, et al. Failure mechanism of slope rock mass due to freeze-thaw weathering [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23 (3) : 469-476. (in Chinese)
- [15] 张玉军.模拟冻-融过程的热-水-应力耦合模型及数值分析[J].固体力学学报,2009,30(4):409-415.
Zhang Y J. Coupled thermo-hydro-mechanical model and numerical analysis for simulation of freezing-thawing process [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2009, 30(4):409-415. (in Chinese)
- [16] 刘泉声,康永水,刘 滨,等.裂隙岩体水-冰相变及低温温度场-渗流场-应力场耦合研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(11):2 181-2 188.
Liu Q Sh, Kang Y Sh, Liu B, et al. Water-ice phase transition and thermo-hydro-mechanical coupling at low temperature in fractured rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (11) : 2 181-2 188. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)