

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210714005

岩质边坡开挖卸荷岩体参数特征分析*

杜威, 陈兴周, 陈莉丽, 江海, 王文瑞

(西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 岩质边坡的开挖卸荷过程直接决定工程施工的安全性, 边坡变形特征分析及有效数值模拟方法的选取至关重要。基于卸荷岩体力学理论与方法, 开展红砂岩试件的室内常规三轴与三轴卸荷试验, 分析其变形特征、卸荷量与变形模量之间的关系以及强度参数的变化规律, 结合有限单元法构建考虑卸荷作用的算例模型, 探究考虑边坡开挖卸荷作用所引起的应力释放后的岩体劣化分区问题, 以及边坡动态开挖卸荷下的变形分析。研究结果表明: ①当卸荷量达70%和临近破坏时, 其变形模量分别降低了10%和50%左右; ②岩样卸荷力学状态下粘聚力有所降低, 内摩擦角有所增高; ③依据边坡初始应力场与开挖后应力场的对比分析从而确定强、弱卸荷影响区, 算例模型表明考虑卸荷作用后水平位移净增量计算结果为不考虑卸荷作用计算结果的4倍左右, 且其分步开挖支护效果显著, 计算结果更加符合工程实际。研究成果可对边坡岩体开挖卸荷数值计算提供一定的指导意义。

关键词: 岩质边坡; 卸荷试验; 参数特征; 数值计算; 变形分析

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0596-08

Parametric Analysis of Rock Mass during Excavation and Unloading of Rock Slope

DU Wei, CHEN Xingzhou, CHEN Lili, JIANG Hai, WANG Wenrui

(Department of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The excavation and unloading process of a rock slope directly determines the safety of engineering construction, so it is very important to analyze the deformation characteristics of slopes and establish an effective numerical simulation method. Based on the unloading rock mechanics theory and method, laboratory conventional triaxial and triaxial unloading tests were carried out on red sandstone specimens to analyze the deformation characteristics, the relationship between the unloading amount and deformation modulus, and the variation law of strength parameters. In addition, a numerical model that considers the unloading effect was constructed by combining the finite element method. This paper explores the issues of rock mass deterioration partitioning, considering the stress release caused by slope excavation unloading and the deformation analysis of slopes under dynamic excavation unloading. The results show that: (1) When the unloading amount reaches 70% and near failure, the defor-

* 收稿日期:2021-07-14;修回日期:2021-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51979218,U1965107)、陕西省自然科学基金项目(2018JM5118)资助

作者简介:杜威(1998—),男,硕士研究生。主要从事水工岩体力学研究。E-mail:duwei070212@163.com

通讯作者:陈兴周(1980—),男,教授,博士。主要从事水工岩体力学及工程渗流方面的教学与科研工作。

E-mail:xzchen0416@163.com

mation modulus decreases by approximately 10% and 50%, respectively; (2) Under unloading mechanical conditions, the cohesion of rock samples decreases and the internal friction angle increases; (3) By comparing the initial stress field and the stress field after excavation of the slope, the strong and weak unloading zones can be identified. The example model shows that the net calculation results of horizontal displacement increment after considering unloading effect are 4 times the results without considering the unloading effect, and the step-by-step excavation supporting effect is remarkable. The calculation results closely aligns with practical engineering. The research results can provide some guidance for the simulation of slope rock mass excavation unloading.

Keywords: rock slope; unloading test; parametric characteristics; numerical calculation; deformation analysis

0 引言

岩质边坡在水电工程项目中十分常见,由于工程建设的需要,不可避免的需要对边坡岩体进行分级开挖支护的施工过程。开挖效应导致边坡上覆岩体所形成的侧向约束条件减弱或消散,致使岩体内部应力重分布,由于坡面岩体应力释放,边坡坡面向内一定范围形成破裂岩体,导致其力学参数的降低,边坡变形量增大,危害工程施工安全。

岩体在加载与卸载力学状态下,呈现出完全不同的力学变形特征,卸荷过程中岩体向卸荷方向产生强烈的扩容现象,原有结构面在其尖端方向产生扩展以及新裂隙进一步形成,致使岩体迅速损伤劣化,主要表现为质量劣化、弹性模量降低、强度参数降低,稳定性降低^[1]。李建林等^[2-3]结合工程实践,从事卸荷岩体的工程地质、力学特性研究,宏观参数、本构关系、计算方法,以及卸荷岩体加固理论的研究,并实现物理仿真到数值仿真,不断丰富卸荷岩体力学的内容。邓华锋等^[4-6]运用卸荷岩体力学理论与方法,依托大型岩土数值分析软件ADINA,三维模拟边坡岩体开挖中的动态卸荷过程,进行边坡稳定性分析并与实际监测数据相比较,计算结果与实测数据吻合良好,且根据岩体开挖卸荷后的力学参数,采用RMR法对边坡岩体进行质量评价。吕颖慧等^[7-8]基于高应力下的花岗岩常规三轴压缩试验与三轴卸荷试验结果,对比分析卸荷过程中的破坏模式以及力学强度与变形参数的损伤劣化效应,并提出采用Mogi-Coulomb强度准则更能反应其剪切破坏特征。邱士利等^[9]开展了不同初始损伤和卸荷路径下的三轴卸围压试验,提出应变围压增量比和统一围压降参数的卸荷力学描述参量,并结合工程实际探究初始损伤程度试验规律具有的工

程意义。史文兵等^[10]依托离散元数值模拟方法探究平缓反倾红层边坡的变形破坏机制,并根据边坡变形演化过程划分为3种变形破坏形式。段劲^[11]依托有限元软件计算红砂岩顺层岩质边坡开挖变形位移,并与实际监测数据对比分析,所得计算结果与实测数据基本一致。胡田飞等^[12]选取偏应力增量作为评判指标,依托数值分析法确定边坡开挖松弛区范围,并表明偏应力与变形演化之间有着较良好的相关性。陈洪凯等^[13]基于弹性理论建立开挖岩体边坡力学模型,并通过敏感性分析研究边坡卸荷带宽度的变化规律。陆泌锋等^[14]以裂隙张开度、裂隙数量、张开裂隙数量、地震波纵波速4个指标进行工程边坡卸荷分带,并通过选取各卸荷带附近岩石进行单轴抗压试验说明了划分方法的合理性。周火明等^[15]采用现场原位试验与岩体声波测试等方法,研究了三峡船闸边坡卸荷扰动区内岩体力学参数劣化程度,结果表明强、弱卸荷区内岩体性状劣化分别为60%、30%。姚青等^[16]通过现场勘探结果,并采用ANSYS有限元分析软件模拟河谷下切卸荷过程以及冻融风化侵蚀作用,总结了破裂松动岩体的成因机制。吴昊宇等^[17]以某大型开挖边坡工程为例,通过现场监测数据与有限元模拟分析,探究边坡开挖变形破坏特征。孙云志等^[18]依据大量的工程实践,探讨谷坡岩体卸荷带划分依据,提出以张开裂隙宽度、累计宽度、波速等作为量化指标。

本文基于卸荷岩体力学理论,开展室内常规三轴压缩试验与三轴卸荷试验,研究卸荷量与变形模量之间的非线性关系,获取强度参数的变化规律。采用开挖卸荷计算方法,结合有限元数值分析软件对比边坡初始应力场与开挖后应力场,从而确定卸荷影响区范围,建立考虑开挖卸荷分区的边坡动态

开挖支护算例模型,根据试验所得参数特征分析实现强弱卸荷区岩体材料参数的动态弱化折减,并不考虑卸荷作用的计算结果进行对比分析。以期为边坡岩体开挖卸荷数值计算提供一定的指导意义。

1 室内试验

1.1 试验条件

力学试验设备采用由中国科学院武汉岩土所研制的岩石 THMC 多场耦合三轴流变测试系统,如图 1 所示,该系统配有全套的加压伺服控制系统以及精确的测量系统;试件波速测定使用 NM-4B 非金属超声检测分析仪进行。



图 1 岩石力学三轴试验仪

Fig.1 Triaxial testing system for rock mechanics

试验所用试件取自某水电站岩质边坡的红砂岩岩样,将从现场取回的岩块制作成如图 2 所示直径 50 mm、高度 100 mm 的标准试件,剔除表面有明显缺陷的试件并保证试件表面平整度符合试验要求,以纵波波速及饱水质量数据作为参考进行二次筛选,为降低试验离散性选取波速和质量相近的试件。

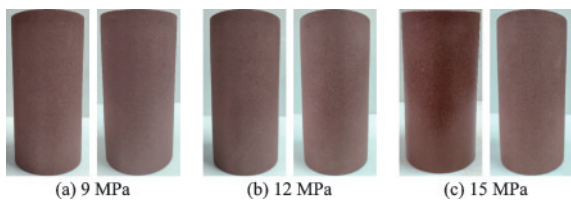


图 2 红砂岩试件

Fig.2 Red sandstone specimens

1.2 试验方案

本文将对红砂岩岩样进行三种围压下(9、12、15 MPa)的室内常规三轴及三轴卸荷试验,并采用

压力增速的加卸载方式。

依据常规三轴压缩试验测出不同围压下的三轴抗压强度,并以此为基础确定三轴卸荷试验中轴压目标值,即相应围压下三轴抗压强度的 70%,采取稳定轴压卸载围压的三轴卸荷试验方法,以模拟边坡岩体开挖阶段的应力状态。试验步骤:(1)首先将轴围压加载至静水压力;(2)加载轴压至目标值,之后保持轴压恒定;(3)逐渐卸除围压,直至试件破坏。

2 卸荷岩体力学特性分析

2.1 变形及破裂特征

图 3 为红砂岩试件的宏观破坏示意,岩样常规三轴压缩破坏时脆性特征明显,并呈现出明显的压剪破坏。三轴卸荷试验中由于卸荷方向的强烈扩容,生成明显的宏观张拉裂纹,岩样的破坏特征由三向压剪破坏转化为张剪破坏,从图 3 中可明显看出其拉剪破坏特征。

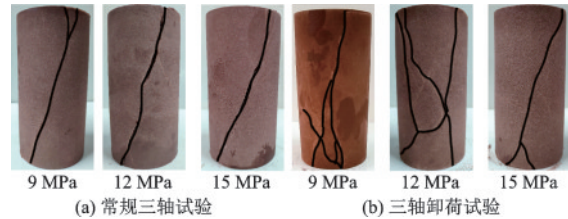


图 3 红砂岩试件宏观破坏示意

Fig.3 Macro failure photographs of red sandstone specimens

依据边坡实际应力状态,考虑不同埋深即不同的初始应力状态,所开展的红砂岩不同围压下常规三轴压缩和三轴卸荷试验,以静水压力结束时的应变为初始应变,并以应力差为纵坐标,绘制如图 4~6 所示的红砂岩试件常规三轴压缩和三轴卸荷试验的应力应变全过程曲线。

根据试验结果可知,红砂岩分别以 9、12、15 MPa 的初始应力水平进行卸荷试验,加载轴压至目标值后稳定轴压分别卸载围压至 2.5、4、5.2 MPa 时试件发生破坏。从常规三轴压缩试验所得应力应变过程曲线可以看出,红砂岩在加载试验中呈现脆性破坏,随着轴压的增大变形逐渐累积,到达峰值强度后,试件突然发生破坏并伴随着较大的声响。三轴卸荷试验所得应力应变曲线表明,两者都呈现一定的延性破坏且伴随较小的声响,随着围压的不断降低,试件沿卸荷方向产生剧烈的扩容现

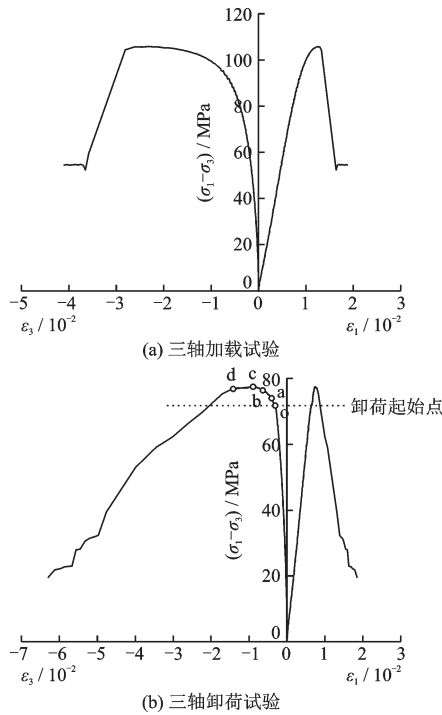


图4 红砂岩应力应变曲线(围压9 MPa)

Fig.4 Stress-strain curves of red sandstones (under a confining pressure of 9 MPa)

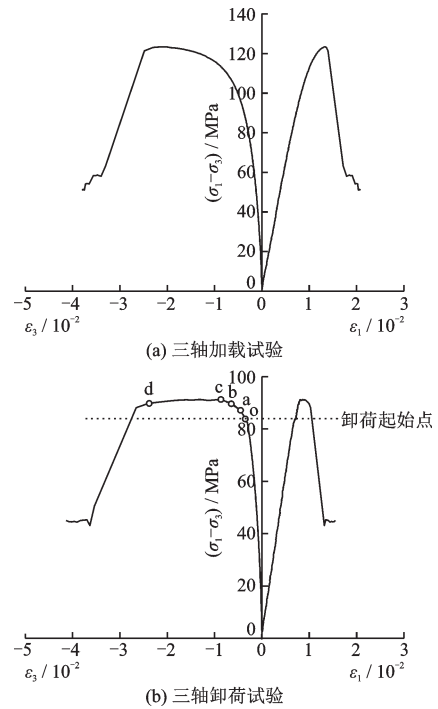


图6 红砂岩应力应变曲线(围压15 MPa)

Fig.6 Stress-strain curves of red sandstones (under a confining pressure of 15 MPa)

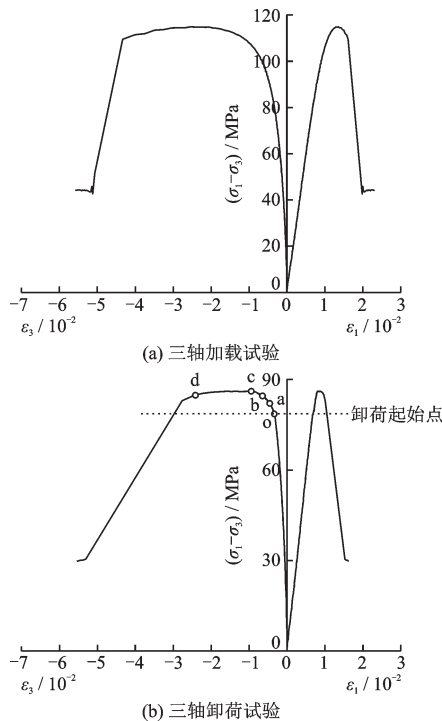


图5 红砂岩应力应变曲线(围压12 MPa)

Fig.5 Stress-strain curves of red sandstones (under a confining pressure of 12 MPa)

象,原生裂隙不断的扩展,以及生成张剪裂隙,致使环向变形迅速增大,且围压越高所表现出的延性破坏越为明显。

如图4~6中三轴卸荷试验所得应力应变过程曲线,图中o点为卸荷起始点,模拟试件的实际应力状态,a点为弹塑性变形分界点;b点为非弹性变形分界点;c点为屈服点,试件发生屈服,变形逐步增大,应力出现跌落现象;d点为破坏点,试件迅速破坏。将以o点卸荷起始点围压值减去c点屈服破坏时的围压值作为总卸荷量。

oa段应力应变曲线近似线性关系,0点之后试件内部的裂隙受到卸载围压的作用,出现了松弛但还未开裂,几乎无塑性变形,到达a点后开挖卸荷量占比达到30%。

ab段应力应变曲线呈现出非线性且上凸,此阶段为弹塑性变形阶段,随着卸荷量的增大,试件内部裂隙松弛,部分裂隙扩展,出现非弹性变形,b点的开挖卸荷量占比为70%左右。

bc段应力应变曲线更加偏离直线,此阶段为裂缝扩展变形阶段,试件内部原生裂隙逐步松弛并扩展,并有一定量的新生裂隙产生,非弹性变形急剧增加,变形速率迅速加快,应力应变曲线逐渐平缓,c点之后随着变形的逐渐增大应力出现跌落,到达d点后试件发生破坏,c点卸荷量默认为100%。

2.2 参数特征

依据上述三轴卸荷试验应力应变全过程曲线

计算变形模量与泊松比,由于一般测定方法为采用单轴压缩试验曲线,考虑到三轴试验时中围压的作用,可采用应力差进行计算。如图4~6所示,三轴卸荷试验中轴向应变变化量小,以卸荷方向变形为主,故若采用常规计算方式,所得计算结果总会偏大,本文将采用下述公式(1)和(2)计算三轴卸荷试验中各个阶段的变形模量,计算结果见表1。

$$\mu = \left(\frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} \sigma_1 - \sigma_3 \right) / \left[\sigma_3 \left(2 \frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} - 1 \right) - \sigma_1 \right] \quad (1)$$

$$E = (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) / \epsilon_1 \quad (2)$$

式中, σ_1 和 σ_3 分别为第一和第三主应力; ϵ_1 和 ϵ_3 分别为轴向应变和环向应变; E 为变形模量; μ 为泊松比。

表1 三轴卸荷试验各阶段变形模量降低比

Table 1 Deformation modulus reduction ratio at each stage of triaxial unloading tests

初始围压	阶段	卸荷量级/%	E/MPa	变模降低量/%
9 MPa	I (oa段)	0~30	8 920~8 610	3.5
	II (ab段)	30~70	8 610~7 747	9.7
	III (bc段)	70~100	7 747~3 352	49.3
12 MPa	I (oa段)	0~30	8 703~8 318	4
	II (ab段)	30~70	8 318~7 398	10.5
	III (bc段)	70~100	7 398~2 949	51.2
15 MPa	I (oa段)	0~30	8 923~8 673	2.8
	II (ab段)	30~70	8 673~8 042	7.1
	III (bc段)	70~100	8 042~2 552	61.5

根据所得结果可知,红砂岩在三轴卸荷围压试验中,卸荷量达30%时变形模量降低量极小,几乎无明显变化,变形量在弹性变形范围内,裂隙并未扩展,故此卸荷阶段对变形模量基本无明显影响。卸荷量达70%时变形模量降低较小,此时试件内部大部分原生裂隙出现松弛且部分扩展,发生一定量的非弹性变形,致使变形模量有较小幅度的降低。卸荷量接近100%时,试件出现明显的破裂面,继续卸载会使破裂面贯通并发生破坏,变形模量总体降低为原有的一半左右,内部岩石骨架结构发生破坏并向卸荷方向产生强烈的扩容现象,试件内部应力重新分布并伴随着一定的残余强度。

依据红砂岩常规三轴及三轴卸荷试验所得结果,分别计算红砂岩试件在加载和卸荷条件下的抗剪强度参数见表2。三轴卸荷试验下岩石的粘聚力有所降低,内摩擦角有所增高,是由于在卸载围压阶

段,岩石向卸荷方向产生强烈的扩容,发生张剪性破坏,而常规三轴压缩试验破坏的主要形式为压剪破坏,一般来说张剪性破坏的破裂面粗糙程度大于压剪性破坏产生的破裂面,故内摩擦角有所增高。

表2 抗剪强度参数

Table 2 Shear strength parameters

试验类型	初始围压/MPa	破坏围压/MPa	轴压/MPa	c/MPa	$\varphi/^\circ$
三轴压缩	9	9	115		
	12	12	127	19.3	37
	15	15	140		
三轴卸荷	9	2.5	81		
	12	3.8	89	13.2	46
	15	5.2	98		

3 边坡开挖卸荷数值模拟

3.1 计算模型

岩体开挖卸荷是应力释放、损伤变形及岩体力学条件弱化的动态变化过程,且力学变形参数与不同卸荷量之间呈现出非线性的特点。本文采用李建林提出的开挖卸荷计算方法^[2,4],强调每一开挖阶段附近岩体的刚度随开挖步序进行动态调整,即卸荷区岩体变形模量的动态折减。结合室内试验所得的参数特征分析结果,将卸荷量达30%、70%和接近100%时,分别定义为微卸荷区、弱卸荷区和强卸荷区,破坏准则采用Mohr-Coulomb准则,并采用表1所得试验结果进行变形模量的动态折减。

结合上述试验所得力学参数建立二维弹塑性有限元算例模型,网格剖分示意如图7所示,采用四节点四边形单元进行网格划分,对模型施加自重应

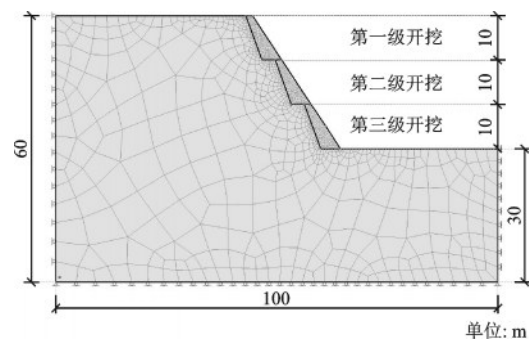


图7 算例模型网格剖分示意

Fig.7 Schematic diagram of grid division for the example model

力,模型两侧采用水平向约束,底部采用垂直向约束,其中边坡高度为30 m,分为三级开挖且每级开挖高度为10 m,开挖坡比为1:0.3。

3.2 计算结果

边坡算例模型开挖完成后,如图8所示为考虑卸荷作用与不考虑卸荷作用的水平向位移净增量等值线分布图。不考虑卸荷作用所得计算结果,边坡顶部的水平向有向坡内变形的趋势,边坡中部及底部的水平位移朝向坡外。考虑卸荷作用所得计算结果,整体边坡开挖完成后都有朝向临空面变形的趋势,并且坡体的整体变形量较大,为不考虑卸荷作用计算结果的4倍左右。

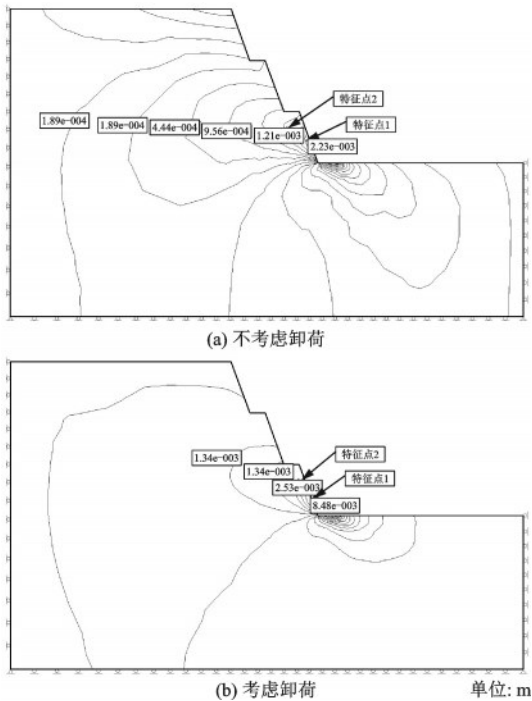


图8 边坡开挖完成后水平向位移
Fig.8 Horizontal displacement diagram of the slope after excavation

分析其主要原因为,在不考虑卸荷作用计算方法中,对于开挖面附近力学参数的选取一直保持原参数,并未考虑由于开挖卸荷作用影响下,坡面向内一定范围内岩体由于应力释放引起的向临空面发展的变形,致使岩体结构发生一定破坏,原生裂隙的扩展以及新裂隙的产生,岩体力学参数呈现出一定的弱化,即材料的劣化。其计算结果始终偏于保守,导致计算得出的边坡变形场与实际情况不符。而采用考虑卸荷影响区内岩体动态刚度折减

计算方法,其计算结果较为符合实际情况。

边坡的加固方式采用锚杆锚索联合支护,结合上述边坡分步开挖下变形情况进行支护设计,边坡表面利用1.5 m与3 m的锚杆间排布局,边坡下部设置9 m的锚索进行联合支护。考虑卸荷作用与不考虑卸荷的边坡算例模型分步开挖支护完成后的水平向位移净增量等值线分布如图9所示,开挖后总体支护效果显著,支护作用有效抑制了边坡开挖完成后的水平向变形。

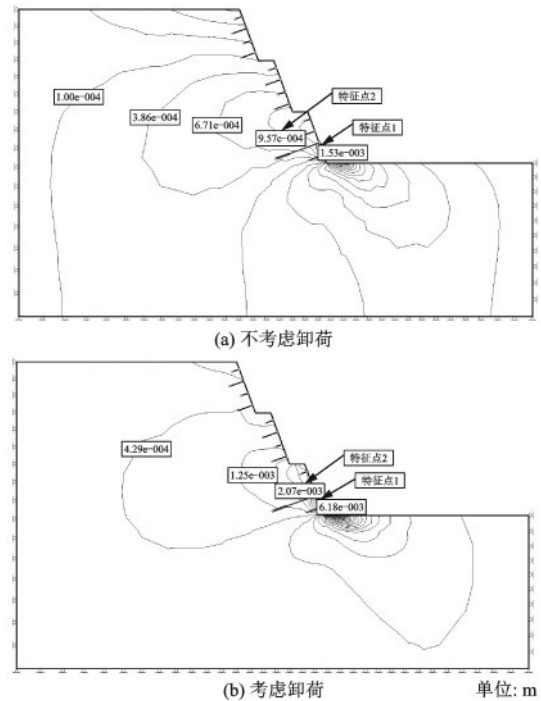


图9 边坡分步开挖支护后水平向位移

Fig.9 Horizontal displacement diagram of the slope after step-by-step excavation and support

边坡坡面及坡体内部水平向位移净增量随开挖步序的变化过程可见表3特征点1、2计算结果可知。在不考虑卸荷作用计算结果中支护作用使坡体开挖完成后水平变形量分别减小了0.7 mm和0.25 mm左右,而考虑卸荷作用所得计算结果其水平变形量分别减小了2.3 mm和0.46 mm左右。

根据表3数据绘制如图10所示的特征点水平向位移净增量随开挖步序变化曲线图可知,各个工况下水平位移净增量随开挖步序的进行逐渐增大,且考虑卸荷影响作用的计算结果明显大于不考虑卸荷作用所得计算结果,考虑卸荷作用的计算方法时支护措施的效果更加显著,是由于考虑卸荷作用影响下边坡卸荷区岩体力学参数的降低,导致边坡

表3 特征点水平向位移净增量

Table 3 Net increments of horizontal displacements of feature points 单位:mm

开挖步序		特征点1			特征点2		
		1	2	3	1	2	3
仅开挖	考虑卸荷	0.15	2.03	8.48	0.15	1.25	2.53
	未卸荷	0.12	0.83	2.23	0.12	0.35	1.21
开挖支护	考虑卸荷	0.13	1.88	6.18	0.13	1.04	2.07
	未卸荷	0.09	0.42	1.53	0.09	0.26	0.96

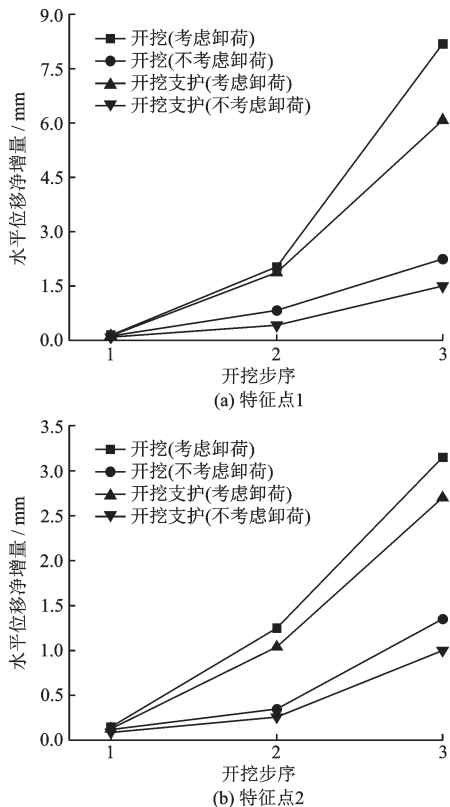


图10 特征点水平位移净增量随开挖步序变化曲线

Fig.10 Diagram of net increment of horizontal displacement of feature points varying with excavation step sequence

变形量增大,支护承受的力也随之增大用于抵抗边坡的变形,支护效果将比较明显。在实际工程中,应用考虑卸荷作用的计算方法进行支护设计,使得边坡开挖支护更加经济合理。

4 结论

本文基于卸荷岩体力学的理论与方法,从岩体开挖卸荷观点出发,结合室内试验结果分析卸荷量与变形模量之间的关系以及力学参数的变化特征,

建立边坡有限元算例模型,探究考虑边坡受开挖影响的强弱卸荷区岩体动态刚度折减的数值计算结果,所得结论如下:

(1) 红砂岩三轴加卸载试验结果可知,卸荷量达30%、70%、接近100%时,变形模量分别降低了3%、13%、50%左右。岩样卸荷力学状态下粘聚力有所降低、内摩擦角有所升高,究其原因因为卸荷试验中试件的破坏类型为张剪性破坏,破坏面粗糙度大于常规三轴试验的压剪性破坏,致使内摩擦角升高。

(2) 采用室内试验所得力学参数建立边坡开挖有限元算例模型,对比初始应力场与边坡开挖后应力场得出卸荷量,并以此为参考划分强、弱卸荷影响区,结合室内三轴试验所得变形模量与卸荷量之间的关系,并采用动态模拟方法设置强、弱卸荷区变形模量的折减百分比。

(3) 根据边坡算例模型计算结果可知,考虑卸荷作用下的边坡分步开挖后水平卸荷回弹变形量为不考虑卸荷作用的4倍左右,并采取锚杆锚索联合支护模拟边坡开挖支护动态过程,有效减少了卸荷回弹变形并且整体支护效果显著,考虑卸荷作用的边坡分步开挖支护水平变形量大于不考虑卸荷作用的计算结果,支护效果更加显著,在实际工程中应当注意支护设计,且坡体的整体变形趋势更加接近实际情况。

参考文献:

[1] 李建林. 卸荷岩体力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
Li J L. Unloading rock mass mechanics [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003. (in Chinese)

[2] 李建林. 卸荷岩体力学理论与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
Li J L. Theory and application of unloading rock mechanics [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1999. (in Chinese)

[3] 哈秋聆,李建林. 岩石边坡卸荷岩体宏观力学参数研究[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.
Ha Q L, Li J L. Study on macroscopic mechanical parameters of unloaded rock mass of rock slope [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1996. (in Chinese)

[4] 邓华锋,李建林,易庆林,等. 软岩高边坡开挖卸荷变形研究[J]. 岩土力学,2009,30(6):1731-1734,1740.
Deng H F, Li J L, Yi Q L, et al. Research on unloading deformation of soft rock high slope [J]. Rock and Soil

- Mechanics, 2009, 30(6): 1731-1734, 1740. (in Chinese)
- [5] 王瑞红, 李建林, 蒋昱州, 等. 考虑岩体开挖卸荷边坡岩体质量评价[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2741-2746.
Wang R H, Li J L, Jiang Y Z, et al. Quality evaluation of unloaded slope rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2741-2746. (in Chinese)
- [6] 王瑞红, 李建林, 刘杰, 等. 考虑岩体开挖卸荷动态变化水电站坝肩高边坡三维稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 3515-3521.
Wang R H, Li J L, Liu J, et al. Three-dimensional stability analysis of dam abutment high slope dynamic behaviors considering rock mass unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup1): 3515-3521. (in Chinese)
- [7] 吕颖慧, 刘泉声, 江浩. 基于高应力下花岗岩卸荷试验的力学变形特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 337-344.
Lyu Y H, Liu Q S, Jiang H. Study of mechanical deformation characteristics of granite in unloading experiments of high stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 337-344. (in Chinese)
- [8] 吕颖慧, 刘泉声, 胡云华. 基于花岗岩卸荷试验的损伤变形特征及其强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2096-2103.
Lyu Y H, Liu Q S, Hu Y H. Damage deformation characteristics and its strength criterion based on unloading experiments of granites [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2096-2103. (in Chinese)
- [9] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同初始损伤和卸荷路径下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1686-1697.
Qiu S L, Feng X T, Zhang C Q, et al. Experimental research on mechanical properties of deep marble under different initial damage levels and unloading paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1686-1697. (in Chinese)
- [10] 史文兵, 李洪建, 曾臻, 等. 平缓反倾红层边坡变形破坏机制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(5): 881-888.
Shi W B, Li H J, Zeng Z, et al. Deformation and failure mechanism of gently anti-inclined red-bed slope [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(5): 881-888. (in Chinese)
- [11] 段劲. 红砂岩顺层岩质边坡开挖变形特性分析[J]. 公路工程, 2014, 39(3): 233-237.
Duan J. Analysis of deformation properties of red sandstone bedding rock slope excavation [J]. Central South Highway Engineering, 2014, 39(3): 233-237. (in Chinese)
- [12] 胡田飞, 杜升涛, 师亚龙. 基于偏应力增量的边坡开挖松动区的确定方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(6): 892-899.
Hu T F, Du S T, Shi Y L. A method to determine the disturbed zone of cutting slope based on deviatoric stress increment [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(6): 892-899. (in Chinese)
- [13] 陈洪凯, 易丽云, 唐红梅, 等. 开挖岩体边坡卸荷带宽度的计算方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(4): 358-363.
Chen H K, Yi L Y, Tang H M, et al. Calculation method of unloading width for excavated rock slopes [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(4): 358-363. (in Chinese)
- [14] 陆泌锋, 邓辉, 郝浩, 等. 岩质高边坡岩体卸荷分带量化研究[J]. 人民珠江, 2019, 40(10): 1-5.
Lu B F, Deng H, Hao H, et al. Quantitative study on classification of unloading zone of rock mass with high rock slope [J]. Pearl River, 2019, 40(10): 1-5. (in Chinese)
- [15] 周火明, 盛谦, 李维树, 等. 三峡船闸边坡卸荷扰动区范围及岩体力学性质弱化程度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1078-1081.
Zhou H M, Sheng Q, Li W S, et al. Excavation-disturbed zone and weaken degree of mechanical properties for rock mass of TGP shiplock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1078-1081. (in Chinese)
- [16] 姚青, 郑达, 王宇, 等. 高寒山区深切河谷碎裂松动岩体成因机制分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(5): 706-713.
Yao Q, Zheng D, Wang Y, et al. Genetic mechanism of cataclastic loose rock mass in the alpine mountain regions and deep valley [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 706-713. (in Chinese)
- [17] 吴昊宇, 崔圣华. 岩质边坡开挖变形破坏特征及锚索支护分析[J]. 路基工程, 2017(4): 114-119.
Wu H Y, Cui S H. Characteristics of rock slope excavation deformation and failure and analysis on cable bolting [J]. Subgrade Engineering, 2017(4): 114-119. (in Chinese)
- [18] 孙云志, 黄润秋. 谷坡岩体卸荷带划分量化指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增2): 3942-3949.
Sun Y Z, Huang R Q. Research on quantification index of rock mass in riverside unloading zone classification [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup2): 3942-3949. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)