

开挖岩坡动态卸荷分区及其支护设计优化

尚旭东,陈莉丽,龚盛,陈兴周,杜威,苏振坤

Dynamic unloading zoning of excavated rock slopes and optimization of support design

SHANG Xudong, CHEN Lili, GONG Sheng, CHEN Xingzhou, DU Wei, SU Zhenkun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12170/20240408003

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同卸荷速率下岩石强度变形特性

Rock strength and deformation characteristics under different unloading rates 水利水运工程学报. 2020(6): 48 https://doi.org/10.12170/20200428001

大型船闸开挖预裂爆破累积损伤特性及隔振效果分析

Analysis of damage accumulating characteristics and vibration isolating effect of presplitting blasting in excavation of large-scale navigation lock 水利水子工程学程 2023(1):104_https://doi.org/10.12170/20211118002

水利水运工程学报. 2023(1): 104 https://doi.org/10.12170/20211118003

基于M–DBT框架的岩质边坡落石跟踪算法研究

A study on the rock block tracking algorithm that utilizes the M-DBT framework 水利水运工程学报. 2024(3): 166 https://doi.org/10.12170/20230606004

深挖方膨胀土渠道边坡变形特征分析与预测

Characteristics analysis and prediction of slope deformation of deeply-excavated expansive soil canal 水利水运工程学报. 2021(4): 1 https://doi.org/10.12170/20201201001

锚索应力增量法评价边坡稳定性

Evaluation of stability of toppling slope by increment method of anchoring cable stress 水利水运工程学报. 2019(2): 8 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.002

轴向分区面板坝分区模量影响分析

Analysis of modulus influence of axial zoned concrete-faced rockfill dam 水利水运工程学报. 2023(2): 113 https://doi.org/10.12170/20220527002





DOI:10.12170/20240408003

尚旭东,陈莉丽,龚盛,等. 开挖岩坡动态卸荷分区及其支护设计优化 [J]. 水利水运工程学报, 2025(2): 84-94. (SHANG Xudong, CHEN Lili, GONG Sheng, et al. Dynamic unloading zoning of excavated rock slopes and optimization of support design[J]. Hydro-Science and Engineering, 2025(2): 84-94. (in Chinese))

开挖岩坡动态卸荷分区及其支护设计优化

尚旭东1,陈莉丽1,龚 盛1,陈兴周1,杜 威2,苏振坤1

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西 西安 710065)

摘要: 岩质边坡开挖产生大范围卸荷区,其力学性能直接影响边坡的安全与稳定。基于此,开展砂岩室内卸荷 试验,分析卸荷过程中岩样的损伤规律;以卸荷比为分区判据,在开挖过程中对各单元的损伤程度进行准确判别 并相应弱化,将其嵌入边坡开挖数值模拟分析中,实现动态卸荷分区;采用提出的动态卸荷分区方法,研究工程 岩坡开挖卸荷后的变形与支护设计优化。结果表明:(1)随着卸荷比增大,变形模量具有阶段性劣化规律,当卸 荷比小于总卸荷比的 50% 时,变形模量降低不明显,达到 50%~90% 时,变形模量损失率均值为 6.8%~16.9%,超 过 90% 后,变形模量呈突降趋势,损失率均值为 16.9%~42.5%,且随着围压增大,卸荷破坏时变形模量降幅增 大;(2)相较于压缩试验,卸荷状态下岩样的黏聚力降低 32.9%,内摩擦角增大 17.5%;(3)应用卸荷分区后,开挖 岩坡的变形与塑性区面积显著增大。通过分区方法判别损伤区与未扰动区,可为支护深度优化提供依据。研究 成果可为边坡开挖卸荷分析和支护优化设计提供参考。

关键 词: 岩质边坡; 开挖卸荷; 卸荷分区

中图分类号: TU452 文献标志码: A 文章编号: 1009-640X(2025)02-0084-11

岩质边坡开挖过程中,临近开挖面的岩体将由三向受力状态转变为一面临空的不平衡状态,因开挖扰 动的影响进而形成不同卸荷损伤区,并随着开挖进程不断发生动态扩展。卸荷区范围内岩体节理与裂隙逐 步发育,使岩体力学性能产生弱化积累效应,导致边坡沿卸荷方向变形失稳,直接影响边坡工程的稳定和安 全。哈秋舲等[1-3] 提出了卸荷岩体力学的新概念, 阐明了多个实际工程中开挖卸荷产生的大变形问题。众多 专家和学者基于卸荷岩体力学理论对各类岩石开展了研究,李建林等[39]对岩石进行了不同卸荷路径、卸荷 速率试验,分析研究卸荷岩石的破坏特征、力学参数变化规律及能量演化规律,并将其与加载破坏试验相比 较,发现两者存在明显差异;邓华锋等10 进行了卸荷损伤岩石再加载试验,分析再加载时岩石的力学性能与 破坏模式,表明卸荷损伤对岩石变形和承载性能有显著影响。为了探究卸荷损伤对实际工程的影响,石安 池等[11]采用地质调查、现场监测等手段进行综合研究,将边坡岩体划分为强、弱、微等3个卸荷带,其中 强、弱卸荷带的力学性质存在明显弱化:李日运等[12]通过卸荷裂隙线密度、张开度、弹性波波速和完整性系 数等 4 个量化指标对工程边坡进行卸荷带划分; 陈兴周等[13] 研究指出, 对于开挖卸荷岩体, 应考虑其应力的 动态变化,并依据卸荷量级对卸荷损伤岩体进行分区。此外,学者们采用数值模拟手段进一步揭示了岩质 边坡开挖的破坏机制与卸荷区分布情况。葛虎胜等[14]对工程岩坡进行逐级开挖卸荷研究,揭示岩质边坡开 挖后位移演变规律与边坡稳定性系数变化规律;杨敏等[15]采用支护结构的受力特性来表征预应力锚索加固 后边坡的稳定性;杨洪福16以边坡稳定安全系数与剪应力分布为依据,对边坡支护参数进行优化;杜威 等177结合室内试验规律,运用有限单元法构建边坡开挖算例模型,实现了卸荷分区;赵川等188和徐风光

收稿日期: 2024-04-08;修回日期: 2024-04-30;接受日期: 2024-05-15

作者简介:尚旭东(1998—),男,陕西西安人,硕士研究生,主要从事水工岩体力学方面研究。 E-mail:xdshang001008@163.com 通信作者:陈兴周(E-mail:xzchen0416@xust.edu.cn)

等^[19]分别提出以岩体剪应变增量和大主应力增量确定卸荷区的方法;刘爽等^[20]和胡田飞等^[21]分别以损伤 变量和偏应力增量作为卸荷区分区标准,采用数值分析方法预测了卸荷区范围。然而,边坡开挖卸荷损伤 区的扩展是一个复杂的动态变化过程,且损伤区的材料劣化程度也随之变化。因此,对动态分区过程与卸 荷损伤区的岩体力学参数劣化规律等方面仍需进一步研究。

基于上述研究成果,本文以卸荷岩体力学理论为基础,通过开展室内常规三轴压缩及三轴卸荷试验,研 究卸荷比与力学参数劣化的关系;以卸荷比为分区依据,准确识别边坡开挖模拟分析中岩体损伤动态扩展 范围,并合理划分不同卸荷损伤区,将室内试验规律与数值计算结果相结合,旨在探究开挖过程中岩质边坡 卸荷影响区的发育扩展过程;以某坝址区岩质边坡为依托,建立边坡开挖支护模型,应用动态卸荷分区方 法,比较分析考虑卸荷前后边坡的变形与塑性区分布,根据卸荷损伤区优化支护范围,以期为岩质边坡开挖 卸荷分析和支护设计提供指导。

1 室内试验

1.1 试验方案

以某水电站岩质边坡砂岩为试验研究对象,将 所取岩样按照《水利水电工程岩石试验规程》 (SL/T264—2020)要求制备成 50 mm(直径)×100 mm (高度)的标准试件,试件两端面不平行度误差控制 在 0.05 mm 以内,直径误差低于 0.3 mm,且断面与试 件轴线偏差低于 0.25°;为减小试验结果的离散性,



图 1 典型砂岩试件 Fig. 1 Typical sandstone specimen

采用 NM-4B 非金属超声检测分析仪对试件进行纵波波速检测并筛选波速相近试件作为试验试件^[22],试验 采用 THMC 多场耦合三轴流变测试系统。典型试件如图 1 所示。

考虑岩样所处的初始应力环境,同时为探究不同围压作用下卸荷试件力学参数的劣化规律,进行围压 分别为 10、15 和 20 MPa 下的常规三轴压缩试验和卸荷试验。为模拟边坡开挖过程中岩体不同程度的卸荷 损伤,三轴卸荷试验采用恒轴压卸围压的应力路径,研究卸荷过程中岩石的损伤规律。

1.2 卸荷损伤岩样力学特性变化规律

图 2 为砂岩试样在围压分别为 10、15 和 20 MPa下的三轴压缩试验与卸荷试验应力-应变曲线。三轴 压缩试验中,随着初始围压的增大,应力-应变曲线斜率与岩样抗压峰值强度增加,岩样轴向应变也随之增 大,而环向应变因围压约束作用的增大而受到限制。三轴卸荷试验中,在不同初始围压下,卸荷阶段的总体 趋势基本相同,卸荷程度越大,环形应变与轴向应变增加越显著,且环向应变增长速率明显大于轴向应变, 说明在三轴卸荷过程中环向应变较轴向应变更加敏感。相较于三轴压缩试验,卸荷岩样破坏时轴向应变更 小,且偏应力也小于压缩试验,表明卸荷状态下岩样的承载能力降低。此外,当初始围压增大时,卸荷过程 中环向应变随之增加,究其原因是围压越大岩石内部储存能量越多,卸荷过程中所释放的能量越多,变形也 更为剧烈,且在卸荷过程中会在侧向产生等效拉应力,从而加速裂隙产生与发展,导致原生裂隙与新生裂隙 相互交错扩展,宏观上呈现明显扩容现象。

考虑到卸荷作用下环向变形和围压变化的影响,本文变形模量和广义泊松比的计算采用以下公式[23]:

$$\begin{cases} E = (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)/\varepsilon_1 \\ \mu = (B\sigma_1 - \sigma_3)/[\sigma_3(2B - 1) - \sigma_1] \\ B = \varepsilon_3/\varepsilon_1 \end{cases}$$
(1)

式中: E为变形模量; μ 为广义泊松比; σ_1 、 σ_3 、 ε_1 和 ε_3 依次为轴向应力、围压、轴向应变及环向应变。



Fig. 2 Stress-strain curve of sandstone

本文综合考虑岩石卸荷初始围压与围压卸荷量的影响,参考李地元等^[24]提出的卸荷比定义,并以此为 特征参量,卸荷比 *K* 定义如下:

$$K = \left| \frac{\sigma_i - \sigma_{30}}{\sigma_{30}} \right| \times 100\% \tag{2}$$

式中:σi为卸荷过程中的围压;σ30为卸荷初始围压。

依据试验结果,计算并绘制变形模量与卸荷比 关系曲线如图 3 所示。可见,在不同的初始应力环 境中,变形模量在卸荷过程中总体呈现先缓慢降低, 在卸荷比达到一定值后呈陡降趋势,且具有明显的 阶段性劣化规律。根据变形模量变化规律可分为 3 个阶段,当卸荷比占总卸荷比的 0~50% 时,变形模 量降低不明显,说明此阶段卸荷对岩样损伤较小;卸 荷比达到总卸荷比的 50%~90% 时,变形模量损失率 均值为 6.8%~16.9%;达到 90%~100% 时,变形模量 出现骤降,损失率均值为 16.9%~42.5%,呈非线性突 变趋势。

卸荷结束时, 围压 10、15 和 20 MPa 所对应的总 卸荷比为 72.2%、66.8% 和 63.6%, 呈明显的递减趋



图 3 变形模量与卸荷比关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between deformation modulus and unloading ratio

(3)

势,相应变形模量损失率为 30.2%、43.4% 和 53.8%,呈明显的递增趋势。比较而言,低围压条件下,到达卸 荷破坏需要更大的卸荷比,即卸载更大的围压;高围压条件下,卸荷破坏时变形模量降低程度更大,较小的 卸荷比可产生较大的卸荷损伤。原因在于,随着围压增大,岩样从外界吸收更多的能量,卸荷过程中吸收的 能量不能及时释放,部分能量转化为破裂表面能,造成岩样原生裂隙扩展与新生裂隙发育,从而加剧了卸荷 损伤。

由于 Mohr-Coulomb 准则中 σ_1 与 σ_3 呈线性关系(见式(3)),因此,可得岩样压缩与卸荷破坏时轴向极 限应力 σ_1 与破坏时围压 σ_3 的关系曲线(图 4)。

 σ

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + b$$

式中:
$$k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}; b = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}; c$$
为黏聚力; φ 为内摩擦角。

86

岩样在三轴压缩与卸荷中的抗剪强度参数见 表 1。相较于三轴压缩试验,三轴卸荷试验岩样的黏 聚力降低 32.9%,而内摩擦角增大 17.5%,说明卸荷 状态下抵抗破坏的主控因素为黏聚力。内摩擦角增 大的原因在于两种试验的破坏形式不同,前者属于 压剪破坏,后者属于张剪破坏,在卸荷过程中孔隙、 裂隙发育扩展,破裂面积与破裂面粗糙程度进一步增 加,使得颗粒间咬合力增强,在一定程度上导致内摩 擦角增大。岩样在三轴卸荷损伤过程中的阶段性节 点与力学参数损伤规律,可为岩坡开挖卸荷分区的 界限及不同损伤区的岩体力学参数劣化提供指导。



图 4 Mohr-Coulomb 强度准则拟合曲线

Fig. 4 Fitted curve of Mohr-Coulomb strength criterion

1 ab. 1 Shear strength parameters								
试验类型	初始围压/MPa	破坏围压/MPa	轴压/MPa	c/MPa	φ/(°)			
	10	10.0	123.5					
三轴压缩	15	15.0	145.2	18.5	40			
	20	20.0	169.6					
	10	2.8	86.4					
三轴卸荷	15	5.0	101.6	12.4	47			
	20	7.3	118.7					

	表1	抗剪强度参数
h	1 Sh	ear strength narameter

2 动态卸荷分区模拟方法

本文以卸荷前后最小主应力的变化量与初始最小主应力比值的绝对值作为各岩体的卸荷分区标准,根据卸荷损伤演化过程中的阶段性节点,定义相应的卸荷损伤区,同时结合室内卸荷试验规律,对损伤区材料进行相应劣化,分别将卸荷比未达到 30% 的区域定义为未扰动区,达到 30%~60% 的损伤区域定义为弱卸荷区,卸荷比超过 60% 的损伤区域定义为强卸荷区。

2.1 动态卸荷分区模拟流程

以卸荷岩体力学为理论基础,基于有限差分法连续介质数值模拟方法,提出一种岩体卸荷区扩展与划 分的数值等效模拟方法。通过编制程序,将卸荷分区方法嵌入到边坡开挖数值计算中,采用遍历各单元在 不同卸荷阶段下的应力状态,计算不同损伤程度单元的卸荷比,并进行实时分组。此外,在模拟过程中,考 虑到分步开挖产生的累积损伤效应,根据室内卸荷试验材料弱化规律,在开挖过程中采用实体单元弱化的 方法,在同一阶段分别对不同卸荷区域内的变形模量与黏聚力进行相应劣化,从而使边坡开挖与卸荷分区 同时进行,重复迭代并更新卸荷损伤区范围,以保证卸荷损伤区的演化随开挖进程而变化。

2.2 动态卸荷分区模拟

为探究卸荷分区模拟方法的适用性,构建边坡开挖卸荷数值分析算例模型,以卸荷比为判据研究边坡 开挖卸荷过程中卸荷劣化的演化规律。算例模型见图 5,该模型尺寸为 100 m(长)×1 m(宽)×80 m(高),采 用边坡逐级分层开挖模式,每级开挖高度为 10 m,开挖坡比为 1:0.5,分 3 级开挖,每 10 m 设一级平台,平台 宽度为 2 m。模型网格以八节点六面体单元为主,共划分 37 299 个节点,24 470 个单元。模型处于自重应 力场中,底部与四周均采用法向约束,采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。

通过卸荷分区动态扩展模拟方法,计算分析监测点应力衰减规律(规定拉应力为正,压应力为负)。 图 6 中应力衰减呈现台阶状分布,对应分步开挖的实现过程,随着开挖的进行,应力逐步释放,卸荷比增 大。第一级开挖时,开挖位置距离监测点较远,卸荷比未超过30%,将此单元定义为未扰动区;第二级开挖时,监测点处受开挖卸荷影响,卸荷比超过30%,将此单元定义为弱卸荷区;第三级开挖时,卸荷比超过60%,将此单元定义为强卸荷区。由此可知,该模拟方法可实现边坡开挖卸荷区的动态划分。



图 7 展示了边坡算例在开挖过程中的卸荷分区 情况。开挖过程中,通过动态分区方法划分坡体开 挖面附近卸荷损伤区。卸荷损伤扩展区域总体为圆 弧形,由坡面向岩体内部分布,随着开挖的进行,卸 荷损伤区范围逐步扩展,且岩体卸荷损伤程度随着 深度增加呈逐渐减弱趋势,开挖至第二级时,强卸荷 损伤扩展区域形态发生变化,由原先的圆弧形分布 转变为"半心形"分布,分析认为受预留平台与上 覆岩体开挖影响,致使平台卸荷路径与开挖面卸荷 路径产生交汇,形成卸荷区域贯通现象,从而增大了 卸荷扩展区域。

此外,为验证动态卸荷分区方法的适用性,采用 徐风光等^[19]论文中的案例进行对比验证,所得开挖 后分区对比如图 8 所示,可见两种分区方法所得的 强卸荷区(松弛区)分布趋势基本一致,均贴近开挖 面,整体呈"通耳"状,同时坡体内部形成1个"半



图 6 监测点单元应力变化曲线





Fig. 7 Dynamic expansion process of the unloading zone

面,整体呈"通耳"状,同时坡体内部形成1个"半岛"状的弱卸荷区(应力集中区),两者分区规律较为接近,说明本文提出的卸荷分区方法是合理的。





3 实例应用分析

依托工程为某电站坝址区边坡,该边坡为顺层 岩质边坡,主要由薄层~中厚层中细砂岩夹板岩及薄 层~极薄层板岩夹砂岩或互层组成,属层状岩体,软 硬相间出现,各向异性明显,顺层地质构造发育。边 坡表部岩体物理风化较强,有大面积崩坡积物覆盖, 植被不太发育,坡体分带特征鲜明,边坡后缘形成了 宽度较大、陡倾坡外的拉裂带,边坡上部坡度较缓 (平均为45°),下部坡度较陡(平均为51°)。边坡的 坡形及开挖设计见图9,通过地质勘查报告和现场试 验确定边坡不同地层的力学参数见表2。





1 ab. 2 Initial physical and mechanical parameters of rock mass								
岩层	变形模量/Pa	泊松比	φ/(°)	c/Pa	$\gamma/(kN/m^3)$			
地层1	6.50×10 ⁸	0.38	28	1.0×10 ⁵	21.5			
地层2	9.00×10 ⁸	0.37	33	2.0×10 ⁵	22.0			
地层3	1.05×10 ⁹	0.35	34	4.5×10 ⁵	24.0			
地层4	2.00×10 ⁹	0.34	37	6.5×10 ⁵	25.0			
地层5	5.00×10 ⁹	0.32	49	1.2×10^{6}	26.5			

表 2 岩体初始物理力学参数 ab. 2 Initial physical and mechanical parameters of rock mass

根据地质剖面图构建计算模型,边坡尺寸为245 m(长)×1 m(宽)×190 m(高),模型网格以八节点六面体 单元为主,共划分25486个节点,12553个单元。模型处于自重应力场中,四周与底部均采用法向约束,采 用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。自上而下采用"台阶法"开挖,边坡开挖坡比为1:0.5,边坡开挖梯段分层 高度不大于15 m,分为4级台阶开挖,每级梯段分为3步开挖,每步开挖高度为5 m,且每级梯段设一级 平台。

3.1 计算结果及分析

边坡开挖过程中卸荷区分布如图 10 所示,卸荷 损伤区随着开挖进程的推进而逐步扩展,且在开挖 结束后,其扩展范围达到最大,分布趋势总体贴近开 挖面,呈圆弧状分布,随着深度增加,卸荷损伤程度 减小,强卸荷区最大深度约为 11.3 m,弱卸荷最大深 度约为 22.5 m。卸荷区分布在第三级梯段处产生了 "内凹"现象,是由于该区域位于 3 种岩层交接部 位,岩石参数有差别,岩层界面的斜率也有变化,进 而改变了卸荷区的空间展布。

考虑卸荷效应前后的水平位移分布如图 11 所示,比较而言,两者的变形趋势基本一致,皆随着开挖的进行而增大;变形均指向坡外,但产生最大变形的位置发生变化,前者最大变形出现在坡体中部,而后者受卸荷累积损伤作用影响,最大变形出现在最后一级梯段处;考虑岩体卸荷效应后坡体最大水平位移显著增大,由 0.38 cm 增大至 0.66 cm。









由图 12 可以看出,相较于未考虑卸荷效应,考 虑卸荷效应后坡体的开挖塑性区面积增大,最大深 度由 7.6 m 增加至 12.0 m,且在坡脚位置处,剪切破 坏的分布范围迅速扩展并有贯通趋势,易产生危险 滑移面,进而导致坡体失稳。

分析图 13 可得,考虑卸荷效应前后水平位移变 化趋势总体一致,由于监测点位于第二、三级开挖面 中部,开挖至监测点前,受竖向卸荷回弹影响,监测 点所处位置呈现向左上方回弹趋势,产生向坡体内 部的位移。开挖至监测点后,开挖面应力得以释放, 产生倾向临空面的水平位移,故而监测点水平位移 随着开挖步的推进呈现先"内收"后"外展"趋 势,且考虑开挖卸荷效应产生的水平位移受卸荷影 响显著,产生较大的变形波动。若不考虑卸荷效应. 边坡开挖后,应力场重新分布,但开挖面附近岩体并 未因开挖作用受到损伤,即坡体仍保持原有的力学 参数,整体性并未发生破坏,导致计算结果趋于保 守:考虑卸荷效应计算时,岩体随着卸荷比的变化, 产生卸荷损伤区,其力学参数随卸荷损伤的增加而 进一步劣化,坡体整体变形量与塑性区范围随之增 加,从而更贴近工程实际。



Fig. 13 Horizontal displacement variation at monitoring points

3.2 支护设计优化

本文采用原有支护与优化支护两种设计方案进行分析对比,原有支护方案采用锚杆、锚索联合支护设 计并逐级锚固。后者在原有支护的基础上,依据开挖卸荷损伤区分布范围,对锚索的支护深度进行优化,支 护优化前后方案对比如图 14 所示,锚杆与锚索均采用线弹性本构关系模拟,其中锚杆的弹性模量、抗拉强 度和直径分别为 2.1×10⁵ MPa、360 kN 和 28.0 mm,布置间距设置为 2 m;锚索的弹性模量、抗拉强度、预应 力和直径分别为 2.1×10⁵ MPa、1 860 kN、300 kN 和 15.2 mm(锚固段为 150.0 mm),布置间距设置为 4 m。

坡体位移是评价边坡稳定性的重要判据,综合图 15 可得,原有支护方案坡体最大水平位移由开挖不支 护时的 0.66 cm 降至 0.49 cm,支护优化方案缩短了锚索支护的深度,最大水平位移降至 0.51 cm,且位移分 布与原支护基本一致;分析图 16 可知,两种支护方案的塑性区总体趋势与范围基本相当,相较于开挖不支 护工况,塑性区范围有较明显的减小,且在坡脚处的剪切贯通趋势也得到了抑制,表明锚杆、锚索的联合支 护有效消除了坡面的大变形,抑制了开挖面附近坡体的变形扩展,达到较好的支护效果。



图 14 支护优化前后方案对比





图 15 支护优化前后水平位移等值线分布



对比上述两种支护设计方案,可知原有方案中 存在过度支护的区域,而支护优化方案利用卸荷区 分布进行重新设计,通过对扰动区与未扰动区的准 确判断,将锚索嵌入未扰动区,实现对原有方案中过 度支护区域的优化,既提高了施工效率,又降低了总 体支护成本,使支护设计更为经济合理。



4 结 语



本文以卸荷岩体力学理论为基础,通过室内试

验,揭示岩石在不同卸荷阶段中各项力学参数的劣化规律。以卸荷比为分区依据,准确识别岩体损伤动态 扩展范围并合理划分卸荷损伤区。基于室内试验规律与动态卸荷分区方法,构建边坡数值计算模型,并应 用于某坝址区岩质边坡开挖工程实例中,探究坡体考虑卸荷效应前后的变形演化与支护设计优化,所得主 要结论如下:

(1)随着卸荷比的增加,变形模量呈阶段性降低,当卸荷比未达到总卸荷比的 50% 时,变形模量降低不

明显,达到 50%~90% 时,变形模量损失率均值为 6.8%~16.9%,超过 90% 后,变形模量呈现非线性突变趋势,损失率均值为 16.9%~42.5%;初始围压越高,卸荷破坏时变形模量降幅度越大,较小的卸荷比可产生较大的卸荷损伤;相较于三轴压缩试验,卸荷状态下岩样的黏聚力降低 32.9%,内摩擦角增大 17.5%。

(2)坝址区工程边坡在考虑开挖卸荷效应后,受卸荷累积损伤影响,坡体水平位移显著增加,开挖塑性 区分布面积明显增大,且在坡脚位置处,剪切破坏的分布范围迅速扩展并有贯通趋势。

(3)原有支护方案中存在过度支护区域,根据开挖卸荷区分布对锚索支护深度进行优化,得到了良好的 支护效果,使支护设计更为经济合理,可为工程支护设计优化提供参考。

参考文献:

- [1] 哈秋舲. 加载岩体力学与卸荷岩体力学[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 114. (HA Qiuling. Loading rock mass mechanics and unloading rock mass mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 114. (in Chinese))
- [2] 李建林. 卸荷岩体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (LI Jianlin. Unloading rock mass mechanics[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 李建林, 王瑞红, 蒋昱州, 等. 砂岩三轴卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2034-2041. (LI Jianlin, WANG Ruihong, JIANG Yuzhou, et al. Experimental study of sandstone mechanical properties by unloading triaxial tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2034-2041. (in Chinese))
- [4] 陈天楠, 邓华锋, 李建林, 等. 不同应力路径下灰岩卸荷损伤特性演化规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(6): 1434-1444. (CHEN Tiannan, DENG Huafeng, LI Jianlin, et al. Influence of stress path on unloading mechanical properties of limestone[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1434-1444. (in Chinese))
- [5] 王旭, 陈兴周, 张浩, 等. 不同卸荷速率条件下砂岩分级卸荷力学特性试验研究[J]. 西北水电, 2021(5): 21-25. (WANG Xu, CHEN Xingzhou, ZHANG Hao, et al. Experimental study on the mechanical properties of sandstone under different unloading rates[J]. Northwest Hydropower, 2021(5): 21-25. (in Chinese))
- [6] 钱亚俊, 武颖利, 裴伟伟, 等. 不同卸荷速率下岩石强度变形特性[J]. 水利水运工程学报, 2020(6): 48-54. (QIAN Yajun, WU Yingli, PEI Weiwei, et al. Rock strength and deformation characteristics under different unloading rates[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(6): 48-54. (in Chinese))
- [7]张培森,赵成业,侯季群,等.不同初始卸荷水平下红砂岩波速变化及能量耗散规律试验研究[J].煤炭学报,2021,46(增刊1):157-173. (ZHANG Peisen, ZHAO Chengye, HOU Jiqun, et al. Experimental study on wave velocity variation and energy dissipation law of red sandstone under different initial unloading levels[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(Suppl1): 157-173. (in Chinese))
- [8] WANG J J, LIU M N, JIAN F X, et al. Mechanical behaviors of a sandstone and mudstone under loading and unloading conditions[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(1): 30.
- [9] DUAN G Y, LI J L, ZHANG J Y, et al. Mechanical properties and failure modes of rock specimens with specific joint geometries in triaxial unloading compressive test[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019: 1340934.
- [10] 邓华锋,陈天楠,李建林,等. 峰前卸荷损伤灰岩的再加载力学性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(6): 1301-1311.
 (DENG Huafeng, CHEN Tiannan, LI Jianlin, et al. Reloading experimental research on the mechanical properties of limestone considering pre-peak unloading damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(6): 1301-1311. (in Chinese))
- [11] 石安池, 徐卫亚, 张贵科. 三峡工程永久船闸高边坡岩体卸荷松弛特征研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 723-729. (SHI Anchi, XU Weiya, ZHANG Guike. Study on unloading and relaxation characteristics of the rockmass of permanent shiplock high rock slope of Three Gorges Project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 723-729. (in Chinese))
- [12] 李日运,刘田珂. 岸坡应力场及卸荷带划分量化指标研究[J]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版), 2014, 35(2): 76-80.
 (LI Riyun, LIU Tianke. Research of bank slope stress field and quantitative indicators of unloading zones classification[J].
 Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2014, 35(2): 76-80. (in Chinese))

- [13] 陈兴周, 邓钦, 段金林, 等. 边坡工程中卸荷岩体的探讨[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2005, 5(3): 24-26. (CHEN Xingzhou, DENG Qin, DUAN Jinlin, et al. Some discussions on unloading rock mass in slope engineering[J]. Journal of Anhui Technical College of Water Resources and Hydroelectric Power, 2005, 5(3): 24-26. (in Chinese))
- [14] 葛虎胜, 刘峰, 苏怀斌, 等. 高陡边坡开挖卸荷位移演变规律及边坡稳定性研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(6): 83-88.
 (GE Husheng, LIU Feng, SU Huaibin, et al. Evolution law of displacement and stability analysis of high and steep slope excavation[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(6): 83-88. (in Chinese))
- [15] 杨敏,李宁,李宏儒,等. 锚索应力增量法评价边坡稳定性[J]. 水利水运工程学报, 2019(2): 8-15. (YANG Min, LI Ning, LI Hongru, et al. Evaluation of stability of toppling slope by increment method of anchoring cable stress[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(2): 8-15. (in Chinese))
- [16] 杨洪福. 基于 Midas/GTS 的某高速公路边坡支护参数优化研究 [J]. 公路, 2020, 65(9): 39-43. (YANG Hongfu. Optimization study of supporting parameters for highway slope based on Midas/GTS [J]. Highway, 2020, 65(9): 39-43. (in Chinese))
- [17] 杜威, 陈兴周, 陈莉丽, 等. 岩质边坡开挖卸荷岩体参数特征分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(3): 596-603. (DU Wei, CHEN Xingzhou, CHEN Lili, et al. Parametric analysis of rock mass during excavation and unloading of rock slope[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(3): 596-603. (in Chinese))
- [18] 赵川, 付成华. 基于剪应变增量的岩质边坡开挖卸荷深度判别[J]. 水电能源科学, 2015, 33(5): 132-134, 117. (ZHAO Chuan, FU Chenghua. Judgment of unloading depth of rocky slope excavation based on shear strain increment[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(5): 132-134, 117. (in Chinese))
- [19] 徐风光, 廖小平, 王浩. 典型路堑边坡开挖卸荷应力变化特征与松驰规律[J]. 公路交通科技, 2022, 39(3): 9-20. (XU Fengguang, LIAO Xiaoping, WANG Hao. Stress variation characteristics and relaxation rule of excavation unloading of typical cut slope[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(3): 9-20. (in Chinese))
- [20] 刘爽, 束加庆, 周晨露, 等. 基于损伤理论的岩体边坡开挖卸荷松弛数值模拟研究[J]. 武汉大学学报 (工学版), 2018, 51(增刊1): 273-278. (LIU Shuang, SHU Jiaqing, ZHOU Chenlu, et al. Numerical research on unloading in rock slope excavation based on damage mechanics[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(Suppl1): 273-278. (in Chinese))
- [21] 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 Tianfei, DU Shengtao, SHI Yalong. 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))
- [22] 邓华锋, 李建林, 邓成进, 等. 岩石力学试验中试样选择和抗压强度预测方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3399-3403.
 (DENG Huafeng, LI Jianlin, DENG Chengjin, et al. Analysis of sampling in rock mechanics test and compressive strength prediction methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3399-3403. (in Chinese))
- [23] 高春玉, 徐进, 何鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456-460. (GAO Chunyu, XU Jin, HE Peng, et al. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 456-460. (in Chinese))
- [24] 李地元, 孙志, 李夕兵, 等. 不同应力路径下花岗岩三轴加卸载力学响应及其破坏特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 2): 3449-3457. (LI Diyuan, SUN Zhi, LI Xibing, et al. Mechanical response and failure characteristics of granite under different stress paths in triaxial loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Suppl2): 3449-3457. (in Chinese))

Dynamic unloading zoning of excavated rock slopes and optimization of support design

SHANG Xudong¹, CHEN Lili¹, GONG Sheng¹, CHEN Xingzhou¹, DU Wei², SU Zhenkun¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: The excavation of rock slopes generates a wide unloading zone, whose mechanical properties directly influence the safety and stability of the slope. This study conducts laboratory unloading tests on sandstone to analyze the damage patterns of rock samples during unloading. Using the unloading ratio as a zoning criterion, the damage degree of each unit during excavation is accurately assessed and weakened accordingly, which is then incorporated into numerical simulations of slope excavation to achieve dynamic unloading zoning. The proposed dynamic zoning method is used to study deformation and support design optimization of engineering rock slopes after excavation unloading. The results show that: (1) As the unloading ratio increases, the deformation modulus exhibits a stage-wise deterioration trend. When the unloading ratio is less than 50% of the total, the deformation modulus reduction is negligible; between 50% and 90%, the average modulus loss rate ranges from 6.8% to 16.9%; beyond 90%, the modulus sharply decreases, with an average loss rate of 16.9% to 42.5%, and the extent of modulus reduction during unloading failure increases with confining pressure. (2) Compared to compression tests, the cohesion of rock samples under unloading decreases by 32.9%, while the internal friction angle increases by 17.5%. (3) The application of unloading zoning results in significant increases in deformation and the plastic zone area of excavated rock slopes. The zoning method for distinguishing damaged and undisturbed zones provides a basis for optimizing support depth. These findings offer valuable references for slope excavation unloading analysis and support design optimization.

Key words: rock slope; excavation unloading; unloading zoning