

深部锚固节理岩体蠕变-疲劳破坏能量演化规律分析

宋洋, 杨辉, 李永启, 范波

Analysis on the evolution law of creep-fatigue failure energy of deep anchored jointed rock mass

SONG Yang, YANG Hui, LI Yongqi, and FAN Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202107018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

加锚贯通节理岩体宏观剪切破坏特性

Macroscopic and microscopic shear failure characteristics of anchored penetrating jointed rock mass

宋洋, 赵玉兵 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 95-101

锚固的贯通节理岩体剪切破坏特性分析

Shear failure mode of anchored rock mass with through joints

宋洋, 张峰源, 李永启, 杜炎齐, 王伟颐 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 133-140

低速缓动滑坡滑带土剪切蠕变特性

周静静, 赵法锁, 祝艳波, 吴博, 陈沛, 宋飞, 杨一帆 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(1): 107-112

三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析

Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area

蒋文明, 王鲁琦, 赵鹏, 黄波林, 张枝华, 胡明军 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 105-112

非贯通非共面凝灰岩节理岩体各向异性及其能量特征分析

宋洋, 任萌, 张维东, 王贺平, 李征 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(1): 126-132

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

王平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑涛, 吴坤达, 毛博 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 52-61



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202107018

宋洋, 杨辉, 李永启, 等. 深部锚固节理岩体蠕变-疲劳破坏能量演化规律分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 98-105.
SONG Yang, YANG Hui, LI Yongqi, *et al.* Analysis on the evolution law of creep-fatigue failure energy of deep anchored jointed rock mass[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 98-105.

深部锚固节理岩体蠕变-疲劳破坏能量演化规律分析

宋 洋¹, 杨 辉², 李永启², 范 波²

(1. 辽宁工程技术大学建筑与交通学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:为探究深部岩体在爆破、开挖等扰动荷载下的力学特性,开展锚固岩体在蠕变-疲劳荷载下的室内试验,并进一步探究其能量演化规律。结果表明:(1)在疲劳荷载作用下,加锚节理岩体比无锚条件下的滞回环面积小,在施加预应力时,其滞回环面积又大幅度减少,说明加锚预应力能有效降低其能量损耗;(2)岩石强度越高,其滞回环面积越小,对应的能量耗散越小,反之能量耗散大;(3)对比不同加卸载速率可知:在每一级循环荷载过程中,加卸载速率越大其对应的应变值、切线斜率就越大。考虑加卸载速率对节理岩体劣化作用,依据应变等价原理,得出节理岩体峰值损伤本构方程,并通过试验验证模型的准确性,为深部岩体结构支护提供思路。

关键词:剪切蠕变;滞回环面积;加卸载速率;能量损耗;损伤本构模型

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)04-0098-08

Analysis on the evolution law of creep-fatigue failure energy of deep anchored jointed rock mass

SONG Yang¹, YANG Hui², LI Yongqi², FAN Bo²

(1. College of Architecture and Communications, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

2. Civil Engineering College, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: In order to explore the mechanical properties of deep rock masses under disturbance loads such as blasting and excavation, laboratory tests of anchored rock masses under creep-fatigue loads were carried out, and the law of energy evolution was further explored. The results show that: (1) Under the action of fatigue load, the area of the anchored jointed rock mass is smaller than the of the unanchored condition. When prestress is applied, the hysteresis area of the jointed rock mass is greatly reduced, indicating that the anchored prestress can effectively reduce its energy loss. (2) The higher the rock strength, the smaller the hysteresis loop area, the smaller the corresponding energy dissipation. Conversely, the lower the rock strength, the larger the hysteresis loop area and the larger the corresponding energy dissipation. (3) Comparing different loading and unloading rates, experimental results show that during each level of cyclic loading, the greater the loading and unloading rate, the greater the corresponding strain value and tangent slope. Considering the effect of loading and unloading rate on the deterioration of jointed rock masses, based on the principle of strain equivalence, the peak damage constitutive equation of

收稿日期: 2021-07-21; 修订日期: 2021-09-14

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974146); 辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0042); 辽宁省高等学校创新人才支持计划资助项目(21-1071); 辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD08)

第一作者: 宋 洋(1982-), 男, 辽宁丹东人, 副教授, 博士, 主要从事岩土与地下工程方面教学与研究。E-mail: lgdsongyang@163.com

通讯作者: 杨 辉(1993-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事桥梁与隧道方面的研究。E-mail: 826376530@qq.com

jointed rock masses is obtained, and the accuracy of the model is verified through experiments, which provides ideas for deep rock structure support.

Keywords: shear creep; hysteresis area; loading unloading rate; energy loss; damage constitutive equation

0 引言

深部岩体地质环境复杂加锚节理岩体机理不明制约地下工程发展,为此复杂应力路径下深部加锚节理岩体剪切时效性机理研究,是保障深部围岩安全稳定的关键科学问题,深部地下工程应力环境复杂,部分隧道沿线地震频发,断层破碎带较为密集,且开挖普遍采取爆破作业方式,爆破扰动对围岩支护结构破坏性极大。深部断层破碎带与巷道围岩具有明显的蠕变特征,变形具有显著的时效性。锚杆锚固对控制围岩稳定效果突出且应用范围广泛,但锚杆与节理岩体之间的力学作用机理难以准确把握,锚固节理岩体力学行为不明确,因此,探究复杂环境下深部节理岩体锚固机制对完善锚固理论和解决支护工程实践问题具有重要意义。节理岩体是岩体稳定的主要控制因素,认识节理岩体在疲劳荷载下的能量演化与变形规律,对研究岩土工程在地震、库水周期性升降等循环荷载下的稳定性具有重要意义^[1-4]。

近年来,基于循环加卸载条件下岩石变形与能量演化的相关成果较多。辛亚军等^[5]选取了2组岩石开展单轴分级加载蠕变试验,通过不同应变差值下能量耗散过程,确定岩石不同加载水平与变形模量的关系。邓华锋等^[6]进行砂岩的单轴循环加—卸载试验,得到了循环加卸载滞回圈曲线相应的变化特征,并进一步分析了加卸载过程中的总功、耗散能、能量耗散率、损伤变量等这些参数相应的变化规律。翟明磊等^[7]开展了GCTS试验对人工劈裂岩石节理进行了分级剪切-蠕变-卸载试验,通过试验探究总变形能、弹性变形能和法向应力呈正相关,并发现他们与循环级数呈指数关系。Feng等^[8]提出相应能量耗散率的指标,研究了能量耗散演化规律。Chen等^[9-10]分析了深埋碳质板岩断裂的演化规律,并分析了能量损伤演化的机制,进一步说明了其在脆性评价中应用;Meng等^[11]开展了加—卸载试验方案下岩石变形破坏过程中能量的积聚、耗散的特征,进而发现了峰前能量积累和耗散的演化规律;LI等^[12]开展花岗岩三轴实验,分析了不同加卸载应力路径下能量演化特征。

综上所述,岩石在循环加卸载作用下变形直至失稳

破坏过程中都伴随能量吸收、释放与损耗。从能量角度研究岩石变形与破坏问题,已成为岩石力学研究热点。上述研究主要集中于循环加卸载下完整岩样变形机制与能量关系分析,对于深部锚固节理岩体蠕变加载作用下突然受到地震或者爆破荷载作用下能量演化相关研究较少,深部隧道工程破坏往往不是瞬间发生的,是在蠕变大变形伴随爆破扰动和地震导致的破坏。本文为探究不同疲劳荷载下锚固岩体的剪切力学特性,通过改变疲劳荷载中的疲劳频率、疲劳幅值和疲劳次数对锚固岩体的蠕变-疲劳特性及能量演化规律进行研究。

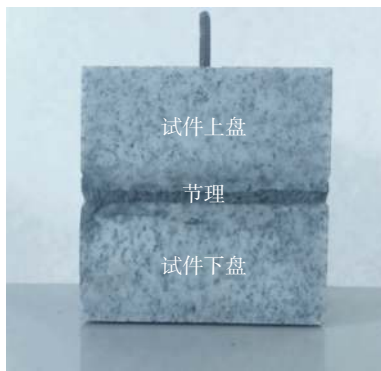
1 剪切蠕变试验

1.1 试件制备

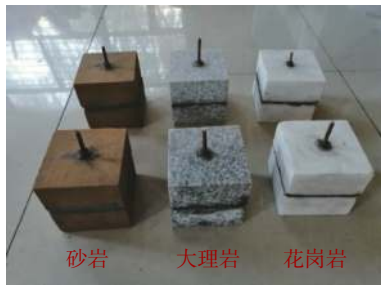
本文选取大理岩、花岗岩、砂岩作为试验对象,试样提前钻好孔洞,孔洞的直径为10 mm,试样的尺寸规格100 mm×100 mm×50 mm(长×宽×高),根据选取试样制作节理岩体,选取同种岩石用制备好的混凝土(水泥:细沙:水:早凝剂=1:1:0.5:0.05)进行粘结,粘结处为制作的岩体节理。制作的节理为贯通节理,尺寸规格100 mm×100 mm×5 mm(长×宽×高),在制备过程中保证所有试件的节理厚度和性质基本一致。值得说明的是:为保证试验结果的可比性,三种岩性的岩石试件仅含有试验制备的贯通节理,无其他节理存在。节理试件实物如图1所示,预制节理基体24 h后,撤掉光滑PVC管,插入单头螺纹杆锚杆,锚杆材料选用Q235钢筋,直径6 mm,杆体总长110 mm,螺纹长度20 mm。上部预留10 mm螺纹,通过拧紧螺母施加预应力,其余部分与基体等长为100 mm。

1.2 试验方案

本次试验加载系统采用辽宁工程技术大学土木工程试验中心的TAW2000三轴试验仪器中的剪切装置,如图2所示,首先把预置好的试块平放到剪切装置中,进行试件剪切蠕变试验。本次实验方法是低频扰动蠕变实验。因此,试验采用分级加载方式,将试验分为3级加载,加载速率为0.5 MPa/s,各级约为试件抗压强度30%、60%、90%。节理岩体有两种工况加锚和不加锚,为了实验的准确性,更加贴合实际,采用两种分级加



(a) 标记图



(b) 实物图

图 1 试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test piece

载方案, 方案 1 : 1 ~ 2 ~ 3 kN, 方案 2 : 2 ~ 4 ~ 6 kN, 本文通过控制仪器, 采用余弦荷载输出的方式进行疲劳荷载的施加。具体循环加卸载路径如图 3 所示。



图 2 剪切装置

Fig. 2 Shearing device

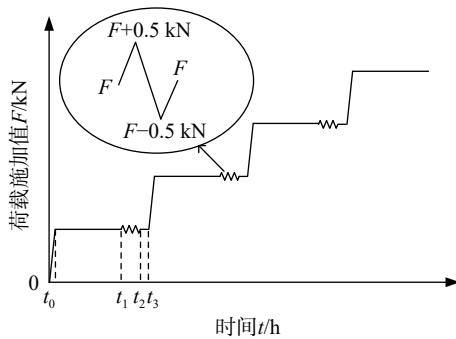


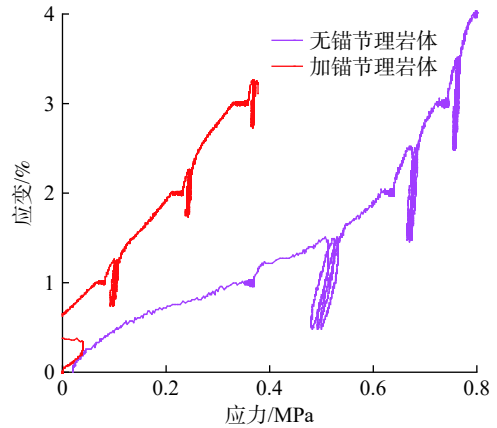
图 3 加载路径示意图

Fig. 3 Loading path diagram

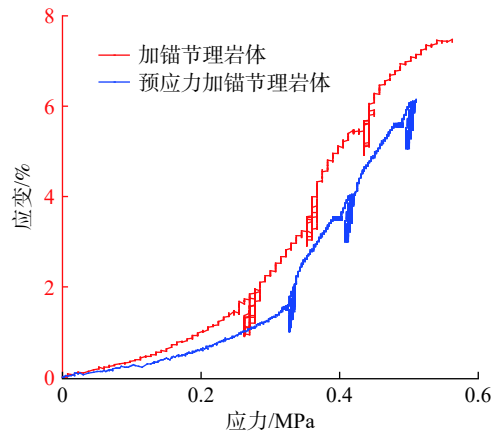
2 试验结果分析

2.1 蠕变-疲劳对试件特性的影响

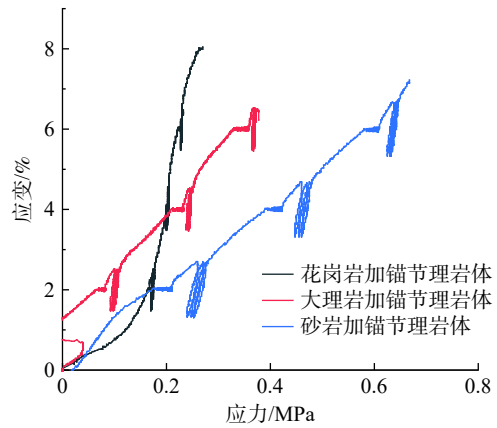
通过对节理岩体有无加锚、有无预应力及不同岩性下在蠕变-疲劳荷载作用下得到应力-应变曲线进行分析, 如图 4 所示, 其中循环加卸载试验条件: 在岩石常规分级剪切蠕变试验基础上, 在各级剪切蠕变试验后期



(a) 有、无加锚节理岩体



(b) 有、无预应力加锚节理岩体



(c) 不同岩性下的循环加卸载曲线

图 4 不同工况下岩石应力-应变曲线

Fig. 4 Rock stress-strain curve under different working conditions

施加速率分别为 20 N/S、30 N/S、40 N/S、50 N/S 的循环荷载,进而研究循环加卸载对岩石剪切蠕变的影响。

(1)为对比分析有无加锚时,节理岩体在疲劳荷载作用下滞回环面积大小。图 4(a)进行 3 个阶段循环加卸载,每一阶段循环 3 次,通过对有无加锚节理岩体分析,得到无锚和加锚得到滞回环有明显区别,在加锚情况下滞回环面积要比无锚小,即加锚节理岩体在低周循环加卸载下能量消耗小,从能量损耗角度看,节理岩体加锚时增加岩体稳定性。在每一次循环荷载作用下,形成滞回环面积不断在减少,但节理岩体不可逆变形却在不断增大,节理岩体在锚杆作用下,不可逆变形大幅度的减少。

(2)为对比有无预应力,节理岩体在疲劳荷载作用下滞回环面积大小。图 4(b)为有无施加预应力节理岩体,当施加预应力时曲线迅速上升,无预应力时趋势缓慢,随着荷载的增加,滞回环也呈阶梯型增长。有预应力时所形成的滞回环面积比无预应力少的多,可以得到施加预应力时能大幅度减少能量的损耗。

(3)对比不同岩石强度下所对应的滞回环面积大小。图 4(c)不同岩性加锚节理岩体在疲劳荷载作用下效果有明显的区别,花岗岩在每一级的循环加卸载过程中得到的滞回环面积都要比大理岩和砂岩得到的滞回环面积小,即花岗岩、大理岩、砂岩通过锚杆锚固时,从能量的消耗角度来看,花岗岩锚固效果最好,大理岩次之,砂岩锚固效果较差。岩石强度越高,其与锚杆的黏结作用越强,进而提高锚杆的锚固作用。

2.2 加卸载速率对加锚节理岩体特性的影响

为分析应变随不同加卸载速率的变化趋势,以砂岩为例,汇总砂岩每一级循环加卸载过程中的峰值应变,如图 5 所示。

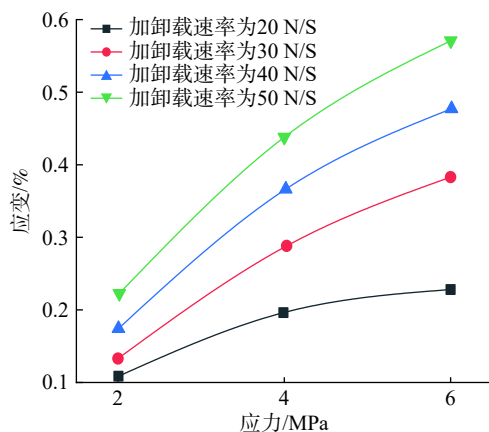


图 5 不同加卸载速率下应力-应变示意图

Fig. 5 Schematic diagram of stress-strain at different loading and unloading rates

循环加卸载为 3 级,不同的加卸载速率在每级所得的应变值是不同的,随着应力的增加,应变也在不断增加,对比不同的加卸载速率可以看出,在每一级循环加卸载过程中,加卸载速率越大得到的应变就越大,随着循环加卸载从第一级施加到第三级,速率大的应变增长快,曲线的切线斜率大,但不同的加卸载速率有共同的特点从第一级施加到第二级的斜率大于从第二级施加到第三级的斜率。

当加卸载速率一致时,随着分级的增加,剪切应变呈现出逐渐增加的趋势,但增加速率逐渐下降,随着加卸载速率的提高,剪切应力由 2 MPa 增加到 6 MPa 对应的剪切应变增量也逐渐上升,由加卸载速率为 20 N/S 的增量为 0.119,加卸载速率为 50 N/S 的增量为 0.348,增加约 2.9 倍;当剪切应力一致时,剪切应变与加卸载速率成正相关,在剪切应力为 2 MPa 处加卸载速率从 20 N/S 增加到 50 N/S 时应变的增量为 0.114 在剪切应力为 6 MPa 处加卸载速率从 20 N/S 增加到 50 N/S 时应变增量为 0.342,增加 3 倍。即得加锚节理岩体在疲劳荷载作用下,加卸载速率越大,单位时间内对加锚节理岩体的扰动尺度越显著,从而使得节理岩体裂纹扩展加剧,试件宏观裂隙发育、贯通速度提高,导致试件变形增大。

3 能量特征的分析

加锚节理岩体在疲劳荷载作用下曲线特征如图 6 所示,在循环加卸载下,加载应力-应变曲线和卸载应力-应变曲线没有重合,加载曲线位于卸载曲线上,外荷载对加锚节理岩体做功,节理岩体吸收能量,这些能量在卸载时只能释放出来一部分(弹性应变能),另一部分被消耗(消耗的是节理损伤能和塑性变形能)。加载曲线下的面积表示的是疲劳荷载过程中岩体节理吸收的能

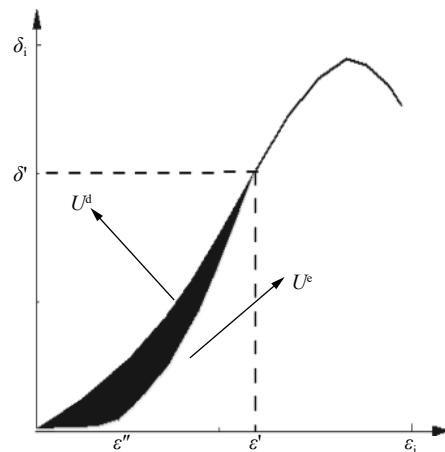


图 6 疲劳荷载作用下能量示意图

Fig. 6 Schematic diagram of energy under low-cycle cyclic load

量,卸载曲线下的面积表示岩体节理释放出来的弹性应变能,两条曲线所围成的面积,如图 6 所示即为耗散能。

从能量守恒定律可以得出:

$$U = U^d + U^e \quad (1)$$

$$U = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 + \int_0^{\epsilon_2} \sigma_2 d\epsilon_2 + \int_0^{\epsilon_3} \sigma_3 d\epsilon_3 \quad (2)$$

$$U^e = \frac{1}{2} \sigma_1 \epsilon_1^e \quad (3)$$

式中: U ——节理岩体受载荷作用下吸收的能量;
 U^e ——储存在节理岩体内部的可释放弹性应变能;
 U^d ——节理岩体所耗散的能量;
 σ_i, ϵ_i ——应力、应变值,其中 $i=1, 2, 3$;
 ϵ_1^e ——弹性应变值。

试验条件是单轴加卸载试验, $\sigma_2=\sigma_3=0$, 则式(2)可以简化为:

$$U = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 \quad (4)$$

单轴加载试验根据谢和平等^[13]的研究,式(3)可以改写成:

$$U^e = \frac{1}{2E_u} \sigma_1^2 \approx \frac{1}{2E_0} \sigma_1^2 \quad (5)$$

因此,节理岩体受载荷作用下吸收的能量 U 、储存在内部的可释放弹性应变能 U^d 与节理岩体所耗散的能量 U^e 可由式(1)(4)(5)求出,如表 1 所示:

表 1 不同岩性的能量值
 Table 1 Energy values of different lithologies

岩性	工况	岩石吸收的能量	弹性应变能	消耗能	耗能比
花岗岩	无锚	0.075 6	0.020 5	0.055 1	0.729
	加锚	0.115 2	0.075 8	0.039 4	0.342
	预应力	0.190 3	0.120 8	0.059 5	0.313
大理岩	无锚	0.060 4	0.019 8	0.040 6	0.672
	加锚	0.095 5	0.054 3	0.041 2	0.431
	预应力	0.170 5	0.102 8	0.067 7	0.397
砂岩	无锚	0.046 3	0.013 8	0.032 5	0.702
	加锚	0.096 3	0.045 9	0.050 4	0.523
	预应力	0.162 0	0.086 6	0.075 4	0.465

为更好从能量演化角度认识节理岩体变形破坏过程中的影响,对节理岩体在变形破坏中的吸收总能量、弹性应变能和耗散能随着有、无加锚及有、无预应力变化规律进行研究,如图 7 所示。

在疲劳荷载下,当花岗岩节理不做处理时,耗能比为 72.9%,加锚时耗能比为 34.2%,施加预应力时耗能比则为 31.3%,施加预应力时比无锚、加锚分别同比下降了 41.6%、2.9%,当大理岩节理无锚处理时,耗能比为

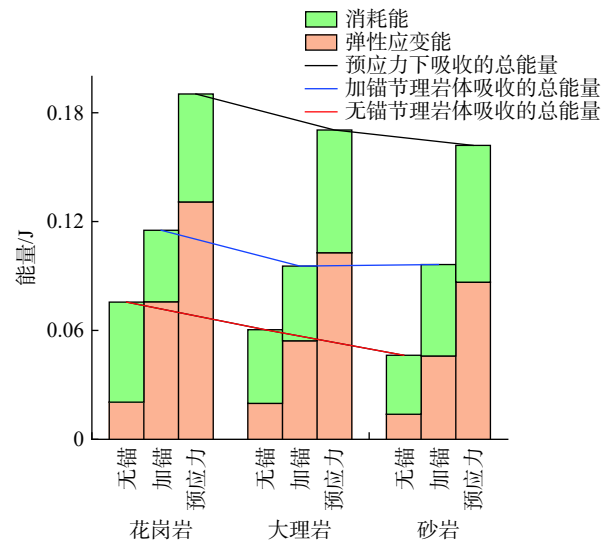


图 7 不同岩性能量值

Fig. 7 Different rock properties

67.2%,加锚时耗能比为 43.1%,施加预应力时耗能比则为 39.7%,施加预应力时比无锚、加锚分别同比下降了 24.1%、3.4%,当砂岩的节理无锚处理时,耗能比为 70.2%,加锚时耗能比为 52.3%,施加预应力时耗能比则为 46.5%,施加预应力时比无锚、加锚分别同比下降了 23.7%、5.8%,即从耗能比的角度来看,当节理岩体在疲劳荷载作用下时,施加预应力能更好的保证岩体的稳定性。对比不同的岩性发现花岗岩吸收的能量最多,其次是花岗岩,最少的是砂岩。通过图 7 可知,花岗岩在加锚预应力工况下消耗能占的比例少,验证了岩石强度越高,滞回环面积越小,能量耗散越小,即花岗岩锚固效果好。

4 基于能量耗散的损伤演化研究

4.1 损伤模型建立

岩石耗散能的积累对节理岩体产生损伤,节理岩体劣化就会导致节理岩体发生破坏,所以,就可以用能量演化过程中耗散能与节理岩体吸收能量的关系来量化岩石能量损伤。

Kachanovt^[14]提出的连续性变量 D 的概念:

$$D = \frac{A_d}{A} \quad (6)$$

式中: A_d ——实际承载面积,即截面上仍具有承载能力的所有面积;

A ——原始无损状态的截面面积。

为了避免计算试件的实际承载面积而进行复杂的统计学分析,Lemaitre^[15]在 1972 年提出了应变等效假设,将无损试件的本构方程通过等效变换建立损伤材料的本构方程,加速了损伤力学的发展进程。假设认为,

应力在受损材料上产生的应变与有效应力作用在无损伤材料上产生的应变等价, 根据这一原理提出了:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\tilde{E}} = \frac{\tilde{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{E(1-D)} \quad (7)$$

$$\sigma = E(1-D)\varepsilon \quad (8)$$

其中, $\tilde{E} = E(1-D)$ 为有效弹性模量, 即损伤材料的弹性模量。

耗散能比为:

$$U' = 1 - \frac{U^c}{U} = \frac{U^d}{U} \quad (9)$$

如图 8 所示, 对于疲劳荷载作用下节理岩体耗能比随应变演化规律进行了曲线拟合得出:

$$U'(\varepsilon) = a \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right)^b \quad (10)$$

式中: a 、 b ——公式参数;
 ε ——节理岩体应变;
 ε_f ——和峰值应变值。

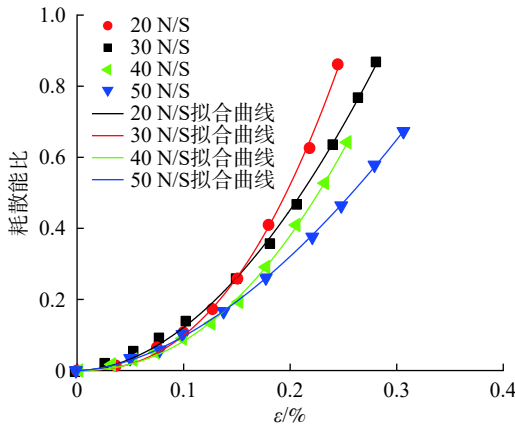


图 8 节理岩体耗能比随应变演化规律示意图

Fig. 8 Schematic diagram of evolution of energy consumption ratio of jointed rock mass with strain

如图 9 所示, 在不同加卸载速率下的峰值应变变化规律进行分析, 得出:

根据不同加卸载速率下的应变演化规律示意图符合一次函数, 选取 v 为自变量, $\varepsilon_f(v)$ 为因变量, 得到如下公式:

$$\varepsilon_f(v) = c + d \cdot v \quad (11)$$

式中: c 、 d ——系数。

将式(11)代入(10), 得到考虑疲劳速率下的耗散能的方程如下所示:

$$U'(\varepsilon, v) = a \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f(v)} \right)^b \quad (12)$$

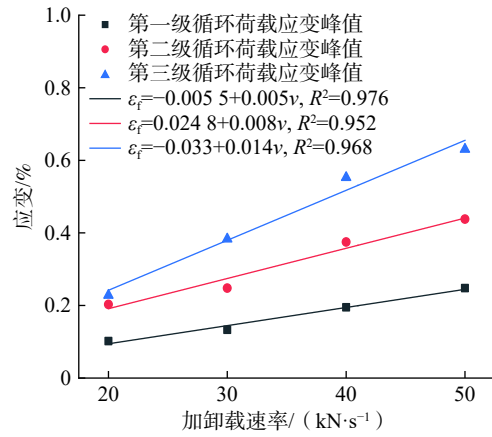


图 9 不同加卸载速率下的应变演化规律示意图

Fig. 9 Schematic diagram of strain evolution law under different loading and unloading rates

联立式(1)与(6), 可得节理岩体损伤演化方程:

$$\sigma(\varepsilon, v) = E\varepsilon(1-D(\varepsilon, v)) = E\varepsilon \left[1 - a \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f(v)} \right)^b \right] (\varepsilon \leq \varepsilon_f) \quad (13)$$

联立式(3)与式(7)得出节理岩体峰值应变前的损伤本构方程:

$$\begin{aligned} \sigma(\varepsilon, v) &= E\varepsilon(1-D(\varepsilon, v)) \\ &= E\varepsilon \left[1 - a \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f(v)} \right)^b \right] (\varepsilon \leq \varepsilon_f) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: a ——衡量节理岩体损伤程度的物理量;
 b ——表征节理岩体损伤状态的物理量;
 c 、 d ——模型的相关系数。

4.2 参数求解及模型验证

为求解损伤本构方程相关参数, 结合试验数据, 基于 Origin 软件的非线性最小二乘法功能^[16], 给出式(14)在不同情况下的求解方法, 如表 2 所示:

通过对表 2 分析可知:

(1) 参数 a 与加卸载速率近似呈现出抛物线形变化趋势, 符合二次函数变化规律, 并且随着岩石强度的增加而逐渐提高;

(2) 参数 b 随着加卸载速率的增加而表现为先提高后降低的变化, 符合二次函数变化规律, 参数 b 与岩性无明显规律;

(3) 参数 c 随着加卸载速率的增加表现为先下降而后上升的变化, 近似符合三次函数变化规律, 参数 c 与岩石强度的规律性不明显;

(4) 参数 d 与加卸载速率服从线性变化关系, 且岩石强度越高, 参数 d 越大。将室内试验结果与本构模型对应的应力应变曲线进行对比, 如图 10 所示。

表 2 拟合曲线的相关参数
Table 2 Related parameters of fitting curve

岩样	加卸载速率/(N·s ⁻¹)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ₁ ²	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ₂ ²	<i>ε</i> _f	<i>R</i> ²
砂岩	20	7.80	1.898	0.998 3	-0.005 5	0.005	0.976	0.385	0.946
	30	21.59	2.404	0.998 5	-0.033	0.008	0.952	0.320	0.956
	40	14.41	2.199	0.998 5	0.024 8	0.012	0.968	0.295	0.967
	50	4.46	1.737	0.999 6	0.036 4	0.014	0.972	0.285	0.973
大理岩	20	10.38	1.934	0.998 2	-0.003 5	0.006	0.965	0.410	0.972
	30	23.92	2.274	0.999 1	-0.028	0.009	0.958	0.359	0.981
	40	15.79	2.107	0.998 7	0.029 3	0.012	0.967	0.297	0.964
花岗岩	50	6.35	1.825	0.999 5	0.041 5	0.015	0.957	0.283	0.953
	20	11.95	1.746	0.998 6	-0.004 7	0.008	0.964	0.395	0.943
	30	25.78	2.524	0.998 7	-0.029	0.010	0.981	0.374	0.946
	40	17.31	2.126	0.998 5	0.031 7	0.012	0.972	0.365	0.975
	50	7.86	1.809	0.999 8	0.043 4	0.015	0.961	0.299	0.954

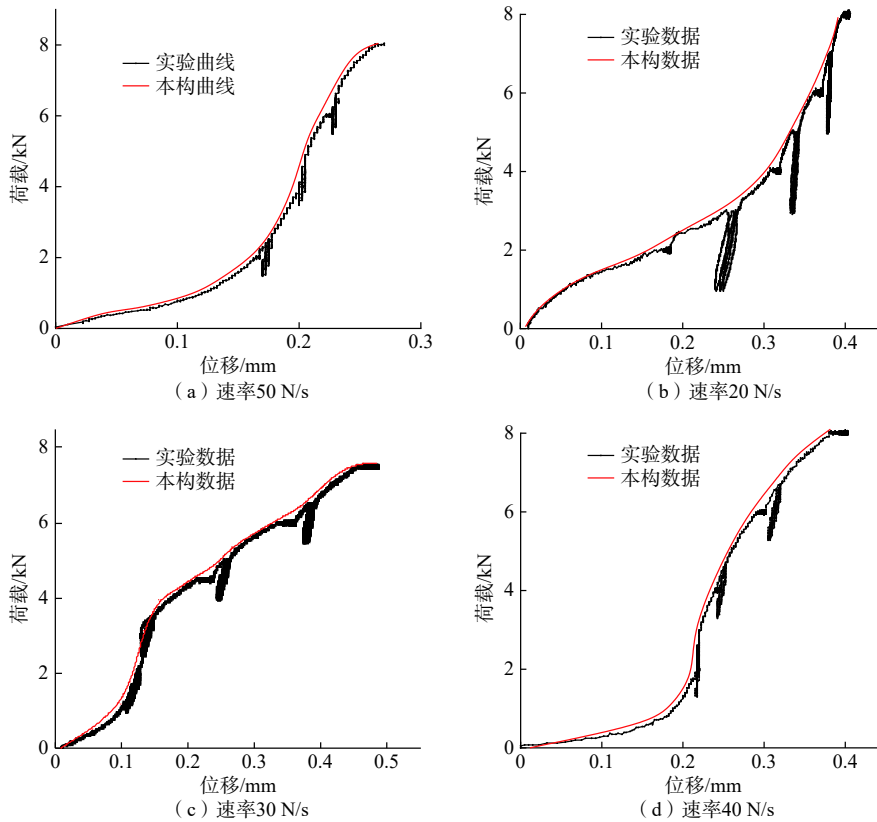


图 10 试验曲线与损伤本构方程曲线比较

Fig. 10 Comparing the curves of the test curve and damage constitutive equation

用能量演化过程中耗散能与节理岩体吸收能量的关系来量化节理岩体量损伤,得到了耗散能与加、卸载速率的演化关系,通过 Origin 软件进行二维曲面拟合的得到损伤变量方程考虑加、卸载速率对节理岩体的劣化作用,依据应变等价原理,得出节理岩体峰前损伤本构方程,通过拟合系数均高于 0.94 可知损伤模型与试验曲线的吻合程度较高,模型能够较好反映深部岩体变形破坏规律。

5 结论

(1)通过对比有无加锚,说明加锚节理岩体在疲劳荷载下滞回环面积比无锚节理岩体小,即加锚减少能量损耗。对比有无施加预应力下滞回环的面积,当施加预应力时滞回环面积大幅度减少,即预应力能减少节理岩体在疲劳荷载下能量损耗。

(2)试验用花岗岩、大理岩、砂岩三种不同的岩石,通过实验数据发现花岗岩的锚固效果最佳,大理岩次

之,砂岩最差,发现岩石强度越高,滞回环面积越小,能量耗散越小,反之能量耗散越大,即在疲劳荷载作用下岩石强度越高,其锚固效果越好。

(3)通过对比不同的加卸载速率,在每一级循环加卸载过程中,加卸载速率越大得到应变值就越大,随着循环加卸载从第一级施加到第三级,速率大的应变增长快,曲线的切线斜率大,但不同的加卸载速率有共同的特点在第一阶段切线斜率大于第二阶段切线斜率。

(4)通过考虑不同的加卸载速率对节理岩体劣化作用,依据应变等价原理,得出节理岩体峰前损伤本构方程,并通过试验验证模型的准确性,该研究为深部岩体结构支护提供思路。

参考文献(References):

- [1] 陈旭光,张强勇. 岩石剪切破坏过程的能量耗散和释放研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(2): 179-184. [CHEN Xuguang, ZHANG Qiangyong. Research on the energy dissipation and release in the process of rock shear failure [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(2): 179-184. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 陈子全,何川,吴迪,等. 深埋碳质千枚岩力学特性及其能量损伤演化机制 [J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 445-456. [CHEN Ziquan, HE Chuan, WU Di, et al. Mechanical properties and energy damage evolution mechanism of deep-buried carbonaceous phyllite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 445-456. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 宋洋,任萌,张维东,等. 非贯通非共面凝灰岩节理岩体各向异性及其能量特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 126-132. [SONG Yang, REN Meng, ZHANG Weidong, et al. Analysis of anisotropy and energy characteristics of tuffs with non-penetrating joints [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 126-132. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 李安润,邓辉,王红娟,等. 水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 106-113. [LI Anrun, DENG Hui, WANG Hongjuan, et al. Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 106-113. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 辛亚军,李梦远. 岩石分级加载蠕变的能量耗散与变形机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊1): 2883-2897. [XIN Yajun, LI Mengyuan. Study on deformation mechanism and energy dissipation of rock creep under step loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup 1): 2883-2897. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 邓华锋,胡玉,李建林,等. 循环加卸载过程中砂岩能量耗散演化规律 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊1): 2869-2875. [DENG Huafeng, HU Yu, LI Jianlin, et al. The evolution of sandstone energy dissipation under cyclic loading and unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup 1): 2869-2875. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 翟明磊,郭保华,李冰洋,等. 岩石节理分级剪切加载-蠕变-卸载的能量与变形特征 [J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2865-2872. [ZHAI Minglei, GUO Baohua, LI Bingyang, et al. Energy and deformation characteristics of rock joints under multi-stage shear loading-creep-unloading conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2865-2872. (in Chinese with English abstract)]
- [8] FENG J J, WANG E Y, CHEN X, et al. Energy dissipation rate: an indicator of coal deformation and failure under static and dynamic compressive loads [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(3): 397-406.
- [9] CHEN Z Q, HE C, WU D, et al. Fracture evolution and energy mechanism of deep-buried carbonaceous slate [J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(6): 1243-1260.
- [10] CHEN Z Q, HE C, MA G Y, et al. Energy damage evolution mechanism of rock and its application to brittleness evaluation [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(4): 1265-1274.
- [11] MENG Q B, ZHANG M W, ZHANG Z Z, et al. Experimental research on rock energy evolution under uniaxial cyclic loading and unloading compression [J]. Geotechnical Testing Journal, 2018, 41(4): 20170233.
- [12] LI D Y, SUN Z, XIE T, et al. Energy evolution characteristics of hard rock during triaxial failure with different loading and unloading paths [J]. Engineering Geology, 2017, 228: 270-281.
- [13] 谢和平,彭瑞东,鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3565-3570. [XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3565-3570. (in Chinese with English abstract)]
- [14] KACHANOV M. On the time to failure under creep conditions [J]. Izv An sssr Otd Tekhn Nauk, 1958, 8(2): 26-31.
- [15] JEAN L. A continuous damage mechanics model for ductile fracture [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1985, 107(1): 83-89.
- [16] WEN T, TANG H M, MA J W, et al. Energy analysis of the deformation and failure process of sandstone and damage constitutive model [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(2): 513-524.