

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20221116003

文章编号: 1672-9331(2023)02-0125-12

引用格式: 鲜振兴, 许旭堂, 杨枫, 等. 循环荷载对单裂隙岩体疲劳损伤的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(2): 125-136.

Citation: XIAN Zhenxing, XU Xutang, YANG Feng, et al. Effect of cyclic load on fatigue damage of single fracture rock mass[J]. J. Changsha Univ. Sci. Tech. (Nat. Sci.), 2023, 20(2): 125-136.

循环荷载对单裂隙岩体疲劳损伤的影响

鲜振兴¹, 许旭堂¹, 杨枫¹, 简文彬², 徐祥¹, 李光杰¹, 刘道奇¹

(1. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福州大学 岩土工程与工程地质研究所, 福建 福州 350108)

摘要:【目的】揭示单裂隙岩体在循环荷载作用下的疲劳损伤演化规律, 研究更便于实际工程应用的损伤变量计算方法。【方法】通过开展基于声波测试的模型岩体疲劳试验研究, 分析了不同循环次数比、不同单裂隙角度下试样的波速降低率、初始损伤及损伤变量的变化规律; 提出不同角度单裂隙岩体的非线性疲劳累积损伤模型。【结果】随着裂隙角度的增加, 模型试样的初始波速降低率及初始损伤呈非线性“S”形增大趋势; 在循环荷载作用下单裂隙岩体波速降低率具有明显的三阶段衰减特征, 初始衰减阶段、稳定衰减阶段及加速衰减阶段的疲劳寿命比例约为2:7:1; 在循环次数比相同的情况下, 岩体的疲劳累积损伤演化随裂隙角度的增大呈加速趋势, 但在加速衰减阶段却呈减速趋势; 单裂隙岩体疲劳寿命与裂隙角度的关系曲线呈“V”字形, 在循环荷载作用下45°单裂隙岩体损伤变量增长最快, 且在加速衰减阶段疲劳寿命占比最小, 最易发生拉伸-压剪裂纹混合的“X”形裂纹破坏。【结论】在裂隙角度为30°~90°时, 若在岩体疲劳破坏前用名义损伤替代实际总损伤, 名义损伤偏大; 若在疲劳破坏阶段用名义损伤替代实际总损伤, 名义损伤偏小; 当失稳比例因子一定时, 失稳因子及收敛因子均随裂隙角度的增加呈单调递增趋势。

关键词: 道路工程; 循环荷载; 单裂隙岩体; 疲劳损伤演化; 损伤变量; 波速降低率

中图分类号: P642

文献标志码: A

0 引言

受地质构造运动的影响, 天然岩体内部会存在大量原生裂隙、孔洞等缺陷, 呈现出非均质性、非连续性及各向异性等特点^[1-3]。山区公路边坡工程中的裂隙岩体在各种循环动荷载的反复作用下, 其内部缺陷不断萌生、扩展, 岩体抵抗外荷载的能力因其物理力学性质的持续劣化而不断衰减, 这导致边坡在较低应力水平下就发生显著累积变形, 并最终发生疲劳失稳破坏^[4-7]。因此, 研究循环荷载作用下裂隙岩体疲劳损伤特性及其演化规律, 对山区公路边坡工程中岩体疲劳损伤的诊断以及岩体抗疲劳设计参数的选取具有重要的工程参考价值。

当前, 表征岩体内部损伤的常用方法有: 耗散能量法、弹性模量法、声发射累计计数法、残余强度法及超声波波速法等^[3,8-13]。张亮等^[9]基于岩石能量耗散理论和室内试验数据, 讨论了裂隙长度变化对单裂隙岩体内部能量演化机制及能量损伤演化规律的影响, 而对影响裂隙岩体能量演化机制的其他重要几何参数(如裂隙角度、数量及位置等)并未涉及; 马秋峰等^[10]将损伤变量定义为耗散能与损伤耗能率的比值, 结合弹塑性损伤本构模型, 揭示了不同围压下岩体的损伤演化规律, 但该模型的参数过于复杂; 张超等^[11]讨论了采用弹性模量法分析岩石损伤的局限性, 提出了考虑损伤应变阈值影响的岩石损伤表征变量及其演化模型, 该模型未考虑岩体初始损伤; 李树刚等^[12]建立了基于声发射累计计数法的岩石损伤模型, 重点

收稿日期: 2022-11-16; 修回日期: 2022-12-05; 接受日期: 2022-12-06

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2022J01157); 国家自然科学基金资助项目(41702288); 福建农林大学杰出青年科研人才计划项目(XJQ202014)

通信作者: 许旭堂(1986—)(ORCID: 0000-0002-7842-1433), 男, 副教授, 主要从事工程地质与岩土工程方面的研究。

E-mail: xxtmdd@163.com

分析了岩石相似材料在单轴压缩过程中的损伤特性及时空演化规律,但未分析缺陷岩体的声发射特性;YAN等^[13]建立了考虑残余强度特征的岩石微观损伤本构模型,该模型未考虑岩体压密阶段的初始损伤;LI等^[14]基于超声波波速法揭示了岩体损伤断裂过程,但未提出相应的损伤变量计算方法,也未对岩体损伤破坏过程进行定量研究。

还有学者从围压、加载速率、加载路径、体积变形量及数值分析等方面入手,深入探究了岩体的疲劳损伤演化规律^[10,15-23]。其中,XIAO等^[20]基于岩体损伤的三阶段演化规律提出的倒“S”形疲劳累积损伤模型无法体现裂隙对岩体疲劳损伤特性的影响。闫长斌^[21]基于声波变化与岩体损伤的关系,建立了以岩体声波降低率为基准量的岩体爆破累积损伤本构模型,该模型可计算损伤值,其结果可较为有效地反映岩体损伤演化规律。罗吉安等^[22]认为煤岩微元强度服从Weibull概率密度分布,并基于双剪统一强度理论构建了煤岩损伤本构模型,该模型对煤岩分级加卸载条件下的应力-应变关系具有较好的适用性。

当前有关岩石疲劳损伤特性的研究成果非常丰富,但多数是通过理论、数值分析及模型试验对完整岩体的损伤演化规律及破坏过程进行研究,而对于天然缺陷岩体的疲劳损伤,尤其是循环荷载下单裂隙岩体疲劳损伤演化规律及模型的研究较少,并且缺少对循环荷载下单裂隙岩体损伤变量计算方法的对比分析。因此,本文开展循环荷载对单裂隙岩体疲劳损伤影响的试验研究,建立基于波速变化的不同损伤变量的计算方法,讨论不同损伤变量的适用性,重点揭示不同角度单裂隙岩体的疲劳损伤演化及疲劳寿命发展规律,为科学评价动荷载作用下公路岩质边坡的长期疲劳稳定性及边坡的治理提供依据。

1 材料与试验

试验所选岩样源自福建省龙岩市某中风化粉砂岩边坡。该岩样呈块状结构,主要成分为石英、长石、方解石、高岭石。因原岩取样困难、成本高,且天然岩体具有不均匀性及各向异性,故本研究基于相似理论开展室内模型试验,采用由砂、水泥和石膏配制的相似材料模拟粉砂岩。当砂、水泥和石膏的质量比为3.0:0.4:0.6时,模型试样可较

好地满足几何相似比为10.0、重力相似比为1.5的相似配比要求。粉砂岩及模型试样的主要物理力学参数见表1。

表1 粉砂岩及模型试样的主要物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of siltstone and model specimens

试样	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松 比	内聚 力/MPa	内摩擦 角/(°)
粉砂岩	2.65	10.00	0.22	9.60	42
模型 试样	1.76	1.55	0.19	0.62	40

单裂隙岩体模型所需的立方体模具尺寸为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm。在制作试样时,首先在立方体模具上涂抹凡士林,在配比称重后的砂、水泥和石膏中加入质量分数为1%的硼砂溶液并搅拌均匀,随后分层压实并预设裂隙,直至压制成型并在硬化后拆模,在将成型试样置于自然环境中养护至完全干燥后,即可开展相关试验。为了模拟单裂隙岩体,在浇筑模型试样时,将涂有凡士林的厚约0.5 mm的钢片嵌入模型,形成竖直穿透模型试样的裂隙,在试样凝结初期将钢片拔出。因石膏具有膨胀特性,在凝结后期裂缝开度缩小,直至几乎闭合,从而形成不完全黏结的单裂隙岩体模型试样。本次试验共制作了无裂隙及裂隙(单裂隙)角度分别为0°、30°、45°、60°、90°的6组岩体试样,用 α 表示裂隙与水平方向的夹角(锐角或直角)。成型后的单裂隙岩体试样如图1所示。



(a) $\alpha=0^\circ$ (b) $\alpha=30^\circ$ (c) $\alpha=45^\circ$ (d) $\alpha=60^\circ$ (e) $\alpha=90^\circ$

图1 不同角度单裂隙岩体试样

Fig. 1 Rock specimens with different angle single fracture

疲劳试验所用设备为电液伺服疲劳试验机,如图2(a)所示。采用应力控制加载方式施加单轴循环荷载来模拟交通动荷载,所施加的简谐荷载的加载曲线为正弦曲线,频率为5 Hz,疲劳下限应力为0 MPa,上限应力 $S_{\max}=1.6$ MPa,为模型试样单轴抗压强度的80%。在试验时,由下限应力加载至上限应力后,开始循环往复单轴加载,直至试样发生疲劳损伤破坏。在整个疲劳试验过程中,借助图2(b)所示的WSD-3数字声波检测仪实时在线跟踪测试模型两侧声波的纵波波速。



(a) 电液伺服疲劳试验机



(b) WSD-3 数字声波检测仪

图2 基于声波测试的模型试样疲劳试验

Fig. 2 Fatigue test of model specimens based on acoustic testing

2 基于波速变化的损伤变量计算方法

在循环荷载作用下,岩体内部的损伤机制十分复杂。现有研究表明^[21,24]:声波波速的变化能有效反映岩体内部的损伤,其中,损伤变量与纵波波速的关系可表示为:

$$D = 1 - \left(1 - \frac{v_0 - v}{v_0}\right)^2 = 1 - (1 - \eta)^2 \quad (1)$$

式中: D 为工程上常用的损伤变量,即名义损伤; v 、 v_0 分别为受损和无损岩体纵波波速; $\eta = (v_0 - v)/v_0$,为波速降低率。

天然岩体内部常存在缺陷,即岩体自身存在初始损伤。基于声波波速的变化,可将初始损伤表示为:

$$D_c = 1 - \left(1 - \frac{v_0 - v_c}{v_0}\right)^2 = 1 - (1 - \eta_c)^2 \quad (2)$$

式中: D_c 为初始损伤; v_c 为岩体在承受疲劳荷载前的初始纵波波速; $\eta_c = (v_c - v_0)/v_0$,为初始波速降低率。

在施加循环荷载后,岩体内部开始出现疲劳造成的损伤。可将考虑初始损伤的疲劳损伤表

示为:

$$D_p = 1 - \left(1 - \frac{v_c - v_p}{v_c}\right)^2 = 1 - (1 - \eta_p)^2 \quad (3)$$

式中: D_p 为疲劳损伤; v_p 为循环荷载作用下岩体纵波波速; $\eta_p = (v_p - v_c)/v_c$,为疲劳波速降低率。

岩体的实际总损伤 D_t 为初始损伤 D_c 与疲劳损伤 D_p 的和,即:

$$D_t = D_c + D_p = 1 - (1 - \eta_c)^2 + 1 - (1 - \eta_p)^2 = 2(\eta_c + \eta_p) - \eta_c^2 - \eta_p^2 \quad (4)$$

3 结果与分析

3.1 单裂隙岩体试样疲劳破坏形态

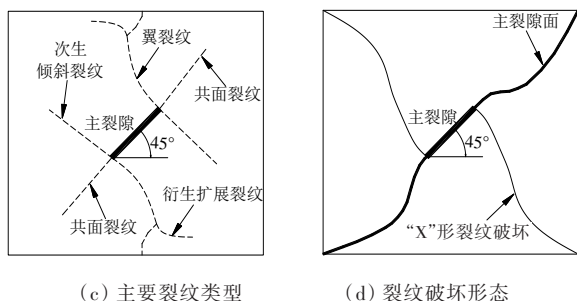
图3所示为45°单裂隙岩体试样裂纹扩展及破坏形态。由图3可知,在循环荷载作用下,单裂隙岩体试样尖端处最先开裂并产生翼裂纹,在试样边角处,与轴向夹角30°~45°的部位萌生了微小裂纹。因预设缺陷岩体裂隙尖端处为应力集中区,故起始翼裂纹主要集中在该区域,见图3(a)和3(c)。同时,在拉伸及压剪作用下,裂纹末端逐渐出现次生倾斜裂纹。在整个加载周期内,翼裂纹扩展形状由直线过渡为圆弧,裂纹表面较光滑;次生倾斜裂纹与翼裂纹方向相反并呈一定角度扩展;次生共面裂纹扩展方向与预设主裂隙方向基本一致,呈台阶或波浪状。在加载后期,翼裂纹末端逐渐出现衍生扩展裂纹,随着共面裂纹的扩张,及翼裂纹与次生倾斜裂纹的贯通,试样表面出现明显的局部鼓胀和片落现象,最终形成的4条破裂面与轴向应力方向的夹角约为45°,试样表面呈现出具有“X”形裂纹破坏形态的拉-剪混合破坏面,如图3(b)、3(d)所示。无裂隙和0°、30°、60°单裂隙岩体试样的疲劳裂纹形式及破坏形态与45°单裂隙岩体试样的类似,均存在拉伸裂纹、压剪裂纹以及“X”形裂纹破坏形态;而在90°单裂隙岩体试样上仅产生了平行于轴向应力方向的劈裂张拉裂纹,且裂纹贯通整个岩体试样。



(a) 裂纹扩展



(b) 疲劳破坏形态



(c) 主要裂纹类型 (d) 裂纹破坏形态

图3 45°单裂隙岩体试样裂纹扩展及破坏形态

Fig. 3 Fracture propagation and failure forms of 45° single fracture model specimen

3.2 波速测试结果

3.2.1 循环荷载作用下模型试样超声波波速的变化

单裂隙岩体纵波波速与循环次数比的关系如图4所示,图中循环次数比可定义为试样当前加载循环次数与破坏时的加载循环次数(即疲劳寿命)之比。从图4可以看出,在同一裂隙角度下,模型试样纵波波速随循环次数比的增大呈非线性减小趋势。受仪器精度及采集误差影响,在初始衰减阶段(OA段)前期波速具有增大的趋势,尽管岩体内部裂隙的形成原因是在循环加载初期岩体被压实,材料内部更紧实、更均一,但在此阶段后期岩体初步出现微裂纹扩展现象,表现出塑性损伤特点,此时波速整体上呈波动下降趋势;在稳定衰减阶段(AB段)波速呈持续缓慢下降趋势,持续过程较长,此时岩体内部的裂隙已基本被压实,损伤在稳定缓慢增大;在加速衰减阶段(BC段)波速快速下降,在此阶段岩体在循环荷载作用下产生破坏变形,内部裂隙进一步扩展、延伸,损伤变量快速增加,波速下降迅速,最终试样迅速损坏。

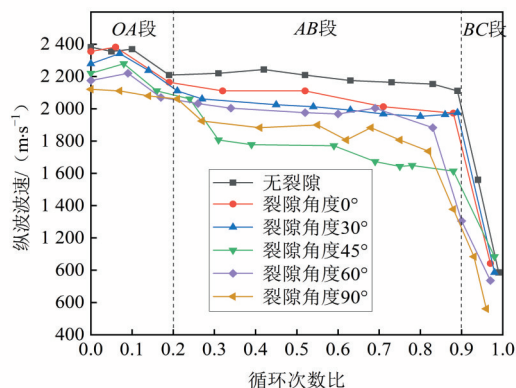


图4 单裂隙岩体纵波波速与循环次数比的关系

Fig. 4 Relationship between longitudinal wave velocity and cycle number ratio of single fracture rock mass

此外,在AB段,无裂隙及0°、30°、45°、60°、90°单裂隙岩体的平均纵波波速分别为2 010、

1 900、1 840、1 560、1 780、1 650 m/s。显然,平均纵波波速随裂隙角度的增大而整体上呈下降趋势。其中,45°单裂隙岩体的平均纵波波速明显比其他单裂隙岩体的小,最大下降幅度约为22%。

3.2.2 循环荷载作用下模型试样疲劳波速降低率的变化

模型试样疲劳波速降低率与循环次数比的关系如图5所示。

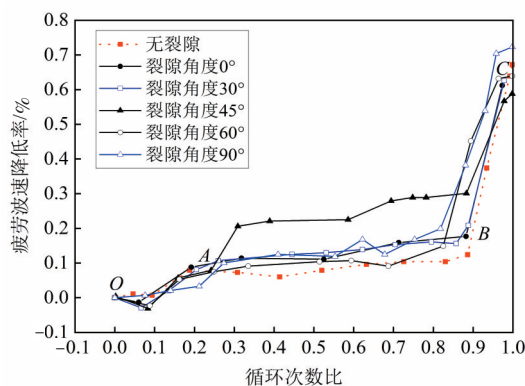


图5 疲劳波速降低率与循环次数比的关系

Fig. 5 Relationship between fatigue wave velocity reduction rate and cycle number ratio

从图5可以看出,在循环荷载作用下,不同角度单裂隙试样的波速降低率曲线随循环次数比的变化趋势基本一致,具有典型的三阶段衰减特征。在循环加载初期,单裂隙岩体需经历长时间的压实稳定阶段,这导致处于OA段的疲劳寿命的占比较大(约为20%),此时岩体受疲劳破坏程度较轻;随着细观疲劳裂纹的扩展与滋生,单裂隙岩体处于AB段的疲劳寿命的占比有所减小,但仍占很大比例(约70%),此时岩体内部受损破坏程度有所增大;处于BC段的疲劳寿命的占比约为10%。与既有研究^[20,25-27]所得结论相比,上述结论的不同之处在于:不同角度单裂隙岩体各阶段疲劳寿命的占比发生了较大改变,其中,在OA段增加了约10%,在BC段增加了约5%,而在AB段减小了约15%。在循环次数比相同的情况下,在AB、BC段有裂隙岩体的疲劳波速降低率均比无裂隙岩体的大。与其他单裂隙角度岩体相比,45°单裂隙岩体AB、BC段的疲劳波速降低率更小,且在BC段减小得最为迅速。

在循环动荷载作用下,单裂隙岩体试样的疲劳损伤破坏机制由裂隙角度、裂纹的扩展形式及“X”形拉-剪破坏面的方向决定。显然,45°单裂隙

岩体试样更易沿最大剪应力方向形成剪切破坏面。在静载条件下,无裂隙岩体的破裂面与水平面的夹角为 $45^\circ + \phi/2$ (ϕ 为岩体内摩擦角),但在循环荷载下,裂隙尖端应力集中,模型试样内部拉张裂纹萌生、扩展。在不同位置的应力达到最大主应力的过程中,逐步形成贯通的“X”形拉-剪混合破坏面,此时有裂隙试样的内摩擦角逐渐减小,这导致单裂隙岩体疲劳损伤的累积变形在裂隙角度为 45° 时达到最大,即 45° 单裂隙岩体更易发生疲劳破坏。

3.3 单裂隙岩体疲劳累积损伤演化规律

3.3.1 单裂隙岩体初始波速降低率及初始损伤

表2为不同角度单裂隙岩体的初始损伤计算结果。分析表2可知,岩体的初始波速降低率及初始损伤均随裂隙角度的增大而增大。

表2 岩体初始损伤计算结果

Table 2 Calculation results of initial damage of rock mass

α	纵波波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\eta_c/\%$	D_c
无	2 190	0.000	0.000
0°	2 170	0.913	0.018
30°	2 152	1.735	0.035
45°	2 125	2.968	0.058
60°	2 110	3.652	0.072
90°	2 080	5.022	0.098

岩体初始波速降低率与裂隙角度的拟合结果如图6所示。

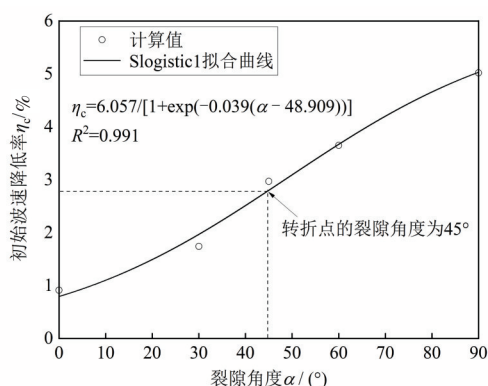


图6 初始损伤与裂隙角度的关系

Fig. 6 Relationship between initial damage and fracture angle

图6表明岩体初始波速降低率与裂隙角度的关系可用非线性“S”形递增函数 Slogistic1 表示(拟合优度 $R^2=0.991$),具体形式为:

$$\eta_c = \frac{6.057}{1 + \exp(-0.039(\alpha - 48.909))} \quad (5)$$

岩体初始波速降低率在裂隙角度为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时,非线性递增速度较快,而在裂隙角度为 $60^\circ \sim 90^\circ$ 时,非线性递增速度较慢, 45° 单裂隙岩体的初始波速降低率为转折点。结合式(2)和式(5)可知,岩体初始损伤与裂隙角度之间的关系也为非线性“S”形的递增关系。以上分析表明,在开展循环荷载作用下缺陷岩体疲劳分析时,应关注初始损伤各向异性的影响。

3.3.2 不同损伤变量计算方法的对比

结合式(1)~(4)及不同角度单裂隙试样波速变化曲线,可得不同单裂隙角度下岩体损伤变量的演化规律,如图7所示。分析图7可知,岩体损伤变量演化曲线与相应岩体的波速降低率演化曲线在形态上基本相似,从物理意义上讲,基于波速变化定义的损伤变量的计算结果应为正值,但受仪器精度及波速测量误差的影响,疲劳损伤初期名义损伤为负值,见图7(a)。循环次数比越大,同一单裂隙岩体的损伤变量也就越大,此结论和疲劳波速降低率与循环次数比关系曲线(图5)中OA、AB、BC 3个阶段的分析结论一致,损伤变量在区间 $[0, 1]$ 内随波速降低率呈单调递增变化。从整体上看,3种损伤变量的关系为:在循环次数比为 $[0, 0.854 5]$ 时,名义损伤>总损伤>疲劳损伤;在循环次数比为 $[0.854 5, 1.000 0]$ 时,总损伤>名义损伤>疲劳损伤。显然,以往不考虑初始损伤的计算方法得到的损伤变量(名义损伤)比岩体实际所受的损伤(疲劳损伤)大。当裂隙角度为 90° 时,计算得到的OA段名义损伤最大,为实际损伤的17.3倍;AB段的平均名义损伤为实际损伤的1.7倍。在OA、AB段,3种损伤变量之间的差值较大;而在BC段,这种差值有所减小,此时总损伤大于名义损伤。对于无裂隙和 0° 单裂隙试样,3种损伤的计算结果趋于一致;对于其他角度裂隙的试样,不同损伤之间的差值随循环次数比的增加而逐渐减小;但当裂隙角度增大时,这个差值会随之上升,这说明该差值与初始损伤有关。

本研究对不同单裂隙角度下用名义损伤替代实际总损伤的情况进行了讨论,结果见表3。分析表3可知,当无裂隙及单裂隙角度为 $[0^\circ, 30^\circ)$ 时,计算得到的单裂隙岩体试样的初始损伤为 $[0, 0.034)$,可用名义损伤替代实际总损伤;而当单裂隙角度为 $[30^\circ, 90^\circ]$ 时,计算得到的单裂隙岩体试

样的初始损伤为 $[0.034, 0.098]$ 。岩体在加速破坏阶段(OA 、 AB 段)前,若用名义损伤简单地替代实际总损伤,名义损伤将偏大,无法准确评估缺陷岩体在动荷载作用下的强度和稳定性;在 BC 段,若

用名义损伤简单地替代实际总损伤,名义损伤将偏小,且随着初始损伤的增大,误差也将增大,这不利于动荷载诱发裂隙岩坡疲劳失稳加固措施的选择及评价。

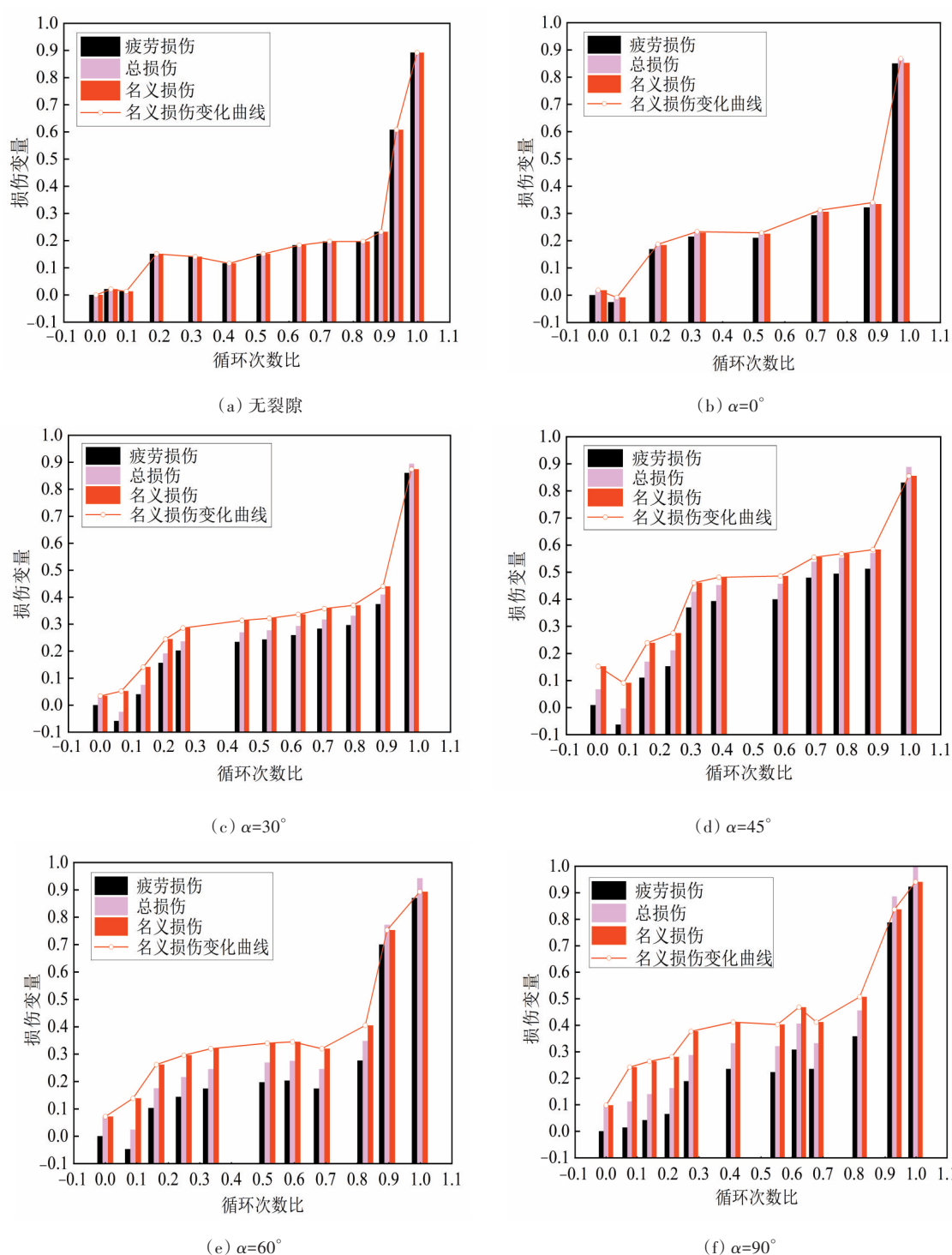


图7 不同单裂隙角度下岩体损伤变量的演化规律

Fig. 7 Evolution law of rock mass damage variables under different single fracture angles

表3 名义损伤替代实际总损伤的结果

Table 3 Results of nominal damage for replacing actual total damage

α	D_c	阶段	结论
无裂隙及 [0°,30°]	[0,0.034]	OA、AB、 BC	可用名义损伤替 代实际总损伤
[30°,90°]	[0.034,0.098]	OA、AB	名义损伤偏大
		BC	名义损伤偏小

3.3.3 不同单裂隙角度下岩体的疲劳损伤

基于损伤变量的计算结果,采用非线性倒“S”形疲劳累积损伤模型对总损伤演化曲线进行拟合,结果如图8所示。从图8可以看出,非线性倒“S”形疲劳累积损伤模型可较好地描述单裂隙岩体的疲劳损伤特性。

总损伤演化曲线的拟合公式为:

$$D_t = D_c + \omega \left(\frac{N}{\xi - N} \right)^\psi \quad (6)$$

式中: N 为广义循环次数,此处取循环次数比; ω 、 ξ 、 ψ 为参数,均为正值。其中, ω 为失稳比例因子, ω 越大,BC段的疲劳寿命所占比重越小; ψ 为收敛因子, ψ 越小,曲线收敛越快; ξ 为失稳因子,其值与 ω 有关,并受裂隙特性的影响。为了确保非线性倒“S”形疲劳累积损伤模型具有明确的物理含义,在拟合过程中剔除了因量测误差及仪器误差造成的数据异常点,如图8(a)~8(c)所示。

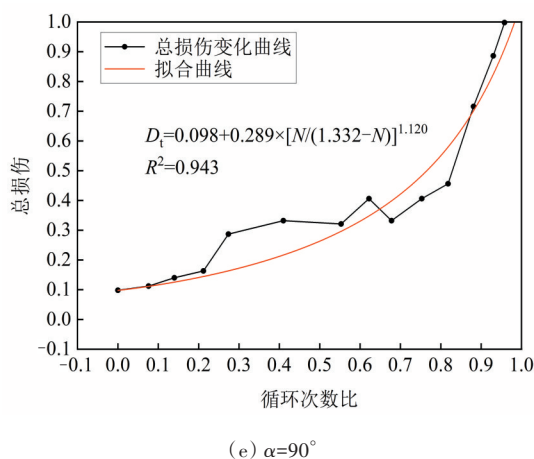
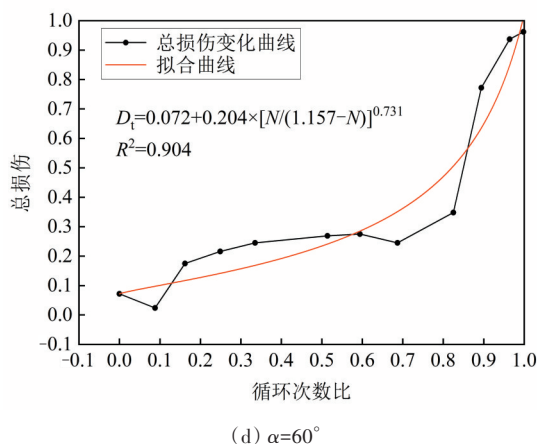
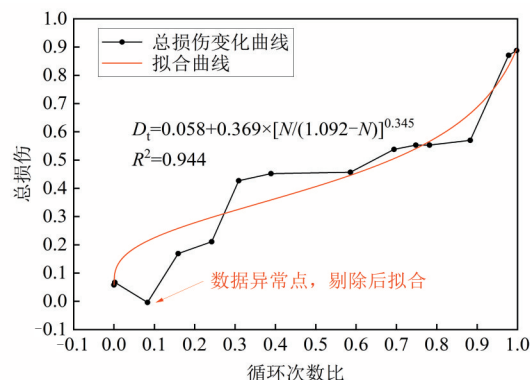
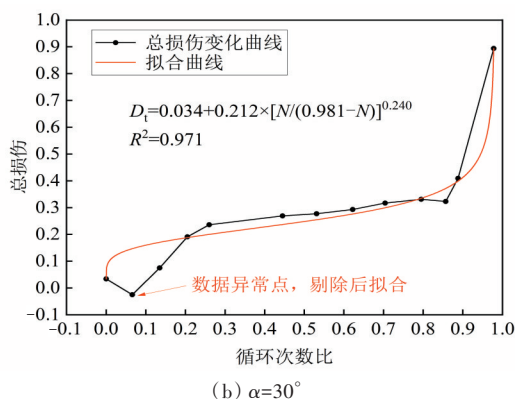
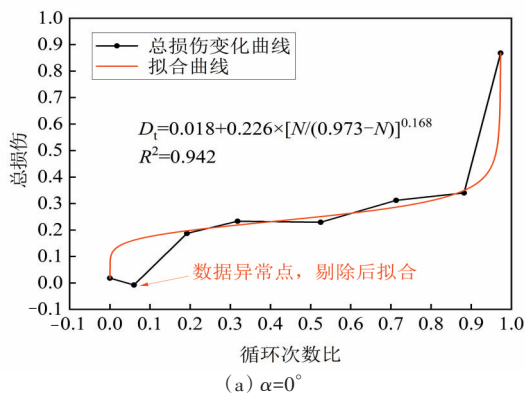
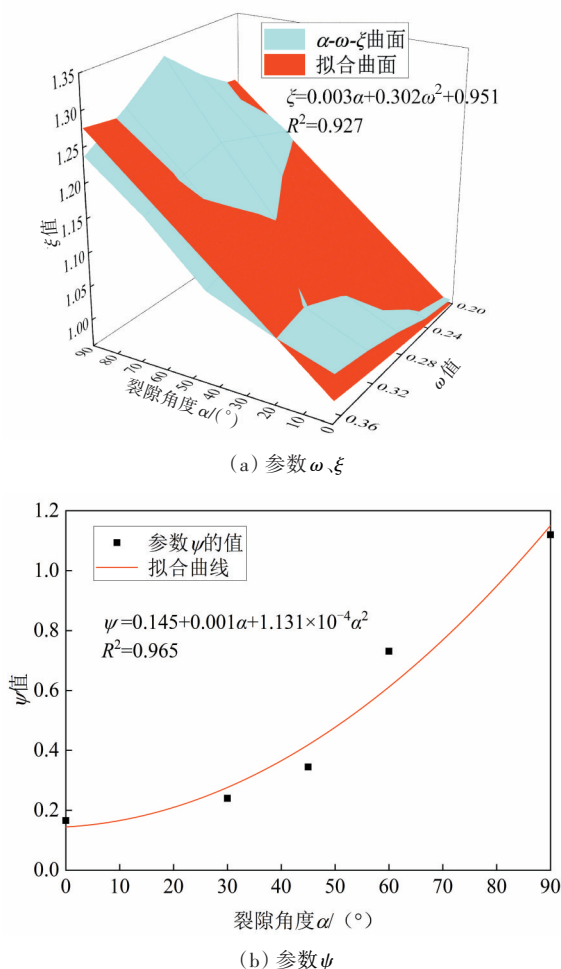


图8 不同单裂隙角度下岩体疲劳累积损伤演化曲线
Fig. 8 Fatigue cumulative damage evolution curves of rock mass under different single fracture angles

参数 ω 、 ξ 、 ψ 与裂隙角度的关系如图9所示。从图9(a)可以看出,失稳因子 ξ 及失稳比例因子 ω 与裂隙角度 α 有关,当裂隙角度 α 一定时, ξ 是 ω 的偶函数,并随 ω 的增大而单调递增;当 ω 一定时, ξ 随裂隙角度 α 的增大而线性递增。从图9(b)可以看出,收敛因子 ψ 与裂隙角度 α 之间具有二次函数关系,并随 α 的增大而增大。

图9 参数 ω 、 ξ 、 ψ 与裂隙角度的关系Fig. 9 Relationship between parameters of ω 、 ξ 、 ψ and fracture angle

各参数与裂隙角度之间的关系式如下:

$$\xi = 0.003\alpha + 0.302\omega^2 + 0.915 \quad (7)$$

$$\psi = 0.001\alpha + 1.131 \times 10^{-4}\alpha^2 + 0.145 \quad (8)$$

在实际运用时,可先通过试验获取某一单裂隙角度下岩体疲劳累积损伤演化曲线,再结合式(6)~(8),确定各个模型的参数值,预测不同角度单裂隙岩体的疲劳累积损伤演化规律。

4 讨论

4.1 单裂隙岩体疲劳累积损伤模型

与XIAO等^[20]给出的非线性倒“S”形疲劳累积损伤计算方法相比,本研究基于循环荷载作用下单裂隙岩体疲劳损伤演化规律,提出了可描述不同角度单裂隙岩体疲劳累积损伤经验模型,并尝试建立了初始损伤 D_0 、失稳因子 ξ 及失稳比例因子

ω 与裂隙角度 α 的关系,该模型能有效表征不同角度单裂隙岩体在各个疲劳阶段的损伤;与李润^[27]提出的采用Logistic方程的逆函数形式描述单裂隙岩体的疲劳损伤相比,本研究提出的模型所需参数较少(ω 、 ξ 、 ψ 及 α),且物理意义明确,对于实际工程具有更好的适用性。然而,本研究所提模型仅考虑了单裂隙角度的影响,后续需开展其他裂隙属性(数量、间距、位置、是否含填充物等)及交叉裂隙下岩体的疲劳损伤试验,进一步明确裂隙属性对岩体疲劳损伤的内在机制。

4.2 单裂隙角度对岩体疲劳损伤的影响

基于所提出的疲劳损伤经验模型,不同单裂隙角度下岩体疲劳损伤演化过程如图10所示。

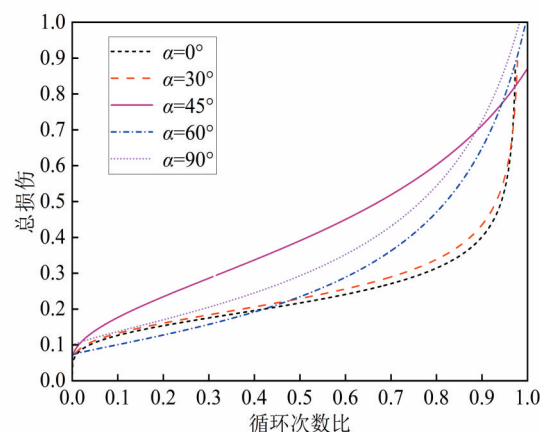


图10 不同单裂隙角度下岩体疲劳损伤演化过程

Fig. 10 Evolution process of fatigue damage of rock mass under different single fracture angles

从图10可以看出,随着裂隙角度的增大,岩体的损伤演化过程不断加快,曲线收敛速度却不断减小。当裂隙角度为 $[0^\circ, 30^\circ]$ 时,在循环荷载作用下岩体内部裂隙的水平发展程度略大于垂直压密程度,初始衰减阶段损伤变量呈现出相对较快的上升趋势; 45° 单裂隙岩体疲劳累积损伤整体上呈斜直线快速增长趋势,失稳比例因子最大,加速衰减阶段的疲劳寿命占整个疲劳寿命的比例最小;当裂隙角度为 $[60^\circ, 90^\circ]$ 时,裂隙水平扩展程度远大于垂直压密程度,在循环加载初期损伤变量迅速发展至稳定衰减阶段,在加速衰减阶段损伤变量的变化相对平缓,疲劳寿命所占比例反而有所增大。

从能量耗散角度来看,在循环荷载作用下,在

45°单裂隙岩体裂隙尖端处的应力集中区能量聚集速度最快,能量最高,而微小裂纹耗能水平有限,这导致该区域衍生出其他属性裂纹(如翼裂纹、次生倾斜裂纹及共面裂纹等),并最终沿45°最大剪应力面形成主裂隙面。随着主裂隙面的贯通,45°单裂隙岩体很快进入疲劳破坏阶段,并迅速出现“X”形裂纹破坏形态,这使得45°单裂隙岩体更易发生疲劳破坏。因此,后续的研究将从裂隙岩体物理力学特性出发,进一步开展基于能量耗散理论的缺陷岩体能量损伤演化机制及塑性-损伤本构模型的研究。

4.3 裂隙角度对岩体疲劳寿命的影响

裂隙岩体疲劳寿命对于工程岩体的稳定性及耐久性具有重要的意义,在本试验中引入的预设裂隙对模型试样疲劳寿命也有显著影响。当上限应力为1.6 MPa时,试样的平均疲劳寿命随裂隙角度的变化曲线如图11所示。

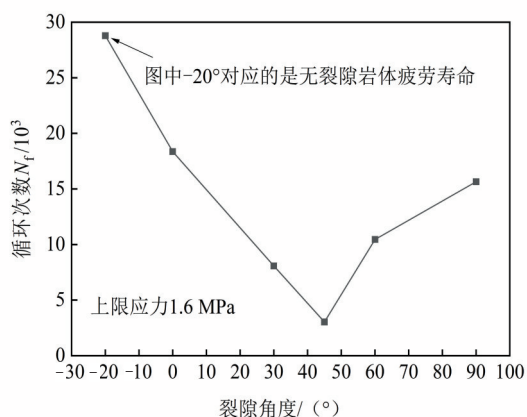


图11 裂隙角度对试样平均疲劳寿命的影响

Fig. 11 Effect of fracture angle on mean fatigue life of specimen

从图11可以看出,裂隙角度与试样平均疲劳寿命(循环次数)的关系曲线呈“V”字形,当裂隙角度小于45°时,单裂隙岩体试样的平均疲劳寿命随着裂隙角度的增大而减小;当裂隙角度大于45°时,试样的平均疲劳寿命随裂隙角度的增大而增大,但增加幅度缓慢减小;当裂隙角度为45°时,单裂隙岩体试样的平均疲劳寿命最小。0°~45°单裂隙岩体疲劳寿命的下降幅度比45°~90°单裂隙岩体疲劳寿命的增加幅度大得多。试验所测疲劳寿命是微裂纹萌生及扩展的结果,与其他单裂隙角度岩体相比,在循环荷载作用下,45°单裂隙岩体

不仅产生拉伸裂纹,而且产生鲜明的压剪裂纹,这导致其疲劳寿命最低。此外,上限应力水平作为影响疲劳寿命的主要因素,后续研究可开展不同上限应力水平下缺陷岩体疲劳损伤特性试验,获取模型试样疲劳寿命曲线,结合荷载谱和岩体动力响应特性,在疲劳累积损伤理论及疲劳裂纹扩展理论框架下估算模型试样剩余疲劳寿命。

5 结论

1) 单裂隙岩体疲劳特性对天然岩坡长期稳定性有显著影响。试验研究表明,单裂隙岩体的初始波速降低率及初始损伤均随裂隙角度的增大而增大,递增曲线呈非线性“S”形;在循环荷载作用下,基于波速降低率的单裂隙岩体的疲劳损伤具有三阶段衰减特征,与混凝土材料、完整粉砂岩及其他节理岩体相比,不同角度单裂隙岩体初始衰减阶段及加速衰减阶段疲劳寿命的占比有所增加,并分别占20%、10%,稳定衰减阶段的疲劳寿命的占比为70%。

2) 在裂隙角度相同的情况下,岩体损伤变量随循环次数比的增大而增大;在循环次数比相同的情况下,随着裂隙角度的增大,在岩体损伤演化阶段中的加速衰减阶段,曲线收敛速度不断减小。单裂隙模型试样的疲劳寿命整体上随着裂隙角度的增加呈“V”字形变化,其中,45°单裂隙岩体的疲劳寿命最小,其在加速衰减阶段的占比也最小。因而45°单裂隙岩体最易发生拉伸-压剪裂纹混合的“X”形裂纹破坏。

3) 不同计算方法得到的损伤变量存在差异,以往损伤变量计算方法所得计算结果与岩体实际损伤有出入,且初始损伤越大,偏差也越大。

4) 提出不同角度单裂隙岩体的非线性倒“S”形疲劳累积损伤模型。当失稳比例因子 ω 一定时,失稳因子 ξ 随裂隙角度的增加呈线性增大趋势,收敛因子 ψ 与裂隙角度之间具有非线性正相关关系。

[参考文献]

- [1] 宋洋,张峰源,李永启,等.锚固的贯通节理岩体剪切破坏特性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2020,

- 31 (5) : 133-140. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.05.18.
- SONG Yang, ZHANG Fengyuan, LI Yongqi, et al. Shear failure mode of anchored rock mass with through joints [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31 (5) : 133-140. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.05.18.
- [2] 李盛南,刘新喜,李玉,等.炭质泥岩渐进破坏过程的变形特性及损伤演化研究[J].中国公路学报,2022,35 (4) : 99-107. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.04.007.
- LI Shengnan, LIU Xinxi, LI Yu, et al. Study on the deformation characteristics and damage evolution law of the progressive failure process of carbonaceous mudstone [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35 (4) : 99-107. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.04.007.
- [3] 王贵荣,任建喜.基于三轴压缩试验的红砂岩本构模型[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(6) : 48-51. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2006.06.011.
- WANG Guirong, REN Jianxi. Constitutive model of red sandstone based on triaxial compression test [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2006, 26 (6) : 48-51. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2006.06.011.
- [4] 申艳军,杨更社,王铭,等.冻融-周期荷载下单裂隙类砂岩损伤及断裂演化试验分析[J].岩石力学与工程学报,2018,37(3) : 709-717. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1296.
- SHEN Yanjun, YANG Gengshe, WANG Ming, et al. Experiments on the damage characteristics and fracture process of single-joint quasi-sandstone under the cyclic freezing-thawing and cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (3) : 709-717. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1296.
- [5] 任松,王小书,高思娴,等.基于NMR和声发射的砂岩疲劳损伤试验研究[J].北京理工大学学报,2019,39 (8) : 792-799. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2019.08.004.
- REN Song, WANG Xiaoshu, GAO Sixian, et al. Experimental study on fatigue damage of sandstone based on NMR and acoustic emission [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(8) : 792-799. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2019.08.004.
- [6] 许旭堂,简文彬,吴能森,等.动荷载作用下山区道路边坡耐久性研究[J].长江科学院院报,2019,36(1) : 102-106. DOI: 10.11988/ckyyb.20170825.
- XU Xutang, JIAN Wenbin, WU Nengsen, et al. Durability of mountain road slope under dynamic loads [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36 (1) : 102-106. DOI: 10.11988/ckyyb.20170825.
- [7] 杨小彬,韩心星,刘恩来,等.循环加卸载下花岗岩非均匀变形演化的声发射特征试验研究[J].岩土力学,2018,39 (8) : 2732-2739. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0048.
- YANG Xiaobin, HAN Xinxing, LIU Enlai, et al. Experimental study on the acoustic emission characteristics of non-uniform deformation evolution of granite under cyclic loading and unloading test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (8) : 2732-2739. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0048.
- [8] 许旭堂,简文彬,林玫玲,等.循环荷载下含软弱夹层岩体声学特性试验研究[J].工程地质学报,2016,24 (6) : 1170-1176. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2016.06.016.
- XU Xutang, JIAN Wenbin, LIN Meiling, et al. Research on the SWCC of unsaturated natural residual soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(6) : 1170-1176. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2016.06.016.
- [9] 张亮,王桂林,雷瑞德,等.单轴压缩下不同长度单裂隙岩体能量损伤演化机制[J].中国公路学报,2021,34 (1) : 24-34. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.01.003.
- ZHANG Liang, WANG Guilin, LEI Ruide, et al. Energy damage evolution mechanism of single jointed rock mass with different lengths under uniaxial compression [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34 (1) : 24-34. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.01.003.
- [10] 马秋峰,刘志河,秦跃平,等.基于能量耗散理论的岩石塑性-损伤本构模型[J].岩土力学,2021,42(5) : 1210-1220. DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1091.
- MA Qiufeng, LIU Zhihe, QIN Yueping, et al. Rock plastic-damage constitutive model based on energy dissipation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5) : 1210-1220. DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1091.
- [11] 张超,杨楚卿,白允.岩石类脆性材料损伤演化分析及其模型方法研究[J].岩土力学,2021,42(9) : 2344-2354. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0278.
- ZHANG Chao, YANG Chuqing, BAI Yun. Investigation of damage evolution and its model of rock-like brittle materials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(9) : 2344-2354. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0278.
- [12] 李树刚,成小雨,刘超,等.单轴压缩岩石相似材料损伤特性及时空演化规律[J].煤炭学报,2017,42 (S1) : 104-111. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.1703.
- LI Shugang, CHENG Xiaoyu, LIU Chao, et al. Damage characteristics and space-time evolution law of rock similar material under uniaxial compression [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42 (S1) : 104-111. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.1703.
- [13] YAN J B, ZOU Z X, GUO S W, et al. Mechanical behavior and damage constitutive model of granodiorite in a deep buried tunnel [J]. Bulletin of

- Engineering Geology and the Environment, 2022, 81 (3): 118. DOI: 10.1007/s10064-022-02619-w.
- [14] LI H R, DONG Z K, OUYANG Z L, et al. Experimental investigation on the deformability, ultrasonic wave propagation, and acoustic emission of rock salt under triaxial compression [J]. Applied Sciences, 2019, 9(4): 635. DOI: 10.3390/app9040635.
- [15] CHEN C F, XU T, ZHOU G L, et al. Experimental investigation of influence of alternating cyclic loadings on creep behaviors of sandstone [J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2021, 25 (1): 1–19. DOI: 10.1007/s11043-019-09432-1.
- [16] 杨计先, 罗明坤, 张晓悟, 等. 循环加卸载条件下花岗岩力学特性及疲劳损伤演化研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(3): 91–98. DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20210510.001.
- YANG Jixian, LUO Mingkun, ZHANG Xiaowu, et al. Mechanical properties and fatigue damage evolution of granite under cyclic loading and unloading conditions [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(3): 91–98. DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20210510.001.
- [17] 蔡燕燕, 唐欣, 林立华, 等. 疲劳荷载下大理岩累积损伤过程的应变速率响应[J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (5): 827–836. DOI: 10.11779/CJGE202005004.
- CAI Yanyan, TANG Xin, LIN Lihua, et al. Strain rate response of damage accumulation of marble under fatigue loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42 (5): 827–836. DOI: 10.11779/CJGE202005004.
- [18] WANG Y, ZHANG B, LI B, et al. A strain-based fatigue damage model for naturally fractured marble subjected to freeze-thaw and uniaxial cyclic loads [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2021, 30 (10): 1594–1616. DOI: 10.1177/10567895211021629.
- [19] 张向东, 曲直, 李军. 考虑不同加载条件的粉砂质泥岩损伤特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29 (3): 120–126. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.03.17.
- ZHANG Xiangdong, QU Zhi, LI Jun. Damage characteristic of silty mudstone under various loading condition [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29 (3): 120–126. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.03.17.
- [20] XIAO J Q, DING D X, XU G, et al. Inverted S-shaped model for nonlinear fatigue damage of rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46 (3): 643–648. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.11.002.
- [21] 闫长斌. 基于声速变化的岩体爆破累积损伤效应[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 187–192. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.s1.056.
- YAN Changbin. Blasting damage cumulative effect of rock mass based on sound velocity variation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (S1): 187–192. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.s1.056.
- [22] 罗吉安, 何俊, 董春亮, 等. 基于双剪统一强度理论的煤岩损伤本构模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(2): 98–106. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.010.
- LUO Ji'an, HE Jun, DONG Chunliang, et al. Damage constitutive model of coal rock based on double-shear unified strength theory [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19 (2): 98–106. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.010.
- [23] 杨横涛, 林杭. 岩样单裂隙几何参数对其破坏模式与强度的影响[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(3): 26–33, 44. DOI: 10.11988/ckyyb.20171081.
- YANG Hengtao, LIN Hang. Influence of flaw parameters on the failure mode and strength of single-flawed rock specimens [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(3): 26–33, 44. DOI: 10.11988/ckyyb.20171081.
- [24] 王卫华, 张恒根, 李夕兵. 爆破荷载下岩石的拉压损伤模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52 (11): 3918–3929. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.11.014.
- WANG Weihua, ZHANG Henggen, LI Xibing. Tension-compression damage model of rock under blasting load [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52 (11): 3918–3929. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.11.014.
- [25] 赵东拂, 高海静, 杨健辉. 混凝土双轴拉压、三轴拉压变幅疲劳性能研究[J]. 工程力学, 2017, 34(8): 154–160. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.04.0286.
- ZHAO Dongfu, GAO Haijing, YANG Jianhui. Variable-amplitude fatigue properties of plain concrete under biaxial tension-compression and triaxial tension-compression-compression cyclic loading [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(8): 154–160. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.04.0286.
- [26] 樊秀峰, 吴振祥, 简文彬. 循环荷载下砂岩疲劳损伤过程的声学特性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(S1): 58–62. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.s1.035.
- FAN Xiufeng, WU Zhenxiang, JIAN Wenbin. Analysis of acoustic property of sandstone fatigue damage under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (S1): 58–62. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.s1.035.
- [27] 李润. 循环荷载作用下节理岩体边坡疲劳劣化及其锚固效应研究[D]. 福州: 福州大学, 2014.
- LI Run. Study on the fatigue degradation of jointed rock slope and its anchoring effect under cyclic loading [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014.

Effect of cyclic load on fatigue damage of single fracture rock mass

XIAN Zhenxing¹, XU Xutang¹, YANG Feng¹, JIAN Wenbin², XU Xiang¹,
LI Guangjie¹, LIU Daoqi¹

(1.College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, China;

2.Institute of Geotechnical and Geological Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to reveal the evolution law of fatigue damage of single fracture rock mass under cyclic loading, and to study the calculation method of damage variables that is more conducive to practical engineering application. [Methods] Through model rock fatigue tests based on acoustic wave velocity, the change law of wave velocity reduction rate, initial damage and damage variables under different cyclic times ratio and different single fracture angles were analyzed. A nonlinear fatigue cumulative damage model for different single fracture angles was proposed. [Findings] With the increase of the fracture angle, the decrease rate of the initial wave velocity and the initial damage of the model sample showed a nonlinear S-shaped trend. The wave velocity reduction rate of single fracture rock mass under cyclic load presented obvious three-stage attenuation characteristics, and the proportion of initial attenuation, stable attenuation and accelerated attenuation to fatigue life is about 2:7:1. At the same cycle number ratio, the fatigue cumulative damage evolution of rock mass tended to accelerate with the increase of fracture angle, but showed a decelerating trend in the accelerating attenuation stage. The relationship curve between fatigue life and fracture angle of single fracture rock mass is in "V" shape. Under cyclic loading, the damage variable of the rock mass with 45° fracture increased fastest, while the proportion of the fatigue life in the acceleration attenuation stage was the least, and the X-shaped fracture failure of the mixed tension compression shear fracture was most likely to occur. [Conclusions] If the nominal damage was substituted for the actual total damage before the fatigue failure of rock mass when the fracture was 30°~90°, the nominal damage value was larger. Once the nominal damage was replaced by the actual total damage in the fatigue failure stage, the nominal damage value was smaller. Meanwhile, a nonlinear fatigue cumulative damage model for rock masses with different single fracture angles was proposed. When the instability scale factor is constant, both the instability factor and the convergence factor show a monotonically increasing trend with the increase of the fracture angle.

Key words: road engineering; cyclic loading; single fracture rock mass; fatigue damage evolution; damage variable; wave velocity reduction rate

Manuscript received: 2022-11-16; **revised:** 2022-12-05; **accepted:** 2022-12-06

Foundation item: Project (2022J01157) supported by Natural Science Foundation of Fujian Province; Project (41702288) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (XJQ202014) supported by Outstanding Youth Fund Project of Fujian Agriculture and Forestry University

Corresponding author: XU Xutang(1986—)(ORCID:0000-0002-7842-1433), male, assistant professor, research interest: engineering geology and geotechnical engineering. E-mail: xxtmdd@163.com

(责任编辑:石月珍;校对:赵冰;英文编辑:栗淼)