

•水利与土木工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400463



本刊网刊

考虑初始压密阶段的充填节理岩石干湿循环单轴压缩损伤力学模型

柴少波¹, 宋博阳¹, 文成伍¹, 宋浪^{1,2}, 刘晋豪¹, 史雷³, 赵川³

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安交通大学 城市学院, 陕西 西安 710018; 3. 联勤保障部队 工程质量监督站, 江苏 南京 210000)

摘要: 充填节理岩石在干湿循环工况下的压缩过程出现明显的初始压密阶段, 而现有岩石损伤模型很少考虑节理充填特性, 并且不易准确描述初始压密阶段的非线性变形。鉴于此, 本文将充填节理岩石抽象为由空隙和非空隙两部分组成, 依据空隙部分的变形协调关系, 计算充填节理岩石的压密变形; 基于统计损伤理论, 以岩石微元强度为界限分析充填节理岩石的受力变形过程, 建立了充填节理岩石的压密-弹塑性单轴压缩损伤力学方程。然后, 提供了损伤力学模型中各参数的确定方法, 并依据干湿循环作用下的充填节理岩石试样压缩试验数据完成了损伤力学模型的验证以及参数分析和损伤度分析。结果表明: 干湿循环作用引起的岩样损伤程度随循环作用次数增加而逐渐提高, 表现为空隙部分占比不断增加; 由压缩作用引起的损伤逐渐滞后, 反映出充填节理岩石的环境致劣特征。本文构建的模型能够较好地分析充填节理岩石在干湿循环作用下的压缩力学性能, 具有一定的实际工程意义。

关键词: 充填节理; 初始压密变形; 损伤力学模型; 干湿循环; 累积损伤

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2025)04-0185-12

自然界中的岩体内部大都存在着裂隙或节理, 是十分复杂的天然材料。岩石力学行为及变形特性等与裂隙的闭合扩张、节理填充物的性质等息息相关^[1-3]。岩石在荷载扰动及环境作用(酸雨、干湿循环或冻融循环等)下会产生不同程度的损伤。由于岩石内部随机分布的裂隙和节理在环境侵蚀作用下不断扩展发育、侵蚀软化, 降低了岩石结构的整体性和力学稳定性, 因此研究岩石的变形破坏全过程的模拟方法和损伤特性对于岩石工程的安全防护和评估具有十分重要的意义。

近年来, 针对节理岩石损伤力学特性的研究取得了较为丰富的成果^[4-5]。室内试验层面, 研究人员针对天然形成及人工制备的完整或含裂隙和节理的岩样开展各类环境侵蚀作用下的压缩、剪切或累积冲击等一系列力学试验^[6-7], 充分揭示了环境损伤程度对不同岩性、节理分布及节理界面特性的岩石损伤力学变形行为的影响机制^[8-9]。针对含充填节理岩石试样, 柴少波^[10-11]和 Chai^[12]等进行酸性腐蚀、冻融循环及干湿循

环作用下的压缩试验和 SHPB 动态冲击试验, 研究了充填节理岩石强度和力学损伤的变化规律。为揭示岩石微观层面的裂纹演化规律, 部分学者采用数值模拟或微观扫描的方法对节理岩石在不同环境作用下的损伤变形机制和劣化规律进行了研究^[13-15]。曾超等^[16]通过 PFC 软件建立不同节理厚度的岩块数值模型, 研究了节理填充料的吻合度和节理厚度对应力波传播的影响规律。Song 等^[17]对不同节理分布的充填节理岩石进行不同围压作用下的单轴压缩试验模拟研究, 探究峰值应力和起裂应力随围压的变化规律及围压对节理岩石裂纹发展特性的影响。针对节理岩石内部裂隙演变模式, 王本鑫等^[18]采用 3D 打印和 CT 扫描 3 维重构技术研究含同种节理类型的非贯通平行四节理模型内部的破裂模式。

目前, 节理岩石的微观试验和数值模拟方面有待深入研究, 通过微观角度分析节理岩石的损伤力学特性研究方面存在微观模型参数匹配较困难和计算水平受限等问题。

收稿日期: 2024-06-13 修回日期: 2024-10-10 网络出版日期: 2024-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172302; 41902277); 陕西省重点研发计划项目(2025SF-YBXM-525); 陕西省自然科学基金项目(2025JC-YBMS-535); 陕西省教育厅科研计划项目(24JK0529)

作者简介: 柴少波(1989—), 男, 副教授, 博士生导师。研究方向: 应力波传播及岩石动力学。E-mail: shbchai@chd.edu.cn

除力学试验和数值模拟外,大量学者针对节理岩石的损伤本构开展了研究^[19-20]。学者们在最初建立本构模型时通常将岩石视为均质体^[21-22],大多只考虑岩石变形破坏过程中的部分阶段^[23-24],而实际情况下岩石细观单元强度存在很大差异。基于Krajcinovic等^[25]提出的损伤统计模型,部分学者构建了岩石微元强度度量方法^[26-27]。例如:袁小清等^[26]基于Lemaitre应变等效假设,推导出考虑节理岩石宏观细观缺陷耦合的复合损伤变量,以完整岩石的初始损伤状态作为基准损伤状态,建立了节理岩石的损伤本构模型。针对传统本构模型无法考虑节理岩石初始压密阶段非线性变形的问题,曹文贵等^[27-28]将岩石抽象为空隙和骨架部分,根据微元强度服从Weibull随机分布并基于岩石三轴应力应变试验曲线提出一种损伤软化本构模型,用于描述岩石破裂全过程。考虑到岩石受到外界环境侵蚀损伤后岩石内部裂隙发育导致弹性模量和力学强度降低等问题,李新平等^[29]针对单裂隙岩样,通过冻融循环作用和单轴压缩试验,基于统计损伤理论,建立了冻融受荷裂隙岩石的损伤劣化模型,并探究了不同裂隙长度对岩石总损伤的影响程度。Hamdi等^[30]用裂纹面积与总图像面积之比表征岩石内部损伤,并据此建立了岩石拉伸损伤模型。上述研究为构建损伤本构模型提供了方法,且本构方程能较好地描述节理岩石受环境侵蚀作用后的力学损伤性质,但目前关于充填节理岩石损伤本构模型的研究较为有限。

由于充填层相对软弱,易受到环境侵蚀劣化,因此既有试验结果表明含充填节理的岩石初始压密阶段的非线性变形较普通岩石更为明显。目前,考虑压密阶段的损伤力学模型的研究对象多为完整岩石或非充填节理岩石,对环境侵蚀作用下充填节理岩石的力学损伤研究鲜有报道。前期的相关试验研究^[10-12]揭示了含充填节理岩石试样在环境作用下的损伤劣化规律及变形力学行为,为开展充填节理岩石损伤本构模型研究提供了必要基础。因此,本文基于岩石空隙部分的变形依据,建立充填节理岩石损伤劣化模型,并通过相关试验数据验证了模型的准确性,为进一步研究含充填节理岩体损伤力学行为提供了参考。

1 充填节理岩石损伤力学模型

1.1 充填节理岩石空隙部分的宏观损伤表征

充填节理岩石中节理层和两侧岩石物理特性及几何特征差异显著。两侧岩石和充填节理内部都不均匀地分布有一定的可压缩空隙,由于充填节理具有低强度、易压缩的性质,其内部的可压缩空隙占比较大,在充填节理岩石单轴压缩试验时前期初始压密阶段

明显。

由压缩试验^[10]可知,充填节理岩石在单轴压缩过程中表现为易压缩的空隙部分首先闭合,当荷载加载到一定程度时,充填节理岩石的空隙部分闭合完成;随后,进入线弹性变形阶段,此时充填节理岩石仅发生非空隙部分的变形^[10];之后,当非空隙部分应力超过屈服应力时,充填节理岩石发生非线性变形直至发生破坏。因此,充填节理岩石的单轴压缩应力应变曲线表现出较为明显的阶段性,包含了初始压密阶段(OA)、线弹性阶段(AB)、屈服阶段(BC)、破坏阶段(CD),如图1所示。图1中, γ_0 为充填节理岩石应力应变曲线中线弹性阶段的反向延长线与应变坐标轴的交点横坐标数值。

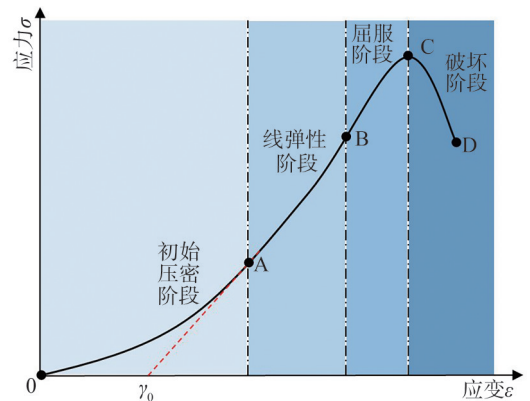


图1 充填节理岩石全过程破坏曲线

Fig. 1 Full process failure curve of filled jointed rock

将充填节理和两侧岩石抽象为具有一定分布尺寸的空隙部分和非空隙部分,如图2所示。空隙部分主要由可压缩微裂隙和天然孔隙组成,空隙部分的变形主导了应力-应变曲线前期压密阶段的变形。

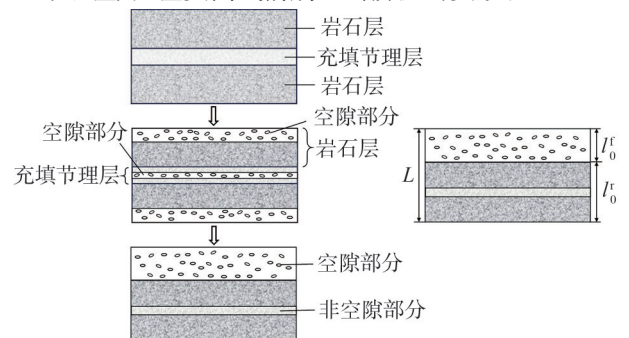


图2 充填节理岩石组成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of filled jointed rock components

如图2所示,设充填节理岩样的初始长度为 L ,充填节理岩石空隙部分的厚度为 l_0^T ,非空隙部分厚度为 l_0^R ,则

$$L = l_0^T + l_0^R \quad (1)$$

若充填节理岩石在单轴压缩作用下产生的变形量为 ΔL ,其中,非空隙部分产生的变形量为 Δl^R ,空隙

部分产生的变形量为 Δl^f ,则

$$\Delta L = \Delta l^f + \Delta l^f \quad (2)$$

充填节理岩石的宏观总应变可表示为:

$$\varepsilon_i = \Delta L/L = (\Delta l^f + \Delta l^f)/L \quad (3)$$

空隙部分和非空隙部分的应变可表示为:

$$\begin{cases} \varepsilon_i^r = \Delta l^r/l_0^r, \\ \varepsilon_i^f = \Delta l^f/l_0^f \end{cases} \quad (4)$$

令 $\gamma_0 = l_0^f/L$,计为充填节理岩石空隙部分占比。本文定义的空隙部分仅为张开微裂隙和孔隙,占比小于岩石实际孔隙率,但不影响对压密阶段曲线的计算。

利用式(1)~(4),可得到充填节理岩石宏观总应变与其各部分应变之间的关系为:

$$\varepsilon_i = (1 - \gamma_0)\varepsilon_i^r + \gamma_0\varepsilon_i^f \quad (5)$$

在应力 σ_i 作用下,充填节理岩石试验的空隙部分与非空隙部分的应变并不存在变形协调关系,而表现为:在初始压密阶段由空隙部分起主导作用;随着初始压密阶段的结束,空隙部分的变形基本完成且到达最大值,之后弹塑性阶段变形由非空隙部分决定。这与实际的应变过程是相符的^[29]。

充填节理岩石空隙部分的变形是非线性的,将压缩应力 σ_i 分为 n 级荷载并对充填节理岩石进行分级施加,则

$$\sigma_i = \sum_{s=1}^n \Delta\sigma_i^s \quad (6)$$

式中, s 代表其中任一荷载。

在压缩应力增量 $\Delta\sigma_i^s$ 作用下,充填节理岩石空隙部分的瞬时长度为 l_s^f ,则产生瞬时应变 ε_i^{fs} 可以表示为:

$$\varepsilon_i^{fs} = - \int_{l_{s-1}^f}^{l_s^f} \frac{dL}{L} = - \ln \frac{l_s^f}{l_{s-1}^f} \quad (7)$$

假定在 n 级荷载作用下,充填节理空隙部分服从广义虎克定律^[29],则瞬时应变 ε_i^{fs} 也可表示为:

$$\varepsilon_i^{fs} = \Delta\sigma_i^s/E_1 \quad (8)$$

式中, E_1 为空隙部分材料的空隙弹性模量,并认为在 n 级荷载作用下该弹性模量保持不变,将式(8)左右两侧求和得到:

$$\sum_{s=1}^n \varepsilon_i^{fs} = \sum_{s=1}^n \Delta\sigma_i^s/E_1 \quad (9)$$

将式(6)与(7)代入式(9)中可得:

$$- \ln \frac{l_n^f}{l_0^f} = \frac{\sigma_i}{E_1} \quad (10)$$

式中, l_n^f 表示第 n 级荷载的瞬时变形。

再将式(4)与(10)联立得:

$$\varepsilon_i^f = \frac{\Delta l^f}{l_0^f} = \frac{l_0^f - l_n^f}{l_0^f} = 1 - e^{-\frac{\sigma_i}{E_1}} \quad (11)$$

1.2 充填节理岩石非空隙部分力学模型

充填节理岩石中非空隙部分的变形机理和几何特征与空隙部分有很大差异。非空隙部分由岩石骨架组成,其在荷载作用下的变形包括可恢复的线弹性变形和不可恢复的塑性变形。塑性变形主要因其所受应力超过屈服强度而产生的损伤引起,会在造成裂纹扩展的同时形成新裂纹,加剧岩石的损伤劣化行为。因此,可从统计损伤力学的角度对非空隙部分的损伤进行分析。统计损伤力学法是将岩石内部损伤程度以微元强度量化,并根据岩石内部微元体损伤服从随机分布的特点,假设岩石内部损伤服从Weibull随机分布,从而建立相应的岩石统计损伤本构模型。

根据Jean^[31]提出的应变等价性假设,岩石在任何损伤状态的本构关系形式是相同的。将充填节理岩石在荷载作用下引起的损伤量视为 D ,则充填节理岩石在损伤情况下的本构关系可表示为:

$$\sigma_i = (1 - D)\sigma_i' \quad (12)$$

式中, σ_i' 表示充填节理岩石非空隙部分的名义应力。根据广义胡克定律,充填节理岩石非空隙未损伤部分的应变 $\varepsilon_i^{r'}$ 表示为:

$$\varepsilon_i^{r'} = \sigma_i'/E_2 \quad (13)$$

式中, E_2 为充填节理岩石非空隙部分的弹性模量。

充填节理岩石未损伤部分包括两侧岩石未损伤部分和充填节理岩石未损伤部分,在加载过程中两者与其损伤部分互相混合影响,但由于加载过程中岩样并未溃散,可认为非空隙部分的损伤与未损伤部分变形协调,即:

$$\varepsilon_i^r = \varepsilon_i^{r'} \quad (14)$$

将式(12)和(14)代入到式(13)中,得到充填节理岩石未损伤部分的应变关系式:

$$\varepsilon_i^r = \sigma_i/[E_2(1 - D)] \quad (15)$$

将式(15)代入式(5)中,则损伤变量 D 可表示为:

$$D = 1 - \frac{(1 - \gamma_0)\sigma_i}{E_2(\varepsilon_i - \gamma_0\varepsilon_i^f)} \quad (16)$$

当充填节理岩石结束压密阶段而进入弹塑性变形阶段时,充填节理岩石空隙部分的变形已基本完成且到达最大值,即 $\varepsilon_i^f = 1$ 。此时,损伤变量 D 可表示为:

$$D = 1 - \frac{(1 - \gamma_0)\sigma_i}{E_2(\varepsilon_i - \gamma_0)} \quad (17)$$

考虑到充填节理岩石内部缺陷的不均匀性,采用双参数Weibull分布描述充填节理损伤变量 D 的分布规律,则充填节理岩石非空隙部分的微元强度 F 表示为:

$$F = \sigma_1/(1 - D) - p_0 \quad (18)$$

式中, σ_1 为未损伤部分的峰值应力, p_0 为初始损伤参数。联立式(17)和(18), 可得微元强度 F 的另一表达式:

$$F = \frac{E_2(\varepsilon_i - \gamma_0)}{(1 - \gamma_0)} - p_0 \quad (19)$$

按照统计损伤理论, 建立非空隙部分的损伤演化表达式:

$$D = \begin{cases} 1 - \exp(-F/F_0)^m, & F \geq 0; \\ 0, & F < 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中, F_0 、 m 分别为 Weibull 分布的随机参数, 可通过对试验数据分析得到。 $F_0 < 0$ 表示充填节理岩石仅空隙部分发生变形, 对应应力应变曲线中的压密变形阶段。

将式(20)代入式(15)中, 可得到充填节理岩石非空隙部分的应变分析式:

$$\varepsilon_i^r = \begin{cases} \sigma_i / [E_2 \exp(-F/F_0)^m], & F \geq 0; \\ \sigma_i / E_2, & F < 0 \end{cases} \quad (21)$$

1.3 充填节理岩石损伤力学方程及参数确定

第 1.1 和 1.2 节分别得到了充填节理岩石空隙和非空隙部分的应变分析式, 分别如式(11)与(21)所示, 将其代入式(5)中即可得充填节理岩石全过程的损伤力学方程为:

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \gamma_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_i}{E_1}\right) \right] + \frac{(1 - \gamma_0)\sigma_i}{E_2 \exp(-F/F_0)^m}, & F \geq 0; \\ \gamma_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_i}{E_1}\right) \right] + \frac{(1 - \gamma_0)\sigma_i}{E_2}, & F < 0 \end{cases} \quad (22)$$

该力学方程包括 γ_0 、 E_1 、 E_2 、 F_0 、 m 共 5 个参数, 这些参数需从试验所得的应力应变曲线中计算获得。

1.3.1 γ_0

充填节理岩石空隙部分在低应力作用下会发生较大变形, 当充填节理岩石进入线弹性变形阶段时, 空隙部分的压密已基本完成。由式(22)可知, $1 - \exp(-\sigma_i/E_1) \rightarrow 1$ 。因此, 如图 1 所示, 单轴压缩试验曲线中线弹性阶段的延长线在应变轴上的截距即为参数 γ_0 的取值。 γ_0 代表充填节理岩石中空隙部分的体积占比, 反映了岩石中孔隙和裂缝所占的比例。随着干湿循环次数的增加, 空隙占比增大, 反映了岩石的劣化。

在压密阶段, 空隙占比直接影响压密阶段的应变特征。较大的空隙占比意味着在压密阶段需要更多的应力来闭合这些空隙, 因此该参数对压密阶段的应力应变曲线有重要影响。在屈服-硬化阶段, 空隙部分压密完成后, 空隙占比的影响逐渐减小, 但其初始值对整个变形过程的屈服点和硬化阶段起到基础性作用。在

峰后阶段, 空隙占比对峰后阶段的脆性破坏有影响, 较大的空隙占比可能导致更为明显的脆性破坏行为。

1.3.2 E_2

由于充填节理非空隙部分与岩石非空隙部分共同变形且充填节理占比较小, 可将两者的弹性模量视为相同参数。在计算非空隙部分的弹性模量时, 需要单独考虑非空隙部分的变形特征。

在单轴压缩试验压密变形阶段, 变形已基本完成, 式(22)第 2 式的右边第 1 项可写为 γ_0 , 因此可采用简化后的应变分析式计算压密变形阶段后的变形过程, 改写后的力学方程为:

$$\varepsilon_i = \gamma_0 + \frac{(1 - \gamma_0)\sigma_i}{E_2} \quad (23)$$

由于单轴压缩试验应力应变曲线上任一点的斜率均可表示为 $k = \partial\sigma/\partial\varepsilon$, 代入式(23)即可得到应力应变曲线中线弹性阶段的斜率:

$$k_1 = \frac{E_2}{1 - \gamma_0} \quad (24)$$

单轴压缩试验所获得的应力应变曲线中线弹性阶段的斜率还可以采用任意两点的纵坐标之差与横坐标之差的比值计算, 即:

$$k_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \quad (25)$$

式中, σ_1 、 σ_2 、 ε_1 和 ε_2 分别为应力应变曲线上线弹性阶段任意两点对应的应力与应变值。因此, 利用式(24)和(25)可以获得 E_2 的计算公式:

$$E_2 = \frac{(1 - \gamma_0)(\sigma_A - \sigma_B)}{\varepsilon_A - \varepsilon_B} = (1 - \gamma_0)k_1 \quad (26)$$

E_2 代表充填节理岩石中非空隙部分的刚度, 主要由岩石骨架和充填物的残留部分组成。随着干湿循环次数增加, 非空隙部分的强度和刚度逐渐降低。

在压密阶段, 由于非空隙部分的变形较小, 主要是由空隙的闭合来主导。因此, 弹性模量对压密阶段影响不大。在屈服-硬化阶段, 空隙部分压密完成后, 非空隙部分的变形开始主导, 应力逐渐升高, 此时非空隙部分的弹性模量控制了线弹性阶段的斜率和屈服阶段的开始; 在屈服点之后, 非空隙部分的弹塑性变形开始起主导作用; 峰值应力过后, 非空隙部分的破坏和裂纹扩展导致弹性模量急剧下降。

1.3.3 E_1

充填节理岩石在单轴压缩试验达到线弹性阶段前, 力学方程应满足式(22)中的第 2 式, 因此在应力应变曲线的压密阶段上任取 k 点 $[\sigma_n, \varepsilon_n]$ ($n=1, 2, \dots, k$), 采用最小二乘法拟合得到充填节理岩石空隙部分的弹性模量 E_1 。

E_1 代表充填节理岩石中空隙部分的压缩刚度,反映了空隙在应力作用下的变形能力。空隙部分主要由微裂隙和孔隙组成,在干湿循环作用下,空隙的体积和形状发生变化,导致弹性模量随循环次数的增加而降低。

在低应力作用下,空隙部分首先发生变形,弹性模量较小,表现为明显的压密效应。空隙部分的压缩行为在这个阶段起主导作用,初始的应力应变曲线由空隙变形决定。在屈服-硬化阶段,空隙部分压密完成,弹性模量变大,但其影响逐渐减弱,非空隙部分开始主导整个岩石的力学行为。峰后阶段,空隙部分变形基本结束,对整体应力应变曲线的影响较小,但在破坏过程中可能会发生二次开裂或微裂纹扩展。

1.3.4 随机分布参数 F_0 和 m

设充填节理岩石单轴压缩应力应变曲线峰值点处的应力和应变分别为 σ_u 和 ε_u , 峰值点处有:

$$\frac{\partial \sigma_u}{\partial \varepsilon_u} = 0 \quad (27)$$

将应力应变曲线峰值点处的应力应变数值代入式(22)中的第1式中,则该式简化为:

$$\varepsilon_u = \gamma_0 + \frac{(1 - \gamma_0)\sigma_u}{E_2(1 - D_u)} \quad (28)$$

式中, D_u 为曲线峰值点对应的损伤量。

将式(28)代入式(27)中得:

$$\frac{\partial D_u}{\partial \varepsilon_u} = \frac{1 - D_u}{\varepsilon_u - \gamma_0} \quad (29)$$

联立式(19)、(20)、(29)可得:

$$m = \frac{F_u(1 - D_u)}{\sigma_u \ln(1 - D_u)} \quad (30)$$

$$F_0 = F_u \left[-\ln(1 - D_u) \right]^{-1/m} \quad (31)$$

其中,

$$F_u = \frac{E_2(\varepsilon_u - \gamma_0)}{1 - \gamma_0} - p_0 \quad (32)$$

充填节理岩石从压密变形阶段进入线弹性变形阶段时,充填节理岩石非空隙部分的微元开始破坏,微元强度 F 开始逐渐增大。选取单轴压缩过程应力应变曲线中充填节理岩石空隙部分的压密阶段结束并进入线弹性变形阶段时的临界应力、应变值 σ_c 和 ε_c 进行计算,此处微元强度 $F(\sigma_c, \varepsilon_c) = 0$, 代入式(19)中可得:

$$p_0 = \frac{E_2(\varepsilon_c - \gamma_0)}{1 - \gamma_0} \quad (33)$$

综上所述,式(30)、(32)和(33)为微元强度分布参数 m 和 F_0 的计算公式。

损伤演化参数控制非空隙部分的损伤发展,主要反映岩石骨架部分的微裂纹扩展和新裂纹生成。Weibull分布的参数 m 和初始损伤参数 F_0 描述了非空隙部分损伤的演化规律。

在压密阶段,损伤演化的影响较小,非空隙部分尚未开始发生显著变形。随机分布参数在屈服和硬化阶段起主要作用。随着应力增加,非空隙部分逐渐损伤,裂纹开始扩展,损伤演化参数决定了屈服点后的硬化特征及峰值应力的高低。峰后阶段,损伤演化参数的影响尤为显著。

2 干湿循环作用下充填节理岩石的损伤特性分析

2.1 充填节理岩石的空隙变化分析

充填节理岩石在多次环境侵蚀中的损伤可分为两个尺度进行描述。首先,在环境侵蚀循环作用下,充填节理岩石可能会经过持续浸泡、水化分解、酸性腐蚀、低温收缩、升温膨胀等复杂过程,每一阶段的损伤规律都有较大差别^[10-11]。另外一个尺度为环境侵蚀循环作用次数。由于环境侵蚀损伤由多次环境侵蚀循环作用叠加而成,所以充填节理岩石内部细观缺陷的损伤演化规律十分复杂。

总的来说,在野外服役过程中,原本结构紧密、孔隙程度较低的充填节理岩石在复杂的外部环境侵蚀作用下会出现内部微裂隙体积增大、空隙部分增多。尤其是对于结构强度致密性较低的充填节理部分,损伤程度更严重。如图3所示,复杂环境侵蚀作用下的充填节理岩石空隙部分增大,从而导致单轴压缩试验的应力应变曲线压密阶段延长,即力学方程中空隙部分的占比参数增大。因此,结合充填节理岩样在干湿循环作用后的单轴压缩试验结果对第1节中提出的充填节理岩石力学模型进行应用分析。

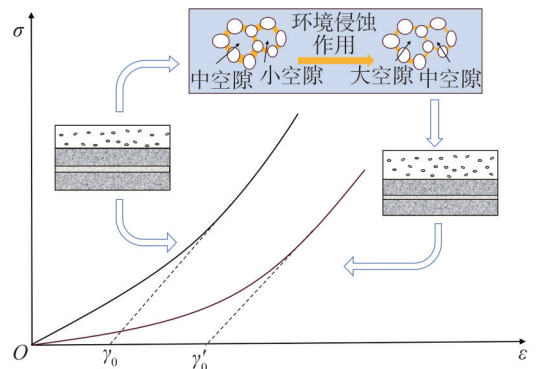


图3 干湿循环作用下空隙变化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of void changes under the action of dry-wet cycling

2.2 干湿循环试验及结果分析

2.2.1 试验方案

充填节理岩石干湿循环作用试验中岩样两侧岩石采用质地均匀,直径为 50 mm、厚度为 15 mm 的花岗岩材料;充填层为由不同配比的石灰砂浆和泥砂砂浆制成的厚 5 mm 的夹层,充填节理层的具体配合比和抗压强度参数见表 1。表 1 中,Ⅲ型充填层强度最高,Ⅰ型次之,Ⅱ型最低^[10]。

对 3 种充填节理岩样进行干湿循环作用,一次循环作用定义为:将充填节理岩石在浸泡箱中浸泡 12.0 h,自然风干 0.5 h 后,再在恒温恒湿烘箱中 60 °C 条件下

表 1 充填节理配合比参数

Tab. 1 Mix ratio parameters of filled joints

节理层	充填材料	配合比	抗压强度/kPa
I	石灰砂浆	水:石灰:砂=1:1:3	1 623
II	石灰砂浆	水:石灰:砂=1.00:1.54:1.54	1 119
III	泥砂砂浆	水:泥砂:石灰:砂=1.0:0.3:0.7:3.0	2 315

烘干 12.0 h。干湿循环试验分别循环 0、5、10 和 20 次。

对每组完成干湿循环的充填节理岩样采用 NN-48 非金属超声检测分析仪进行充填节理岩石的波速测定;随后,在 WAW31000 型万能试验机上进行单轴压缩试验,得到单轴压缩试验结果。试验流程见图 4。

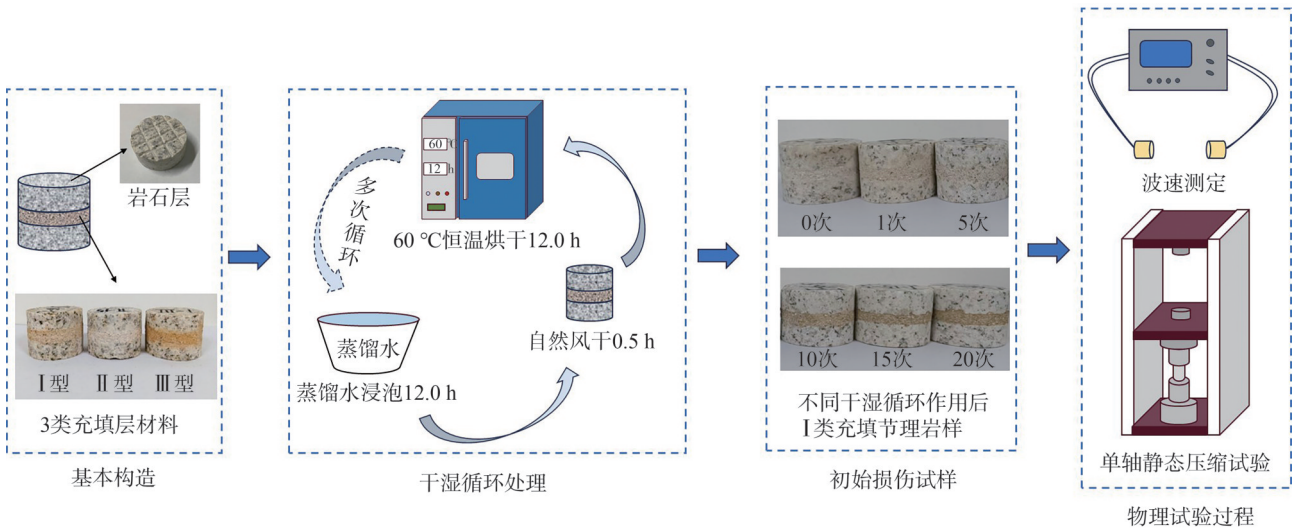


图 4 干湿循环试验流程

Fig. 4 Dry-wet cycle test flow

2.2.2 结果分析

干湿循环作用会对充填节理岩石造成不同程度的初始损伤,而波速测定作为一种无损检测手段,可以很好地表征岩石的损伤度:

$$D_n^0 = 1 - \frac{v_n^2}{v_0^2} \quad (34)$$

式中, D_n^0 为 n 次干湿循环作用后充填节理岩石的初始损伤值, v_0 为初始状态下岩样的波速值, v_n 为 n 次干湿循环作用后的波速值。测试过程中对同一充填节理岩样进行 3 次测量,取平均值作为最终波速值;通过式(34)得到多次干湿循环作用下 3 种充填节理岩石的初始损伤值,结果见表 2(岩样编号中的第 1 个数字表示充填节理岩石试样型号,第 2 个数字表示干湿循环次数,下同)。

由表 2 可知,3 种充填节理岩石的初始损伤值为Ⅲ型充填层 > Ⅰ型 > Ⅱ型。这是由于充填材料物质对干湿循环作用敏感性不同,Ⅲ型充填节理材料中含有黏土,黏土矿物对干湿循环作用敏感性高,由于黏土的收缩性和易崩解特性,在干湿循环作用下容易出现软

表 2 干湿循环作用下 3 类充填节理岩样波速值

Tab. 2 Wave velocity values of three types of filled jointed rock sample under dry-wet cycles

岩样编号	波速/(m·s ⁻¹)				初始损伤值/%
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值	
I-0	2 942	2 948	2 945	2 945	
I-5	2 595	2 595	2 595	2 595	22.36
I-10	2 561	2 550	2 545	2 552	24.91
I-20	2 491	2 483	2 499	2 491	28.46
II-0	2 718	2 730	2 754	2 734	
II-5	2 545	2 548	2 563	2 552	12.87
II-10	2 511	2 487	2 502	2 500	16.39
II-20	2 429	2 436	2 428	2 431	20.94
III-0	3 420	3 423	3 441	3 428	
III-5	2 786	2 781	2 788	2 785	34.00
III-10	2 678	2 672	2 681	2 677	39.02
III-20	2 665	2 653	2 653	2 657	39.92

化现象和裂纹萌生的情况,故强度特性劣化最为严重;而相比于 I 型充填节理, II 型充填节理中石灰占比增大,石灰的强度和稳定性比砂差,在长期反复干湿循环作用下充填节理劣化较为严重,故 II 型充填节理岩石的强度比 I 型低。

随后,对不同干湿循环次数下的3类不同充填物的岩样进行静态单轴压缩试验,得到对应的应力应变曲线。根据第1节中对力学模型参数的计算要求,从应力应变曲线中获得峰值应力及其对应的峰值应变值与压密阶段结束进入线弹性变形阶段的临界应力应变值,结果见表3。

表3 干湿循环作用下充填节理岩样峰值和临界应力应变值

Tab.3 Peak and critical stress-strain values of three types of filled jointed rock samples under dry-wet cycles

岩样编号	峰值应力 σ_u/MPa	峰值应变 $\varepsilon_u/10^{-3}$	临界应力 σ_c/MPa	临界应变 $\varepsilon_c/10^{-3}$
I-0	58.29	62.46	29.81	40.51
I-5	49.61	70.89	31.68	51.63
I-10	47.35	79.43	36.00	62.14
I-20	44.80	95.51	35.69	82.2
II-0	54.63	69.06	26.36	46.65
II-5	45.07	73.94	21.36	52.87
II-10	42.35	80.03	21.82	56.00
II-20	39.42	91.34	19.17	64.54
III-0	65.30	56.37	31.78	39.83
III-5	51.31	65.91	27.51	42.89
III-10	48.46	68.51	23.73	43.09
III-20	46.33	85.80	21.16	63.85

3 模型验证与参数分析

3.1 干湿循环模型验证

结合第2.2节的相关试验数据,采用第1.3节提出的充填节理岩石单轴压缩损伤力学模型及参数的确定方法,可以计算得到不同干湿循环次数下3种充填材料岩样的应力应变曲线模拟参数,结果见表4。

表4可以看出,3类岩石应力应变曲线拟合参数的范围比较接近,且随干湿循环作用次数的变化规律基本相同,即:随干湿循环次数的增加,充填节理岩石空隙和非空隙部分的弹性模量逐渐减小,空隙部分占比逐渐增大,表明环境侵蚀作用造成充填节理岩石内部裂隙持续发育,整体强度逐渐降低。

表4 干湿循环作用下充填节理岩样损伤模型拟合参数
Tab.4 Fitting parameters of filled jointed rock damage model under dry-wet cycles

岩样编号	E_1/MPa	E_2/GPa	γ_0	F_0	m
I-0	7.549	1.095	0.014	46.000	7.500
I-5	5.966	0.846	0.015	38.000	6.000
I-10	5.664	0.758	0.017	41.000	8.900
I-20	3.231	0.630	0.035	45.000	7.000
II-0	9.266	1.186	0.025	49.000	7.000
II-5	7.029	1.136	0.035	41.000	6.600
II-10	7.177	0.919	0.034	40.500	6.200
II-20	5.708	0.815	0.043	40.000	6.100
III-0	10.113	2.211	0.026	45.000	15.000
III-5	10.125	1.134	0.019	40.000	6.000
III-10	9.537	1.074	0.022	34.000	5.900
III-20	3.502	1.010	0.044	39.000	5.000

将表4中各工况下的模型参数代入式(22)中,可以得到充填节理压缩应力应变模拟曲线,如图5所示。由图5可以看出,本文构建的模型与试验结果拟合效果非常好,可以较好地反映不同干湿循环次数下3类充填节理岩样在单轴压缩作用下的应力应变曲线,验证了该模型的准确性。如图5所示,充填节理岩石试样在干湿循环作用下的应力应变曲线各阶段的特征变化显著,能充分体现充填节理岩石试样压缩过程中的初始压密阶段。此外,曲线反映出干湿循环作用导致充填节理岩石强度明显降低,以及因环境损伤导致空隙率增大而产生更大的变形的特征。如:在0次干湿循环作用下, I 型充填节理岩石的峰值应力为58.29 MPa,峰值应力对应的应变为0.062。而经历了20次干湿循环

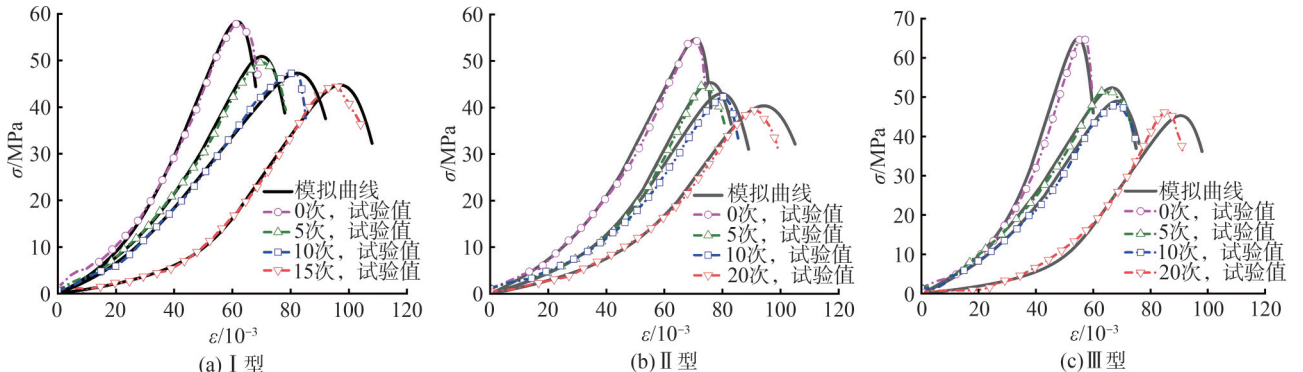


图5 不同干湿循环次数下3类充填节理岩样试验与模拟曲线结果对比

Fig. 5 Comparison of test and simulated curve results of three types of filled jointed rock under dry-wet cycles

环作用后,充填节理岩石的峰值应力为 44.80 MPa,降低了 23.16%;峰值应力对应的应变为 0.096,增加了 52.91%。

3.2 与已有模型的对比

现有关于岩石损伤本构模型的研究较多,但多针对完整岩石在不同作用下的损伤情况开展。例如:张慧梅等^[32]基于岩石内部裂隙和孔隙分布的随机性,建立了完整岩石的统计损伤模型。赵怡晴等^[21]基于变形组合元件建立了相应的节理岩体压缩损伤本构模型。两类模型均与试验数据曲线的吻合度较高。本文研究的岩样中含有充填节理层,节理层内充填物的强度较低,在轴压作用下充填节理岩石的全应力应变曲线的初始压密阶段显著。

为进一步展现本文构建的单轴压缩损伤力学模型在表征节理初始压密阶段的准确性,以 I 型充填节理岩石试样在 0、5、10 次干湿循环条件下的单轴压缩的试验数据为例,对比已有模型^[21,32]和本文模型对该组试验数据的拟合效果。根据第 2.2 节试验中峰值应力、峰值应变的数据值,采用文献[21,32]中建立的本构模型方法,对试验数据曲线进行拟合,结果如图 6 所示。由图 6 可知:已有模型^[21,32]更适用于完整岩石或节理岩石的应力应变曲线,对岩石前期的线弹性变形的拟合度较好;本文所建立的力学模型能反映不同干湿循环损伤环境下充填节理岩石的初始压密及峰值强度、峰值应变、弹性模量等特征。

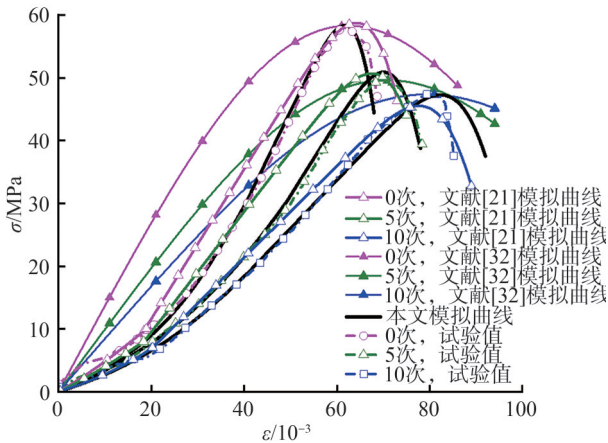


图 6 不同模型模拟值与试验值的对比

Fig. 6 Comparison between different models and experimental values

3.3 力学模型参数及损伤度分析

为研究本文模型中参数 m 和 F_0 对应力应变曲线的影响,以干湿循环 5 次的 II 型充填节理岩样的模型曲线为例,采用控制变量法,固定其中一参数,改变另一参数,分析应力应变曲线的变化规律。由于参数 m 和 F_0 仅对应力应变曲线的弹塑性阶段有影响,因此参

数分析时仅针对弹塑性阶段曲线进行讨论。图 7 为随机分布参数 F_0 和 m 对应力应变曲线的影响,曲线中未截取初始压密阶段。

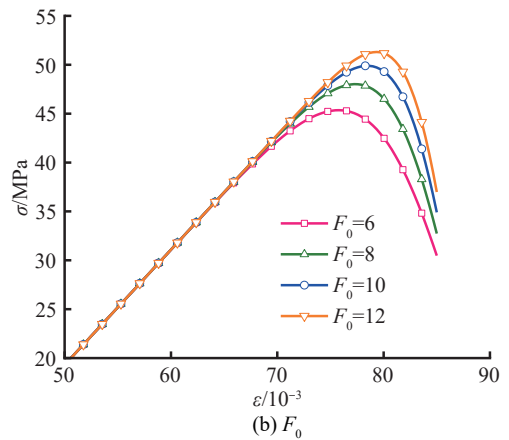
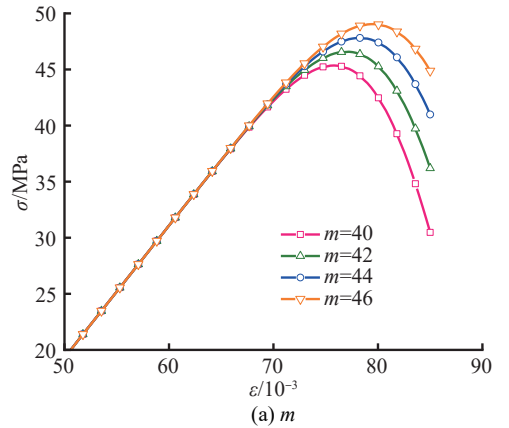


图 7 随机分布参数对应力应变曲线的影响

Fig. 7 Influence of parameters on stress-strain curves

由图 7 可知:参数 m 影响着应力应变曲线的峰值应力,对线弹性阶段斜率影响不大;峰值应力随 m 的增大而增大;随着参数 m 的增大,曲线的屈服阶段延长,充填节理岩石的强度提高。参数 F_0 同样影响应力应变曲线的峰值应力,且随参数 F_0 的增大,峰值应力逐渐增大;与参数 m 不同的是,随着参数 F_0 的增大,峰后曲线的斜率逐渐增大,这表明充填节理岩石的脆性更强,非空隙部分的微元强度分布更为集中。

干湿循环的本质是对充填节理岩石内部结构的分解溶蚀,增大了内部结构的空隙和裂隙,具体表现为充填节理岩石空隙部分占比增大以及弹性模量减小。以 I 型充填节理岩石为例,分析干湿循环次数对损伤力学模型参数的影响及损伤度变化规律,如图 8 所示。由图 8 可知,空隙部分占比随着干湿循环次数的增大而增大,空隙部分和非空隙部分弹性模量随着干湿循环次数的增加而减小。5 次干湿循环后,充填节理岩石空隙部分占比 γ_0 增长 8.63%;10 次干湿循环后 γ_0 增长 20.86%;20 次干湿循环后, γ_0 增长 149.64%。20 次

干湿循环作用下的充填节理岩石的空隙部分几乎为未遭受干湿循环作用空隙部分的2.5倍。这表明随着干湿循环次数的增加,充填节理岩石内部空隙的发育速度加快,内部空隙体积占比增大。

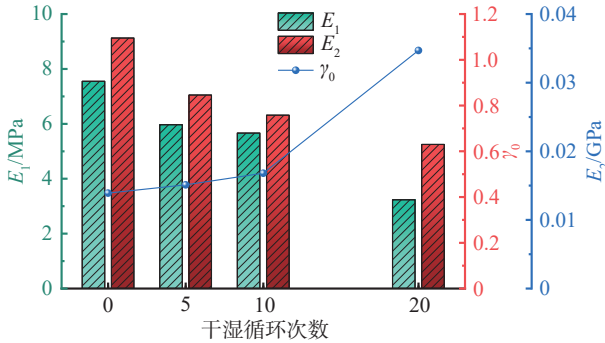


图8 干湿循环次数对模型参数的影响

Fig. 8 Influence of the number of dry-wet cycles on model parameters

空隙部分和非空隙部分的弹性模量在5次干湿循环作用后分别降低了20.97%和22.74%,降低得最多,表明充填节理岩石在干湿循环作用前期的力学损伤大于后期,多次循环作用会造成累积损伤现象。

结合表2和式(20)得到单轴压缩作用下充填节理岩石的损伤-应变曲线,如图9所示,曲线呈现出明显的“S”状走势。由图9可知,随着干湿循环次数的增加,损伤曲线整体向右移动,开始发生损伤时的应变逐渐增大,表明前期的压密阶段逐渐加长。总体来看,充填节理岩石随单轴压缩加载过程的损伤可以分为3个阶段。

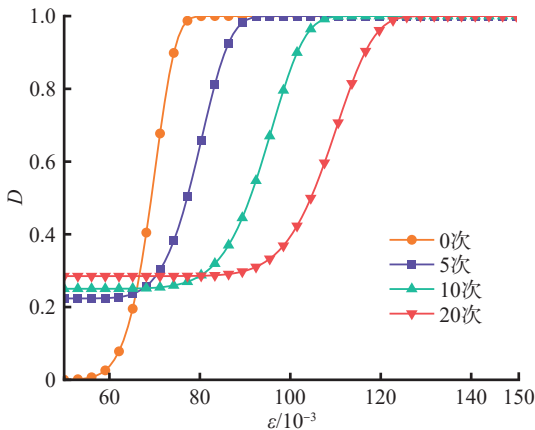


图9 不同干湿循环次数下充填节理岩石损伤-应变曲线

Fig. 9 Damage-strain curve of jointed rock filled with different dry-wet cycles

第1阶段:在初始应力加载前期,充填节理岩石的空隙部分逐渐被压缩闭合;当空隙部分变形结束,即式(22)第2式第1项为最大值时,压密阶段结束,该阶段充填节理岩石的损伤曲线呈水平直线,表明充填节理岩石压密阶段的应力损伤为0。

第2阶段:随着轴向应力的加载,损伤曲线进入线

弹性阶段,该阶段充填节理岩石非空隙部分开始产生新的裂缝,并沿着原有孔隙、弱结构面不断发展形成复杂的裂纹分布,造成损伤不断累积,直至加载应力到达峰值抗压强度,充填节理岩石非空隙部分的内部结构被破坏。

第3阶段:充填节理岩石的残余应力逐渐被释放,充填节理岩石整体被完全破坏,损伤值接近1。

4 结论

利用充填节理岩石空隙变形规律,基于不同干湿循环次数下3类不同充填物质的充填节理岩石单轴压缩试验的应力应变曲线,建立了考虑压密阶段的单轴压缩损伤力学方程,并给出了方程中参数的计算方法。通过分析力学模型参数和损伤度,探究了不同干湿循环次数下变形和损伤的变化规律,结论如下。

1)将充填节理岩石抽象为空隙和非空隙部分,基于各组成部分之间的变形关系,建立了考虑压密阶段的充填节理岩石单轴压缩损伤力学模型。本文模型能够较好地反映充填节理岩石前期的压密阶段以及后期的弹塑性变形阶段,并证明了压密模型的可靠性和有效性。

2)对充填节理岩石损伤力学模型参数分析发现,充填节理岩石损伤力学模型中参数 m 影响曲线的屈服阶段,反映了充填节理岩石的整体强度;参数 F_0 影响峰后曲线的下降速率,反映了充填节理岩石的力学性质。环境侵蚀作用对充填节理岩石微观结构的改变表现为弹性模量降低、空隙部分占比增大。

3)对不同干湿循环次数下充填节理岩石损伤度的分析表明,环境侵蚀作用对充填节理岩石的环境致劣特征明显,非线性压密变形显著,具体表现为曲线前段平台期的延长。

综上所述,本文提出的充填节理岩石单轴压缩损伤力学模型为分析岩体在干湿循环作用下的力学行为提供了理论基础。然而,模型的适用性与岩石类型及充填层的强度密切相关,为进一步验证模型的适用性和可靠性,未来的研究应考虑更多的实际工程案例,以确保该模型能够在各种复杂条件下发挥有效作用。

参考文献:

[1] Yang Renshu, Wang Maoyuan, Yang Yang, et al. Simulation material experiment on the dynamic mechanical properties of jointed rock affected by joint-filling material[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(12): 125-131. [杨仁树,王茂源,杨阳,等. 充填材料对节理岩石动力学性能影响的模拟试验[J]. 振动与冲击, 2016, 35(12): 125-131.]

[2] Liu Yi, Dai Feng, Dong Lu, et al. Experimental investigation

- on the fatigue mechanical properties of intermittently jointed rock models under cyclic uniaxial compression with different loading parameters[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,2018,51(1):47–68.
- [3] Bahaaddini M,Sharrock G,Hebblewhite B K.Numerical investigation of the effect of joint geometrical parameters on the mechanical properties of a non-persistent jointed rock mass under uniaxial compression[J]. *Computers and Geotechnics*,2013,49:206–225.
- [4] Wang Fei,Gao Mingzhong,Qiu Guan hao,et al.Pore structure and mechanical properties of red sandstone under the action of initial damage–load–freeze-thaw[J]. *Advanced Engineering Sciences*,2022,54(6):194–203.[王飞,高明忠,邱冠豪,等.初始损伤–载荷–冻融作用下红砂岩的孔隙结构及力学特性[J].*工程科学与技术*,2022,54(6):194–203.]
- [5] Que Xiangcheng,Zhu Zhende,Niu Zihao,et al.Deformation and strength anisotropy of columnar jointed rock mass with different cross-sectional shapes[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2021,42(9):2416–2426.[阙相成,朱珍德,牛子豪,等.不同截面柱状节理岩体变形及强度各向异性研究[J].*岩土力学*,2021,42(9):2416–2426.]
- [6] Zhang Bo,Li Shucai,Zhang Dunfu,et al.Uniaxial compression mechanical property test, fracture and damage analysis of similar material of jointed rock mass with filled cracks[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2012,33(6):1647–1652.[张波,李术才,张敦福,等.含充填节理岩体相似材料试件单轴压缩试验及断裂损伤研究[J].*岩土力学*,2012,33(6):1647–1652.]
- [7] Zhang Yufei,Li Jianchun,Yan Yatao,et al.Experimental study on dynamic damage characteristics of roughness joint surface based on SHPB[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2021,42(2):491–500.[张雨霏,李建春,闫亚涛,等.基于 SHPB 试验的粗糙节理面动态损伤特征研究[J].*岩土力学*,2021,42(2):491–500.]
- [8] Li Hongzhe,Xia Caichu,Wang Xiaodong,et al.Experimental study on deformation and strength properties of jointed marble specimens[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2008,27(10):2118–2123.[李宏哲,夏才初,王晓东,等.含节理大理岩变形和强度特性的试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2008,27(10):2118–2123.]
- [9] Liu Bo,Li Haibo,Zhu Xiaoming.Experiment simulation study of strength degradation of rock joints under cyclic shear loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2011,30(10):2033–2039.[刘博,李海波,朱小明.循环剪切荷载作用下岩石节理强度劣化规律试验模拟研究[J].*岩石力学与工程学报*,2011,30(10):2033–2039.]
- [10] Chai Shaobo,Song Lang,Zhou Wei,et al.Effect of water-rock interactions on the deterioration of filled jointed rock[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*,2023,53(5):1510–1520.[柴少波,宋浪,周炜,等.水岩作用对充填节理岩石劣化的影响[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2023,53(5):1510–1520.]
- [11] Chai Shaobo,Song Lang,Liu Huan,et al.Experimental study on deterioration characteristics of filled jointed rock under dry-wet cycles in acidic environment[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2022,43(11):2993–3002.[柴少波,宋浪,刘欢,等.酸性干湿循环下充填节理岩石劣化性能试验研究[J].*岩土力学*,2022,43(11):2993–3002.]
- [12] Chai Shaobo,Liu Huan,Song Lang,et al.Static pressure and dynamic impact characteristics of filled jointed rock after frozen-thaw cycle damage[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*,2023,11:1222676.
- [13] Lin M L,Jeng F S,Tsai L S,et al.Wetting weakening of tertiary sandstones—Microscopic mechanism[J]. *Environmental Geology*,2005,48(2):265–275.
- [14] Li Yong,Cai Weibing,Zhu Weishen,et al.Experiment and particle flow analysis of crack propagation evolution mechanism under hydraulic coupling[J]. *Advanced Engineering Sciences*,2020,52(3):21–31.[李勇,蔡卫兵,朱维申,等.水力耦合作用下裂纹扩展演化机理的试验和颗粒流分析[J].*工程科学与技术*,2020,52(3):21–31.]
- [15] Dong Ping,Liu Tingting,Li Xinping,et al.Study on wave propagation and meso-failure of rock with non-persistent joints[J]. *Blasting*,2021,38(4):17–25.[董平,刘婷婷,李新平等.冲击荷载作用下非贯通节理岩体细观破坏模式研究[J].*爆破*,2021,38(4):17–25.]
- [16] Zeng Chao,Zeng Yawu,Zhao Kai.Numerical simulation of particle flow of stress wave propagation characteristics under the impacts of joint contact area and thickness[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*,2018,16(1):134–139.[曾超,曾亚武,赵凯.节理接触面积和厚度对应力波传播特性影响的颗粒流数值模拟[J].*水利与建筑工程学报*,2018,16(1):134–139.]
- [17] Song Lang,Chai Shaobo,Li Jing,et al.Numerical study on compressive mechanical characteristics of filled jointed rock under confining pressure based on PFC[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*,2023,11:1283479.
- [18] Wang Benxin,Jin Aibing,Zhao Yiqing,et al.Fracture law of 3D printing specimen with non-consecutive joints based on CT scanning[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2019,40(10):3920–3927.[王本鑫,金爱兵,赵怡晴,等.基于 CT 扫描的含非贯通节理 3D 打印试件破裂规律试验研究[J].*岩土力学*,2019,40(10):3920–3927.]

- [19] Xiao Weiguo, Dui Guansuo, Ren Qingwen. Study of non-linear constitutive model for jointed rock masses[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(9): 1–6. [肖卫国, 兑关锁, 任青文. 节理岩体非线性本构模型的研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(9): 1–6.]
- [20] Lv Siqing, Zhu Jiebing, Wang Bin, et al. Study on macro-meso damage model of sandstone with open cracks under the coupling action of freeze-thaw and load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(5): 1124–1135. [吕思清, 朱杰兵, 汪斌, 等. 冻融荷载耦合作用下含开口裂隙砂岩宏细观损伤模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(5): 1124–1135.]
- [21] Zhao Yiqing, Liu Hongyan, Lü Shuran, et al. 3-dimensional compression damage constitutive model of jointed rock mass based on deformation components[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2015, 46(3): 991–996. [赵怡晴, 刘红岩, 吕淑然, 等. 基于变形元件的节理岩体三轴压缩损伤本构模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(3): 991–996.]
- [22] Shen Wei, Peng Lihua, Yue Yunguo, et al. Elastic damage and energy dissipation in anisotropic solid material[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1989, 33(2): 273–281.
- [23] Deng Zhengding, Zhan Xingxin, Shu Jiajun, et al. Stability deterioration mechanism and sensitive parameters analysis of dangerous rock mass under freeze-thaw cycles[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(2): 150–161. [邓正定, 詹兴欣, 舒佳军, 等. 冻融循环作用下危岩体稳定性劣化机制及敏感参数分析[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(2): 150–161.]
- [24] Frantziskonis G, Desai C S. Constitutive model with strain softening[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1987, 23(6): 733–750.
- [25] Krajcinovic D, Silva M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1982, 18(7): 551–562.
- [26] Yuan Xiaoqing, Liu Hongyan, Liu Jingping. A damaging model of jointed rock under coupled action of freezing and thawing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(8): 1602–1611. [袁小清, 刘红岩, 刘京平. 冻融荷载耦合作用下节理岩体损伤本构模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(8): 1602–1611.]
- [27] Cao Wengui, Zhao Minghua, Liu Chengxue. Study on the model and its modifying method for rock softening and damage based on weibull random distribution[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(19): 3226–3231. [曹文贵, 赵明华, 刘成学. 基于Weibull分布的岩石损伤软化模型及其修正方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(19): 3226–3231.]
- [28] Cao Wengui, Zhang Chao, He Min, et al. Statistical damage simulation method of strain softening deformation process for rocks considering characteristics of void compaction stage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1754–1761. [曹文贵, 张超, 贺敏, 等. 考虑空隙压密阶段特征的岩石应变软化统计损伤模拟方法[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(10): 1754–1761.]
- [29] Li Xiping, Lu Yani, Wang Yangjun. Research on damage model of single jointed rock masses under coupling action of freeze-thaw and loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(11): 2307–2315. [李新平, 路亚妮, 王仰君. 冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(11): 2307–2315.]
- [30] Hamdi E, Romdhane N B, Le Cléach J M. A tensile damage model for rocks: Application to blast induced damage assessment[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(2): 133–141.
- [31] Jean L. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1985, 107(1): 83–89.
- [32] Zhang Huimei, Lei Lina, Yang Gengshe. Research on rock statistical damage model and determination of parameters [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 29(3): 29–32. [张慧梅, 雷丽娜, 杨更社. 基于Weibull统计分布的岩石损伤模型[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 29(3): 29–32.]

Constitutive Damage Model of Dry-wet Cycles of Filled Jointed Rock Considering the Initial Compaction Stage

CHAI Shaobo¹, SONG Boyang¹, WEN Chengwu¹, SONG Lang^{1,2}, LIU Jinhao¹, SHI Lei³, ZHAO Chuan³

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. City College, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710018, China;

3. Joint Logistics Support Force Engineering Quality Supervision Station, Nanjing 210000, China)

Abstract: The compression process of filled jointed rock under dry-wet cycles exhibits a distinct initial compaction stage; however, existing rock damage models rarely account for the filling characteristics of joints, making it difficult to accurately describe the nonlinear deformation during the initial compaction stage. In response to this, the present study conceptualizes the filled jointed rock as consisting of two components: voids

and non-voids. The compaction deformation of the filled jointed rock is calculated based on the deformation coordination relationship of the voids. The study analyzes the mechanical deformation process of filled jointed rock by treating the micro-element strength as the limit using statistical damage theory and establishes a compression elastoplastic uniaxial compression damage mechanics equation for jointed rock. A method is provided for determining the parameters of the damage mechanics model, and the model is verified through parameter analysis and damage degree analysis using compression test data from filled jointed rock samples under dry-wet cycles. The results indicated that the degree of damage to rock samples caused by dry-wet cycles increases gradually with the number of cycles, demonstrating a continuous increase in the proportion of voids. However, the damage caused by compression gradually lags, reflecting the environmental deterioration characteristics of jointed rock. The model constructed in this study effectively analyzes the compressive mechanical properties of filled jointed rock under dry-wet cycles and holds practical engineering significance.

Key words: filled jointed; initial compaction deformation; damage mechanics model; dry-wet cycles; cumulative damage

(编辑 李轶楠)

引用格式: Chai Shaobo, Song Boyang, Wen Chengwu, et al. Constitutive damage model of dry-wet cycles of filled jointed rock considering the initial compaction stage[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(4): 185–196. [柴少波, 宋博阳, 文成伍, 等. 考虑初始压密阶段的充填节理岩石干湿循环单轴压缩损伤力学模型[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(4): 185–196.]