

循环侵水与荷载耦合作用下砂岩三轴 压缩损伤本构模型

王霄川¹, 殷照婷², 秦哲², 张润昌², 高泽起¹

(1. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014;

2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要:针对库区周期性水位升降引发的边坡工程安全问题,通过循环侵水后的三轴压缩试验和计算机断层扫描(CT)试验,分析了循环侵水作用下砂岩宏观力学参数及微观结构劣化特征,构建了考虑循环侵水与荷载复合作用的砂岩损伤本构模型。研究表明:随着循环侵水次数增加,砂岩微观结构参数(孔隙率、孔隙体积和孔隙半径)逐渐增大,而宏观力学参数(峰值强度、弹性模量)则逐渐减小,其中 1 次循环侵水后劣化最显著,峰值强度、弹性模量降幅分别达 11.56% 和 9.57%。构建了循环侵水-荷载耦合损伤本构模型,并通过试验验证了其合理性。模型计算曲线与试验结果高度吻合($R^2 > 0.95$),证实了该模型能准确反映岩石在各变形阶段的非线性规律。砂岩的总损伤曲线呈 S 型变化,可划分为损伤稳定、发展和完成阶段,随着循环侵水次数与围压增加,破坏模式由脆性向延性转变,围压对岩石损伤的发展具有抑制作用。

关键词:砂岩;循环侵水;残余强度;压密特性;本构模型;损伤演化

中图分类号:TU452

文献标志码:A

Damage constitutive model of sandstone under triaxial compression coupled with cyclic water intrusion and loading

WANG Xiaochuan¹, YIN Zhaoting², QIN Zhe², ZHANG Runchang², GAO Zeqi¹

(1. Shandong Lugiao Group Co., Ltd., Jinan 250014, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and
Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In view of the slope engineering safety problems caused by cyclic rise and fall of water level in reservoir area, the macroscopic mechanical parameters and microstructural degradation characteristics of sandstone under cyclic water intrusion was analyzed through triaxial compression tests and computed tomography scan (CT) tests, and a sandstone damage constitutive model considering the combined action of cyclic water intrusion and load was constructed. The results show that with the increase of the number of cyclic water intrusion, the sandstone microstructure parameters such as porosity, pore volume and pore throat radius gradually increase, while the macroscopic mechanical parameters such as peak strength and elastic modulus gradually decrease, and that the changes are the most significant after one cycle of water intrusion, with the peak strength and elastic modulus reaching 11.56% and 9.57% respectively. A constitutive model of sandstone damage under cyclic water intrusion and load was established and its validity was verified by experiments. The calculated curves of the model

收稿日期:2025-03-27

基金项目:自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室开放基金项目(BHKF2024Z06);山东省自然科学基金项目(ZR2024ME060)

作者简介:王霄川(1989—),男,山东青岛人,高级工程师,主要从事路桥相关施工工作。

秦哲(1988—),男,山东泰安人,副教授,博士,主要从事多场耦合作用下岩石力学性质、地下空间工程全生命周期安全智能监测及预警研究,本文通信作者。E-mail:chin_sdust@hotmail.com

is in excellent agreement with the experimental results ($R^2 > 0.95$), confirming that this model can reflect the nonlinear deformation laws of rock at various stages. The total damage curve of sandstone presents an S-typed change, which can be divided into damage stability, development and completion stages. With the increase of cyclic water intrusion times and confining pressure, the failure mode changes from brittle to ductile, and confining pressure has an inhibitory effect on the development of rock damage.

Key words: sandstone; cyclic water intrusion; residual strength; compaction characteristics; constitutive model; damage evolution

为满足防洪、发电、供水等多重需求,水库水位往往呈现出周期性升降变化,这一动态过程导致消落带区域的岩体长期受到循环侵水作用的侵蚀^[1]。岩体内部孔隙、裂隙和节理等会萌生和扩展,造成岩石力学性能劣化,当岩体处于受荷状态时,会进一步加剧岩体损伤和破坏,为工程稳定运行带来安全隐患。因此,明确循环侵水与荷载作用对岩石力学特性的损伤劣化特征及影响规律,对维护工程安全至关重要^[2]。

近年来,关于循环侵水作用对岩石物理力学性能影响方面的研究受到了众多国内外学者的重视,并取得了丰硕成果。Özbek^[3]对不同干湿循环次数下岩石的物理力学特征进行研究,发现岩样的纵波波速和单轴抗压强度存在劣化现象;Costin^[4]基于岩石材料的连续损伤本构关系建立等效宏观损伤准则,定量表征岩石微裂纹的扩展演化过程;徐志华等^[5]开展单轴、三轴压缩试验,以红砂岩为研究对象,定量分析了干湿循环作用对岩石强度等力学参数的影响。Chen等^[6-7]开展长期浸泡、干湿循环两种条件的试验,结果表明:水岩作用会导致岩石的抗压强度、弹性模量等力学性能不断降低,且长期浸泡的劣化效应弱于干湿循环;刘新喜等^[8]通过研究干湿循环条件下裂隙炭质页岩的能量演化规律与破坏特征,发现其破坏模式受干湿循环次数和裂隙倾角的共同控制;宋朝阳等^[9]基于声发射监测技术和单轴压缩试验研究干湿循环下弱胶结岩石宏细观劣化效应,发现声发射参数变化特征可以一定程度上反映干湿循环作用对岩石宏观强度和细观结构的影响大小。同时,国内外学者在岩石的损伤本构模型方面也进行了相关研究,积累了相当丰富的研究成果。黄震等^[10]结合应变强度理论与损伤力学理论,基于岩石微元强度服从随机统计分布的假设,建立了干湿循环荷载作用下粉砂岩的损伤演化方程;Ortiz^[11]从细观损伤力学角度出发,基于岩石内部微裂纹扩展机制,提出了岩石材料的连续损伤本构模型;Deng等^[12]通过浸泡-风干循环水岩作用试验,构建了水岩耦合作用下砂岩的统计损伤本构关系;冯美生等^[13]对经过不同溶液浸泡及不同干湿循环次数处理的砂岩进行扫描电子显微镜试验、单轴压缩试验,并构建了宏观损伤本构模型,得到的试验结果与模型理论曲线吻合较好;Li等^[14]对不同干湿循环条件下的砂岩进行单轴压缩试验和单轴恒载蠕变试验,建立了考虑黏度系数变化和东西向旋回变化的砂岩分形导数蠕变本构模型;Du等^[15]利用弹性模量、加载速率定义损伤变量,建立了红砂岩干湿循环与冲击载荷耦合损伤本构模型。

尽管前述研究在水岩作用与岩石损伤领域取得了显著进展,但深入分析可以发现,多数研究将“宏观力学响应”与“细观结构演化”作为两条相对独立的线索进行分析,未能有效地建立两者在“循环侵水-荷载”双因素耦合作用下的内在联系与协同演化规律。因此,本研究以砂岩为研究对象开展室内三轴压缩试验,得到砂岩在不同循环侵水次数和围压下的应力-应变曲线,并结合计算机断层扫描(computed tomography scan, CT)试验获得砂岩细观结构特征,探究循环侵水作用下砂岩宏观力学特性劣化效应和细观结构演化规律;随后基于 Lemaitre 应变等效原理,考虑砂岩压密特性和残余强度特征,构建循环侵水和荷载复合作用下的损伤本构模型,明确了不同循环侵水次数和不同围压作用对砂岩损伤演化规律的影响。

1 循环侵水作用下砂岩宏观力学特性及细观结构演化规律分析

1.1 试验方案

试验以涉水边坡中常见岩石——黄砂岩作为研究对象,制备 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准岩样,通过波速测试,剔除波速差异较大的岩样。对砂岩进行循环侵水次数 n 为 0(自然状态)、1、5、10 和 20 次的循环侵水试验,将黄砂岩岩样放入浸泡箱中自然吸水 24 h 至饱水状态,然后烘干 24 h 至恒重,达到干燥状态,此过程即为一次完整的循环侵水^[16]。每次循环侵水设置 5 组平行试样,每组 3 块,循环侵水后,其中 4 组分别用于进行围压为 0、5、10 和 15 MPa 的三轴压缩试验;为避免扰动对岩样影响,采用金刚石线低速切

割的方法从剩余 1 组岩样中选取试样表面部分制成 1 cm^3 的立方体试样,利用跨尺度岩心扫描成像系统对岩样进行 CT 试验,获取循环浸水后岩样细观结构变化信息和岩样在三轴压缩状态下的应力-应变曲线,试验流程如图 1 所示。

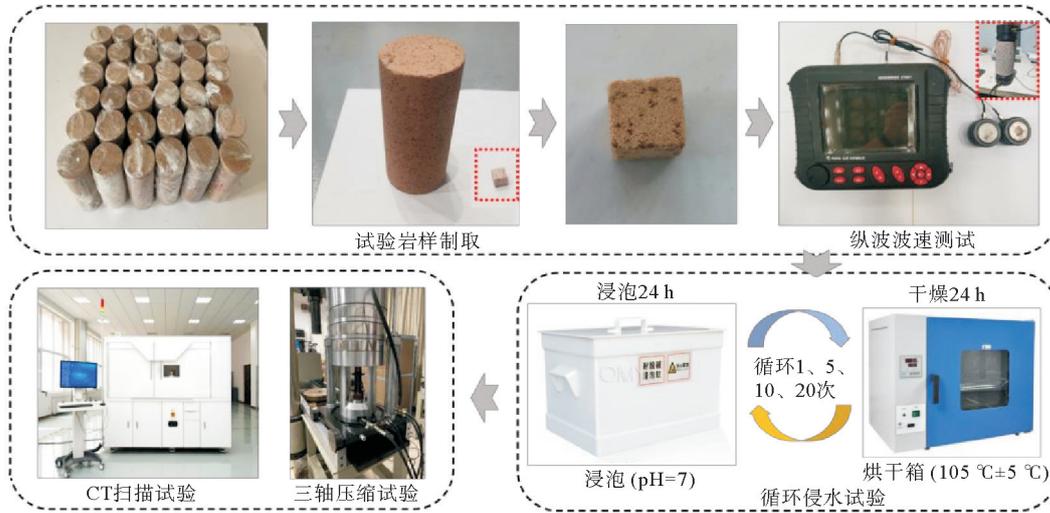


图 1 试验流程图

Fig. 1 Test flow diagram

1.2 宏观力学特性分析

开展循环浸水后的三轴压缩试验,得到不同围压和循环浸水次数下的砂岩应力-应变曲线,如图 2 所示。在相同围压(σ_3)下,随着循环浸水次数的增加,岩样的压密阶段和塑性屈服阶段延长,峰值应变逐渐增大,破坏阶段应力下降逐渐放缓,岩样的塑性特征逐渐增强,岩样峰值强度和弹性阶段斜率呈现减小趋势。在相同循环浸水次数下,随着围压增大,岩样峰值强度增大,在峰后破坏阶段,围压的约束作用限制了岩样破坏后的侧向变形,岩石残余强度呈现增大的趋势。基于图 2 的试验结果分析循环浸水与围压作用下砂岩的应力-应变演化规律。在相同围压条件下,随着循环浸水次数的增加,岩样的压密阶段和塑性屈服阶段显著延长,峰值应变逐渐增大,同时应力-应变曲线的峰后下降段趋于平缓,表现出由脆性向塑性转变的特征。具体而言,当围压为 10 MPa 时,循环浸水次数从 0 增加到 15 次,峰值应变增大了约 20%,而峰值强度降低了约 24%。在相同循环浸水次数下,围压的增加显著提升了岩样的承载能力,围压每增加 5 MPa,峰值强度增大 18%~50%。值得注意的是,较高围压对峰后变形具有明显的约束作用,使残余强度提高,这主要归因于围压对微裂纹扩展的抑制作用。

不同循环浸水和围压条件下岩样峰值抗压强度与弹性模量定量分析结果如图 3 所示,为了更直观地展示砂岩力学参数在循环浸水作用下的劣化程度,定义阶段劣化度 D_d 如式(1)所示。以围压 10 MPa 为例,在相同围压下,随着循环浸水次数从 0 增加到 20 次,岩样内部的微裂纹持续扩展和贯通,结构逐渐劣化。前期岩样峰值抗压强度显著降低,后期降低速度变缓,在 1 次循环浸水后,劣化幅度达最大值 11.56%。岩样的弹性模量也呈现出相似的规律,随着循环浸水次数增加,岩样产生更大的轴向应变,前期弹性模量会显著减小,后期减小速度变缓,在 1 次循环浸水后,劣化幅度达最大值 9.75%。在相同循环浸水次数下,以 10 次为例,随着围压的增大,岩样内部的部分孔隙、微裂隙等闭合程度逐渐增高,岩样的峰值强度和弹性模量逐渐增加,劣化度逐渐减小。砂岩在循环浸水作用下的力学劣化呈现先快后慢的特征,推测与以下两个机制有关:一是微裂隙网络在多次循环后逐渐趋于饱和;二是矿物溶解与转化过程逐步达到平衡^[17]。该推测有待通过扫描电镜与 X 射线衍射技术,对不同循环次数下砂岩的微观结构与矿物组成变化进行对比验证研究。

$$D_d = \frac{\chi_{n-1} - \chi_n}{\chi_{n-1}} \tag{1}$$

式中, χ_{n-1} 和 χ_n 分别为第 $n-1$ 和 n 次循环浸水后岩石的力学参数。

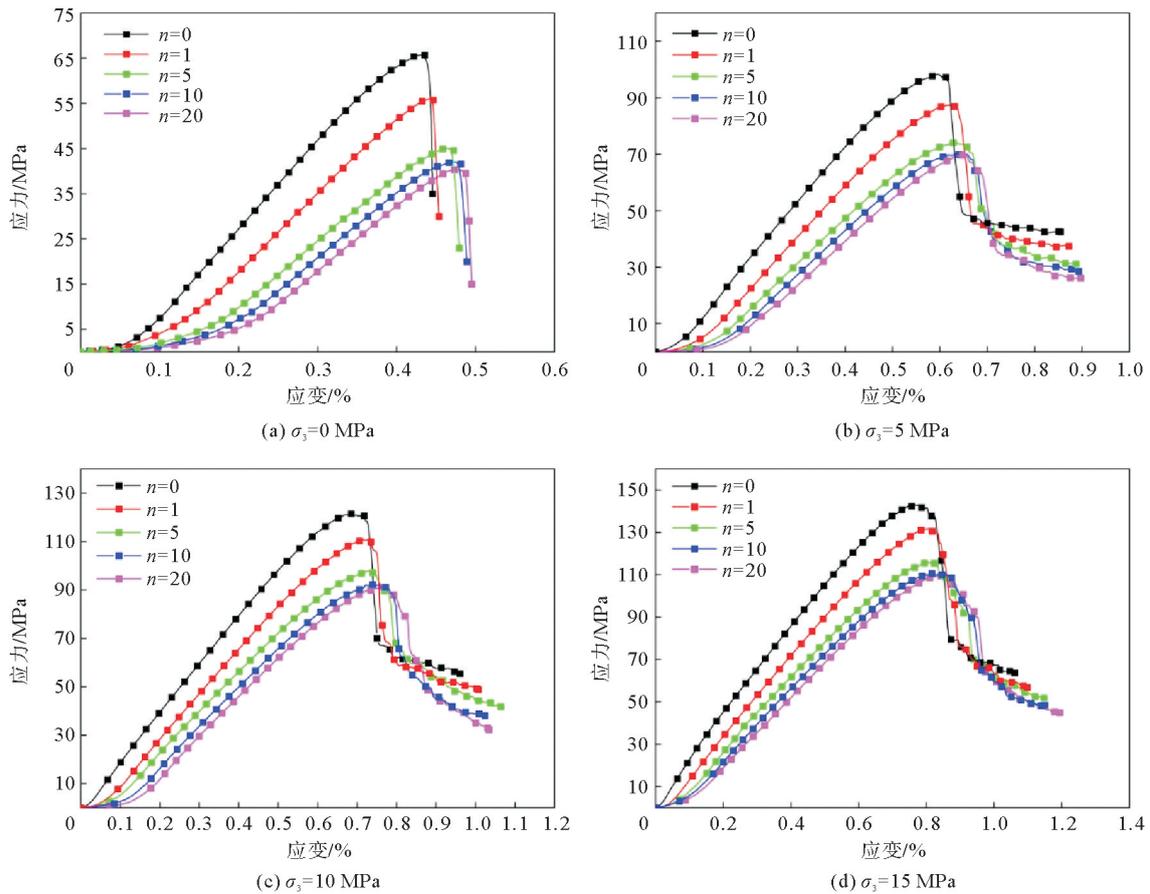


图 2 循环侵水作用下砂岩应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of sandstone under cyclic water intrusion

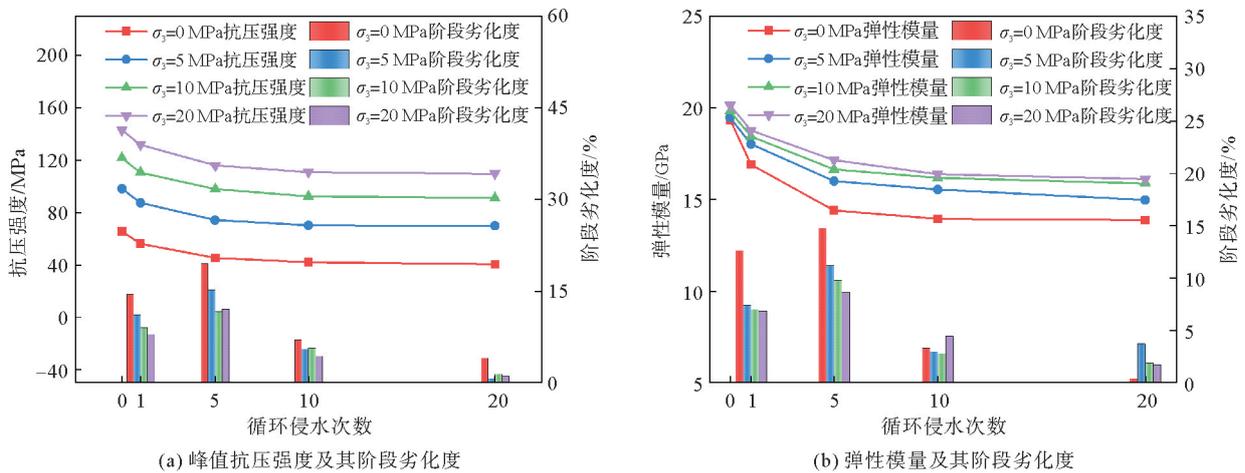


图 3 岩样三轴压缩试验结果

Fig. 3 Triaxial compression test results of rock samples

1.3 细观结构演化规律

通过 CT 扫描将生成 1 600 张 1 500×1 500 像素的 16 位二维灰度图像,为了简化图像重构后数据分析过程,本研究选取 200×200×200 体素立方体区域作为代表性体积元(体素分辨率为 10 μm),利用 Avizo 软件对采集的二维图像进行处理,采用中值滤波对图像进行降噪,采用交互式阈值分割方法对 CT 图像进行二值化处理,建立砂岩试样孔隙网络模型,流程示意如图 4 所示。

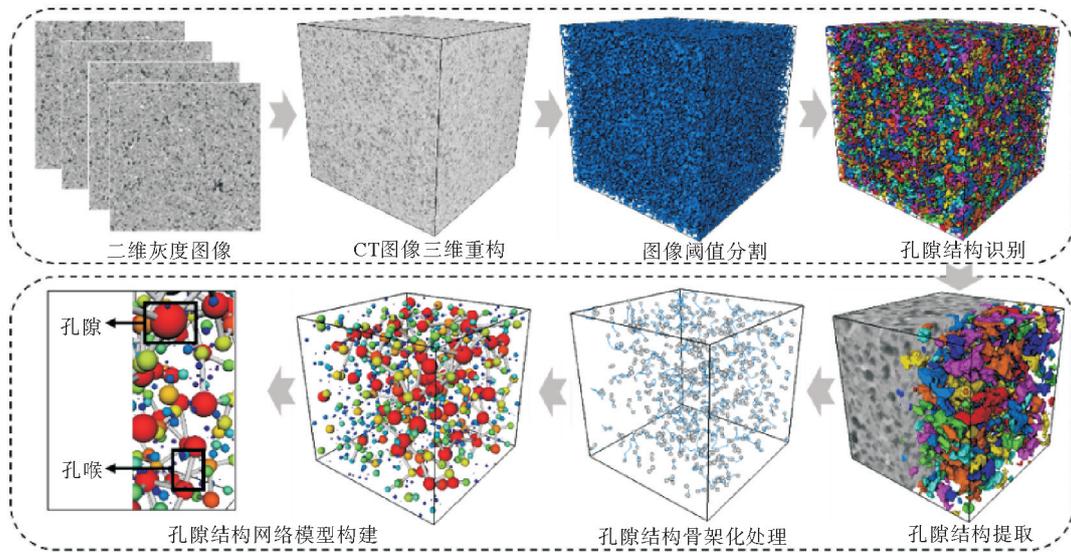


图 4 砂岩图像处理与孔隙网络建模

Fig. 4 Sandstone image processing and pore network modeling

通过孔隙结构空间标记,对不同循环侵水次数砂岩的孔隙率进行计算,同时采用 Avizo 软件中的 Axis Connectivity 模块提取砂岩孔隙率及其有效孔隙率随循环侵水次数的变化数据,如表 1 所示。结果表明,砂岩孔隙率及有效孔隙率随着循环侵水次数增加呈现逐渐增大的趋势,1 次、5 次循环侵水变化最明显,其孔隙率和有效孔隙率增大率分别为 8.20% 和 8.31%,说明循环侵水作用下砂岩内部孔隙萌生、扩展的同时,部分闭合孔隙会逐渐演化为张开孔隙,砂岩内部孔隙结构间的连通性增强。

表 1 数字岩心孔隙率分析结果

Table 1 Digital core porosity analysis results

| 循环侵水次数 | 孔隙率 | 孔隙率变化率 | 有效孔隙率 | 有效孔隙率变化率 |
|--------|-------|--------|-------|----------|
| 0 | 8.42 | — | 6.36 | — |
| 1 | 8.78 | 4.23 | 6.68 | 4.28 |
| 5 | 9.50 | 8.20 | 7.38 | 8.31 |
| 10 | 9.95 | 4.73 | 7.91 | 4.84 |
| 20 | 10.07 | 1.21 | 8.21 | 1.30 |

为进一步分析砂岩在循环侵水作用下微观结构劣化程度,统计不同循环侵水次数下孔隙及孔喉参数平均值演化规律,如图 5 所示,随循环侵水次数的增加,孔隙半径和孔隙体积平均值呈现先显著增加,后趋于平缓的趋势,1 次循环侵水后的增长率达最大值,分别为 8.68% 的 13.36%,可见前期循环侵水对砂岩孔隙结构的劣化作用更为显著。随着循环侵水次数增加,孔喉半径和孔喉长度平均值也呈现类似规律,1 次循环侵水后的增长率达最大值,分别为 9.08% 和 7.43%,说明岩样孔隙之间的联络通道在循环侵水作用下进一步发展演化,孔隙连通程度在不断增强,加剧了岩石的劣化。

2 考虑循环侵水与荷载耦合作用的砂岩三轴压缩损伤模型

循环侵水作用会引发岩样微观损伤,而荷载作用则会导致岩样宏观损伤,两种损伤效应相互叠加,构成了岩石的整体损伤。为了揭示砂岩在循环侵水和荷载复合作用下的损伤演化特性,需从微观和宏观两个层面进行深入探讨。构建损伤本构方程有助于深入理解砂岩在损伤过程中的微观结构以及宏观力学性能变化,进而全面研究循环侵水作用下受荷砂岩的损伤演化过程。

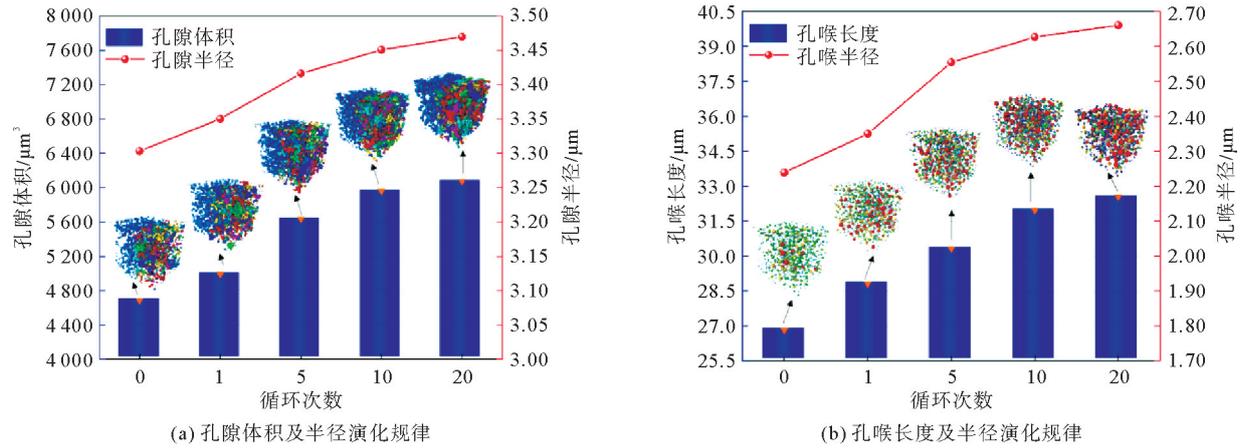


图5 砂岩孔隙结构随循环侵水次数演化曲线

Fig. 5 Evolution curve of sandstone pore structure with times of cyclic water intrusion

2.1 宏观耦合损伤变量计算

为了描述材料逐渐劣化的特性,将 Kachanov 的连续性概念应用于岩石材料,提出砂岩在循环侵水作用下产生的孔隙等新次生细观缺陷是诱导黄砂岩性能劣化的主要原因。因此,根据循环侵水前后孔隙率的变化定义循环侵水损伤变量 D_1 为:

$$D_1 = \frac{W_n - W_0}{1 - W_0} \quad (2)$$

式中, W_0 和 W_n 分别表示循环侵水前后岩石的孔隙率。

基于统计损伤力学理论,可将岩石内部随机分布的微缺陷视为随机损伤场,并通过微元强度参数实现损伤程度的量化表征,假定岩石内部缺陷满足双参数的 Weibull 分布函数,则其概率密度函数 $V(P)$ 为^[18]:

$$V(P) = \frac{m}{f_0} \left(\frac{P}{f_0}\right)^{m-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{P}{f_0}\right)^m\right] \quad (3)$$

式中: P 为岩石微元强度的随机分布变量,假设微元强度满足最大拉伸应变屈服准则, P 可采用应变 ϵ 表示^[19];参数 f_0 与 m 分别表示比例参数与形状参数,与材料力学性质相关。

在荷载作用下,定义荷载损伤变量 D_2 为已经破坏的微单元数量 M_d 与总的微单元数量 M 之比。

$$D_2 = \frac{M_d}{M} \quad (4)$$

当加载到某一应变水平 ϵ 时,破坏的微单元数量可通过积分求解:

$$M_d = \int_0^{\epsilon} M \cdot V(x) dx = M \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{f_0}\right)^m\right] \right\} \quad (5)$$

联立式(3)和式(4)可得荷载损伤变量:

$$D_2 = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{f_0}\right)^m\right] \quad (6)$$

依据 Lemaitre 应变等价原理^[20]和有效应力概念,将循环侵水引起的砂岩劣化定性为细观损伤,将不同围压荷载引起的损伤定性为宏观损伤,图6显示了各损伤变量的关系。

耦合处理后的损伤状态等于宏观和微观损伤状态之和减去无损伤的原始状态,三种状态下的应变关系可表示为:

$$\epsilon_{12} = \epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_0 \quad (7)$$

式中: ϵ_{12} 为耦合损伤状态下的应变, ϵ_1 为细观损伤状态下的应变, ϵ_2 为宏观损伤状态下的应变, ϵ_0 为无损伤状态下的应变。

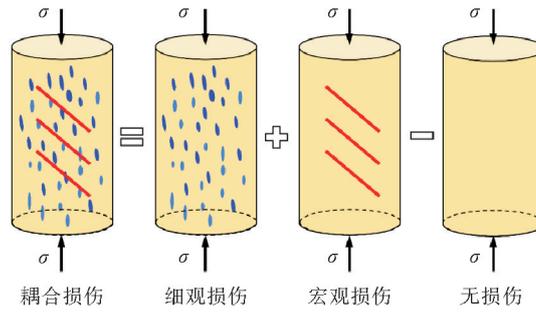


图 6 应变等效计算示意图

Fig. 6 Strain equivalent calculation diagram

当应力保持不变时,应力与弹性模量之间的关系可以定义如下:

$$\frac{\sigma}{E_{12}} = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} - \frac{\sigma}{E_0} \quad (8)$$

式中: σ 为应力分量, E_{12} 为耦合损伤状态下的弹性模量, E_1 为细观损伤状态下的弹性模量, E_2 为宏观损伤状态下的弹性模量, E_0 为无损状态下的弹性模量。

根据 Lemaitre 的应变等效假设^[20],定义三个不同状态下弹性模量为:

$$\begin{cases} E_{12} = E_0 (1 - D_{12}), \\ E_1 = E_0 (1 - D_1), \\ E_2 = E_0 (1 - D_2). \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)可将宏细观耦合损伤变量 D_{12} 表示为:

$$D_{12} = 1 - \frac{(1 - D_1)(1 - D_2)}{1 - D_1 D_2} = 1 - \frac{\left(1 - \frac{W_n - W_0}{1 - W_0}\right) \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{f_0}\right)^m\right]}{1 - \frac{W_n - W_0}{1 - W_0} + \frac{W_n - W_0}{1 - W_0} \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{f_0}\right)^m\right]} \quad (10)$$

式中: ϵ 为应变分量, D_{12} 为岩石循环侵水-荷载耦合损伤。

2.2 循环侵水和荷载耦合作用下砂岩损伤本构模型的建立

目前,众多研究建立的损伤本构模型认为岩石承受的所有荷载都由其未损伤的部分来承担,当岩体完全损伤时不能承受外荷载^[19]。但实际情况中,岩石在达到峰后强度后的破坏阶段,其承载能力并未完全丧失。因此,为了更加准确描述砂岩峰后破坏情况,需建立考虑岩石残余强度的改进损伤模型。假定岩石材料可分为未损伤部分和损伤部分,但损伤部分仍具有一定的承载能力,在荷载作用下岩石材料的状态如图 7 所示。将损伤变量 D 表示为:

$$D = \frac{L_2}{L} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} \quad (11)$$

式中: L 为岩石总面积, L_1 为未损伤部分的面积, L_2 为加载下发生损伤后的面积。

其应力关系可以表示为:

$$\sigma_i L = \sigma'_i L_1 + \sigma''_i L_2 \quad (12)$$

式中:岩石总面积所受应力为 σ_i ,岩石未损伤部分所受等效应力为 σ'_i ,岩石损伤部分所受等效应力为 σ''_i , $i = 1, 2, 3$ 。

结合式(11)~(12)可得:

$$\sigma_i = \sigma'_i (1 - D) + \sigma''_i D \quad (13)$$

同时由于应变协调,即任意应力状态下损伤部分与未损伤部分应变相等,可得:

$$\epsilon_i = \epsilon'_i = \epsilon''_i \quad (14)$$

式中: ϵ_i 为岩石产生的应变, ϵ'_i 为岩石未损伤部分产生的应变, ϵ''_i 为岩石损伤部分产生的应变, $i = 1, 2, 3$ 。

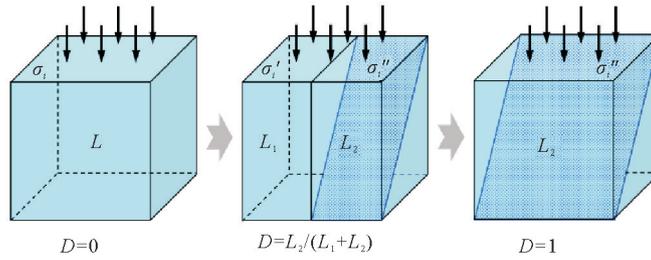


图7 岩石微元轴向受力

Fig. 7 Axial forces on rock micro units

假定岩石未损伤部分只发生弹性变形,符合广义虎克定律,在限定的围压下考虑损伤只发生在主应力方向,其他两个方向不考虑损伤,即 $\sigma_2 = \sigma_2', \sigma_3 = \sigma_3'$,在常规三轴试验($\sigma_2 = \sigma_3$)情况下有:

$$\sigma_1' = E\epsilon_1 + 2\mu\sigma_3. \quad (15)$$

式中, E 、 μ 分别为岩石弹性模量和泊松比。

岩石损伤部分的等效应力在数值上等于试验所得的岩石残余强度 σ_r ,即:

$$\sigma_1'' = \sigma_r. \quad (16)$$

将式(15)~(16)代入式(13),即可建立考虑残余强度的损伤模型:

$$\sigma_1 = (E\epsilon_1 + 2\mu\sigma_3)(1-D) + \sigma_r D. \quad (17)$$

可知,当残余强度为零($\sigma_r = 0$)时,式(17)恢复到 Lemaitre 模型,当损伤变量达到最大值($D = 1$)时,岩石仍保持一定的强度。

将式(10)代入式(17)可得砂岩在不同循环侵水和围压荷载作用下的本构模型为:

$$\sigma_1 = E\epsilon_1 \left[\frac{(1-D_1)(1-D_2)}{1-D_1D_2} \right] + 2\mu\sigma_3 + (\sigma_r - 2\mu\sigma_3) \left[1 - \frac{(1-D_1)(1-D_2)}{1-D_1D_2} \right]. \quad (18)$$

传统的损伤本构模型理论曲线未能准确反映应力-应变曲线压密阶段特征,而岩石压密特性对于深入了解岩石的力学行为、破坏机理等方面具有重要意义。因此,为准确描述砂岩应力-应变关系,将式(18)以压密阶段与线弹性变形阶段交点处为压密点进行分段,建立考虑压密阶段的分段损伤本构模型为:

$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon(1-D'_{12}) + 2\mu\sigma_3(1-D'_{12}), & \epsilon \leq \epsilon_k; \\ E(\epsilon - \epsilon_k)(1-D''_{12}) + 2\mu\sigma_3 + (\sigma_r - 2\mu\sigma_3)D''_{12} + \sigma_k, & \epsilon > \epsilon_k. \end{cases} \quad (19)$$

其中: D'_{12} 、 D''_{12} 分别为压密点前后的耦合损伤变量, ϵ_k 为压密点处的应变, σ_k 为压密点处的应力。

$$D'_{12} = 1 - \frac{\left[1 - \frac{W_n - W_0}{1 - W_0} \right] \exp \left[- \left(\frac{\epsilon}{f_1} \right)^{m_1} \right]}{1 - \frac{W_n - W_0}{1 - W_0} + \frac{W_n - W_0}{1 - W_0} \exp \left[- \left(\frac{\epsilon}{f_1} \right)^{m_1} \right]}, \quad (20)$$

$$D''_{12} = 1 - \frac{\left[1 - \frac{W_n - W_0}{1 - W_0} \right] \exp \left[- \left(\frac{\epsilon - \epsilon_k}{f_2} \right)^{m_2} \right]}{1 - \frac{W_n - W_0}{1 - W_0} + \frac{W_n - W_0}{1 - W_0} \exp \left[- \left(\frac{\epsilon - \epsilon_k}{f_2} \right)^{m_2} \right]}. \quad (21)$$

其中: f_1 、 m_1 分别为压密点前的比例参数与形状参数, f_2 、 m_2 分别为压密点后的比例参数与形状参数。尽管基于统计损伤理论的本构模型可利用峰值应力与压密点等边界条件求解参数,但其模型参数的物理意义仍有待厘清。未来工作将考虑分析加载过程中的能量耗散随应变演化的规律,通过建立损伤变量与能量耗散之间的内在关联,最终构建一个物理意义明确的损伤本构模型。

2.3 损伤本构模型验证

为验证本构模型的准确性,根据计算得到的循环侵水次数 n 为 0、1、5、10、20 时的参数 f_1 、 m_1 及 f_2 、 m_2 如表 2 所示。

表 2 本构模型参数统计
Table 2 Statistical results of constitutive model parameters

| 围压/MPa | 循环次数 | f_1 | m_1 | f_2 | m_2 |
|--------|------|---------|----------|---------|-----------|
| 0 | 0 | 0.103 3 | -0.916 6 | 0.360 1 | 234.689 3 |
| | 1 | 0.169 3 | -0.802 5 | 0.300 2 | 70.877 1 |
| | 5 | 0.330 8 | -0.704 5 | 0.292 5 | 41.302 2 |
| | 10 | 0.377 4 | -0.770 2 | 0.278 1 | 64.369 9 |
| | 20 | 0.514 8 | 0.694 9 | 0.275 6 | 83.301 9 |
| 5 | 0 | 0.059 0 | -0.931 5 | 0.524 9 | 44.602 0 |
| | 1 | 0.144 3 | -0.833 9 | 0.525 7 | 32.765 2 |
| | 5 | 0.222 0 | -0.859 2 | 0.503 9 | 8.663 0 |
| | 10 | 0.296 7 | -0.830 2 | 0.508 1 | 10.520 6 |
| | 20 | 0.310 1 | -0.993 7 | 0.510 0 | 12.600 2 |
| 10 | 0 | 0.032 2 | -0.977 4 | 0.692 3 | 22.865 6 |
| | 1 | 0.111 8 | -0.746 4 | 0.681 9 | 15.754 4 |
| | 5 | 0.174 6 | -0.662 1 | 0.699 9 | 8.681 7 |
| | 10 | 0.189 3 | -1.237 7 | 0.607 0 | 11.345 5 |
| | 20 | 0.226 3 | -1.471 3 | 0.612 6 | 11.714 4 |
| 20 | 0 | 0.026 2 | -1.784 6 | 0.800 1 | 22.625 8 |
| | 1 | 0.079 9 | -0.880 7 | 0.813 1 | 14.400 9 |
| | 5 | 0.115 1 | -0.849 6 | 0.758 8 | 9.193 7 |
| | 10 | 0.165 1 | -0.632 3 | 0.808 8 | 13.168 4 |
| | 20 | 0.184 5 | -0.701 4 | 0.794 9 | 13.518 3 |

根据表 2 中统计参数计算得到不同循环侵水-荷载条件下砂岩应力-应变曲线与实际试验曲线对比, 由于篇幅限制, 选用部分试验结果如图 8 所示。可见理论曲线与试验曲线吻合较好, 拟合相关系数 $R^2 > 0.95$, 模型能够较好地反映砂岩初始压密阶段、弹性阶段以及残余强度阶段的变形特征, 说明所构建的损伤本构模型具有较好的适用性。

3 循环侵水和荷载耦合作用下砂岩损伤演化规律研究

根据损伤力学可知, 岩石处于应力-应变曲线的压密阶段时, 其内部原生孔隙、微裂纹逐渐闭合, 而新生裂隙的发育扩展并不明显^[18]。因此, 在该阶段可以认为荷载作用造成的损伤接近于 0, 即荷载损伤因子可作以下简化:

$$D_{12} = \begin{cases} \frac{W_n - W_0}{1 - W_0}, & \epsilon \leq \epsilon_k; \\ 1 - \frac{\left(1 - \frac{W_n - W_0}{1 - W_0}\right) \exp\left[-\left(\frac{\epsilon - \epsilon_k}{f_2}\right)^{m_2}\right]}{1 - \frac{W_n - W_0}{1 - W_0} + \frac{W_n - W_0}{1 - W_0} \exp\left[-\left(\frac{\epsilon - \epsilon_k}{f_2}\right)^{m_2}\right]}, & \epsilon > \epsilon_k. \end{cases} \quad (22)$$

根据式(22)可得到循环侵水和荷载复合作用下岩石的总损伤演化曲线, 如图 9 所示。总损伤演化规律曲线呈现出 S 型, 可划分为 3 个阶段, 即: 损伤稳定阶段(阶段 I), 岩石受到循环侵水作用影响, 孔隙、微裂纹不断形成并扩展, 不可逆的损伤在岩石中不断积累, 并在损伤前期起到主导作用, 同时由于加载使岩石内部的孔隙、裂纹压密闭合, 但损伤程度微小; 损伤发展阶段(阶段 II), 已有的微裂隙闭合完成后, 随着荷载进一步加大, 这些微裂隙开始加速扩展、错动, 并与岩石内部出现的新裂隙、孔洞连通, 使得总损伤急剧增大, 此外, 循环侵水作用会加剧岩石内部的应力集中, 促进该区域细观结构的扩展和连通, 进一步破坏岩石整体结构, 在这个阶段的总体损伤受荷载作用的影响较大; 损伤发展完成阶段(阶段 III), 岩石内部的孔隙和裂缝贯通至表面时, 岩石完全破坏并达到残余强度阶段, 总体损伤值趋于 1 并保持不变。

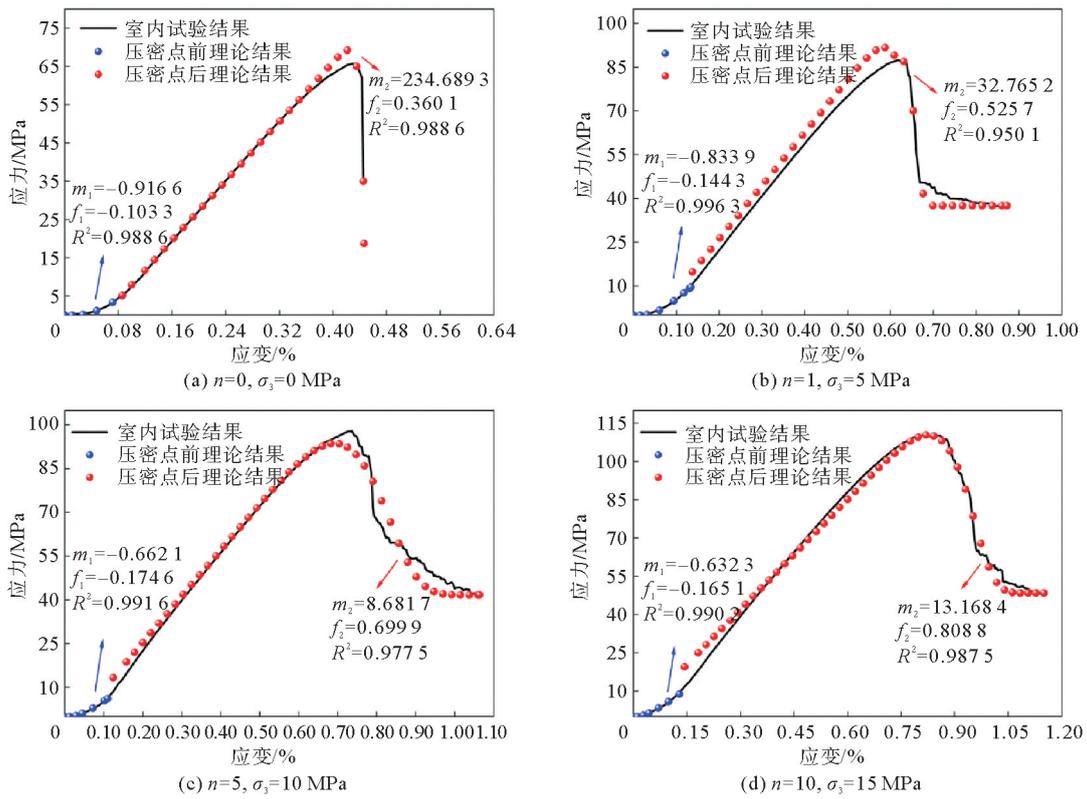


图 8 不同循环侵水-荷载条件下砂岩应力-应变曲线试验值与理论值

Fig. 8 Experimental and theoretical values of stress-strain curves of sandstone under different cyclic water intrusion-load conditions

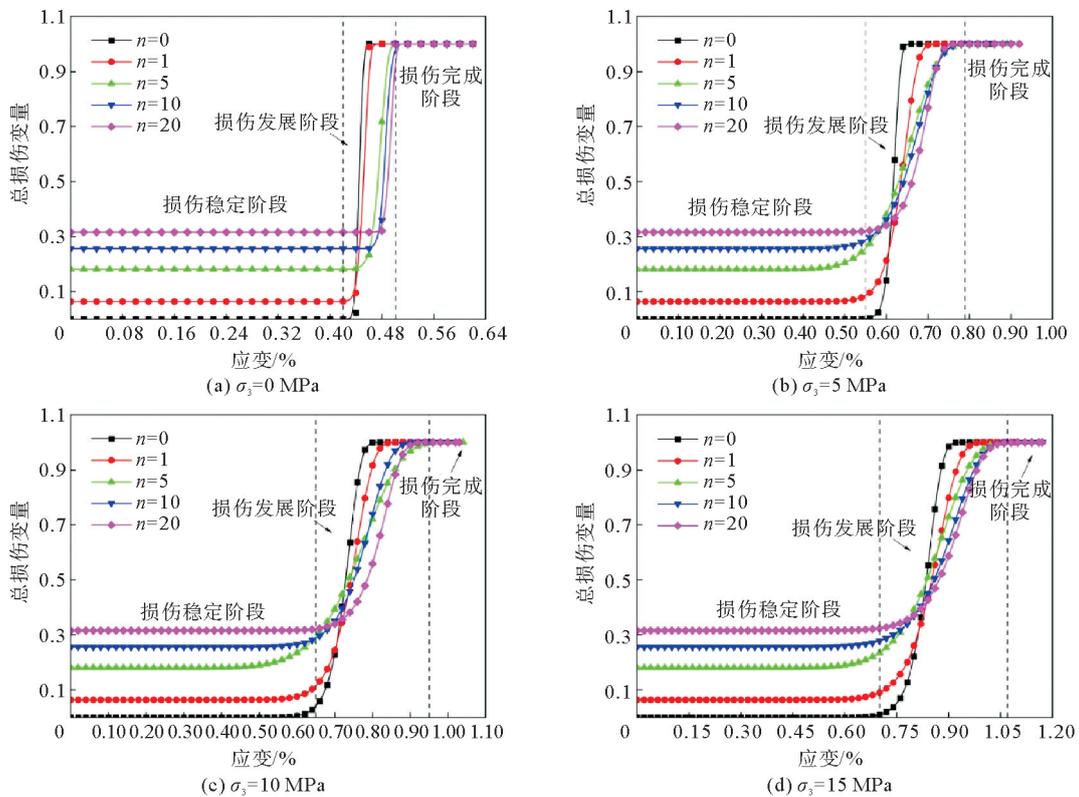


图 9 循环侵水-荷载作用下岩石总损伤演化曲线

Fig. 9 Total damage evolution curve of rock under cyclic water intrusion-load effects

循环侵水和荷载复合作用对岩石的损伤演化产生了显著影响,在相同围压条件下,随着循环侵水次数的增加,总损伤曲线更加趋于平缓,循环侵水损伤逐渐增大,增长率呈现减缓的趋势,岩石内部孔隙、微裂隙完全闭合时的临界应变逐渐变大,达到损伤完成阶段时的临界应变和损伤完成时的应变逐渐延后,这表明循环侵水作用提高了岩石的塑性,宏观上表现为岩石抵抗变形的能力减弱,破坏模式趋于延性破坏。在相同循环侵水条件下,随着围压增加,在应变相同的条件下,总损伤逐渐减小,且岩石的损伤发展阶段呈现延长的趋势,损伤速率减缓,说明围压对岩石损伤的发展具有抑制作用,且提高了塑性,岩石破坏模式趋于延性破坏。

4 结论

基于细观统计理论和损伤力学,结合室内试验结果,研究了不同循环侵水和荷载条件下砂岩细观结构变化及宏观力学劣化,推导了可以综合考虑循环侵水和荷载条件的损伤本构模型,揭示了循环侵水和荷载作用下砂岩损伤演化规律,得出如下结论:

1) 砂岩的峰值强度、弹性模量等力学参数呈初期显著减小,后期减小速度变缓的趋势,1次循环侵水后劣化幅度最大,且随着围压的增大,岩样的峰值强度和弹性模量呈现增大的趋势。砂岩孔隙率、有效孔隙率、孔隙半径、孔隙体积以及孔喉半径随着循环侵水次数增加呈现逐渐增大的趋势,1次循环侵水后变化最明显,变化率分别为8.31%、10.47%、8.68%、8.94%、13.36%。

2) 根据砂岩宏观力学特性与细观结构在循环侵水作用下的变化规律,建立了循环侵水作用下受荷砂岩损伤本构模型,理论曲线与试验结果曲线吻合较好,模型能够准确描述岩石加载过程中各阶段的变形特性,适用于循环侵水条件下岩体在荷载作用下的应力-应变问题。

3) 砂岩总损伤演化曲线呈现S型,分为损伤稳定、损伤发展、损伤完成3个阶段,总损伤在损伤前期主要受循环侵水作用影响,后期主要受荷载作用影响,随着循环侵水次数和围压增加,损伤完成阶段时的临界应变逐渐延后,共同作用促使岩石由脆性破坏转变为延性破坏。

构建的循环侵水-荷载耦合损伤本构模型为研究库岸边坡等涉水岩土工程的稳定性提供了参考,但其工程应用仍需突破两个关键环节:一是模型参数的物理意义需结合能量演化与微观测试进行阐释,以增强模型的理论清晰度;二是开发模型的增量形式,并通过FLAC^{3D}平台的二次开发,转化为适用于实际工程数值模拟的模型,直接服务于涉水岩体工程的稳定性预测与防控。

参考文献:

- [1] 马兴印,公绪飞,卞立国,等.双轴加载条件下红砂岩基本力学特性及破坏机制[J].山东科技大学学报(自然科学版),2022,41(3):58-65.
MA Xingyin, GONG Xufei, BIAN Ligu, et al. Basic mechanical properties and failure mechanism of red sandstone under biaxial loading condition[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(3):58-65.
- [2] 王滢,王妍妍,高盟,等.深海能源土含气储层边坡稳定性研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2024,43(1):32-40.
WANG Ying, WANG Yanyan, GAO Meng, et al. Study on slope stability of deep-sea energy soil gas reservoir[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2024, 43(1):32-40.
- [3] ÖZBEK A. Investigation of the effects of wetting-drying and freezing-thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(2):595-609.
- [4] COSTIN L S. Damage mechanics in the post-failure regime[J]. Mechanics of Materials, 1985, 4:149-160.
- [5] 徐志华,张国栋,孙钱程,等.干湿循环作用下红砂岩强度劣化特性试验[J].中国公路学报,2018,31(2):226-233.
XU Zhihua, ZHANG Guodong, SUN Qiancheng, et al. Experimental research on strength degradation of red sandstone under dry-wet conditions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2):226-233.
- [6] CHEN S J, JIANG T Q, WANG H Y. Influence of cyclic wetting-drying on the mechanical strength characteristics of coal samples: A laboratory-scale study[J/OL]. Energy Science and Engineering, 2019, 7(6). DOI:10.1002/ese3.476.
- [7] HUANG S Y, WANG J J, QIU Z F, et al. Effects of cyclic wetting-drying conditions on elastic modulus and compressive

- strength of sandstone and mudstone[J/OL]. *Processes*, 2018, 6(12). DOI:10.3390/pr6120234.
- [8] 刘新喜,李玉,范子坚,等. 干湿循环作用下单裂隙炭质页岩能量演化与破坏特征研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(7):1761-1771.
LIU Xinxi, LI Yu, FAN Zijian, et al. Energy evolution and failure characteristics of single fissure carbonaceous shale under drying-wetting cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(7):1761-1771.
- [9] 宋朝阳,纪洪广,刘志强,等. 干湿循环作用下弱胶结岩石声发射特征试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(4):812-819.
SONG Zhaoyang, JI Hongguang, LIU Zhiqiang, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of weakly cemented granular rocks affected by dry-wet cycling process[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2019, 36(4):812-819.
- [10] 黄震,胡钊健,张海,等. 干湿循环下宁明粉砂岩宏微观损伤劣化规律[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(12):4954-4961.
HUANG Zhen, HU Zhaojian, ZHANG Hai, et al. Macro/micro damage degradation law of ningming siltstone under dry-wet cycles[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(12):4954-4961.
- [11] ORTIZ M A. Constitutive theory for the inelastic behavior of concrete[J]. *Mechanics of Materials*, 1985, 4(1):67-93.
- [12] DENG H F, HU A L, LI J L, et al. Statistical damage constitutive model of sandstone under water-rock interaction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(3):631-639.
- [13] 冯美生,叶倩华,周新宇. 不同溶液及干湿循环作用下砂岩宏微观损伤效应试验与模型研究[J]. *工程勘察*, 2024, 52(1):20-26.
FENG Meisheng, YE Qianhua, ZHOU Xinyu. Experimental and model study on macro and micro damage effects of sandstone under different solutions and drying-wetting cycles[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 2024, 52(1):20-26.
- [14] LI T, HOU R, LIU G K, et al. Investigations on creep behavior and fractal derivative constitutive model of sandstone under different drying-wetting cycles[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 26(1):69-78.
- [15] DU B, BAI H B. A damage constitutive model of red sandstone under coupling of wet-dry cycles and impact load [J/OL]. *Shock and Vibration*, 2019. DOI:10.1155/2019/7692424.
- [16] LIU Y D, ZHANG H J, QIN Z, et al. Energy evolution and deformation features of re-loading creep failure in yellow sandstone after cyclic water intrusion[J/OL]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2025, 186. DOI:10.1016/j.ijrmmms.2024.106019.
- [17] 王子娟,刘新荣,傅晏,等. 两种 pH 水环境干、湿循环作用对泥质砂岩的侵蚀研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(11):3231-3239.
WANG Zijuan, LIU Xinrong, FU Yan, et al. Erosion analysis of argillaceous sandstone under dry-wet cycle in two pH conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(11):3231-3239.
- [18] 肖鹏,陈有亮,杜曦,等. 冻融循环作用下砂岩的力学特性及细观损伤本构模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(4):805-815.
XIAO Peng, CHEN Youliang, DU Xi, et al. Mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycles and studies on meso-damage constitutive model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(4):805-815.
- [19] HUANG X, PANG J Y, LIU G C, et al. Experimental study on physicomaterial properties of deep sandstone by coupling of dry-wet cycles and acidic environment[J/OL]. *Advances in Civil Engineering*, 2020. DOI:10.1155/2020/2760952
- [20] LEMAITRE J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. *Transactions of the ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, 1985, 107:83-89.

(责任编辑:吕海亮)