

应力 - 干湿循环耦合作用下砂泥岩接触面剪切特性与机制研究

张景昱^{1,2}, 钱信之^{1,2}, 邓华锋^{1*}, 黄宜胜^{1,2}, 李建林¹, 程 雷¹, 宛良朋³

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

3. 中国三峡建设管理有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 岸坡消落带岩体在水位周期变动和上覆岩层自重共同作用下, 其物理力学性质呈现弱化趋势, 这种趋势在砂泥岩互层结构中尤为显著。为研究砂泥岩接触面剪切力学特性, 以三峡库区岸坡典型砂泥岩接触面为研究对象, 设计并开展应力 - 干湿循环耦合作用试验。结果表明, 应力 - 干湿循环耦合作用导致接触面抗剪强度、黏聚力和内摩擦角呈现先快后慢的非线性劣化趋势, 且劣化程度随上覆应力的增大而加剧; 基于莫尔 - 库仑准则建立的抗剪强度劣化模型计算结果与试验数据拟合效果较好; 细观分析发现, 砂泥岩接触面结构由密实向疏松多孔转变, 其中泥岩的损伤劣化对接触面力学性能弱化起主导作用。研究成果为三峡库区碎屑岩互层岸坡的劣化分析与稳定性评估提供了重要的理论依据。

关键词: 岩石力学; 上覆应力; 干湿循环; 砂泥岩接触面; 抗剪强度; 劣化机制

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2026)01 - 0065 - 14

第一作者: 张景昱 (1987 -), 现任副教授, 主要从事水工岩土工程方面的研究工作。E-mail: zhangjingyu@ctgu.edu.cn

***通信作者:** 邓华锋 (1979 -), 现任教授, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn

Shear characteristics and mechanisms of sandstone-mudstone interface under coupled stress and dry-wet cycling

ZHANG Jingyu^{1,2}, QIAN Xinzh^{1,2}, DENG Huafeng^{1*}, HUANG Yisheng^{1,2}, LI Jianlin¹,
CHENG Lei^{1,2}, WAN Liangpeng³

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. China Three Gorges Construction Management Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Under the combined influence of periodic water level fluctuations and the overlying rock mass, the hydro-fluctuation belt of reservoir bank slopes exhibits significant degradation in physical and mechanical properties, particularly in interbedded sandstone and mudstone formations. To investigate the shear mechanical characteristics of sandstone-mudstone interfaces, typical interfaces from the Three Gorges Reservoir area were examined through stress and dry-wet cycle coupling tests. The results indicate that this coupling effect leads to a nonlinear degradation trend in interfacial shear strength, cohesion, and internal friction angle, characterized by an initial rapid decline followed by a gradual reduction. The degradation intensifies with increasing overburden stress. A shear strength degradation model based on the Mohr-Coulomb criterion showed strong agreement with the experimental data.

收稿日期: 2025 - 06 - 13; **修回日期:** 2025 - 09 - 16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U22A20600, 52327811), 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金项目 (2022KDZ23)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U22A20600 and 52327811) and Open Fund of the Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University (Grant No. 2022KDZ23)

Microscopic analysis revealed a transition in the interface structure from dense to porous, with mudstone degradation playing a dominant role in the weakening of mechanical properties. These findings provide a theoretical basis for the degradation analysis and stability evaluation of elastic rock bank slopes in the Three Gorges Reservoir area.

Key words: rock mechanics; overburden stress; wet-dry cycling; sandstone-mudstone interface; shear strength; degradation mechanism

First author: ZHANG Jingyu (1987 -), associate professor, is engaged in research on hydraulic and geotechnical engineering. E-mail: zhangjingyu@ctgu.edu.cn

***Corresponding author:** DENG Huafeng (1979 -), professor, is engaged in research on geotechnical engineering. E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn

1 引言

三峡库区广泛分布碎屑岩,其中以砂泥岩互层最为典型,在库水位循环升降影响下,砂岩和泥岩长期经历干湿循环作用会产生劣化效应,引发局部塌岸^[1];同时,砂泥岩接触面也会受到侵蚀,进而导致层面剪切力学特性劣化,引发岸坡滑移失稳。

目前,国内外学者针对水-岩作用对砂岩和泥岩物理力学特性的影响进行了大量研究。张村等^[2]对砂岩进行了多种含水状态下力学特性、破裂演化、劣化机制等方面的研究,发现水-岩作用下砂岩发生力学性质劣化。邓华锋等^[9]设计并进行砂岩节理热湿循环和重复剪切次序作用下的试验,发现在12个热湿循环周期内,砂岩节理面的剪切力学参数、形貌特征及剪切耗散能均呈现相似的演化规律:初期急剧下降,随后趋于稳定。曹廷等^[10]通过水-岩循环试验,对变质砂岩宏观物理力学参数关系开展了研究,结果表明,试样破坏特征有随着循环次数的增加由剪切破坏向拉张破坏转变的趋势。黄叶宁等^[11]系统分析了节理岩体的剪切力学性能与损伤演化,并建立了相应的水-岩损伤剪切本构模型。X. W. Xu等^[12]研究了粉砂质泥岩在干湿循环作用下的物理力学性质变化,提出考虑残余强度和非线性变形特性的损伤本构模型,并验证了其有效性。H. Qin等^[13]提出用峰值前损伤变量来表征峰值应力之前的损伤程度,从宏观和微观2个角度揭示了泥岩的破坏机制和力学特性。刘晓明等^[14]通过单、三轴压缩试验和崩解试验,揭示了泥岩在干湿循环作用下力学性质显著劣化,具体表现为强度降低、塑性变形阶段延长及破坏模式向剪切破坏演化。于天佑等^[17]通过研究水汽循环对红层泥岩力学特性的影响规律,建立了指数型劣化模型。王宇等^[18]研究了卸荷损伤泥岩在水-岩作用下的宏细观参数变化,

建立了非线性动力学劣化模型,揭示了质量、波速、体积应变等参数的变化趋势。李桂臣等^[19]系统研究了泥岩在宏观、细观和微观尺度下的水-岩作用机制,提出了多尺度关联体系,为泥岩工程灾害防治提供了理论基础。近年来,在自重应力作用下,岸坡砂、泥岩劣化诱发层间剪切破坏,发生了三峡库区杉树槽滑坡^[20]、卡门子湾滑坡^[21]、万州区五桥街道和钟鼓楼街道、云阳县盘龙街道、奉节县红土乡等岩体崩塌灾害^[22]。

随着研究的深入,相关成果显示层面剪切力学特性的劣化也是导致岸坡失稳的主要诱因之一。黄小芸等^[23]开展了土-岩接触面干湿循环作用试验,表明干湿循环作用下土体和岩体强度劣化,是导致土-岩接触面抗剪性能劣化的主要原因。周博^[24]进行了冻融循环作用下黄土、泥岩及界面试样的剪切试验,发现相较于黄土试样而言,冻融作用对泥岩和黄土-泥岩界面试样的损伤作用更明显。许博闻等^[25]通过系统研究含水率、干密度及界面形态对黄土-泥岩接触面剪切特性的影响,揭示了其剪切力学行为与抗剪强度的衰减规律。陈雨爽^[26]探索了岩层厚度、岩层倾角及互层岩体界面处力学性质的变化对岩体力学特性的影响,表明岩体强度随泥岩层分布密度的增加而增大。Q. Wu等^[27]研究了干湿循环对2种不同岩石类型不连续面剪切特性的影响,发现干湿循环导致节理岩体微观结构和宏观物理性能退化,进而影响其剪切强度。

在实际工程中,岸坡岩体除了受到干湿循环作用以外,还受到上覆岩层自重的影响。在持续的上覆应力与周期性干湿条件的共同作用下,岩体的劣化进程将显著加快。现有研究已系统揭示了干湿循环作用下岩体的劣化规律及接触面剪切特性,但较少考虑实际工程中上覆应力的影响。为此,以三峡库区典型顺层碎屑岩岸坡为研究对象,设计并开展应力-干湿循环耦合作用试验,获得接触面的剪切

力学特性演化规律, 分析砂泥岩接触面剪切力学特性劣化效应, 并结合单轴压缩试验、纵波波速测试和 SEM 电镜扫描试验, 揭示其劣化机制。

2 试验方案

2.1 试样制备

三峡库区典型碎屑岩岸坡如图 1 所示, 试验选取秭归库区碎屑岩岸坡的砂岩和泥岩为研究对象(见图 2), 将含层面的原岩制作成 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的劈裂面试样。采用 ST500 三维轮廓仪对劈裂面进行扫描, 将点数据生成 .stl 格式文件, 通过粗糙度系数(JRC)计算公式^[28], 得到砂岩层和泥岩层的接触面粗糙度系数为 9.47。

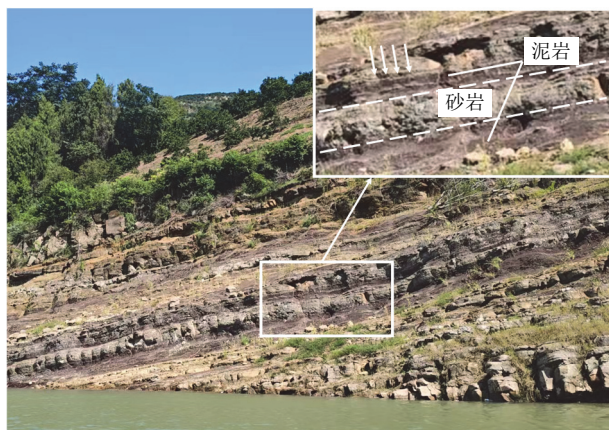


图 1 三峡库区典型碎屑岩岸坡

Fig.1 Typical clastic rock bank slopes in the Three Gorges Reservoir area

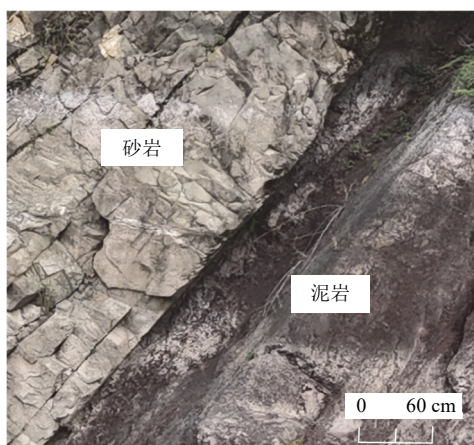


图 2 秭归库区岸坡典型砂泥岩接触面

Fig.2 Typical sandstone-mudstone interface in the bank slopes of Zigui reservoir area

通过波速测试和密度测试, 剔除有明显缺陷和测试值离散性较大的试样后, 根据试验要求, 分别

将砂岩和泥岩制备成 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的长方体试样。为模拟软硬互层结构, 采用线切割制作粗糙度系数为 9.5 的锯齿状接触面, 起伏高度为 2 mm, 将 2 种岩样接触面吻合, 最终形成 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的立方体试样(见图 3)。

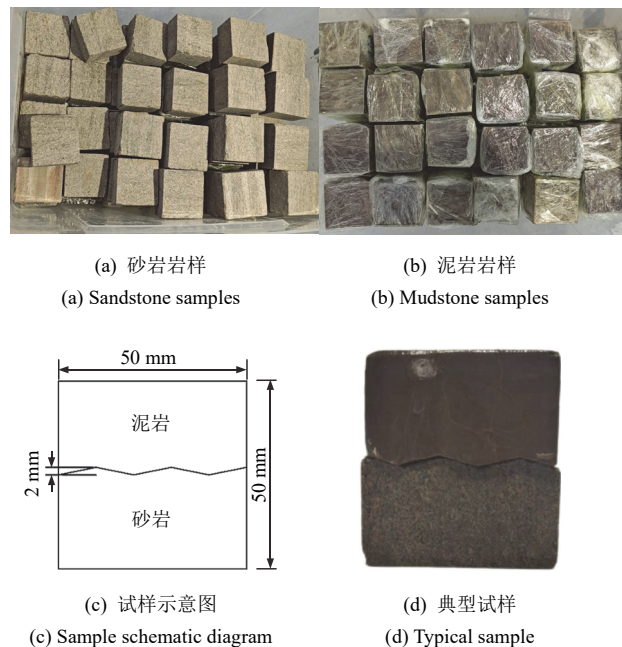


图 3 砂、泥岩接触面试样

Fig.3 Sandstone and mudstone interface samples

2.2 试验流程

根据三峡库区地质资料, 计算出碎屑岩消落带岸坡岩体上覆应力范围为 $0.08 \sim 0.66\text{ MPa}$ 。为模拟消落带砂泥岩互层的应力赋存环境, 选取 0.2, 0.4 和 0.6 MPa 三个典型应力梯度进行试验。

对泥岩岩样进行含水率测试, 含水率随时间的变化曲线如图 4 所示。由图可知, 加湿过程可分为快速增长($2.29\% \leq w < 4.65\%$)、缓慢增长($4.65\% \leq w < 5.01\%$)和趋于饱和($5.01\% \leq w \leq 5.06\%$)三个阶段; 风干过程分为含水率下降($5.06\% \geq w > 2.49\%$)和裂纹演化($2.49\% \geq w \geq 0.57\%$)两个阶段。在裂纹演化阶段, 随着含水率降低, 泥岩颗粒间接触状态由连续胶结逐渐向散体流态转变, 导致岩样产生裂隙并破坏其完整性。因此, 将泥岩的含水率范围界定为 $2.49\% \sim 5.06\%$ 。为避免干湿循环过程中出现开裂现象, 采用“加湿-风干”的循环方式。考虑到砂岩的透水性高于泥岩, 实际工程中水分通常先渗透至砂岩层, 再通过砂泥岩接触面逐渐浸润泥岩, 故在泥岩试样四周及顶面涂防水胶层, 使接触面利用砂岩的毛细吸水特性浸湿。

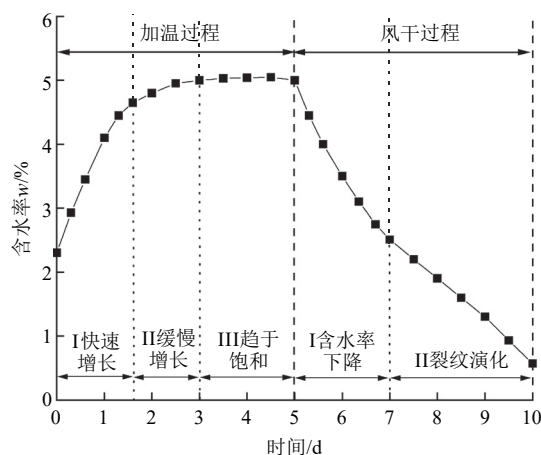


图4 泥岩含水率随时间变化曲线

Fig.4 Variation of moisture content in mudstone with time

参考以往的研究经验, 应力-干湿循环耦合作用试验共进行 12 个循环周期^[29-30]。每个循环周期依次对试样进行加压、雾化加湿(加湿 28 d 模拟三峡水库高水位运行工况)和风干(风干 2 d 模拟防洪限制水位运行工况, 避免持续风干导致岩样开裂)。在第 0, 1, 3, 5, 8, 12 次循环后, 采用 YZW1000 型微机控制电动直剪仪进行试样在 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa 法向应力下的直剪试验(法向加载速率 0.05 kN/s, 剪切速率 0.025 mm/s), 采用 RMT-150C 岩石力学试验机测试试样的单轴抗压强度(轴向位移加载速率为 0.005 mm/s), 分别采用 RSM-SY5(T)非金属声波检测仪和 Prisma E 环境扫描电子显微镜

测试在不同应力-干湿循环耦合作用循环次数下的纵波波速及微观结构(见图 5)。

3 剪切力学特性劣化规律

为研究应力-干湿循环耦合作用对砂泥岩接触面抗剪强度的影响, 不同上覆应力条件下试验结果如图 6 所示。由图可知, 不同循环次数下曲线形态基本一致, 均经历弹性与塑性 2 个阶段。随着循环次数增加, 曲线整体下移, 斜率逐渐减小, 同时抗剪强度降低, 表明砂泥岩接触面剪切力学特性劣化效应明显。

为探究干湿循环次数 N 、上覆应力 σ_0 及法向应力 σ_n 对接触面抗剪强度 τ 的影响, 将这 3 个影响因素分别设为 x , y 和 z , 并以三维球体的大小(颜色)表征抗剪强度 τ 的值, 如图 7 所示。当干湿循环次数或上覆应力与法向应力相同时, 不同干湿循环次数(上覆应力)的抗剪强度差异较小; 当干湿循环次数与上覆应力相同时, 抗剪强度随法向应力的增加而增大。这表明法向应力对抗剪强度的影响高于干湿循环次数和上覆应力。

为排除法向应力的影响, 将相同法向应力设为一组, 绘制抗剪强度劣化规律曲线, 如图 8 所示。由图可知, 砂泥岩接触面抗剪强度随循环次数的增加呈指数型衰减, 总体呈现先快后慢的劣化规律。具体表现为: 无上覆应力时, 12 次循环后强度劣化

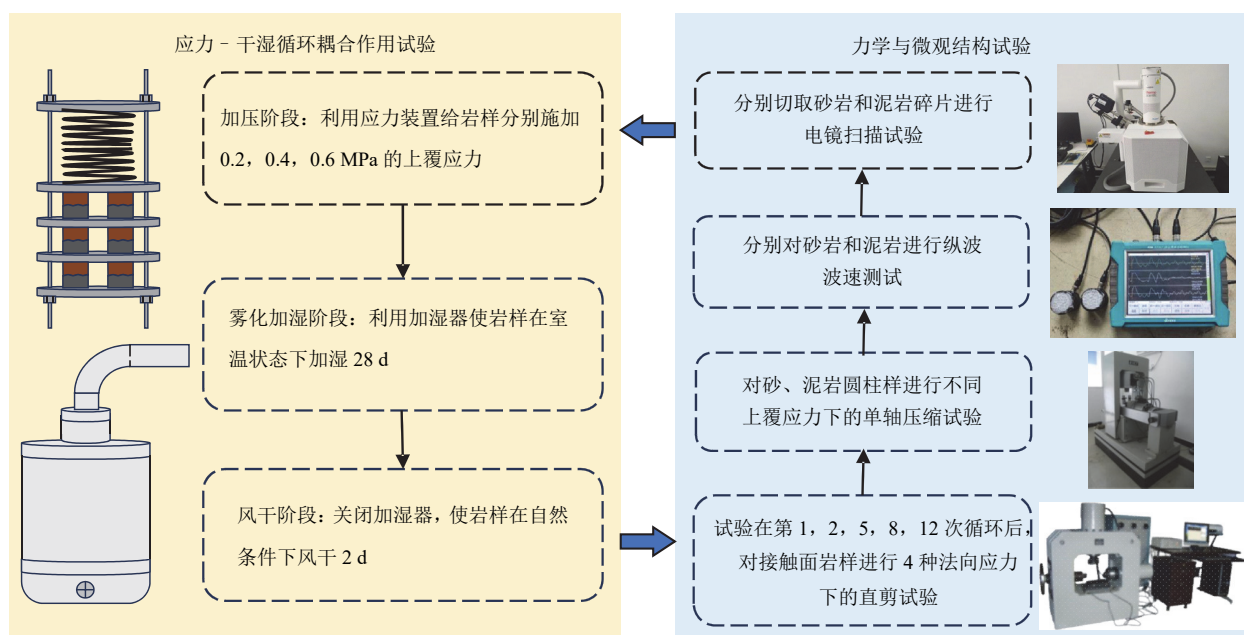


图5 应力-干湿循环耦合作用试验仪器及流程图

Fig.5 Test apparatus and procedure for stress and wet-dry cycling coupling experiment

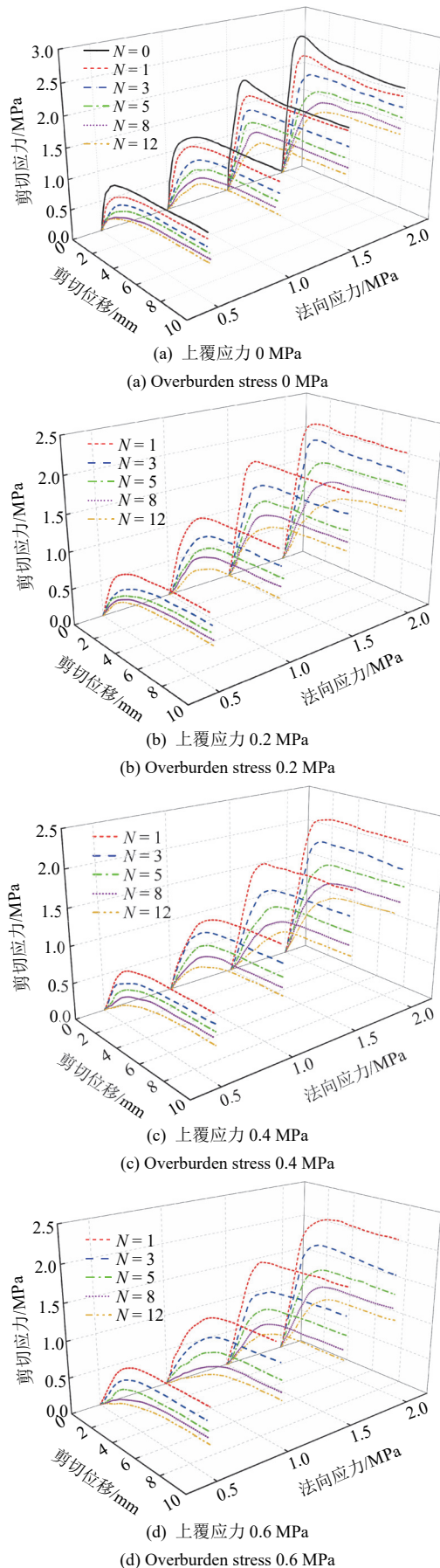
图6 不同上覆应力 σ_0 接触面岩样剪切应力-剪切位移曲线

Fig.6 Shear stress-shear displacement curves of interface samples under different overburden stresses

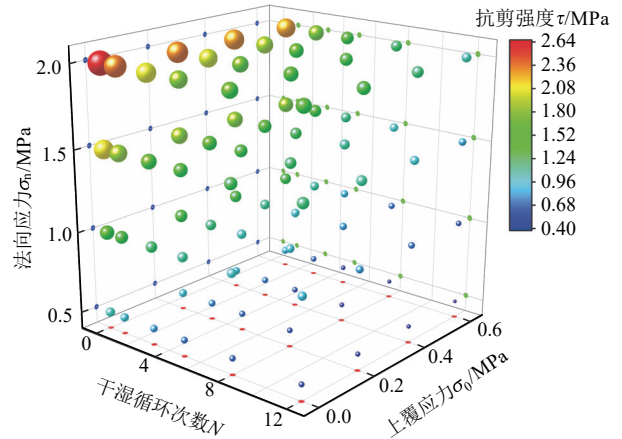
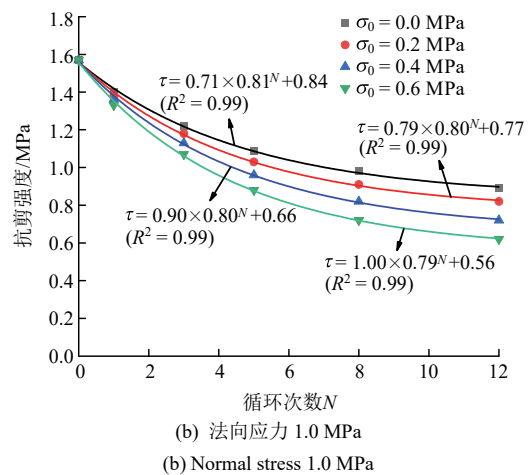
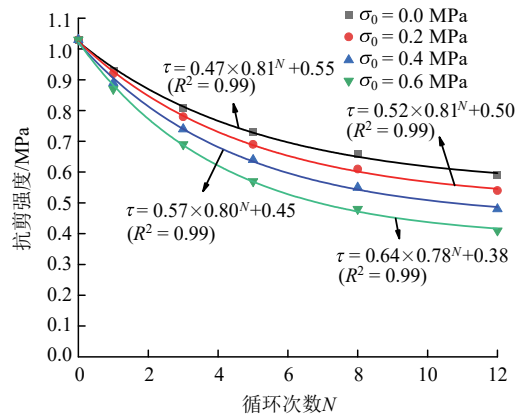


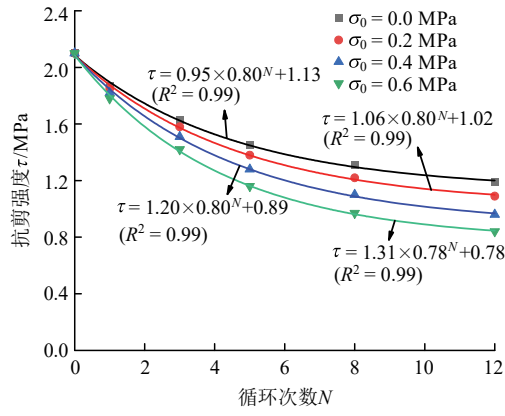
图7 砂泥岩接触面抗剪强度对比图

Fig.7 Comparison of shear strength at sandstone-mudstone Interfaces

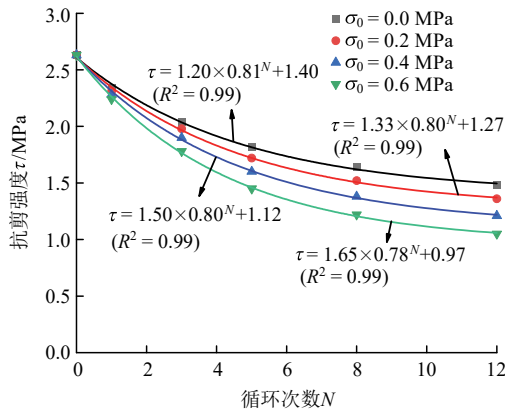
41.75%~43.73%；施加0.2~0.6 MPa的上覆应力后，劣化幅度增至47.57%~60.51%，且上覆应力越大劣化越显著。其中，前5次循环内强度劣化幅度较大，8次循环后劣化趋势明显减缓。

根据莫尔-库仑准则，对抗剪强度数据进行拟合，得到接触面黏聚力 c 与内摩擦角 φ ，并绘制其劣化曲线，如图9所示。由图可知，在应力-干湿循





(c) 法向应力 1.5 MPa
(c) Normal stress 1.5 MPa

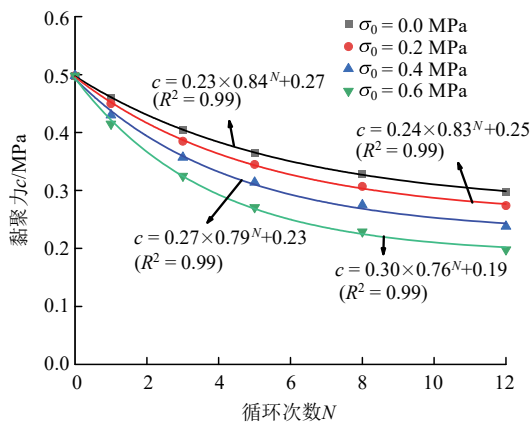


(d) 法向应力 2.0 MPa
(d) Normal stress 2.0 MPa

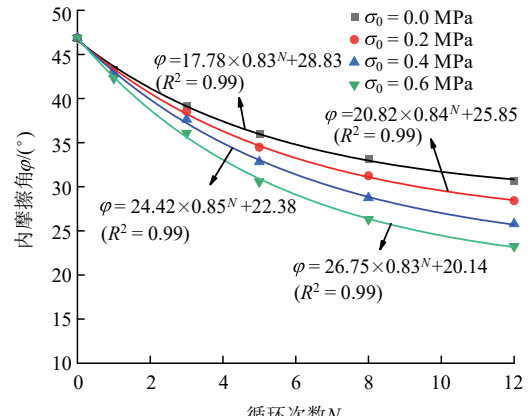
图 8 各循环次数下砂泥岩接触面抗剪强度劣化规律曲线
Fig.8 Deterioration patterns of shear strength at sandstone-mudstone interfaces under different cycle numbers

环耦合作用下, 接触面黏聚力和内摩擦角均表现出典型的指数劣化规律, 下降速率随循环次数由快转慢。经 12 次循环后, 黏聚力降低 40.16%~60.24%, 内摩擦角降低 34.56%~50.41%。

为区分上覆应力和干湿循环对接触面抗剪强度劣化的影响, 分别计算每个循环内由干湿循环和上



(a) 黏聚力
(a) Cohesion



(b) 内摩擦角
(b) Internal friction angle

图 9 各循环次数下接触面黏聚力和内摩擦角劣化规律曲线
Fig.9 Degradation trends of cohesion and internal friction angle at interfaces under different cycle numbers

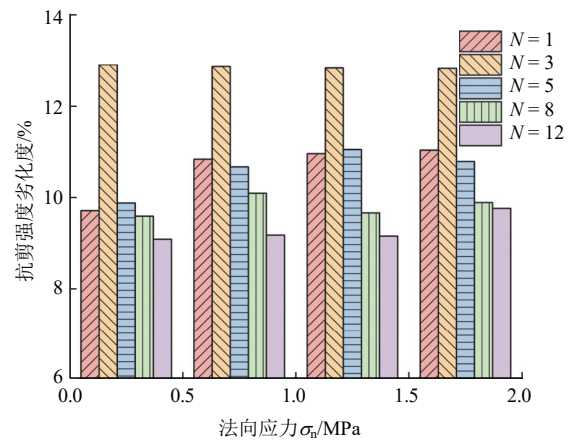


图 10 干湿循环导致的接触面抗剪强度劣化度
Fig.10 Degradation degree of shear strength at interface induced by wet-dry cycles

覆应力引起的强度劣化度: 上覆应力为 0 MPa 时, 不同循环次数下抗剪强度劣化度仅反映干湿循环的作用; 对于施加了上覆应力(0.2, 0.4, 0.6 MPa)的试验组, 其抗剪强度劣化度与相同循环次数下覆应力 0 MPa 试验劣化度的差值即为该上覆应力单独引起的劣化度。图 10 为干湿循环导致的接触面抗剪强度阶段劣化度。由图 10 可知, 无上覆应力时, 不同法向应力下干湿循环引起的抗剪强度阶段劣化度均呈先增后减的趋势, 第 3 次循环周期达到峰值(12.82%~12.90%), 随后逐渐降低(第 12 个循环周期降至 9.09%~9.76%); 与初始状态相比, 接触面抗剪强度总劣化度分别为 41.75%, 43.31%, 43.33%, 43.73%。说明干湿循环对接触面抗剪强度的劣化呈明显的阶段性特征, 初期(第 1~3 次循环)劣化速率最大, 后期逐渐减缓, 且法向应力对劣化度影响不

显著。

图 11 为干湿循环作用下黏聚力和内摩擦角的阶段劣化度。结果显示，黏聚力和内摩擦角的劣化度变化趋势与抗剪强度基本一致，第 3 次循环达到峰值，其中黏聚力阶段劣化度为 11.96%，内摩擦角为 9.3%；经 12 次循环后，黏聚力和内摩擦角总劣化度分别达 39.56% 和 34.56%，说明干湿循环对接触面剪切力学参数具有显著的劣化作用。

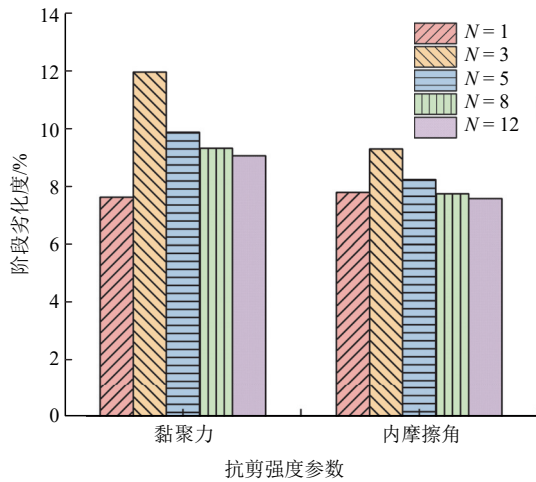


图 11 干湿循环导致的黏聚力和内摩擦角劣化度

Fig.11 Degradation of cohesion and internal friction angle induced by wet-dry cycles

计算各循环次数下由上覆应力导致的接触面抗剪强度劣化度，并绘制成柱状图，如图 12 所示。由图可知，法向应力相同时，上覆应力越大，抗剪强度阶段劣化度越高；与无上覆应力状态相比，经历第 1, 3, 5, 8, 12 次循环后，上覆应力为 0.2, 0.4 和 0.6 MPa 时的抗剪强度较无应力状态时分别减小了 0.88%~9.68%，2.18%~18.59%，4.39%~32.34%，表明上覆应力会加剧干湿循环作用的损伤劣化进程。

图 13 为上覆应力导致的接触面黏聚力和内摩擦角总劣化度曲线。结果表明：2 种参数的总劣化度均随循环次数和上覆应力的增加而增大；在 0.2~0.6 MPa 上覆应力作用下，经历 12 次循环后，黏聚力劣化达 10.87%~29.87%，内摩擦角劣化达 2.15%~24.21%，且应力越大劣化越显著。这说明上覆应力能够加快干湿循环过程中抗剪强度参数的劣化速率。

4 剪切强度经验公式

不同软-硬结构面峰值剪切强度经验公式主要

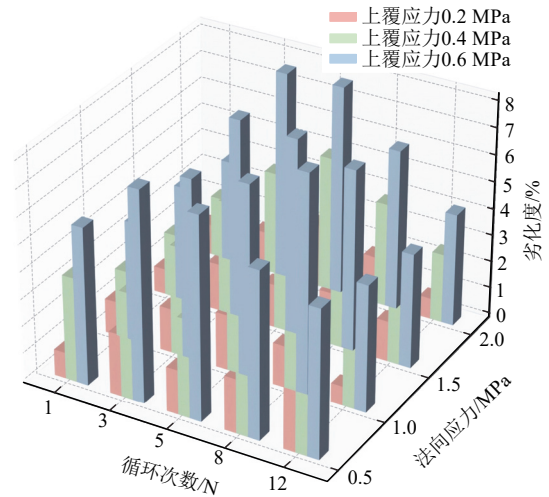


图 12 上覆应力 σ_0 导致的接触面抗剪强度劣化度

Fig.12 Degradation degree of interface shear strength induced by overburden stress σ_0

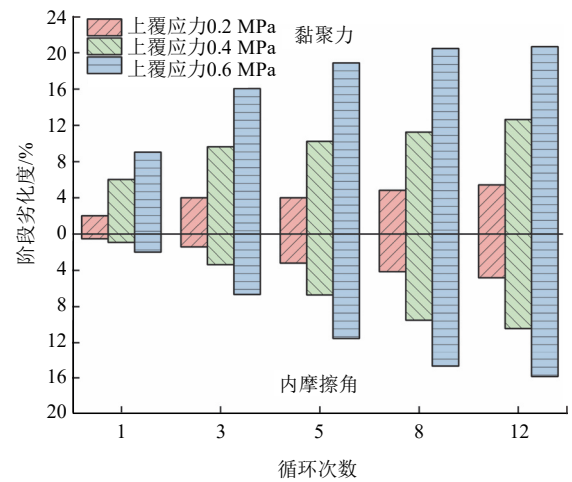


图 13 上覆应力导致的黏聚力和内摩擦角总劣化度变化

Fig.13 Cumulative degradation of cohesion and internal friction angle caused by overburden stress

有张雅慧公式^[31]、宋磊博公式^[32]、金磊磊公式^[33]、Jiang 公式^[34]和范祥公式^[35]具体如下：

张雅慧公式：

低法向应力下的 I 型改进 Barton 准则：

$$\tau = \sigma_n \tan \left\{ \varphi + JRC \lg \left[\frac{(1 - K_a) JCS_a + K_a JCS_b}{\sigma_n} \right] \right\} \quad (1)$$

式中： K_a 为强度影响因子； JCS_a ， JCS_b 分别为硬岩和软岩的岩壁强度。

高法向应力下的 II 型改进 Barton 准则：

$$\tau = \sigma_n \tan \left\{ \varphi + JRC \lg \left[\frac{K_a JCS_a + (1 - K_a) JCS_b}{\sigma_n} \right] \right\} \quad (2)$$

$$K_a = \frac{\sigma_{ca}}{\sigma_{ca} + \sigma_{cb}} \quad (3)$$

式中: σ_{ca} , σ_{cb} 分别为硬、软岩的单轴抗压强度。

宋磊博公式:

$$\tau = \sigma_n \tan \left\{ \varphi + JRC \lg \left[\frac{JCS_b [a(W_{sc})^b + (1-a)]}{\sigma_n} \right] \right\} \quad (4)$$

$$W_{sc} = \frac{\sigma_{ca}}{\sigma_{cb}} \quad (5)$$

式中: a , b 为系数, $a = 0.6572$, $b = 0.1937$ 。

金磊磊公式:

$$\tau = \sigma_n \tan \left\{ \varphi_b + 7 \frac{A_0 \theta_{\max}^*}{C+1} \frac{1}{1 + \frac{12\sigma_n}{JCS_{cs} [0.2 \ln(W_{sc}) + 1]}} \right\} \quad (6)$$

式中: φ_b 为基本摩擦角, A_0 为剪切方向的最大潜在接触面面积比, $\theta_{\max}^*$ 为最大视倾角, C 为节理面粗糙度, JCS_{cs} 为较软侧岩石抗压强度系数。

Jiang 公式:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\alpha \varphi_b + (1-\alpha) \varphi_a + JRC \lg \left(\frac{JCS_b}{\sigma_n} \right) \right] \quad (7)$$

式中: φ_a , φ_b 为壁面的基本摩擦角; α 为系数, 取 0.776。

范祥公式:

$$\tau = 0.3614 + \frac{\sigma_n (JRC)(CCS)(0.0023CCS + 0.0702)}{\sigma_n JRC + CCS} \quad (8)$$

$$CCS = 0.25JCS_a + 0.75JCS_b \quad (9)$$

式中: CCS 为软-硬节理组合壁面强度。

张雅慧等^[31-35]基于异性结构界面剪切破坏机制, 引入壁面强度系数、三维形貌参数、节理强度比和节理粗糙系数等参数, 建立了适用于软-硬界面的峰值剪切强度公式。然而, 现有公式对碎屑岩接触面的适用性仍缺乏有效验证, 同时也未考虑岸坡环境中上覆应力的影响。上述公式与试验值的平均绝对误差如表 1 所示。可以看出, 金磊磊公式和 Jiang 公式的平均绝对百分比误差在 20% 左右, 张

表 1 不同经验公式计算值与试验值平均绝对百分比误差

Table 1 Mean absolute percentage error between calculated values from different empirical formulas and experimental values

经验公式(empirical formula)	MAPE/%	经验公式(empirical formula)	MAPE/%
张雅慧 I 型公式	40.11	金磊磊公式	17.75
张雅慧 II 型公式	42.11	Jiang 公式	20.79
宋磊博公式	32.36	范祥公式	303.9

雅慧公式、宋磊博公式和范祥公式平均绝对百分比误差较大。因此, 有必要提出一种适用于砂泥岩接触面, 并能反映岩体真实赋存环境的剪切强度预测公式。

4.1 基于试验的抗剪强度公式

当上覆应力 $\sigma_0 = 0$ 时, 接触面抗剪强度不受上覆应力的影响, 抗剪强度与干湿循环周期为指数关系, 表达式为

$$\tau(N) = Ak_1^N + B \quad (10)$$

式中: A 为初始衰减幅度系数, k_1 为抗剪强度随干湿循环的衰减率, B 为长期稳定值。各参数值见图 8。

在式(10)的基础上, 引入上覆应力 σ_0 , 分析上覆应力对抗剪强度劣化的影响。通过分析不同 σ_0 下的试验数据发现, σ_0 对干湿循环初期(N 较小)的强度衰减(A 和 k_1)影响较弱, 但对长期稳定值 B 的影响显著, B 值随 σ_0 增大呈线性递减趋势, 提取每组 σ_0 对应的渐近值 $B(\sigma_0)$, 并尝试用线性关系 $B(\sigma_0) = B - k_2 \sigma_0$ 进行拟合, 代入式(10)中得到 $\tau(N, \sigma_0)$:

$$\tau(N, \sigma_0) = Ak_1^N + (B - k_2 \sigma_0) \quad (11)$$

利用最小二乘法对斜率 k_2 进行求解, k_2 表示抗剪强度随上覆应力的衰减率, 不同法向应力下各系数数值及表达式见表 2, 3。

表 2 抗剪强度公式系数值

Table 2 Coefficient values of shear strength formula

法向应力(normal stress)/MPa	A	k_1	B	k_2
0.5	0.47	0.81	0.55	0.23
1.0	0.71	0.81	0.84	0.45
1.5	0.95	0.80	1.13	0.58
2.0	1.20	0.81	1.40	0.72

表 3 抗剪强度拟合公式

Table 3 Experimental-based fitting equations of shear strength

法向应力(normal stress)/MPa	$\tau(N, \sigma)$ 表达式(expression of $\tau(N, \sigma)$)
0.5	$\tau = 0.47 \times 0.81^N + (0.55 - 0.23\sigma_0)$
1.0	$\tau = 0.71 \times 0.81^N + (0.84 - 0.45\sigma_0)$
1.5	$\tau = 0.95 \times 0.80^N + (1.13 - 0.58\sigma_0)$
2.0	$\tau = 1.20 \times 0.81^N + (1.40 - 0.72\sigma_0)$

4.2 基于莫尔-库仑准则的抗剪强度经验公式

砂泥岩接触面抗剪强度与法向应力的关系可以表达为莫尔-库仑准则形式, 其公式为

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (12)$$

黏聚力、内摩擦角与干湿循环周期为指数关系，当上覆应力为 0 ($\sigma_0=0$) 时，黏聚力 c 、内摩擦角 φ 与干湿循环周期 N 的表达式分别为

$$c(N) = A_1 k_1^N + B_1 \quad (13)$$

$$\varphi(N) = A_2 k_1^N + B_2 \quad (14)$$

式中： k_1 为黏聚力衰减指数，对应泥岩胶结结构的渐进破坏过程，具体数值见图 9。

从图 9(a) 可以看出，上覆应力增大时，黏聚力整体减小。假设初始幅度 $A(\sigma_0)$ 和渐近值 $B(\sigma_0)$ 随 σ_0 变化：

$$c = A(\sigma_0) k_1^N + B(\sigma_0) \quad (15)$$

已知初始值 $A(0) = 0.23$ ， $B(0) = 0.27$ ，将数据取对数后进行迭代计算，发现 $A(\sigma_0)$ 无明显规律， $B(\sigma_0)$ 随 σ_0 减小：

$$B(\sigma_0) = B(0) - k_2 \sigma_0 \quad (16)$$

利用最小二乘法求解 k_2 ，将式(16)代入式(13)中，得到黏聚力与干湿循环周期、上覆应力的表达式为

$$c(N, \sigma_0) = 0.23 \times 0.84^N + 0.27 \times (1 - 0.4 \sigma_0) \quad (17)$$

假设内摩擦角 φ 与上覆应力 σ_0 呈线性衰减，即

$$\varphi(N, \sigma_0) = \varphi(N) - \alpha(\sigma_0) \quad (18)$$

对每个 N 值，计算 φ 随 σ_0 的变化斜率，发现 $\alpha(\sigma_0)$ 与 N 呈线性增长关系，经过化简得

$$\alpha(\sigma_0) = BN \sigma_0 \quad (19)$$

将式(19)代入式(14)中，得到内摩擦角与干湿循环周期、上覆应力的表达式为

$$\varphi(N, \sigma_0) = 17.78 \times 0.83^N + 28.83 - 1.2N \sigma_0 \quad (20)$$

抗剪强度公式中，各系数值见表 4，其中参数 k_1 反映了接触面微观结构的劣化速率。

表 4 抗剪强度参数公式系数值

Table 4 Coefficient values of shear strength parameter formulas

抗剪强度参数 (shear strength parameters)	A	k_1	B	k_2
黏聚力	0.23	0.84	0.27	0.108
内摩擦角	17.78	0.83	28.83	1.200

将式(17)，(20)代入式(12)中得到

$$\tau = 0.23 \times 0.84^N + 0.27 - 0.108 + \sigma_n \tan(17.78 \times 0.83^N + 28.83 - 1.2N \sigma) \quad (21)$$

4.3 模型验证

选取法向应力为 1.0 和 2.0 MPa 的试验数据，

将式(11)和(21)的计算值与试验值进行对比，如图 14 所示。由图可知，计算值与试验值较为接近。分别计算 2 种公式的整体误差如表 5 所示。对比分析表明，2 种公式的平均绝对误差均小于 5%，式(21)的各项误差指标低于式(11)，决定系数更接近 1，表明式(21)计算结果与试验值吻合度更高。表 5 中， $RMSE$ ， $MAPE$ ， AE_{Max} ， R^2 分别为均方根误差、平均绝对百分比误差、最大绝对误差和决定系数。

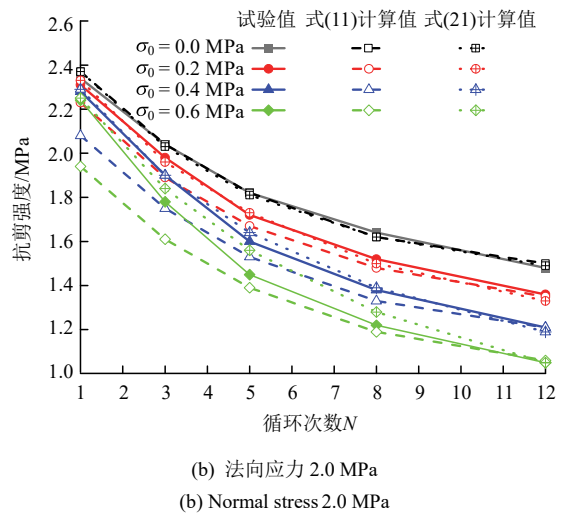
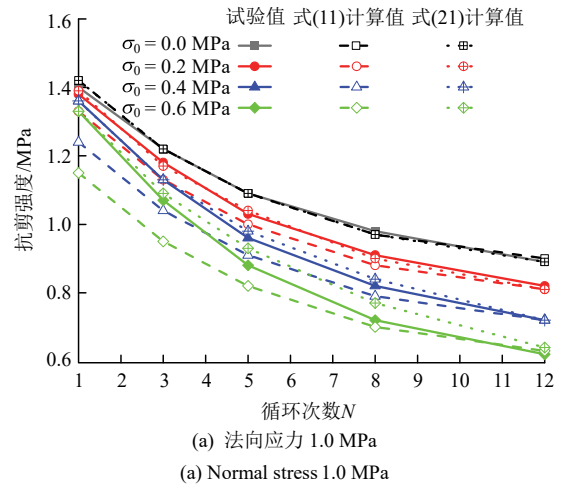


图 14 不同循环次数下抗剪强度计算值与试验值对比
Fig.14 Comparison between calculated and experimental shear stress under different cycle numbers

表 5 不同计算公式的误差指标

Table 5 Error metrics of calculation formulas (11) and (21)

公式(formula)	$RMSE/\%$	$MAPE/\%$	AE_{Max}	R^2
式(11)	6.21	4.87	0.30	0.948
式(21)	1.64	1.35	0.11	0.996

为验证经验公式的适用性，将由式(11)和(21)得到的砂泥岩接触面抗剪强度计算值与试验值进行对比分析，如图 15 所示。从图 15 可以看出，计算值

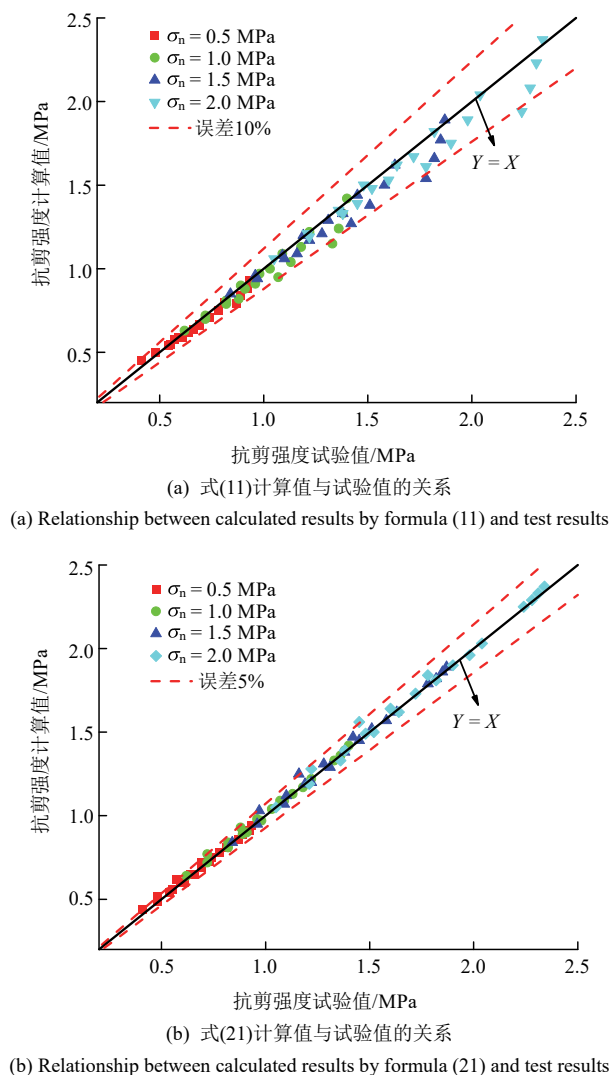


图 15 抗剪强度计算值与试验值的关系

Fig.15 Relationship between calculated and experimental values

与试验值较为接近, 数据均匀分布在 $Y = X$ 直线两侧, 其中, 式(11)计算值误差范围在 10% 以内, 式(21)计算值误差范围在 5% 以内。因此, 在给定范围($1 \leq N \leq 12$, $0.5 \leq \sigma_n \leq 2$ MPa, $0 \leq \sigma_0 \leq 0.6$) 内, 式(21)更适用于预测砂泥岩接触面的抗剪强度。

该模型主要适用于仅考虑干湿循环和上覆应力共同作用下的接触面抗剪强度预测, 且在特定参数范围(循环次数小于 12 次、上覆应力小于 0.6 MPa)内具有较好的适用性, 若超出此范围则需通过补充试验进一步验证。

5 抗剪强度劣化机制

砂泥岩接触面剪切力学特性与砂岩、泥岩自身物理力学特性有直接关系, 为揭示接触面的劣化机

制, 对不同循环次数下的砂岩、泥岩岩样分别进行了单轴压缩试验、纵波波速和微细观结构测试。

砂岩、泥岩抗压强度劣化曲线如图 16 所示, 砂、泥岩单轴抗压强度均随循环次数的增加而降低, 抗压强度总劣化值呈先快后慢的上升趋势, 且上覆应力越大, 总劣化值越大; 经过 12 次循环, 不同上覆应力下砂、泥岩单轴抗压强度的总劣化度范围分别为 23.28%~43.43%, 46.87%~62.17%。

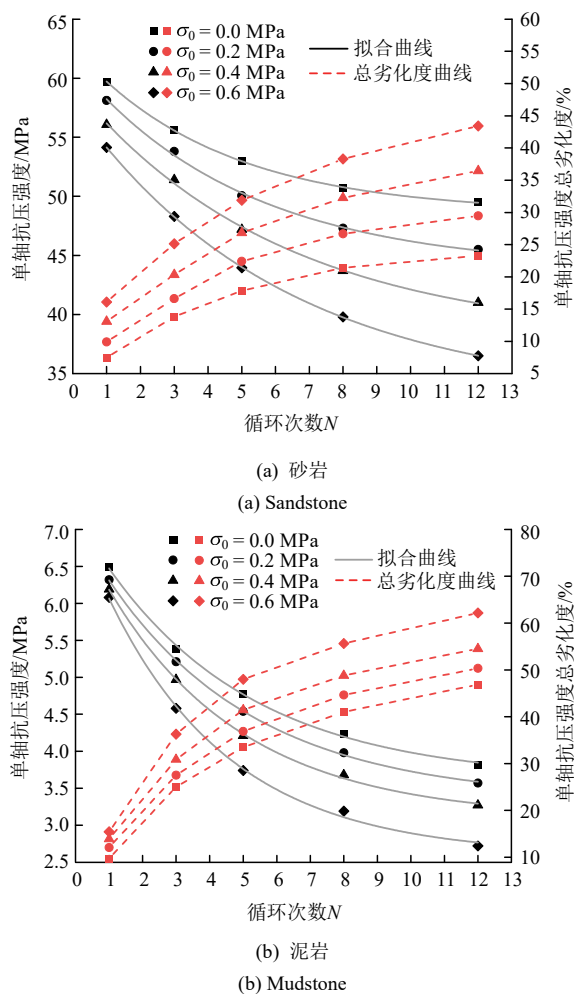


图 16 砂、泥岩单轴抗压强度劣化曲线

Fig.16 Deterioration curves of uniaxial compressive strength for sandstone and mudstone

砂岩和泥岩试样纵波波速变化曲线如图 17 所示, 2 种岩样的波速劣化均呈“缓-陡-缓”的趋势, 且泥岩劣化幅度明显大于砂岩。经 12 次循环后, 砂岩波速降低 14.78%~18.78%, 而泥岩降幅达 37.81%~49.32%; 上覆应力越大, 波速劣化越明显。说明应力-干湿循环耦合作用下泥岩结构更易受损。

砂岩和泥岩典型的 SEM 照片如图 18, 19 所示(以上覆应力 0 MPa 为例), 放大倍数为 650 倍。由图 18, 19 可知, 在应力-干湿循环耦合作用下, 砂、

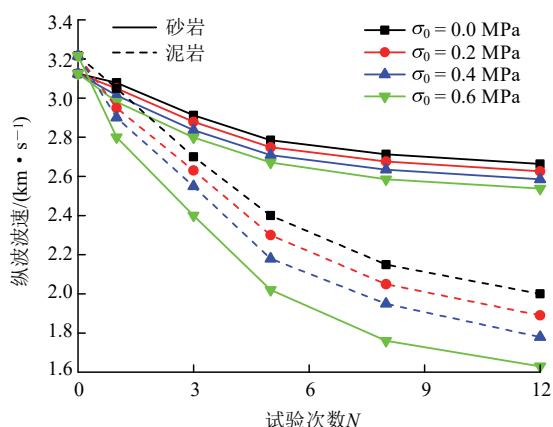
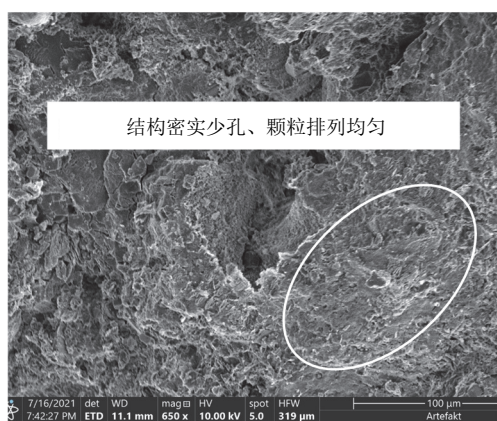
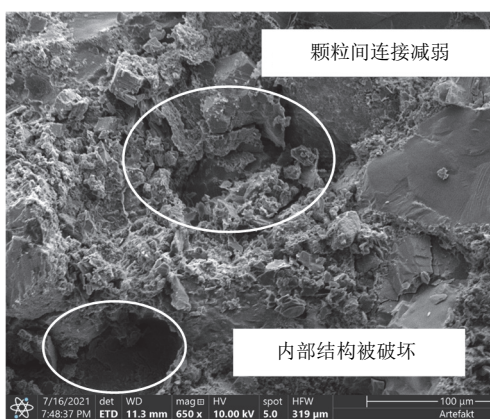


图 17 应力 - 干湿循环耦合作用下砂、泥岩纵波波速劣化规律

Fig.17 Deterioration patterns of P-wave velocities in sandstone and mudstone under stress-wet-dry cycling coupling effects



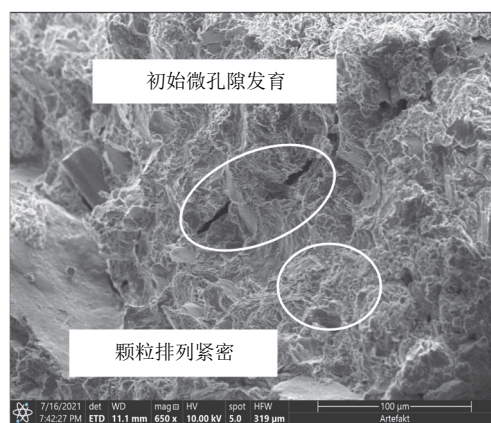
(a) 循环次数 0
(a) Cycle number 0



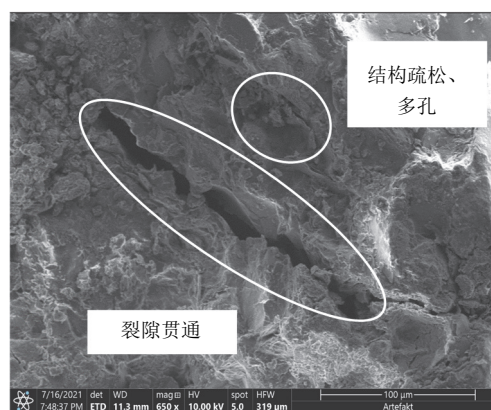
(b) 循环次数 12
(b) Cycle numbers 12

图 18 第 0 和 12 次循环后砂岩 SEM 扫描照片
Fig.18 SEM images of sandstone at 0 and 12 cycles

泥岩的微观结构特征呈现显著差异，其中泥岩的变化程度明显大于砂岩。在初始饱水状态下，砂岩和泥岩的整体结构均较为密实，内部仅存在少量不发育的原生孔隙，未见明显裂纹。随着试验次数的增



(a) 循环次数 0
(a) Cycle number 0



(b) 循环次数 12
(b) Cycle numbers 12

图 19 第 0 和 12 次循环泥岩 SEM 扫描照片

Fig.19 SEM images of mudstone before and after 12 cycles

加，泥岩内部裂隙持续扩展，内部孔隙增加，为水分渗透和化学反应提供了更为便利的通道，进而导致矿物颗粒逐渐溶解和脱落。经过 12 次循环后，泥岩的内部结构遭到严重破坏，颗粒间的连接变得极为松散，整体结构呈现出疏松多孔的状态。相比之下，砂岩在相同条件下虽然也出现了一定的结构变化，但其裂隙发育程度和孔隙增加幅度均明显小于泥岩，颗粒间的连接相对保持较好。泥岩在干湿循环后出现孔隙发育与胶结物流失，导致其内摩擦角降低。这一微观机制与经验公式所反映的“内摩擦角随上覆应力线性降低”的宏观规律相吻合。由于砂岩的力学性能相对稳定，砂泥岩接触面的剪切特性主要受控于泥岩。

应力 - 干湿循环耦合作用下岩石颗粒劣化机制如图 20 所示。加湿过程中，水分渗入岩石内部，导致胶结物质溶解，微孔隙逐渐发育。在上覆应力作用下，胶结物流失加快，促使微裂隙相互贯通，同时裂纹尖端应力集中加剧，进一步加速裂隙扩展，

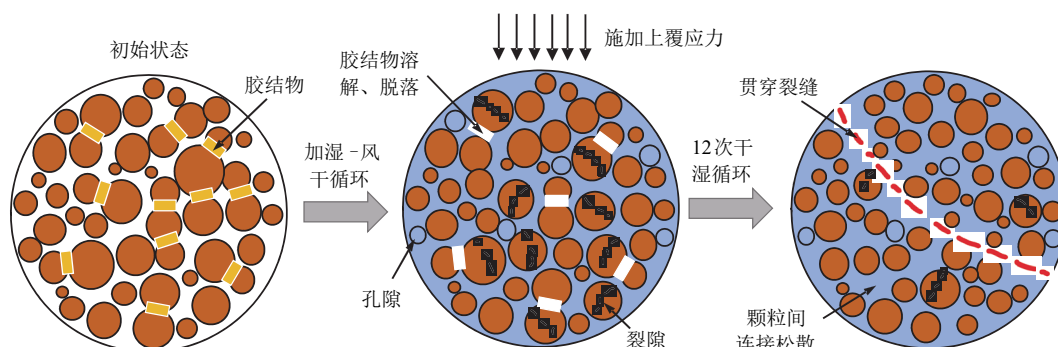


图 20 应力 - 干湿循环耦合作用下岩样劣化机制示意图

Fig.20 Schematic diagram of rock specimen deterioration mechanism under stress and wet-dry cycling coupling action

波速显著下降。经过多次干湿循环后,胶结结构完全破坏,岩样原本致密的结构逐渐松散,颗粒间连接力减弱,接触面摩擦力降低,黏聚力衰减,最终导致其抗剪强度下降。

6 结 论

实际工程中,砂泥岩互层接触面的劣化受上覆应力和干湿循环耦合作用影响。本文研究了砂泥岩接触面在该耦合条件下的剪切力学特性演化规律与损伤机制,主要结论如下:

(1) 应力 - 干湿循环耦合作用下,砂泥岩接触面的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角均呈现先陡后缓的劣化规律。经过 12 次循环后,抗剪强度、黏聚力和内摩擦角的总劣化度分别为 41.75%~60.51%, 40.16%~60.24%和 34.56%~50.41%。

(2) 上覆应力加剧了干湿循环作用对接触面剪切力学参数的劣化进程,上覆应力越大劣化效应越显著。干湿循环导致的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角总劣化度分别为 41.75%~43.73%, 39.56%和 34.56%;上覆应力引起的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角劣化度分别为 16.35%~18.45%, 5.42%~20.68%和 4.83%~15.84%。

(3) 基于试验结果和莫尔 - 库仑准则,引入循环次数、上覆应力 2 个指标,推导了砂泥岩接触面的抗剪强度计算公式,理论计算值与试验值决定系数大于 0.9,误差在 10%以内。

(4) 应力 - 干湿循环耦合作用下,砂、泥岩内部孔隙发育、裂隙持续扩展,水分渗透溶蚀胶结物质;同时上覆应力加剧裂纹尖端应力集中,导致岩样结构由密实状态转变为疏松多孔状态,力学性能下降,

泥岩尤为明显,表明接触面的力学性能劣化主要受控于泥岩。

应力 - 干湿循环耦合作用显著降低了砂泥岩接触面的抗剪强度,宏观上表现为接触面抗剪强度参数的劣化,在微观上则源于裂纹尖端应力集中引发的岩体结构损伤。剪切强度经验公式定量揭示了接触面在宏观上的劣化规律,然而,接触面劣化机制与剪切特性之间的关联缺乏定量研究的支持,这致使机制解释仍以定性描述为主,后续研究应进一步深化,建立微观损伤变量与宏观强度参数之间的数学模型,从而发展更为完善的岩土体耐久性评价理论与方法,为库岸工程和岩质边坡的长期稳定性分析与控制提供可靠依据。

参考文献(References):

- [1] 龙小爽,王 杰,何 平,等. 干湿循环对三峡库区岸坡砂岩力学特性的影响研究[J]. 工程勘察, 2022, 50(6): 38 - 43.(LONG Xiaoshuang, WANG Jie, HE Ping, et al. Influence of drying and wetting cycles on mechanical properties of sandstone on the slope of Three Gorges Reservoir area[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2022, 50(6): 38 - 43.(in Chinese))
- [2] 张 村,王潇杰,师旭涛,等. 含水饱和度影响下砂岩劈裂特性与水岩作用机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增 2): 3 722 - 3 737.(ZHANG Cun, WANG Xiaojie, SHI Xutao, et al. Splitting characteristics of sandstone under the influence of water saturation and its mechanism of water rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(Supp.2): 3 722 - 3 737.(in Chinese))
- [3] 郝瑞卿,曹 平,王 华,等. 干燥与饱水状态下含尖端相交裂隙砂岩的力学特性及破裂演化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(7): 1 696 - 1 706.(HAO Ruiqing, CAO Ping, WANG Hua, et al. Mechanical properties and fracture behaviors of sandstone

- in dry and saturated states with tip intersecting cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(7): 1 696 - 1 706.(in Chinese))
- [4] 宋浩然, 李守宇, 张庆文, 等. 含水泥砂岩声发射阶段特征与损伤演化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(1): 72 - 81.(SONG Haoran, LI Shouyu, ZHANG Qingwen, et al. The acoustic emission stage characteristics and damage evolution of argillaceous siltstone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(1): 72 - 81.(in Chinese))
- [5] 冯帆, 陈绍杰, 王琦, 等. 真三轴卸载-动力扰动下自然与饱水砂岩破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2 240 - 2 253.(FENG Fan, CHEN Shaojie, WANG Qi, et al. Experimental study on failure characteristics of natural and saturated sandstone under true triaxial unloading and dynamic disturbance condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2 240 - 2 253.(in Chinese))
- [6] 王维, 顾峰, 何刘, 等. 水岩循环作用下变质砂岩力学参数劣化试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(2): 179 - 185.(WANG Wei, GU Feng, HE Liu, et al. Experimental study on deteriorating characteristics of metamorphic sandstone mechanical parameters under the effect of wetting-drying cycles[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(2): 179 - 185.(in Chinese))
- [7] 郭宁, 杨逾, 梁鹏飞, 等. 水岩作用下砂岩的崩解机制及加固方法的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(增2): 272 - 277.(GUO Ning, YANG Yu, LIANG Pengfei, et al. Research progress on disintegration mechanism and reinforcement method of sandstone under water-rock action[J]. Materials Reports, 2023, 37(Supp.2): 272 - 277.(in Chinese))
- [8] 王琪, 王华宁, 蒋明镜. 水-岩化学作用对砂岩力学特性影响的三维离散元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增1): 3 344 - 3 354.(WANG Qi, WANG Huaning, JIANG Mingjing. Three-dimensional discrete element analysis of mechanical properties of sandstone considering water-rock chemical reaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Supp.1): 3 344 - 3 354.(in Chinese))
- [9] 邓华锋, 肖瑶, 李建林, 等. 干热河谷岸坡消落带砂岩节理劣化机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(8): 1 839 - 1 851.(DENG Huafeng, XIAO Yao, LI Jianlin, et al. Study on degradation mechanisms of sandstones joints in the hydro-fluctuation zones of dry-hot valley bank slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(8): 1 839 - 1 851.(in Chinese))
- [10] 曹廷, 何刘, 王维, 等. 水岩循环对变质砂岩微观结构损伤与宏观力学劣化影响机制研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(1): 96 - 107.(CAO Ting, HE Liu, WANG Wei, et al. Study on the influence mechanism of wetting-drying cycles on metamorphic sandstones microstructure damage and macroscopic mechanical deterioration[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(1): 96 - 107.(in Chinese))
- [11] 黄叶宁, 邓华锋, 李建林, 等. 水-岩作用下节理岩体剪切力学特性及本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 545 - 557.(HUANG Yening, DENG Huafeng, LI Jianlin, et al. Shear mechanical properties and constitutive model of jointed rock mass under water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 545 - 557.(in Chinese))
- [12] YU X W, FU H Y, ZENG L, et al. Damage constitutive model for soft rocks and its experimental verification on silty mudstone considering cyclic rock-water interactions[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(6): 254.
- [13] QIN H, TANG H, YIN X, et al. Study on water-rock interaction failure mechanism and constitutive model of mudstone damaged by pre-peak disturbance[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 133(PA): 104539 - 104539.
- [14] 刘晓明, 颜圣, 刘凯, 等. 干湿循环作用下红层软岩填料强度特性试验研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(3): 24 - 30.(LIU Xiaoming, YAN Sheng, LIU Kai, et al. Experimental study on strength properties of red bed weak rock filler under dry-wet cycles[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(3): 24 - 30.(in Chinese))
- [15] 成辉, 付宏渊, 曾铃, 等. 考虑干湿循环路径的粉砂质泥岩力学特性及本构模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2024, 58(9): 1 912 - 1 922.(CHENG Hui, FU Hongyuan, ZENG Ling, et al. 2024. Mechanical properties and constitutive model of silty mudstone considering drying-wetting cycle path[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2024, 58(9): 1 912 - 1 922.(in Chinese))
- [16] 白志鹏, 马天驰, 尹红亮, 等. 红层泥岩在不同浸水条件下填料强度特性试验研究[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(5): 37 - 42.(BAI Zhipeng, MA Tianchi, YIN Hongliang, et al. Experimental study on filler strength features of red beds mudstone under different soaking conditions[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(5): 37 - 42.(in Chinese))
- [17] 于天佑, 蒋关鲁, 饶千竺, 等. 水汽循环作用下红层泥岩的损伤劣化特性研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(2): 479 - 491.(YU Tianyou, JIANG Guanlu, RAO Qianzhu, et al. Damage and deterioration characteristics of red mudstone under water vapor cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(2): 479 - 491.(in Chinese))
- [18] 王宇, 夏厚磊, 茆苏徽, 等. 泥岩卸荷损伤-水次序作用下的劣化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(2): 385 - 395.(WANG Yu,

- XIA Houlei, MAO Suhui, et al. Deterioration rules of mudstone under unloading damage and water-rock interaction sequence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(2): 385 - 395.(in Chinese))
- [19] 李桂臣, 李菁华, 孙元田, 等. 泥岩多尺度模型与水岩作用特性研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1 138 - 1 154.(LI Guichen, LI Jinghua, SUN Yuan Tian, et al. Advance of multi-scale study on both analytic models and water-rock interaction characteristics of mudstone[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1 138 - 1 154.(in Chinese))
- [20] 马 娟, 赵文祯, 齐 干, 等. 基于普适型监测的多参数预警研究——以三峡库区卡门子湾滑坡为例[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 259 - 269.(MA Juan, ZHAO Wenyi, QI Gan, et al. Study on the multi-parameter early warning based on universal equipment: A case of Kamenziwan Landslide in the Three Gorges Reservoir[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 259 - 269.(in Chinese))
- [21] 何钰铭, 彭正华, 石长柏, 等. 湖北省三峡库区砂泥岩互层岩体劣化特征与劣化机制分析[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(1): 34 - 37.(HE Yuming, PENG Zhenghua, SHI Changbai, et al. Analysis of the deterioration characteristics and mechanism of sandstone-mudstone interbedded rock mass in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024, 42(1): 34 - 37.(in Chinese))
- [22] 杨秀元. 三峡库区侏罗系岩体湿-热循环损伤机制研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.(YANG Xiuyuan. Study on the damage mechanism of the jurassic rock mass in Three Gorges Reservoir Area under the humid-hot cycling[Ph. D. Thesis] [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.(in Chinese))
- [23] 黄小芸, 邓华锋, 李建林, 等. 干湿循环作用下土-岩接触面剪切力学特性劣化规律试验研究[J]. 工程地质学报, 2025, 33(2): 416 - 425.(HUANG Xiaoyun, DENG Huafeng, LI Jianlin, et al. Experimental study on the deterioration law of shear mechanical properties of soil-rock interface under dry-wet cycle action[J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(2): 416 - 425.(in Chinese))
- [24] 周 博. 冻融循环作用下土岩界面剪切特性研究[硕士学位论文][D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.(ZHOU Bo. Experimental study on shear behavior of improved fillers in road-bridge transition section under dry and wet effects[M. S. Thesis][D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2024.(in Chinese))
- [25] 许博闻, 兰恒星, 刘世杰. 界面形态对黄土-泥岩接触面剪切力学特性影响研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(2): 448 - 462.(XU Bowen, LAN Hengxing, LIU Shijie. Experimental study on shear strength of contact surface between loess and mudstone[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(2): 448 - 462.(in Chinese))
- [26] 陈雨爽. 干湿循环条件下砂、泥岩及其界面的力学特性研究[硕士学位论文][D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.(CHEN Yushuang. Study of the mechanical properties of sandstone and mudstone and their interfaces under drying-wetting cycle[M. S. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.(in Chinese))
- [27] WU Q, QIN Y, TANG H M, et al. Influence of wetting and drying cycles on the shear behavior of discontinuities between two different rock types with various surface topographies[J]. Acta Geotechnical, 2024, 19(11): 1 - 23.
- [28] 宋 洋, 王贺平, 张维东, 等. 恒定法向刚度条件下加锚充填节理岩体剪切特性研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(9): 2 695 - 2 706.(SONG Yang, WANG Heping, ZHANG Weidong, et al. Shear characteristics of anchored filling jointed rock mass under constant normal stiffness [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(9): 2 695 - 2 706.(in Chinese))
- [29] 张景昱, 詹润禾, 邓华锋, 等. 热湿循环作用下节理砂岩重复剪切力学特性及本构模型[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(10): 2 148 - 2 157.(ZHANG Jingyu, ZHAN Runhe, DENG Huafeng, et al. Repeated shear mechanical properties and constitutive model of jointed sandstone under heat-wet cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(10): 2 148 - 2 157.(in Chinese))
- [30] ZHOU M L, LI J L, LUO Z C, et al. Impact of water-rock interaction on the pore structures of red-bed soft rock[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 7 398 - 7 398.
- [31] 张雅慧, 汪丁建, 唐辉明, 等. 基于PFC^{2D}数值试验的异性结构面剪切强度特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1 031 - 1 041.(ZHANG Yahui, WANG Dingjian, TANG Huiming, et al. Study of shear strength characteristics of heterogeneous discontinuities using PFC^{2D} simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1 031 - 1 041.(in Chinese))
- [32] 宋磊博, 江 权, 李元辉, 等. 软-硬自然节理的改进JRC-JCS剪切强度公式[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2 789 - 2 798.(SONG Leibo, JIANG Quan, LI Yuanhui, et al. Improved JRC-JCS shear strength formula for soft-hard natural joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2 789 - 2 798.(in Chinese))
- [33] 金磊磊, 魏玉峰. 基于三维形貌和剪胀效应的软-硬节理抗剪强度模型[J]. 工程力学, 2020, 37(12): 180 - 190.(JIN Leilei, WEI Yufeng. Calculation model for the shear strength of soft-hard joints based on three-dimensional morphology and dilatancy effect[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(12): 180 - 190.(in Chinese))
- [34] JIANG Q, YANG Y, YAN F, et al. Deformation and failure behaviours of rock-concrete interfaces with natural morphology under shear testing[J]. Construction and Building Materials, 2021. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123468.
- [35] 范 祥, 邓志颖, 崔志猛, 等. 一种新的软-硬节理峰值剪切强度模型[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1 861 - 1 870.(FAN Xiang, DENG Zhiying, CUI Zhimeng, et al. A new peak shear strength model for soft-hard joint[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(7): 1 861 - 1 870.(in Chinese))