



# 干湿循环作用下砂岩力学特性及能量损伤演化\*

张丙吉<sup>1,2</sup>, 辛全明<sup>1,2,3</sup>, 季铁军<sup>4</sup>, 屈林永<sup>4</sup>

(1. 中国建筑东北设计研究院有限公司 岩土公司, 辽宁 沈阳 110006;

2. 辽宁省岩土与地下空间工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110006;

3. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 4. 中建东设岩土工程有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

**摘要:** 内陆港口砂岩地基在水的循环作用下, 岩石力学性能劣化, 威胁港口地基的长期稳定性。为探究砂岩在干湿循环作用下的力学特性及能量损伤, 开展不同干湿循环次数下的三轴压缩试验。结果表明: 随着干湿循环作用的增强, 砂岩力学性能指标逐渐衰减, 当循环次数达到 15 次时, 衰减幅度基本收敛; 砂岩峰值强度、残余强度、弹性模量和变形模量的劣化度累积具有相似规律, 干湿循环 0~8 次时累积速率较快, 循环次数达到 15 次时累积速率放缓; 在应力作用下, 岩石吸收总能量随着应变增长而逐渐递增, 耗散能累积主要集中在岩石破坏阶段。能量耗散导致损伤发展, 损伤变量与耗散能走势较为一致。

**关键词:** 港口地基工程; 干湿循环; 砂岩; 劣化度; 能量耗散; 损伤

中图分类号: U 416; U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0192-06

## Mechanical properties and energy damage evolution of sandstone under dry-wet cycle

ZHANG Bing-ji<sup>1,2</sup>, XIN Quan-ming<sup>1,2,3</sup>, JI Tie-jun<sup>4</sup>, QU Lin-yong<sup>4</sup>

(1. China Northeast Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110006, China;

2. Geotechnical Engineering and Underground Space Research-Center of Liaoning Province, Shenyang 110006, China;

3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

4. ZJDS Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

**Abstract:** Under the action of water circulation, the sandstone foundation of inland port leads to the deterioration of rock mechanical properties and threatens the long-term stability of port foundation. In order to explore the mechanical characteristics and energy damage of sandstone under dry-wet cycle, we carry out the triaxial compression test under different dry-wet cycle times. The results show that with the enhancement of dry-wet cycle, the mechanical properties of sandstone gradually decay, the attenuation amplitude basically converges when the number of cycles reaches 15 times. The accumulation degrees of deterioration of sandstone peak strength, residual strength, elastic modulus and deformation modulus have the similar law, the accumulation rate of dry-wet cycle is faster when 0~8 times, and the accumulation rate slows down when 15 times. Under the action of stress, the total energy absorbed by rock increases with the increase of strain, and the accumulation of dissipated energy is mainly concentrated in the failure stage of rock. Energy dissipation leads to damage development, and the trend of damage variable and dissipated energy is consistent.

**Keywords:** port foundation engineering; dry-wet cycle; sandstone; deterioration degree; energy dissipation; damage

收稿日期: 2021-02-09

\*基金项目: 中建股份科技研发计划资助项目(CSCEC-2017-Z-37、CSCEC-2020-Z-57); 中建东北院科技研发计划资助项目(DBY-KY-05)

作者简介: 张丙吉(1965—), 男, 教授级高级工程师, 从事地基基础与岩土体方面的科研与设计研究。

通讯作者: 辛全明(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 从事岩土工程的科研与设计。E-mail: he75983@163.com

岩石在水、太阳辐射、风力等外界因素作用下易风化, 导致物理结构和力学性能发生劣化<sup>[1-2]</sup>。内陆港口建设中, 基岩在水的作用下易风化, 且地下水位随季节变化不停变动, 对基岩的力学特性造成劣化影响, 影响到港口地基的安全和稳定性, 干湿循环试验可以模拟风化作用对岩石的影响, 由此开展干湿循环试验研究岩石力学特性变化具有十分重要的意义<sup>[3-4]</sup>。

现对于干湿循环作用下岩石力学性能变化的研究已有较多成果, 傅晏<sup>[5]</sup>以砂岩为研究对象, 研究不同干湿循环次数的砂岩力学性能指标变化规律; Ito 等<sup>[6]</sup>对北海道某岩石进行不同次数的循环干湿试验, 通过单轴压缩试验测定不同循环次数下的无侧限抗压强度; 申培武等<sup>[7]</sup>对红层泥岩进行干湿循环崩解试验, 研究不同干湿循环次数下的崩解形态特征变化规律; Hu 等<sup>[8]</sup>探讨干湿循环作用下泥岩微裂缝发育规律; 安阳等<sup>[9]</sup>采用颗粒流软件模拟石膏岩在干湿循环作用下的细观力学劣化效应, 并建立相应统计损伤模型; 宋朝阳等<sup>[10]</sup>针对弱胶结岩石进行不同干湿循环次数下单轴压缩试验, 并监测研究岩石声发射特征。

本文结合重庆万州新田港深基坑工程, 以基岩砂岩为研究对象, 开展不同干湿循环次数下的三轴压缩试验, 探讨岩石力学性能指标与循环次数之间的关系, 并分析力学性能指标劣化度变化规律。引入能量理论, 分析砂岩在不同干湿循环作用下的能量耗散规律, 基于此定义损伤变量, 从而进行砂岩损伤演化分析。研究成果可为干湿循环作用下岩石力学特性及内陆港口地基长期稳定性研究提供参考。

1 干湿循环作用下砂岩三轴压缩试验

1.1 试验背景

重庆万州新田港深基坑深度为 26~32 m, 地层自上而下为杂填土、粉质黏土、卵碎石、全风化砂岩、强风化砂岩、中风化砂岩。港口基坑里的砂岩在雨水、地下径流作用下, 经历干湿循环,

导致岩石强度弱化, 对基坑开挖、港口建设和营运造成威胁。取新鲜中风化砂岩, 用保鲜膜密封后运回实验室进行加工。通过薄片鉴定, 确定砂岩由碎屑物(81%)和胶结物(19%)组成, 碎屑物主要由石英(68%)、长石(8%)、岩屑(4%)、微量矿物(1%)组成; 胶结物主要由方解石(17%)、绿泥石(2%)组成。

1.2 试样材料及方案设计

岩样基本物理力学参数见表 1, 将砂岩样加工成直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱体试样, 4-3 试样如图 1 所示, 要求圆柱样两端面平整度小于 0.05 mm, 断面垂直度小于 0.25°。首先进行砂岩含水率试验, 确定砂岩饱和需要 1 d, 由此将砂岩样置于水箱自由饱水 1 d 后再置入恒温烘箱, 12 h 后取出冷却到室温, 记录此时试样质量, 不断循环该步骤直至烘干至质量恒定, 将这种岩样饱水到烘干的过程定义为一次干湿循环。干湿循环次数分别设置为 0、1、5、8 和 15 次, 围压设置为 1 MPa。三轴压缩试验采用 RLW-2000 型三轴流变试验系统(图 2)开展, 该系统由轴向加载、围压加载、伺服、控制、数据采集和自动绘图系统等部分组成, 试验过程数据自动化采集。围压加载速率设为 0.5 MPa/s, 围压加载至目标值稳定后, 再以 0.01 mm/s 的位移速率施加轴向荷载。

表 1 岩样基本物理力学参数				
密度/(t·m <sup>-3</sup> )	孔隙率/%	含水率/%	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
2.27	0.59	2.86	23.57	36.14

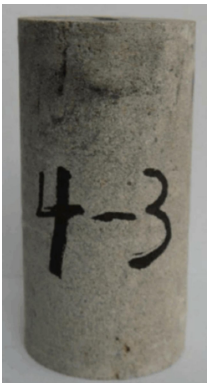


图 1 岩石试样



图2 试验设备

1.3 试验成果

通过数据采集系统自动采集干湿循环次数 0、1、5、8 和 15 次下的三轴压缩试验结果，如图 3 所示。

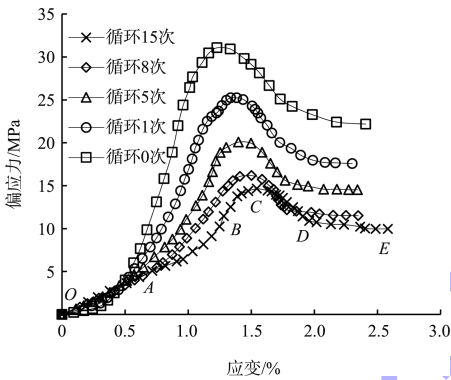


图3 不同干湿循环次数下的偏应力-应变曲线

由图 3 可看出，不同干湿循环次数下，砂岩变形破坏过程表现为 5 个阶段，依次是裂隙压密 (OA)、弹性变形 (AB)、塑性屈服 (BC)、岩石破坏 (CD) 和残余变形阶段 (DE)。1) OA 阶段：砂岩内部微裂隙、微缺陷在荷载作用下逐渐闭合，偏应力-应变曲线斜率递增；2) AB 阶段：偏应力-应变曲线近似线性，曲线斜率随着干湿循环次数的增加而递减；3) BC 阶段：BC 段斜率明显小于 AB 段，此时应力增长变缓；4) CD 阶段：C 点为峰值应力，CD 阶段越过峰值强度后，岩石内部微裂隙、微缺陷贯通，导致岩石宏观变形破坏；5) DE 阶段：岩石宏观破坏后，仍有一定变形空间，此时偏应力-应变曲线较为平缓，岩石还具备一定的承载能力，即为残余强度，残余强度随着干湿循环次数的增加而递减。

2 试验结果分析

2.1 峰值强度和残余强度变化

统计图 3 中不同干湿循环次数下的峰值强度和残余强度，如图 4 所示。

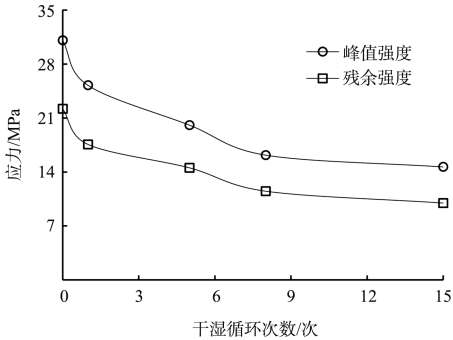


图4 不同干湿循环次数下的峰值强度、残余强度

由图 4 可看出，峰值强度、残余强度随着干湿循环次数的增加而递减，两者的衰减走势基本保持一致，干湿循环 0 次时砂岩峰值强度、残余强度分别为 31.08、22.19 MPa，循环 15 次时分别为 14.66、9.97 MPa，砂岩干湿循环 15 次时的峰值强度、残余强度分别为 0 次时的 47.17%、44.93%，强度折减较大。砂岩干湿循环 0~8 次时，峰值强度、残余强度衰减较快，循环 15 次时，两者强度逐渐趋于收敛，这说明干湿循环作用随着次数增加而逐渐平衡。

为表征干湿循环作用下砂岩力学参数的衰减劣化程度，劣化度计算公式如下<sup>[11]</sup>：

$$M_i = (T_0 - T_i) / T_0 \times 100\% \tag{1}$$

式中： $M_i$  为总劣化度； $T_0$ 、 $T_i$  分别为干湿循环 0、 $i$  次的砂岩力学参数。采用式 (1) 计算图 4 中峰值强度、残余强度值，得到的劣化度曲线如图 5 所示。

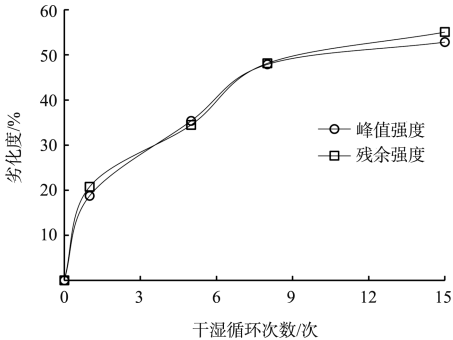


图5 峰值强度、残余强度的劣化度曲线

由图 5 可看出, 不同干湿循环次数下的峰值强度、残余强度劣化度曲线走势较相似, 随着干湿循环次数的增加, 两者强度的劣化度逐渐累积, 循环 15 次时逐渐收敛。

2.2 弹性模量和变形模量变化

文献[12]分别将岩石偏应力-应变曲线近直线段、50%峰值强度点与坐标原点连线斜率定义为弹性模量、变形模量, 由此得到弹性、变形模量随干湿循环次数变化的曲线, 如图 6 所示。在此基础上采用式(1)进行计算, 得到劣化度曲线, 如图 7 所示。

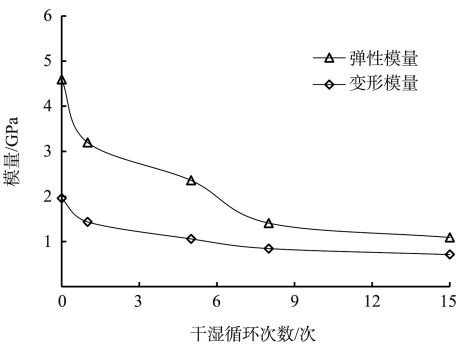


图 6 不同干湿循环次数下的弹性模量和变形模量

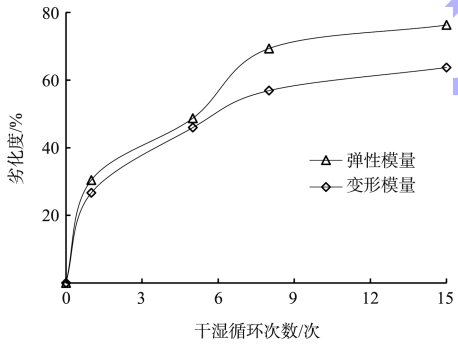


图 7 弹性模量和变形模量的劣化度曲线

由图 6 可看出, 弹性、变形模量皆随着干湿循环次数的增加而逐渐衰减。干湿循环 0 次时砂岩弹性模量、变形模量分别为 4.60、1.96 GPa, 15 次时分别为 1.09、0.71 GPa, 砂岩干湿循环 15 次时的弹性、变形模量分别为 0 次时的 23.70%、36.22%。由图 7 可看出, 弹性、变形模量劣化度均随干湿循环作用的增强而递增, 砂岩干湿循环 15 次时, 弹性、变形模量劣化度分别达到 76.28%、63.72%, 此时劣化度曲线趋于收敛。

综合图 6、7 可知, 在同一干湿循环次数下, 弹性模量始终大于变形模量, 弹性模量劣化度始终高于变形模量, 这说明砂岩材料内部原生微裂隙、微缺陷发育较多, 在加载应力作用下的, 原生微裂隙、微缺陷逐渐闭合, 导致砂岩偏应力-应变曲线中的裂隙压密阶段十分明显, 裂隙压密阶段分布在 0~0.6% 应变范围内。再分析图 5、7 可知, 砂岩在干湿循环作用下, 力学性能指标的劣化效应显著, 峰值强度、残余强度、弹性模量和变形模量劣化度的累积过程较为相似, 干湿循环 0~8 次时累积较快, 干湿循环 15 次时, 劣化度累积速率趋于稳定。单从劣化度分析, 干湿循环作用对岩石力学参数影响的强弱关系为: 弹性模量>变形模量>峰值强度>残余强度。

3 能量损伤演化分析

3.1 能量演化分析

砂岩在干湿循环作用过程中, 水对砂岩的作用有明显的弱化, 主要表现为: 1) 砂岩矿物颗粒表面存在一定的岩屑和碎屑物, 干湿循环作用下水搬运、溶解砂岩颗粒表面成分; 2) 在水的作用下, 连接矿物颗粒之间的胶结物方解石、绿泥石逐渐溶解, 削弱颗粒之间联结能量, 颗粒结构逐渐变得松散, 原有微裂隙、微缺陷不断发育扩展, 损伤程度加深<sup>[13]</sup>。实际上, 岩石变形破坏过程中, 内部能量不断交换转变, 能量耗散导致岩石承载能力的降低, 同时体现了岩石内部微裂隙、微缺陷发育扩展的过程, 由此分析不同干湿循环次数下岩石能量变化规律。

假设岩石在应力作用下, 其变形过程无热量交换, 能量理论中根据热力学第一定律有<sup>[14]</sup>:

$$U=U^e+U^d \tag{2}$$

$$U=\int \sigma_1 d\varepsilon_1+\int \sigma_2 d\varepsilon_2+\int \sigma_3 d\varepsilon_3 \tag{3}$$

式中:  $U$  为外力对岩石做功产生的能量;  $U^e$  为弹性应变能, 主要形成于弹性变形阶段, 应力作用解除后  $U^e$  能得到一定程度的恢复;  $U^d$  为耗散能, 主要



在损伤发展和不可逆塑性变形时产生； $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 分别为最大、中间和最小主应力； $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 和 $\varepsilon_3$ 分别为最大、中间和最小主应力方向上的应变。

本文三轴压缩试验中  $\sigma_2=\sigma_3$ ，于是有：

$$U = \int \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2 \int \sigma_3 d\varepsilon_3 \tag{4}$$

$U$  与岩石实际吸收能量  $U_0$  是相等的，在三轴压缩条件下，假设将压缩做功记为正值，则  $U_0$  中同时包含轴向力做的正功以及环向力做的负功。实际计算时， $U_0$  为图 3 中岩石偏应力-应变曲线和应变横轴之间的面积，则  $U_0$  为：

$$\begin{aligned} U_0 &= \int \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2 \int \sigma_3 d\varepsilon_3 = \\ &= \sum_{i=0}^n \frac{1}{2} (\varepsilon_{1,i+1} - \varepsilon_{1,i}) (\sigma_{1,i+1} + \sigma_{1,i}) = \\ &= \sum_{i=0}^n \frac{1}{2} (\varepsilon_{3,i+1} - \varepsilon_{3,i}) (\sigma_{3,i+1} + \sigma_{3,i}) \end{aligned} \tag{5}$$

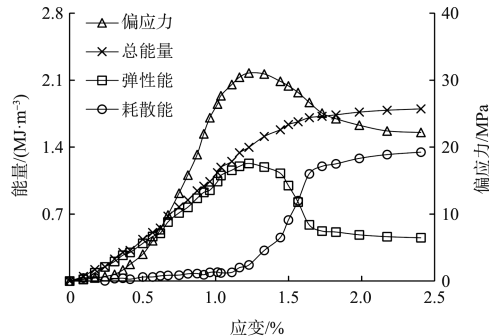
式中： $\sigma_{1,i}$ 、 $\sigma_{3,i}$  分别为图 3 中岩石偏应力-应变曲线上任意点  $i$  的轴压、围压； $\varepsilon_{1,i}$ 、 $\varepsilon_{3,i}$  分别为  $\sigma_{1,i}$  对应的轴向应变、 $\sigma_{3,i}$  对应的环向应变； $\sigma_{1,i+1}$ 、 $\sigma_{3,i+1}$ 、 $\varepsilon_{1,i+1}$ 、 $\varepsilon_{3,i+1}$  同理。

弹性应变能  $U^e$  包含轴向和环向，可写为<sup>[15]</sup>：

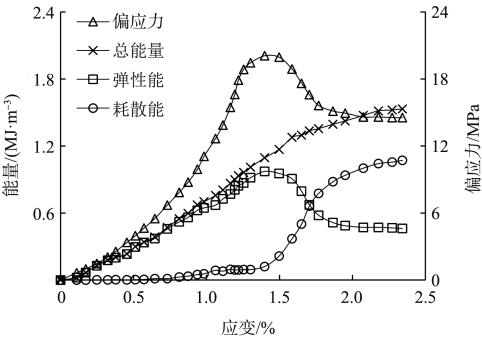
$$\begin{aligned} U^e &= \frac{1}{2E_0} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] = \\ &= \frac{1}{2E_0} [\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\nu(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2)] \end{aligned} \tag{6}$$

式中： $\nu$  为泊松比； $E_0$  为弹性模量，见图 6。

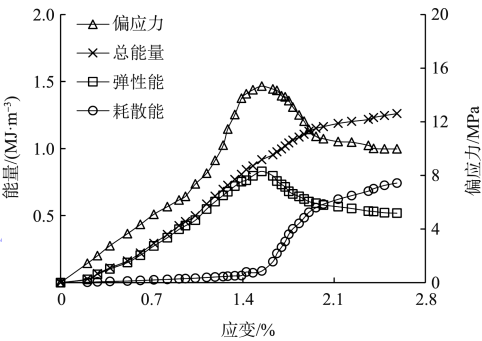
根据式(1)(5)(6)求解砂岩变形破坏过程中的  $U_0$ 、 $U^e$  和  $U^d$ ，如图 8 所示。限于篇幅，仅以干湿循环 0、5 和 15 次为例。



a) 干湿循环0次



b) 干湿循环5次



c) 干湿循环15次

图 8 岩石能量变化曲线

由图 8 可看出，不同干湿循环次数下的岩石能量变化曲线形态较为相似，岩石吸收总能量  $U_0$  随着应变增长而逐渐递增。弹性能  $U^e$  在偏应力-应变曲线峰值点之前，随应变增长而递增，此时岩石内部储存弹性能  $U^e$  占  $U_0$  的比例较高，岩石塑性变形阶段， $U^e$  占  $U_0$  的比例逐渐减小。在峰值点之后随应变增长而递减， $U^e$  占  $U_0$  的比例也随之减小。耗散能  $U^d$  随着应变增长而递增，在峰值点以前累积缓慢且量值较小，峰值点以后在岩石破坏阶段急剧累积，残余变形阶段累积速率逐渐放缓直至趋于收敛。

3.2 损伤演化分析

达到峰值强度后，岩石内部储存的弹性能急剧释放，耗散能急剧累积，加速岩石损伤发展，从而导致岩石宏观屈服破坏。基于本文能量损耗规律，将损伤变量定  $D$  义为：

$$D = \frac{U^d}{U} = \frac{U - U^e}{U} \tag{7}$$

当  $D = 0$  时，认为岩石未受损伤，此时  $U^d = 0$ ；

当  $0 < D < 1$  时, 岩石损伤不断累积扩展; 当  $D = 1$  时, 认为岩石已损伤破坏。根据式(7), 绘制不同干湿循环次数下的损伤曲线, 如图 9 所示, 仅以干湿循环 0、5 和 15 次为例。

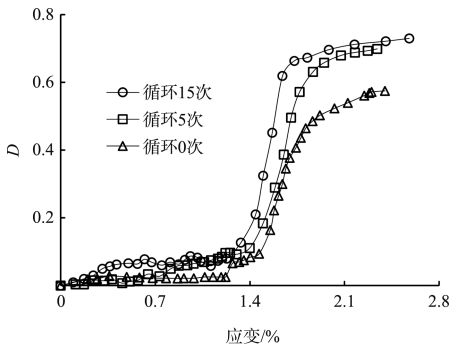


图 9 岩石损伤累积曲线

由图 9 可看出, 岩石损伤累积曲线近似 S 形, 随着应变增长而逐级递增, 对比图 8 可发现, 损伤变量与耗散能走势较为一致。总体上, 应变 1.4% 以前, 大致对应偏应力-应变曲线中的裂隙压密、弹性变形和塑性屈服阶段, 此时损伤累积较慢, 损伤变量不超过 0.15。在应变 1.4%~1.7%, 大致对应偏应力-应变曲线中的岩石破坏阶段, 此时损伤急剧累积, 岩石内部微裂隙、微缺陷贯通, 岩石发生宏观屈服破坏。当应变超过 1.7% 时, 大致对应残余变形阶段, 损伤累积速率变缓, 逐渐趋于收敛。在同一应变值下, 较高干湿循环次数下的损伤变量总是大于较低循环次数, 这说明干湿循环作用对岩石损伤发展起促进作用。

4 结论

1) 随着干湿循环作用的增强, 岩石峰值强度、残余强度、弹性模量和变形模量呈衰减趋势, 当干湿循环次数达到 15 次时, 岩石力学性能指标的衰减及劣化度的累积趋于收敛, 干湿循环作用逐渐平衡。干湿循环作用对岩石力学参数影响的强弱关系为: 弹性模量>变形模量>峰值强度>残余强度。

2) 在应力作用下, 岩石吸收总能量随着应

变增长而逐渐递增。岩石未达到峰值强度时, 岩石吸收总能量大部分转化为可释放的弹性能, 此时耗散能累积较缓慢。在岩石破坏阶段, 弹性能急剧降低, 耗散能急剧增长。进入残余阶段时, 弹性能的衰减和耗散能的增长均逐渐趋于收敛。

3) 岩石变形破坏过程中的能量耗散导致损伤发展, 基于能量耗散规律定义损伤变量。损伤演化曲线近似 S 形, 较高干湿循环次数下的损伤累积较快, 干湿循环作用促进岩石内部损伤发展。

参考文献:

[1] 薛晶晶. 干湿循环作用下两种不同矿物成分砂岩物理力学特性变化试验研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2011.

[2] 张宗堂, 高文华, 张志敏, 等. 干湿循环作用下膨胀岩的崩解特性及分形特征[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(4): 930-937.

[3] 王海涛. 软岩地基嵌岩灌注桩的承载力探讨[J]. 水运工程, 2010(1): 106-107, 116.

[4] WANG L Q, HUANG B L, ZHANG Z H, et al. The analysis of slippage failure of the HuangNanBei slope under dry-wet cycles in the three gorges reservoir region, China[J]. Geomatics, natural hazards and risk, 2020, 11(1): 1233-1249.

[5] 傅晏. 干湿循环水岩相互作用下岩石劣化机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

[6] ITO Y, KUSAKABE Y, ANAN S. Experimental study on rock deterioration by repetition of freezing and thawing, and by repetition of dry and wet in cold region[M]//LOLLINO G, GIORDAN D, CROSTA G B, et al. Engineering geology for society and territory-volume 5. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 1293-1297.

[7] 申培武, 唐辉明, 汪丁建, 等. 巴东组紫红色泥岩干湿循环崩解特征试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1990-1998.

[8] HU M, LIU Y X, REN J B, et al. Laboratory test on crack development in mudstone under the action of dry-wet cycles[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2019, 78(1): 543-556.

(下转第 219 页)