

DOI: 10.11779/CJGE201712022

# 酸碱环境干湿循环作用下砂岩抗剪强度劣化规律研究

刘新荣<sup>1</sup>, 袁文<sup>1</sup>, 傅晏<sup>2</sup>, 王子娟<sup>1</sup>, 朱乐文<sup>3</sup>, 谢应坤<sup>4</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学建设管理与房地产学院, 重庆 400045; 3. 浙江瑞安安阳中心城区管委会, 浙江 瑞安 325200; 4. 重庆市高新工程勘察设计院有限公司, 重庆 401121)

**摘要:** 为研究酸碱环境中砂岩在干湿循环作用下抗剪强度的劣化规律, 在浸泡溶液 pH 值分别为 7, 9, 4 的环境中, 对砂岩试件进行次数为 1, 3, 6, 10 次的干湿循环试验。通过不同循环次数后的单轴和三轴试验, 计算得到每个阶段循环后砂岩的黏聚力和内摩擦角及其与干湿循环次数  $N$  的变化关系式, 从而获得砂岩在不同 pH 值干湿循环作用下抗剪强度随循环次数的变化公式。结果表明, 砂岩的抗剪强度随着循环次数的增加而降低, 在干湿循环作用前期, 受影响较为显著, 抗剪强度降幅很大, 而后, 强度降幅相对较小; 酸性环境下, 砂岩抗剪强度劣化最为严重, 碱性次之, 中性最轻; 干湿循环后的干燥试件抗剪强度劣化幅度远不如湿状态下的劣化幅度。

**关键词:** 干湿循环; 酸碱环境; 砂岩; 抗剪强度; 劣化

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)12-2320-07

**作者简介:** 刘新荣(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程等方面的教学和科研。E-mail: liuxrong@126.com。

## Deterioration rules of shear strength in sandstones under wetting and drying cycles in acid and alkali environment

LIU Xin-rong<sup>1</sup>, YUAN Wen<sup>1</sup>, FU Yan<sup>2</sup>, WANG Zi-juan<sup>1</sup>, ZHU Le-wen<sup>3</sup>, XIE Ying-kun<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Faculty of Construction Management and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Anyang Center Administration Committee, Ruian 325200, China; 4. Chongqing Gaoxin Engineering Survey and Design Institute Ltd., Co., Chongqing 401121, China)

**Abstract:** In order to study the deterioration rules of shear strength in sandstones under wetting and drying cycles, sandstone specimens are tested after 1, 3, 6, 10 wetting and drying cycles in the environment of pH=7, 9, 4. Through UCS and TCS after different cycles, the cohesion and internal friction angle of sandstone are calculated, and the relation formulae between them and number of cycles  $N$  are determined, respectively, thus the shear strength is obtained under wetting and drying cycles in acid and alkali environment. The results show that the shear strength of sandstone decreases with the increase of cycles. In the early stage of cycles, the deterioration effect is comparatively significant, and the deterioration of shear strength is very large, then, the strength deterioration is relatively small. In the acidic environment, the deterioration of shear strength in sandstones is the most serious, slightly reduced in the alkaline environment, and the neutral condition is the lightest. The deterioration of shear strength in dried samples is much lower than that of wet samples.

**Key words:** wetting and drying cycle; acid and alkali environment; sandstone; shear strength; deterioration

## 0 引言

在影响岩体工程安全性的诸多因素中, 水是最活跃的因素之一。水化学溶液作用后, 岩体内部微观结构发生变化, 使得其物理力学性状变差, 对岩体工程的长期稳定性造成威胁<sup>[1-3]</sup>。崔强等<sup>[4]</sup>通过一系列的室内试验, 对化学腐蚀前后砂岩试件的矿物成分、溶液酸碱度、微观形貌、孔隙率等进行了测试, 同时运用次生孔隙率的变化对岩石孔隙结构进行了分析, 将化学腐蚀的主要因素归结为砂岩内部石英质矿物的溶解。李宁等<sup>[5]</sup>研究钙质胶结砂岩在不同 pH 值作用下的

主要胶结物成分, 提出了可应用于酸性溶液的岩石化学损伤强度模型。汤连生等<sup>[6]</sup>对水-岩相互作用下的环境与力学效应进行了较为系统的研究。邓华锋等<sup>[7]</sup>综合考虑了饱水、风干过程及各向异性对岩样纵波波速、强度的影响, 发现岩样的纵波波速与饱水度具有明显非线性、非单调的关系, 在饱水、风干过程中, 岩样的抗压强度和纵波波速存在变化规律不一致的现象。朱合华等<sup>[8]</sup>分别对干燥和饱水状态下砂岩、大理岩、

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51308567)

收稿日期: 2016-05-23

花岗片麻岩、黑云母片麻岩的波速进行试验研究, 结果表明: 饱水后各种岩样的波速有不同程度的增加。邓建华等<sup>[9]</sup>研究了膏溶角砾岩在不同天然含水率情况下的力学特性, 研究表明: 含水率的不同对岩石的峰值强度、弹性模量和泊松比等力学性质有显著影响, 烘干后, 岩石的力学性质发生了很大的变化, 峰值强度、弹性模量都有很大的提高。熊德国等<sup>[10]</sup>在自由和饱水状态下对砂岩、砂质泥岩和泥岩进行巴西劈裂、单轴压缩和常规三轴压缩试验, 发现饱水对 3 种岩石的强度和变形特征均有不同程度的影响, 泥岩表现最为明显, 其次是砂质泥岩和砂岩。笔者等<sup>[11-13]</sup>研究了干湿循环作用下砂岩的抗剪强度变化规律, 同时对酸性环境干湿循环作用下砂岩的物理力学性质的变化进行了细致的研究, 结果表明, 干湿循环对岩石的性状影响很大, 特别是水中含有酸的情况。本文以砂岩为对象, 研究其在酸碱环境干湿循环作用下抗剪强度的变化规律, 为边坡工程, 地下工程的短期和长期稳定性安全评价奠定理论基础。

1 试验方法

选取重庆地区某施工场地砂岩为研究对象。砂岩

具中-细粒砂状结构, 块状构造, 主要由石英、长石、岩屑、方解石、重矿物、填隙物及不透明矿物组成。矿物碎屑颗粒集中在 0.05~0.4 mm, 其中 0.05~0.25 mm 的碎屑颗粒约占 71%, 0.25~0.4 mm 的碎屑颗粒约占 29%, 矿物磨圆度中等, 呈次棱角状-次圆状, 颗粒支撑, 孔隙式胶结。

按规范要求, 将试样加工为圆柱体, 试验尺寸为: 直径  $D=50\text{ mm}$ , 高  $H=100\text{ mm}$ 。先将试样在  $105^{\circ}\text{C}$  烘干  $24\text{ h}$ , 然后使用真空保水机保水  $24\text{ h}$ , 如此为一次干湿循环过程。使用的保水溶液(浸泡溶液)有 3 种, 分别为  $\text{pH}=7$  的蒸馏水,  $\text{pH}=9$  的碱性溶液,  $\text{pH}=3$  的酸性溶液。为了观察干湿循环次数对岩石强度的影响, 考虑岩石试样前期劣化速度较快的特点, 适当缩短参考文献[11, 12]中采用的循环次数, 将试样分别进行 1, 3, 6, 10 次(4 个阶段)干湿循环, 每个阶段循环后采用法国 Rock 600 HT PLUS 型多功能岩石三轴测试系统(图 1)进行单轴和三轴试验, 试验过程中部分试样的干燥、饱和状态及破坏如图 2 所示。试验结果以及计算出的相应的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $j$  见表 1。

表 1 单轴、三轴试验及  $c, j$  值

Table 1 UCS and TCS of sandstone and values of  $c$  and  $j$

| pH   | 干湿状态  | 循环次数<br><i>N</i> | 围压<br>0 | 围压<br>1 | 围压<br>6 | 黏聚力<br><i>c</i> /kPa | 内摩擦角<br><i>j</i> /(° ) |       |       |
|------|-------|------------------|---------|---------|---------|----------------------|------------------------|-------|-------|
| pH=7 | 干     | 0                | 76.00   | 80.21   | 96.50   | 12.43                | 48.52                  |       |       |
|      |       | 1                | 71.59   | 75.49   | 87.32   | 11.74                | 47.34                  |       |       |
|      |       | 3                | 67.91   | 72.14   | 81.24   | 11.27                | 46.39                  |       |       |
|      |       | 6                | 65.36   | 68.41   | 77.49   | 10.84                | 45.77                  |       |       |
|      |       | 10               | 63.26   | 66.01   | 75.34   | 10.52                | 45.46                  |       |       |
|      | 湿     | 1                | 56.22   | 60.32   | 70.53   | 8.78                 | 47.21                  |       |       |
|      |       | 3                | 50.45   | 53.87   | 66.95   | 7.99                 | 45.99                  |       |       |
|      |       | 6                | 46.14   | 49.64   | 60.51   | 7.50                 | 44.38                  |       |       |
|      |       | 10               | 41.92   | 43.82   | 56.87   | 6.97                 | 42.67                  |       |       |
|      |       | pH=9             | 干       | 1       | 69.87   | 74.12                | 86.32                  | 11.42 | 47.45 |
| 3    | 64.59 |                  |         | 68.97   | 80.58   | 10.67                | 46.72                  |       |       |
| 6    | 60.61 |                  |         | 63.56   | 75.34   | 10.1                 | 45.75                  |       |       |
| 10   | 57.48 |                  |         | 60.87   | 72.54   | 9.64                 | 45.41                  |       |       |
| 湿    | 1     |                  | 51.67   | 55.1    | 68.54   | 8.20                 | 46.2                   |       |       |
|      | 3     |                  | 44.54   | 48.02   | 60.23   | 7.33                 | 44.27                  |       |       |
|      | 6     |                  | 39.81   | 43.65   | 55.24   | 6.72                 | 43                     |       |       |
|      | 10    |                  | 34.97   | 38.2    | 49.2    | 6.12                 | 41.34                  |       |       |
|      | pH=4  |                  | 干       | 1       | 66.53   | 70.89                | 84.65                  | 11.01 | 47.26 |
|      |       |                  |         | 3       | 61.10   | 64.3                 | 78.54                  | 10.06 | 46.42 |
| 6    |       | 56.46            |         | 62.03   | 72.21   | 9.51                 | 45.65                  |       |       |
| 10   |       | 51.61            |         | 53.5    | 68.32   | 9.19                 | 45.09                  |       |       |
| 湿    |       | 1                | 45.93   | 48.63   | 60.32   | 7.54                 | 44.03                  |       |       |
|      |       | 3                | 36.10   | 38.8    | 51.2    | 6.22                 | 41.69                  |       |       |
|      |       | 6                | 29.71   | 33.5    | 43.16   | 5.48                 | 38.64                  |       |       |
|      |       | 10               | 22.70   | 25.63   | 35.87   | 4.54                 | 35.09                  |       |       |



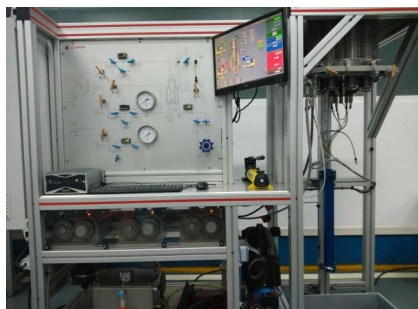


图 1 Rock 600 HT PLUS 型多功能岩石三轴测试系统  
Fig. 1 Rock 600 HT PLUS multi-function rock triaxial test system



图 2 干燥、饱和砂岩试样及其破坏  
Fig. 2 Dry and saturated sandstone samples and their failure

2 试验结果

2.1 黏聚力

酸碱环境对砂岩的黏聚力影响较大,不同 pH 值环境干湿循环作用下砂岩干燥试样和饱和试样破坏所得到的黏聚力如图 3(干燥)和图 4(饱和)所示。图中可以看出,pH=4 时,干湿循环后试样的黏聚力劣化幅度最大,pH=9 次之。

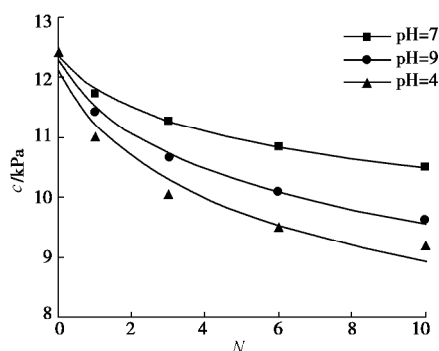


图 3 干燥砂岩试样黏聚力劣化曲线  
Fig. 3 Deterioration curves of cohesion in dry sandstone samples

根据图 3,4 中数据点的分布特点,得到酸碱环境(pH=7,9,4)干湿循环作用下砂岩  $c-N$  的关系式(表 2)。

2.2 内摩擦角

不同 pH 环境干湿循环作用下砂岩干燥试样和饱和试样破坏所得内摩擦角如图 5(干燥)和图 6(饱

和)所示。与黏聚力的劣化规律一样,pH=4 时,参数的劣化最严重,pH=9 次之。

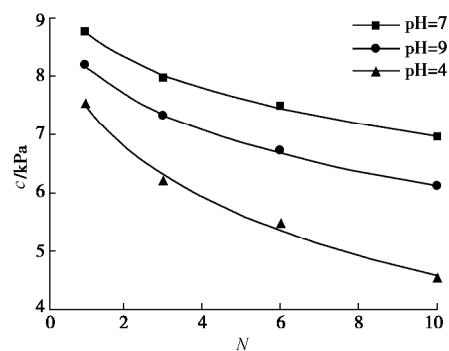


图 4 饱和砂岩试样黏聚力劣化曲线  
Fig. 4 Deterioration curves of cohesion in saturated sandstone samples

表 2  $c-N$  关系式  
Table 2 Relation formulae of  $c-N$

| 状态 | pH | 关系式                             |
|----|----|---------------------------------|
| 干  | 7  | $c = 12.366 - 0.783 \ln(N + 1)$ |
|    | 9  | $c = 12.325 - 1.147 \ln(N + 1)$ |
|    | 4  | $c = 12.161 - 1.339 \ln(N + 1)$ |
| 湿  | 7  | $c = 9.486 - 1.044 \ln(N + 1)$  |
|    | 9  | $c = 9.03 - 1.207 \ln(N + 1)$   |
|    | 4  | $c = 8.7 - 1.716 \ln(N + 1)$    |

根据图 5,6 中数据点的分布特点,得到酸碱环境(pH=7,9,4)干湿循环作用下砂岩  $j-N$  的关系式(表 3)。

表 3  $j-N$  关系式  
Table 3 Relation formulae of  $j-N$

| 状态 | pH | 关系式                              |
|----|----|----------------------------------|
| 干  | 7  | $j = 3e^{-0.418N} + 45.472$      |
|    | 9  | $j = 3.2e^{-0.291N} + 45.239$    |
|    | 4  | $j = 3.358e^{-0.32N} + 45.046$   |
| 湿  | 7  | $j = 11.504e^{-0.061N} + 36.386$ |
|    | 9  | $j = 11.504e^{-0.061N} + 36.386$ |
|    | 4  | $j = 28.109e^{-0.045N} + 17.143$ |

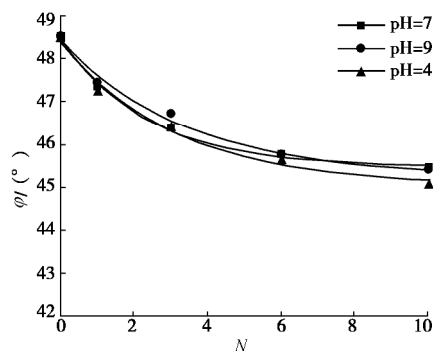


图 5 干燥砂岩试样内摩擦角的劣化曲线  
Fig. 5 Deterioration curves of angle of internal friction in dry sandstone samples

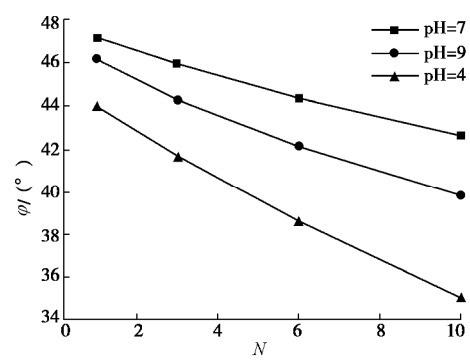


图 6 饱和砂岩试样内摩擦角的劣化曲线

Fig. 6 Deterioration curves of angle of internal friction in saturated sandstone samples

3 劣化分析

通过试验得到的  $c$ ,  $j$  值, 可以获得酸碱环境干湿循环作用下干燥、饱和试样的劣化分析表 (表 4)。为形象展现干湿循环次数与酸碱环境对  $c$ ,  $j$  参数劣化的影响, 表 4 中每个阶段的阶段平均劣化度见图 7~10。

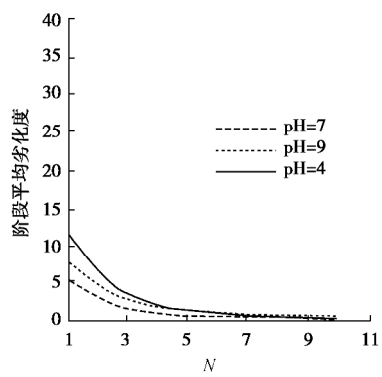


图 7 干燥砂岩试样黏聚力的阶段平均劣化曲线

Fig. 7 Stage average deterioration curves of cohesion in dry sandstone samples

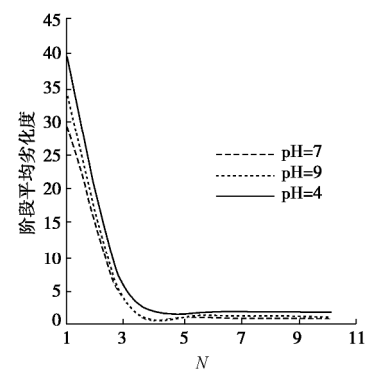


图 8 饱和砂岩试样黏聚力的阶段平均劣化曲线

Fig. 8 Stage average deterioration curves of cohesion in saturated sandstone samples

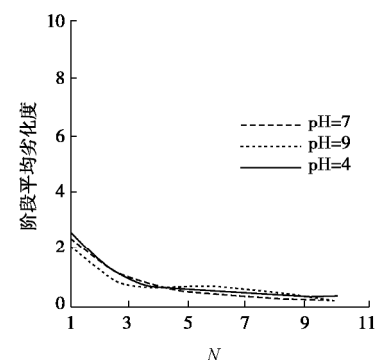


图 9 干燥砂岩试样内摩擦角的阶段平均劣化曲线

Fig. 9 Stage average deterioration curves of internal friction angle in dry sandstone samples

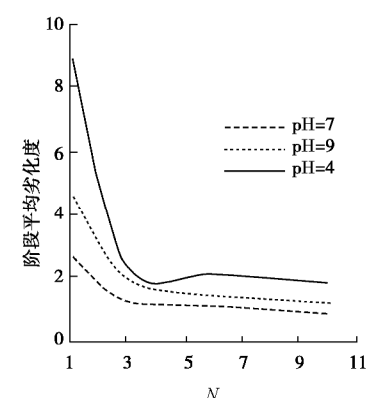


图 10 饱和砂岩试样内摩擦角的阶段平均劣化曲线

Fig. 10 Stage average deterioration curves of internal friction angle in saturated sandstone samples

- (1) 酸性环境下, 黏聚力和内摩擦角下降的量最多, 同时, 第十次干湿循环后, 砂岩的阶段平均劣化度还具有较大值, 说明此时砂岩中还有可以与酸反应的胶结物;
- (2) 黏聚力的 (平均) 劣化度明显高于相应内摩擦角的劣化度, 可能的原因是黏聚力对与酸碱发生化学反应的胶结物含量的变化更为敏感;
- (3) 从干状态 ( $N=0$ ) 到饱和状态 ( $N=1$ ), 试样的  $c$ ,  $j$  值下降较大 (与两次干燥状态对比), 其主要原因可归结为水的存在导致其内部  $c$ ,  $j$  值的降低, 不过并不是说此过程 (由干燥到饱和) 没有酸碱与胶结物的反应, 只不过在此是非主要因素。
- (4) 图中, 砂岩的平均劣化度在前几次循环中逐渐降低, 最后趋向于某一个最低值, 可以推测, 在干湿循环作用前期, 水 - 岩相互作用造成砂岩的化学、物理损伤效应较大, 黏聚力和内摩擦角受影响最为明显。随着循环次数的增加, 水 - 岩相互作用给岩石造成损伤效应减小, 黏聚力和内摩擦角受影响减小, 变化趋于平缓。

表 4  $c, j$  劣化值  
Table 4 Deterioration values of  $c, j$

| PH | 干湿状态 | 循环次数<br>$N$ | 黏聚力<br>$c/\text{kPa}$ | 总劣化度<br>$\Delta D_j$ | 阶段平均劣化度<br>$\frac{\Delta D_j}{n_j - n_{j-1}}$ | 内摩擦角<br>$j /(^{\circ})$ | 总劣化度<br>$\Delta D_j$ | 阶段平均劣化度<br>$\frac{\Delta D_j}{n_j - n_{j-1}}$ |
|----|------|-------------|-----------------------|----------------------|---|-------------------------|----------------------|---|
| 7  | 干    | 0           | 12.43                 | 0.00                 | 0.00  | 48.52                   | 0.00                 | 0.00  |
|    |      | 1           | 11.74                 | 5.55                 | 5.55  | 47.34                   | 2.43                 | 2.43  |
|    |      | 3           | 11.27                 | 9.33                 | 1.89  | 46.39                   | 4.39                 | 0.98  |
|    |      | 6           | 10.84                 | 12.79                | 1.15  | 45.77                   | 5.67                 | 0.43  |
|    |      | 10          | 10.52                 | 15.37                | 0.64  | 45.46                   | 6.31                 | 0.16  |
|    | 湿    | 1           | 8.78                  | 29.36                | 29.36   | 47.21                   | 2.70                 | 2.70  |
|    |      | 3           | 7.99                  | 35.72                | 3.18  | 45.99                   | 5.21                 | 1.26  |
|    |      | 6           | 7.5                   | 39.66                | 1.31  | 44.38                   | 8.53                 | 1.11  |
|    |      | 10          | 6.97                  | 43.93                | 1.07  | 42.67                   | 12.06                | 0.88  |
| 9  | 干    | 0           | 12.43                 | 0.00                 | 0.00  | 48.52                   | 0.00                 | 0.00  |
|    |      | 1           | 11.42                 | 8.13                 | 8.13  | 47.45                   | 2.21                 | 2.21  |
|    |      | 3           | 10.67                 | 14.16                | 3.02  | 46.72                   | 3.71                 | 0.75  |
|    |      | 6           | 10.1                  | 18.74                | 1.53  | 45.75                   | 5.71                 | 0.67  |
|    |      | 10          | 9.64                  | 22.45                | 0.93  | 45.41                   | 6.41                 | 0.18  |
|    | 湿    | 1           | 8.2                   | 34.03                | 34.03   | 46.2                    | 4.78                 | 4.78  |
|    |      | 3           | 7.33                  | 41.03                | 3.50  | 44.27                   | 8.76                 | 1.99  |
|    |      | 6           | 6.72                  | 45.94                | 1.64  | 42.19                   | 13.05                | 1.43  |
|    |      | 10          | 6.12                  | 50.76                | 1.21  | 39.9                    | 17.77                | 1.18  |
| 4  | 干    | 0           | 12.43                 | 0.00                 | 0.00  | 48.52                   | 0.00                 | 0.00  |
|    |      | 1           | 11.01                 | 11.42                | 11.42   | 47.26                   | 2.60                 | 2.60  |
|    |      | 3           | 10.06                 | 19.07                | 3.82  | 46.42                   | 4.33                 | 0.87  |
|    |      | 6           | 9.51                  | 23.49                | 1.47  | 45.65                   | 5.92                 | 0.53  |
|    |      | 10          | 9.19                  | 26.07                | 0.64  | 45.09                   | 7.07                 | 0.29  |
|    | 湿    | 1           | 7.54                  | 39.34                | 39.34   | 44.03                   | 9.25                 | 9.25  |
|    |      | 3           | 6.22                  | 49.96                | 5.31  | 41.69                   | 14.08                | 2.41  |
|    |      | 6           | 5.48                  | 55.91                | 1.98  | 38.64                   | 20.36                | 2.10  |
|    |      | 10          | 4.54                  | 63.48                | 1.89  | 35.09                   | 27.68                | 1.83  |

表 5  $\tau - N$  关系式  
Table 5 Relation formulae of  $\tau - N$

| 状态 | pH | 公式  |
|----|----|---|
| 干  | 7  | $t = 12.366 - 0.783 \ln(N + 1) + S_n \tan(3e^{-0.418N} + 45.472)$     |
|    | 9  | $t = 12.325 - 1.147 \ln(N + 1) + S_n \tan(3.2e^{-0.291N} + 45.239)$   |
|    | 4  | $t = 12.161 - 1.339 \ln(N + 1) + S_n \tan(3.358e^{-0.32N} + 45.046)$  |
| 湿  | 7  | $t = 9.486 - 1.044 \ln(N + 1) + S_n \tan(11.504e^{-0.061N} + 36.386)$ |
|    | 9  | $t = 9.03 - 1.207 \ln(N + 1) + S_n \tan(12.804e^{-0.084N} + 34.397)$  |
|    | 4  | $t = 8.7 - 1.716 \ln(N + 1) + S_n \tan(28.109e^{-0.045N} + 17.143)$   |

析。用库仑准则表达岩（土）体的抗剪强度为

$$t = c + S_n \tan j \quad (1)$$

将表 2 中的  $c - N$  关系式,表 3 中的  $j - N$  关系式入式（1），得到酸碱环境（pH=4，7，9）干湿循环作用下砂岩抗剪强度  $\tau - N$  的关系式，如表 5 所示。

以干湿循环次数  $N$  为横座标，抗剪强度  $\tau$  为纵座标，作出不同酸碱环境砂岩干燥状态和饱和状态抗剪

4 抗剪强度

工程中，为评价库岸边坡的稳定性，常常需要对岸坡岩土体的物理力学参数进行取值，而其中重要的一项参数就是岸坡岩土体的抗剪强度。在滑坡稳定性计算和加固设计中，岸坡岩土体的抗剪强度参数选取的正确与否，直接影响到滑坡推力的大小和稳定性分

强度变化曲线图(图 11, 12), 从图 11, 12 可以看出, 砂岩的抗剪强度随着水-岩循环次数的增加而降低。在干湿循环作用前期, 受影响较为显著, 抗剪强度降幅很大; 而后, 循环作用的影响减小, 强度降幅相对较小。

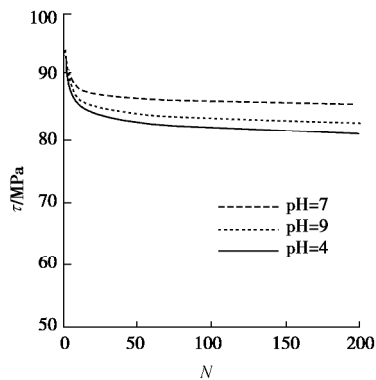


图 11 干燥砂岩抗剪强度劣化曲线

Fig. 11 Deterioration curves of shear strength in dry sandstone samples

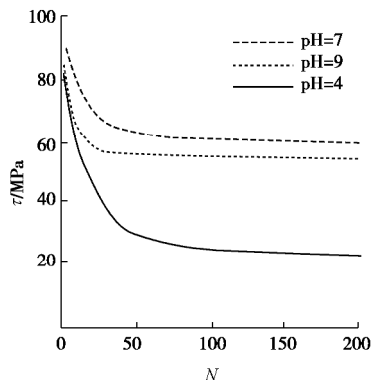


图 12 饱和砂岩抗剪强度劣化曲线

Fig. 12 Deterioration curves of shear strength in saturated sandstone samples

通过干湿状态砂岩的抗剪强度劣化规律对比, 发现相对于饱和状态, 干燥状态下砂岩的劣化程度相对来说较轻, 从劣化机理方面来说, 干燥状态的劣化, 可以解释为岩石内部胶结物的反应和溶解导致内部孔隙率以及微裂纹的增大; 而湿状态下的劣化机理则复杂得多, 水大量存在于岩石的内部, 使得岩石的抗剪强度大幅度下降, 这可以较好地解释库岸边坡在暴雨过后不久或是水库涨水不久发生破坏的几率远远大于干燥之后发生破坏的几率<sup>[11]</sup>。

从图 11, 12 中可以看出, pH=4 时, 干燥状态下, 经历了上百次干湿循环后, 砂岩抗剪强度降低约 10%, 而饱和状态下, 上百次循环后, 砂岩的抗剪强度下降了约 70%。可以推断, 干湿循环作用对库岸边坡的稳定性具有极大的危害, 酸性环境中更甚。鉴于  $\tau-N$

在不同酸碱环境的劣化规律, 可针对类似情况, 提前预报可能破坏的砂岩(其他岩石类似)类岸坡的相关情况, 并提出相应的处理措施。

## 5 结 论

通过对酸碱环境干湿循环作用下砂岩强度劣化规律的研究, 得出了不同 pH 值(pH=7, 9, 4)干湿循环作用下干燥和饱和砂岩抗剪强度随循环次数的变化公式。结果表明:

(1) 随着循环次数的增加, 水-岩相互作用给岩石造成损伤效应减小, 黏聚力和内摩擦角受影响减小, 变化趋于平缓, 黏聚力的劣化度明显高于相应内摩擦角的劣化度。

(2) 砂岩的抗剪强度随着水-岩循环次数的增加而降低。在干湿循环作用前期, 受影响较为显著, 抗剪强度降幅很大; 而后, 循环作用的影响减小, 抗剪强度降幅相对较小。酸性环境下, 砂岩抗剪强度劣化最为严重, 碱性次之, 中性最轻。

(3) pH=4 时, 干燥状态下, 经历了上百次干湿循环后, 砂岩抗剪强度降低约 10%, 而饱和状态下, 上百次循环后, 砂岩的抗剪强度下降了约 70%。

## 参考文献:

- [1] GULSEREN D, EBRU A S, CANDAN G. Some non-linear models to predict the weathering degrees of a granitic rock from physical and mechanical parameters[J]. Expert Systems with Applications, 2011, **38**: 7476 - 85.
- [2] TOBIAS S R, LINDA L, JESUS C, et al. Changes in porosity, permeability, water retention curve and reactive surface area during carbonate rock dissolution[J]. Chemical Geology, 2015, **403**(18): 86 - 98.
- [3] POULSEN B A, SHEN B, WILLIAMS D J, et al. Strength reduction on saturation of coal and coal measures rocks with implications for coal pillar strength[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 2014, **71**: 41 - 52.
- [4] 崔 强, 冯夏庭, 薛 强, 等. 化学腐蚀下砂岩孔隙结构变化的机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(6): 1209 - 1216. (CUI Qiang, FENG Xia-ting, XUE Qiang, et al. Mechanism study of porosity structure change of sandstone under chemical corrosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(6): 1209 - 1216. (in Chinese))
- [5] 李 宁, 朱运明, 张 平, 等. 酸性环境中钙质胶结砂岩的化学损伤模型[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(4): 395 - 399. (LI Ning, ZHU Yun-ming, ZHANG Ping, et al. A chemical

- damage model of sandstone in acid environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(4): 395 - 399. (in Chinese))
- [6] 汤连生, 王思敬. 岩石水化学损伤的机制及量化方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(3): 314 - 319. (TANG Lian-sheng, WANG Si-jing. Analyses of mechanism and quantitative methods of chemical damage in water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanic sand Engineering, 2002, **21**(3): 314 - 319. (in Chinese))
- [7] 邓华锋, 原先凡. 饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(8): 1625 - 1631. (DENG Hua-feng, YUAN Xian-fan. Experimental research on influence of saturation degree of sandstone longitudinal wave velocity and strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(8): 1625 - 1631. (in Chinese))
- [8] 朱合华, 周治国, 邓涛. 饱水对致密岩石声学参数影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(5): 823 - 828. (ZHU He-hua, ZHOU Zhi-guo, DENG Tao. Acoustic parameters of low-porosity rock under dry and saturated conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(5): 823 - 828. (in Chinese))
- [9] 邓建华, 黄醒春, 彭结兵, 等. 膏溶角砾岩不同天然含水率情况下力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(8): 1203 - 1206. (DENG Jian-hua, HUANG Xing-chun. Mechanical properties of Gypsum Breccia with different water contents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(8): 1203 - 1206. (in Chinese))
- [10] 熊德国, 赵忠明, 苏承东, 等. 饱水对煤系地层岩石力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(5): 998 - 1006. (XIONG De-guo, ZHAO Zhong-ming, SU Cheng-dong, et al. Experimental study of effect of water-saturated state on mechanical properties of rock in coal measure strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(5): 998 - 1006. (in Chinese))
- [11] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. (库)水-岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(9): 1298 - 1302. (LIU Xin-rong, FU Yan, WANG Yong-xin, et al. Deterioration rules of shear strength of sand rock underwater-rock interaction of reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(9): 1298 - 1302. (in Chinese))
- [12] 刘新荣, 张梁, 傅晏. 酸性环境干湿循环对泥质砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(增刊 2): 45 - 52. (LIU Xin-rong, ZHANG Liang, FU Yan. Experimental study of mechanical properties of argillaceous sandstone under wet and dry cycle in acid environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S2): 45 - 52. (in Chinese))
- [13] 刘新荣, 李栋梁, 张梁, 等. 干湿循环对泥质砂岩力学特性及其微观结构影响研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(7): 1291 - 1300. (LIU Xin-rong, LI Dong-liang, ZHANG Liang, et al. Influence of wetting-drying cycles on mechanical properties and microstructure of shaly sandstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(7): 1291 - 1300. (in Chinese))

## 勘 误

2017 年第 10 期“水下岩溶浆液抗分散性质试验研究及工程应用”一文中, 1861, 1863, 1865 页眉中作者姓名更正为“张聪, 等”。特此更正。

(本刊编辑部)