

DOI: 10.11779/CJGE201606024

酸性环境干湿循环作用对泥质砂岩力学参数的劣化研究

王子娟^{1, 2}, 刘新荣^{1, 2}, 傅 旻³, 张 梁⁴, 袁 文^{1, 2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 3. 重庆大学建设管理与房地产学院, 重庆 400045; 4. 重庆市巴南区建设工程质量监督站, 重庆 401320)

摘 要: 针对降雨和库水位升降对库岸边坡消落带岩体力学参数的劣化问题, 选取泥质砂岩进行不同 pH 水环境干湿循环作用下的单轴与三轴压缩试验, 结合室内试验结果, 应用广义 Hoek-Brown 准则求得不同地质强度指标评分 (GSI) 下岩体的单轴抗压强度、弹性模量、材料常数和黏聚力。研究表明: 破碎程度越大的泥质砂岩受浸泡的溶液酸性越强、干湿循环次数越多, 其力学参数劣化程度就越高; 在同一个 GSI 评分下, 泥质砂岩各个力学参数随 pH 值和干湿循环次数 n 的劣化效应排序有所差异, 综合劣化效应最大为弹性模量, 累积劣化效应最明显为黏聚力, 其劣化系数与浸泡溶液的 pH 值、干湿循环次数的对数 $\ln(n)$ 成线性相关。基于上述研究提出了泥质砂岩力学参数与 pH 值、干湿循环次数 n 的三维劣化方程, 为酸性环境干湿循环作用下现场岩体力学参数的获取以及边坡稳定性寿命的预测提供了理论依据。
关键词: 干湿循环; pH 值; 广义 Hoek-Brown 准则; 劣化系数; 三维曲面

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)06-1152-08

作者简介: 王子娟(1989-), 女, 博士研究生, 主要从事水岩相互作用及地下空间开发利用等工作。E-mail: 346484339@qq.com。

Deterioration of mechanical parameters of argillaceous sandstone under wetting-drying cycles in acidic environment

WANG Zi-juan^{1, 2}, LIU Xin-rong^{1, 2}, FU Yan³, ZHANG Liang⁴, YUAN Wen^{1, 2}

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. College of Construction Management and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4. Construction Quality and Safety Supervision Station of Banan District, Chongqing 401320, China)

Abstract: Considering that the mechanical parameters of rock mass in reservoir slope are degraded by water level fluctuation and acid rainfall, uniaxial and triaxial compression tests are conducted on the argillaceous sandstone under wetting-drying cycles in acidic environment. Based on the laboratory test results, the uniaxial compressive strength, elastic modulus, material constants and cohesion of rock mass in geological strength index (GIS) are obtained using the generalized Hoek-Brown criterion. The results show that the deterioration of the mechanical parameters is more obvious under higher wetting-drying cycle number and more acid solution for the broken argillaceous sandstone. Under the same GSI score system, there are differences in the ordering of deterioration effect for each mechanical parameter with change of pH values and wetting-drying cycle numbers, the elastic modulus belongs to the largest comprehensive degradation effect, and the cumulative degradation effect of cohesion is the most obvious. A strong linear correlation is observed in the deterioration of mechanical parameters of rock mass, pH value of soak solution and logarithm of wetting-drying cycle numbers. Based on the above research, a three-dimensional curved surface equation for the mechanical parameters of argillaceous sandstone, pH value and wetting-drying cycle numbers is put forward, which can provide a theoretical basis for obtaining the mechanical parameters of rock mass under wetting-drying cycles in acidic environment and predict the stability life of the slope.

Key words: wetting-drying cycle; pH value; generalized Hoek-Brown criterion; deterioration factor; 3D surface

0 引 言

pH 值小于 5.65 的雨为酸雨, 重庆地区酸雨普及, 2007 年的 pH 均值达到 4.58, 全市降水的 pH 均值变

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51308567); 高等学校博士学科点专项科研基金课题 (20120191110039)

收稿日期: 2015-05-08

*通讯作者

化呈现先下降后上升的趋势。岩石在酸性水环境的作用下会发生化学风化, 研究反复酸雨作用对库岸边坡消落带稳定性的影响具有重要意义。国内外专家对岩土体的劣化效应开展了多方面的研究^[1-7], 黄高峰等^[8]通过室内试验数据确定岩体参数, 研究了广义 Hoek-Brown 准则在边坡稳定性分析中的应用。张俊然等^[9-10]通过总结室内试验数据, 预测了干湿循环作用下土-水的特征曲线。龚壁卫等^[11]通过膨胀土干湿循环的特征曲线, 提出了膨胀土吸力与强度的关系。冯夏庭等^[12]研究了化学环境对岩石的力学参数的损伤效应, 傅晏等^[13-14]研究了干湿循环作用对砂岩力学特性影响的研究, 邓华锋等^[15-16]研究了水岩相互作用对岩石孔隙率变化的影响及孔隙内的饱水度与纵波波速的关系。

学者们基本研究了岩土体的力学参数随干湿循环次数变化的二维关系, 对于酸性环境下对岩体的力学参数的影响主要在定性分析上, 本文结合泥质砂岩室内物理力学试验^[17-18], 通过广义 Hoek-Brown 准则求出在一定 GSI 值的岩体强度参数, 根据数据分析拟合公式, 得到了不同破碎程度泥质砂岩的材料强度参数随干湿循环次数和浸泡溶液的 pH 值变化的三维曲面, 定量的阐述了三者之间的相关性, 为反复受酸雨作用对库岸边坡岩体强度劣化的影响具有指导意义。

1 试验方案

1.1 试验设备

本试验主要研究泥质砂岩在酸雨反复“浸泡—风干”作用下力学参数(单轴抗压强度、弹性模量、材料常数、黏聚力)的变化规律。选用重庆地区某边坡的泥质砂岩进行室内试验研究, 采用直径 $D=50\text{ mm}$, 高 $H=100\text{ mm}$ 的圆柱形试件, 单轴压缩试验和三轴压缩试验分别在 INSTRON 1346 和 MTS815 压力机上进行, 泥质砂岩初始物理参数如表 1 所示, 由表 1 可知本次试验选用的泥质砂岩孔隙率比一般中风化砂岩要大, 其开口孔隙较多, 吸水能力增强, 泥质砂岩遇水软化严重, 干湿循环作用对其力学参数的劣化影响显著^[19]。

表 1 泥质砂岩初始物理参数

Table 1 Physical parameters of sandstone					
天然	饱和	孔隙	天然密度	干密度	颗粒密度
含水率	吸水率	率	ρ_0	ρ_d	ρ_s
$w_0/\%$	$w_a/\%$	$n/\%$	$/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
1.09	1.96	5.57	2.56	2.53	2.68

1.2 试验方案和结果

为了模拟重庆地区反复酸雨环境的影响, 采用硝酸和硫酸铵等化学药剂配置 pH 值分别为 3, 5, 7 的水溶液, 分别在这 3 种环境中进行不同次数的干湿循

环试验, 首先将试样放入烘箱烘干, 干燥的温度为 105°C , 然后通过自然浸水法浸泡 24 h, 此过程为一次干湿循环过程。对于单轴压缩试验制作 63 个试样, 每 3 个一组, 留 3 组备用, 其余每组分别进行不同 pH 水环境下干湿循环次数 $n=0, 1, 5, 10, 15, 20$ 的干湿循环试验。对三轴压缩试验制作 76 个试样, 4 个一组, 留 1 组备用, 其余每组分别进行不同 pH 水环境下干湿循环次数 $n=0, 1, 5, 10, 15, 20$ 的干湿循环试验, 然后把每组中的 4 个试件分别进行围压为 2, 4, 6, 8 MPa 下的三轴压缩试验。泥质砂岩在不同干湿循环周期下裂纹扩展情况的部分照片如图 1 所示。试验结果经整理如表 2 所示。

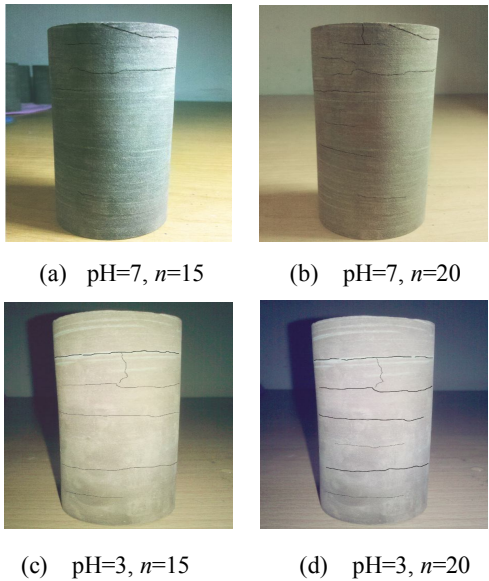


图 1 泥质砂岩在不同干湿循环条件下裂纹扩展情况

Fig. 1 Expansion of cracks of argillaceous sandstone under all kinds of wetting-drying cycles

2 基于广义 Hoek-Brown 准则不同 pH 值干湿循环作用下泥质砂岩力学参数

2.1 岩体的广义 Hoek-Brown 准则

地质强度指标是评价岩体材料的一种方法, 基于地质强度指标 GSI 的广义 Hoek-Brown 准则为

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \sqrt{\left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)}, \tag{1}$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{\text{GSI} - 100}{28 - 14D} \right), \tag{2}$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^a, \tag{3}$$

$$E_m = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{[(60 + 15D - \text{GSI})/11]}} \right), \tag{4}$$

表 2 不同 pH 值各种干湿循环次数下泥质砂岩室内试验结果

Table 2 Laboratory test results of argillaceous sandstone under all kinds of wetting-drying cycles in different pH conditions

n	pH=7				pH=5				pH=3			
	σ /MPa	E /GPa	c /MPa	θ /(°)	σ /MPa	E /GPa	c /MPa	θ /(°)	σ /MPa	E /GPa	c /MPa	θ /(°)
0	49.1	5.17	10.07	45.14	49.1	5.17	10.07	45.14	49.1	5.17	10.07	45.14
1	28.63	2.67	6.53	36.48	26.03	2.56	6.31	36.20	24.58	2.40	5.81	35.30
5	21.35	1.90	5.27	33.13	19.61	1.89	5.03	34.26	17.12	1.58	4.63	30.33
10	18.48	1.84	4.81	30.76	16.56	1.71	4.61	30.56	12.14	1.32	3.16	30.76
15	16.77	1.73	4.46	30.54	14.97	1.55	4.28	30.15	8.71	0.77	2.30	27.87
20	15.37	1.55	4.20	29.80	14.46	1.46	4.49	27.42	5.21	0.72	1.57	21.86

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right), \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}). \quad (6)$$

式中 σ'_1 , σ'_3 破坏时最大、最小有效应力; m_i , m_b 分别为完整岩石和岩体的材料常数; s , a 岩体材料的相关参数; σ_{ci} 为完整岩石单轴抗压强度; σ_{cm} , E_m 分别为岩体的单轴抗压强度和弹性模量; D 为扰动系数, 对于干湿循环没有扰动的岩体, $D=0$, 由公式可知 σ_{cm} , E_m 都是地质强度指标 GSI 唯一评价的, s , a 可以通过固定的 GSI 代入式 (5)、(6) 求得, 再代入式 (3)、(4) 式求得 σ_{cm} , E_m 。

对于完整岩石 GSI=100, $s=1$, $a=0.5$ 基于广义 Hoek-Brown 准则, 有

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{\left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1\right)}, \quad (7)$$

式中, σ_1 , σ_3 为岩石最大、最小主应力。

对式 (7) 求导可得

$$q = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} = 1 + \frac{m_i}{2\sqrt{\left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1\right)}}, \quad (8)$$

式中, q 为泥质砂岩室内不同围压下三轴压缩试验构成的莫尔应力圆的公切线的斜率, 可以由室内试验可得, $q = \frac{1+\sin\theta}{1-\sin\theta}$, θ 为三轴试验得到的岩石的内摩擦角, 对于单轴压缩试验, $\sigma_3=0$, 则 $m_i = 2(1-q)$, 把 m_i 代入式 (2) 得到 m_b 。

由岩体莫尔库仑准则得

$$\sigma'_1 = q_m \sigma'_3 + \sigma_{cm}, \quad (9)$$

$$c_m = \frac{\sigma_{cm}(1-\sin\theta_m)}{2\cos\theta_m}. \quad (10)$$

令 $q_m = q = \frac{1+\sin\theta}{1-\sin\theta} = \frac{1+\sin\theta_m}{1-\sin\theta_m}$, 则 $\theta_m \approx \theta$, 把 θ_m

代入式 (10) 得 c_m 。

2.2 基于广义 Hoek-Brown 准则不同 pH 值干湿循环作用下泥质砂岩力学参数

由上述分析可知, 内摩擦角在完整岩石和岩体中变化很小, 所以把室内试验得到的泥质砂岩的内摩擦角作为岩体的内摩擦角, 由式 (2) ~ (4)、(10) 可通过泥质砂岩室内试验结果得到岩体的抗压强度、弹性模量、材料参数、黏聚力。

通过对表 2 中室内试验得到的数据进行拟合, 发现完整岩石力学参数服从自然对数分布, 表 3 中的拟合公式发现拟合效果很好, 假设完整岩石的力学参数随干湿循环次数是连续变化的, 根据拟合曲线算出不同 pH 水环境干湿循环次数 $n=0, 1, 5, 10, 15, 20$ 的各个情况下的岩石单轴抗压强度 σ_{ci} 和弹性模量 E_i , 通过现场岩体结构面观察, 根据规范的 SCR 评分和 GSI 评分, 把泥质砂岩的地质强度指标 GSI 评分为 20~70, 评分越大, 说明泥质砂岩的完整性越好, 破碎程度越低, 综合指标越高, 由于篇幅限制, 选取两个极值指标 GSI=20, GSI=70, 基于广义 Hoek-Brown 准则根据泥质砂岩室内试验结果进行换算岩体力学参数, 由上述分析可知, 对于未扰动岩体, 风化不严重时可以用完整岩石的内摩擦角代替岩体的内摩擦角, 所以内摩擦角不进行换算。表 2 中不同 pH 水环境各种干湿循环次数下泥质砂岩的内摩擦角 θ 即为 θ_m , 岩体其余的力学参数根据广义 Hoek-Brown 准则的公式进行计算, 计算结果如表 4 所示。

2.3 基于广义 Hoek-Brown 准则泥质砂岩力学参数的变化规律

通过表 4 中数据可知, 考虑破碎程度的泥质砂岩 (岩体) 的弹性模量、材料常数、黏聚力、内摩擦角在不同 pH 值水环境下随干湿循环次数的变化趋势与其单轴抗压强度相同, 只是变化的程度不一样, 如图 2 所示, 其单轴抗压强度随着干湿循环次数的增加而减少, 干湿循环 1 次比干燥状态下 ($n=0$) 损失 50% 左右, 随 pH 值的变化幅度很小, 随着干湿循环次数

表 3 不同 pH 水环境各种干湿循环次数下泥质砂岩力学参数拟合方程

Table 3 Fitting equations for mechanical parameters of argillaceous sandstone under all kinds of wetting-drying cycles in different pH conditions

pH	σ_c	E
7	$\sigma_c(n) = 49.1[1 - 0.609 \ln(n^{0.2489} + 1)]$, $R^2=0.9995$	$E(n) = 5.17[1 - 0.717 \ln(n^{0.168} + 1)]$, $R^2=0.9995$
5	$\sigma_c(n) = 49.1[1 - 0.6846 \ln(n^{0.2052} + 1)]$, $R^2=0.9991$	$E(n) = 5.17[1 - 0.7388 \ln(n^{0.1696} + 1)]$, $R^2=0.9999$
3	$\sigma_c(n) = 49.1[1 - 0.6957 \ln(n^{0.3043} + 1)]$, $R^2=0.9962$	$E(n) = 5.17[1 - 0.7641 \ln(n^{0.2454} + 1)]$, $R^2=0.996$

表 4 不同 pH 水环境各种干湿循环次数下岩体的力学参数

Table 4 Mechanical parameters of rock mass under all kinds of wetting-drying cycles in different pH conditions

岩体状态	GSI=20				GSI=70			
	σ_{cmi}/MPa	E_{mi}/MPa	m_{bi}	c_{mi}/kPa	σ_{cmi}/MPa	E_{mi}/MPa	m_{bi}	c_{mi}/kPa
pH=7,n=0	0.39	236.12	0.56	80.54	9.24	3788.65	3.34	1908.14
pH=7,n=1	0.23	118.77	0.34	57.93	5.34	1905.74	2.00	1348.67
pH=7,n=5	0.17	94.34	0.28	46.83	4.10	1513.75	1.66	1113.54
pH=7,n=10	0.15	82.88	0.25	41.21	3.50	1329.83	1.50	996.47
pH=7,n=15	0.13	75.92	0.23	37.72	3.07	1218.13	1.40	923.89
pH=7,n=20	0.12	70.87	0.22	35.15	2.86	1137.05	1.33	870.67
pH=5,n=0	0.39	236.12	0.56	80.54	9.24	3788.65	3.34	1908.14
pH=5,n=1	0.21	115.20	0.34	52.79	4.86	1848.49	2.04	1224.87
pH=5,n=5	0.16	89.78	0.27	42.72	3.73	1440.49	1.64	1005.79
pH=5,n=10	0.13	77.84	0.24	37.78	3.19	1248.93	1.45	899.42
pH=5,n=15	0.12	70.58	0.22	34.73	2.86	1132.55	1.33	833.99
pH=5,n=20	0.11	65.32	0.21	32.50	2.62	1048.06	1.25	786.18
pH=3,n=0	0.39	236.12	0.56	80.54	9.24	3788.65	3.34	1908.14
pH=3,n=1	0.20	111.08	0.32	52.51	4.78	1782.31	1.89	1245.51
pH=3,n=5	0.13	71.96	0.24	35.45	3.02	1154.63	1.42	837.96
pH=3,n=10	0.09	53.01	0.20	26.64	2.15	850.51	1.20	627.29
pH=3,n=15	0.07	41.36	0.18	21.13	1.61	663.59	1.06	495.56
pH=3,n=20	0.05	32.85	0.16	17.08	1.21	527.06	0.96	398.66

的增加, 酸性溶液对岩石的腐蚀程度要远远大于自然水环境, 所以酸性对泥质砂岩的风化作用是有时间累积效应的, 时间越长, 反应越剧烈。对于地质强度指标 GSI=70 的泥质砂岩单轴抗压强度要大于 GSI=20, 因为 GSI=70 的岩体完整性要远大于 GSI=20, 但是在不同 pH 值干湿循环作用下泥质砂岩单轴抗压强度减小的变化趋势相同。

泥质砂岩的各个力学参数在同一个 pH 水环境下随不同干湿循环次数 n 的曲线符合下面的对数公式:

$$R = y_m / y_{m0} = 1 - j \ln(n^t + 1) \quad , \quad (11)$$

式中, R 为归一化函数, y_m 为岩体在不同干湿循环次数下的力学参数, y_{m0} 为初始力学参数, j, t 为力学参数拟合的系数, 针对特定的 pH 值、地质强度指标 GSI, 岩体力学参数 j, t 为常数。

图 3 选择 pH=7, GSI=20 的条件下泥质砂岩抗压强度、弹性模量、材料常数、黏聚力的归一化函数曲线。归一化函数 R 越小说明劣化程度越高, 由图可知在同一个 GSI 水平和 pH 值下, 泥质砂岩干湿循环作用下的力学参数为干燥状态下的 0.2~0.8。干湿循环次数 n 对其力学参数劣化的影响排序: 弹性模量的劣化效应>单轴抗压强度的劣化效应>材料常数的劣化

效应>黏聚力的劣化效应。

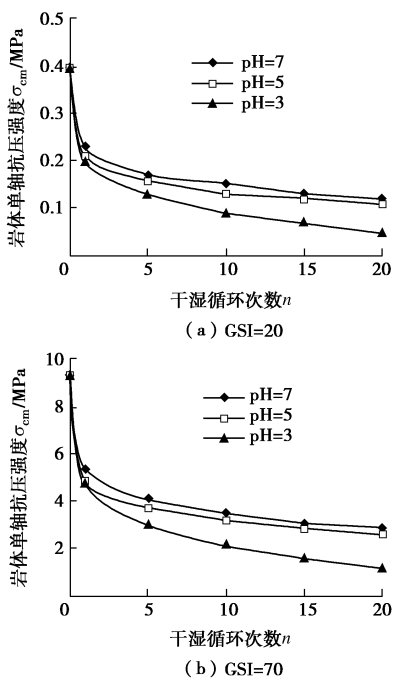


图 2 岩体单轴抗压强度与干湿循环次数的关系

Fig. 2 Relationship between uniaxial compressive strength of rock mass and wetting-drying cycles

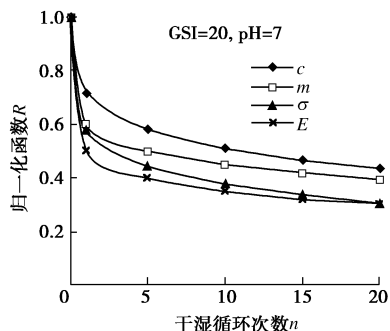


图3 岩体力学参数的归一化系数与干湿循环次数的关系

Fig. 3 Relationship between normalized coefficient of mechanical parameters of rock mass and wetting-drying cycles

2.4 基于广义 Hoek-Brown 准则泥质砂岩应变参数的变化规律

把表4中泥质砂岩的单轴抗压强度和弹性模量进行拟合得到不同pH值下其单轴抗压强度与弹性模量的公式:

$$\sigma_{cm} = \varepsilon_c E_m + \sigma_v = \varepsilon_c E_m + \varepsilon_v E_0 \quad (12)$$

式中 ε_c , ε_v 分别为岩体的最大弹性应变和永久应变; E_m , E_0 分别为弹性模量、变形模量; σ_v 为岩体闭合初始裂隙的应力。拟合曲线求得公式中的 ε_c , σ_v 具体值见表5。

表5 不同pH值干湿循环作用下岩体的应变参数

Table 5 Strain parameters of rock mass under all kinds of wetting-drying cycles in different pH conditions

pH 值	GSI=20		GSI=70	
	ε_c	σ_v	ε_c	σ_v
7	0.0017	0.0007	0.0025	0.0665
5	0.0017	0.0018	0.0025	0.0691
3	0.0017	0.0023	0.0025	0.0780

由表5可知, 泥质砂岩的最大弹性应变不随浸泡溶液的pH值的变化而变化, 只与岩石的完整程度有关, GSI越大 ε_c 越大。泥质砂岩受到单轴压缩时一开始需要闭合裂隙, 这部分产生的应变也叫永久应变, 永久应变随着浸泡溶液的pH值减小而变大, 即与浸泡溶液的酸性成正比关系, 这说明岩样在单轴压缩之前, 酸性腐蚀其的劣化程度比水溶液充分, 岩样的浸岩样在同一pH值水环境下, 泥质砂岩的 σ_v 随该GSI的变大而变大, 虽然永久应变 ε_v 与GSI成反比, 但是变形模量与GSI成正比, 而且变形模量的增幅远大于 ε_v 的减少, 所以岩样的 σ_v 与GSI成正比关系。

3 pH值和干湿循环次数n对泥质砂岩力学参数的劣化研究

3.1 泥质砂岩力学参数的劣化系数公式推导

由上述分析可知在同一个pH水环境下, 泥质砂岩力学参数归一化函数随干湿循环次数n成对数曲线进行变化, 定义其劣化系数为

$$\omega = 1 - R \quad (13)$$

将式(13)代入式(11)中得

$$1 - \omega = \frac{y_m}{y_{m0}} \quad (14)$$

选取GSI=20, 干湿循环次数n=1分别求得岩样力学参数在不同pH值下的劣化系数 ω , 求得的 ω 值绘制成劣化系数 ω 随pH值变化的曲线, 如图4所示。

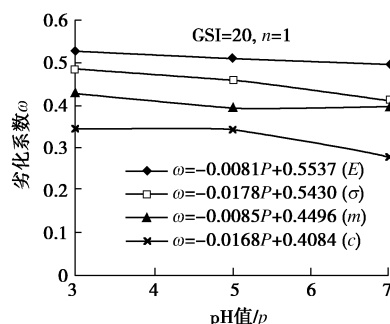


图4 岩体力学参数劣化系数与pH值的关系

Fig. 4 Relationship between deterioration factor of mechanical parameters of rock mass and pH values

由图4中拟合曲线方程可知泥质砂岩的劣化效应与pH值成线性相关, 斜率的绝对值k反映了不同参数指标随pH值劣化的程度。pH值对其力学参数劣化的影响排序: 单轴抗压强度劣化效应>黏聚力劣化效应>材料常数劣化效应>弹性模量效应。由图中的线性拟合曲线可知:

$$\omega = -kp + f \quad (15)$$

式中, k为劣化系数的斜率, p为浸泡水溶液的pH值, f为酸性达到极值时的劣化系数。

分别求出干湿循环次数n=1, 5, 10, 15, 20的泥质砂岩各个参数的劣化系数随pH值变化的拟合方程 ω , 得到k, 图5对各个不同干湿循环次数下的k进行拟合, 具体方程为

$$k_E = 0.0106 \ln n + 0.0075 \quad (R^2=0.9966),$$

$$k_m = 0.0062 \ln n + 0.0082 \quad (R^2=0.9969),$$

$$k_c = 0.013 \ln n + 0.0159 \quad (R^2=0.9946),$$

$$k_\sigma = -0.0022 \ln n + 0.0180 \quad (R^2=0.9871).$$

由拟合方程可知, 泥质砂岩力学参数的劣化系数斜率与干湿循环次数成对数关系, 符合

$$k = a \ln(n) + b \quad (n \geq 1) \quad (16)$$

式中 a, b为劣化系数斜率的系数。

如图6所示, 同样对极值劣化系数f和干湿循环次数进行拟合, 具体方程为

$$\begin{aligned}
 f_{\sigma} &= 0.0774 \ln n + 0.5409 \quad (R^2=0.9991), \\
 f_E &= 0.1355 \ln n + 0.5482 \quad (R^2=0.9981), \\
 f_m &= 0.1112 \ln n + 0.4450 \quad (R^2=0.9980), \\
 f_c &= 0.173 \ln n + 0.3986 \quad (R^2=0.9962).
 \end{aligned}$$

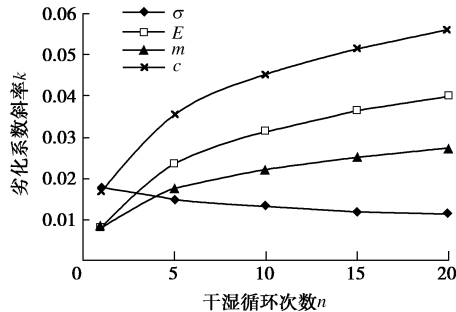


图5 劣化系数斜率与干湿循环次数关系

Fig. 5 Relationship between slope deterioration factor and wetting-drying cycles

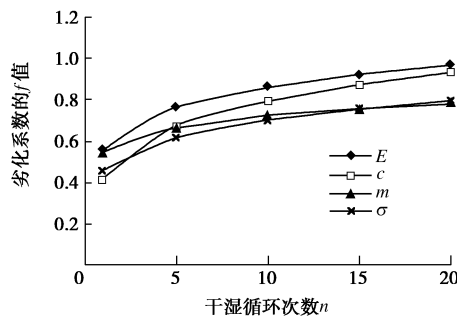


图6 极值劣化系数和干湿循环次数关系

Fig. 6 Relationship between extreme of deterioration factor and wetting-drying cycles

由拟合方程可知, 岩体极值劣化系数 f 与干湿循环次数成对数关系, 符合

$$f = e \ln n + g \quad (n \geq 1). \quad (17)$$

把式 (16)、(17) 代入 (15) 得到

$$\omega = -a \ln(n)p - bp + e \ln(n) + g. \quad (18)$$

分别把泥质砂岩单轴抗压强度、弹性模量、材料参数、黏聚力的 a , b , e , g 代入式 (18), 得到劣化系数的三维曲面方程, 图 7 是泥质砂岩力学参数的劣化系数 ω , pH 值和干湿循环次数 n 之间的三维关系曲面图, 劣化系数 ω 越大, 说明泥质砂岩受二者的影响程度越大, 从图中可知其弹性模量的综合劣化效应最大, 泥质砂岩力学参数的综合劣化效应排序: 当 $1 \leq n \leq 5$ 时, 弹性模量劣化效应 > 单轴抗压强度劣化效应 > 材料常数劣化效应 > 黏聚力劣化效应; 当 $n \geq 10$, $p \leq 4$ 时, 弹性模量劣化效应 > 黏聚力劣化效应 > 单轴抗压强度劣化效应 > 材料常数劣化效应, 由图可知其黏聚力受 pH 值和干湿循环次数累积劣化效应最明显,

波动幅度最大。

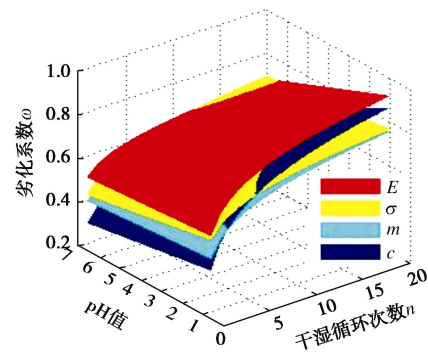


图7 pH 值、干湿循环次数和岩体劣化系数的关系

Fig. 7 Relationship among pH values and wetting-drying cycles and deterioration factor of rock mass

3.2 pH 值和干湿循环次数对岩体力学参数的劣化研究与工程意义

把式 (18) 代入式 (14) 中得到

$$y_m = y_{m0}(1 + a \ln(n)p + bp - e \ln(n) - g). \quad (19)$$

泥质砂岩力学参数与 p 和 $\ln n$ 成线性相关, a 描述 pH 值和干湿循环次数 n 的关联性, b 代表了 pH 值的影响, e 代表干湿循环次数 n 的影响, 其力学参数和浸泡溶液 pH 值、干湿循环次数 n 是三维空间关系, 空间曲面如图 (8) 所示, 泥质砂岩力学参数随 pH 值和干湿循环次数 n 是连续变化的, 变化趋势相同, n 越小, pH 值越大, 其力学参数越大。泥质砂岩力学参数沿正对侧面呈等值线分布, 沿反对侧面呈阶梯分布, 在强酸溶液中, 干湿循环次数 n 达到 50 的时候, 其单轴抗压强度、弹性模量和黏聚力都降为 0, 建议选取干湿循环次数 50 作为极限值来研究岩体在酸性环境下“浸泡—风干”的力学性质。

选取库区代表性岩石进行室内试验研究, 根据现场节理结构面的不同对岩体进行 GSI 打分, 通过广义 Hoek-Brown 准则强度折减法得到岩体的力学参数, 针对不同破碎程度的库岸边坡 (GSI 评分不同), 其消落带岩体力学参数的折减系数不同。统计历年来库岸边坡水位升降和降雨的次数以及库区水质和降雨的平均 pH 值, 求得每年干湿循环次数 n 和 p 值, 代入式 (19) 可以分别推算出未来一段时间不同破碎边坡岩体受酸性环境干湿循环作用腐蚀劣化的力学参数, 进而预测边坡受酸性环境干湿循环作用的劣化寿命, 大致求出沿库岸边坡受水位升降和酸雨反复作用引起的寿命分布图, 根据寿命分布图及时分段对库岸边坡进行加固处理, 对库岸边坡稳定性具有重要影响, 为工程防治提供了依据。

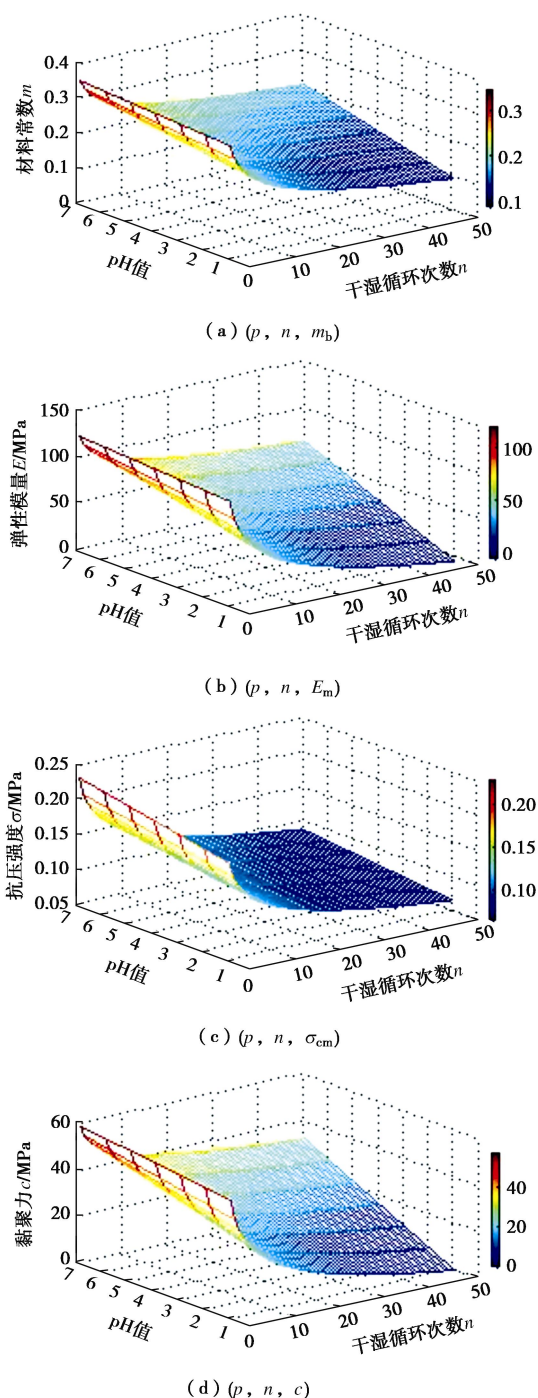


图8 pH值、干湿循环次数和岩体力学参数的关系

Fig. 8 Relationship among pH values, wetting-drying cycles and mechanical parameters of rock mass

4 结 论

(1) 泥质砂岩完整性越差, 破碎程度越高, 其力学参数折减越厉害; 在同一个地质强度指标 GSI 评分下, 酸性环境干湿循环作用使单轴抗压强度、弹性模量、材料常数和黏聚力呈减小趋势, 为初始干燥状态下的 0.2~0.8, 酸性浸泡岩样力学参数下降的趋势比中性浸泡要明显。

(2) 泥质砂岩的最大弹性应变 ε_e 不随浸泡溶液的 pH 值的变化而变化, 与地质强度指标 GSI 成正比关系, 永久应变 ε_v 与 GSI 成反比关系; 闭合初始裂隙的应力 σ_v 与浸泡溶液的 pH 值成反比关系, 与地质强度指标 GSI 成正比关系。

(3) 考虑 pH 值和干湿循环次数 n 的双重影响, 泥质砂岩弹性模量的综合劣化效应最大, 而黏聚力的累积劣化效应最明显, 当 $1 \leq n \leq 5$ 时 (即浸泡-风干次数较少): 弹性模量劣化效应 > 单轴抗压强度劣化效应 > 材料常数劣化效应 > 黏聚力劣化效应; 当 $n \geq 10$, $p \leq 4$ 时 (浸泡-风干次数较多): 弹性模量劣化效应 > 黏聚力劣化效应 > 单轴抗压强度劣化效应 > 材料常数劣化效应。

(4) 泥质砂岩力学参数与 p 和 $\ln n$ 线性相关, 方程为 $y_m = y_{m0}(1 + a \ln(n)p + bp - e \ln(n) - g)$, 当实际库岸边坡受酸雨反复作用时, 通过水质的 pH 值和“浸泡-风干”的次数, 根据室内常规试验可推算出边坡岩体的各个力学参数。

参考文献:

- [1] HOEK E. Strength of rock and rock masses[J]. ISRM News Journal, 1994, 2(2): 4 - 16.
- [2] HOEK E, KAISER P K, BAWDEN W F. Support of underground excavations in hard rock[M]. Rotterdam: A A Balkema, 1995.
- [3] HOEK E, MARINOS P, BENISSI M. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1998, 57(2): 151 - 160.
- [4] 彭 俊, 荣 冠, 王小江, 等. 完整岩石 Hoek-Brown 屈服准则参数 m_i 的经验模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(11): 4617 - 4623. (PENG Jun, RONG Guan, WANG Xiao-jiang, et al. An empirical model for determination of m_i in Hoek-Brown failure criterion for intact rocks[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(11): 4617 - 4623. (in Chinese))
- [5] ARIOGLU E, TOKGOZ N. Estimation of rock strength rapidly and reliably by the Schmidt hammer[J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 1991, 39(9): 327 - 331.
- [6] 杨俊杰, 孙 涛, 张玥宸, 等. 腐蚀性场地形成的水泥土的劣化研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 130 - 138. (YANG Jun-jie, SUN Tao, ZHANG Yue-chen, et al. Deterioration of soil cement stabilized in corrosive site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 130 - 138. (in Chinese))

- [7] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(11): 1936 - 1941. (YANG He-ping, ZHANG Rui, ZHENG Jian-Long. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(11): 1936 - 1941. (in Chinese))
- [8] 黄高峰, 李宗利, 牟声远. Hoek-Brown 准则参数在边坡工程中的敏感性分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(7): 2163 - 2167. (HUANG Gao-feng, LI Zong-li, MU Sheng-yuan. Sensitivity analysis of Hoek-Brown failure criterion parameters on slope projects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(7): 2163 - 2167. (in Chinese))
- [9] 张俊然, 许强, 孙德安. 多次干湿循环后土-水特征曲线的模拟[J]. 岩土力学, 2014, **35**(3): 689 - 695. (ZHANG Jun-ran, XU Qiang, SUN De-an. Simulation of soil-water characteristic curves during drying and wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(3): 689 - 695. (in Chinese))
- [10] 赵天宇, 王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲线[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, **43**(6): 2445 - 2452. (ZHAO Tian-yu, WANG Jin-fang. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess soil considering density and wetting-drying cycle effects[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, **43**(6): 2445 - 2452. (in Chinese))
- [11] 龚壁卫, 周小文, 周武华. 干-湿循环过程中吸力与强度关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 207 - 209. (GONG Bi-wei, ZHOU Xiao-wen, ZHOU Wu-hua. Test on suction and strength of expansive soil in a desorption-absorption cycle of moisture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 207 - 209. (in Chinese))
- [12] 乔丽苹, 刘建, 冯夏庭. 砂岩水物理化学损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(10): 2117 - 2124. (QIAO Li-ping, LIU Jian, FENG Xia-ting. Study on damage mechanism of sandstone under hydro-physico-chemical effects[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(10): 2117 - 2124. (in Chinese))
- [13] 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. (FU Yan. Study on water-rock interaction with the cyclic drying-wetting effect on rock[D]. Chong Qing: Chongqing University, 2010. (in Chinese))
- [14] 张梁. 酸性环境干湿交替作用下泥质砂岩宏观损伤特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. (ZHANG Liang. Study on macro-meso damage characteristics of argillaceous sandstone under dry-wet cycle in acidic condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese))
- [15] 邓华锋, 李建林, 王孔伟, 等. 饱和-风干循环过程中砂岩次生孔隙率变化规律研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(2): 483 - 488. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, WANG Kong-wei, et al. Research on secondary porosity changing law of sandstone under saturation-air dry cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(2): 483 - 488. (in Chinese))
- [16] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 饱和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): 1626 - 1631. (DENG Hua-feng, YUAN Xian-fan, LI Jian-lin, et al. Experimental research on influence of saturation degree on sandstone longitudinal wave velocity and strength[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(8): 1626 - 1631. (in Chinese))
- [17] GB/T 50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 1999. (GB/T 50266—99 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. 1999. (in Chinese))
- [18] SL 264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 2001. (SL 264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. 2001. (in Chinese))
- [19] MORGENSTERN N R, EIGENBROD K D. Classification of argillaceous soils and rocks[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1974, **190**(10): 1137 - 1156.