



粉砂岩干湿循环力学性能劣化及 统计损伤模型 *

张 铁¹, 李文良¹, 罗 刚², 周建伟³

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017;

2. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610036; 3. 川藏铁路有限公司, 四川 成都 610094)

摘要: 内陆港口岩石地基经历不同程度的干湿循环作用, 地基承载性能衰减劣化。以干湿循环次数和围压作为试验工况, 开展粉砂岩常规三轴压缩试验。假定粉砂岩微元强度服从改进 Harris 概率分布, 从而定义损伤变量, 选择 M-C 强度准则, 结合试验结果中弹性模量及内摩擦角的对数型衰减规律, 构建一种可反映干湿循环的统计损伤模型, 并给出参数解析方法, 得到损伤发展曲线。采用新建模型辨识粉砂岩及文献中泥质白云岩和砂岩试验曲线, 并经模拟对比。结果表明, 粉砂岩弹性模量、黏聚力、内摩擦角均随着干湿循环次数的增加而逐渐衰减, 当循环次数达到 16 次时, 衰减变化曲线趋于平稳, 该衰减规律可用对数函数表示; 干湿循环促进岩石力学性能衰减劣化, 宏观表现为峰值应力的降低; 新建模型经验证可行。

关键词: 港口地基工程; 粉砂岩; 干湿循环; 劣化; 损伤; Harris 函数; 模型

中图分类号: U 655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)02-0029-08

Deterioration of mechanical properties and statistical damage model of siltstone under dry-wet cycles

ZHANG Tie¹, LI Wen-liang¹, LUO Gang², ZHOU Jian-wei³

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China;

2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610036, China;

3. Sichuan-Tibet Railway Co., Ltd., Chengdu 610094, China)

Abstract: The rock foundation of inland ports experiences different degrees of dry-wet cycles, and the bearing performance of the foundation decreases and deteriorates. The number of dry-wet cycles and confining pressure are taken as the working conditions for the conventional triaxial compression test of siltstone. The micro-element strength of siltstone is assumed to obey the improved Harris probability distribution, and then the damage variable is defined. The M-C strength criterion is selected to build a new statistical damage model that can reflect the dry-wet cycle in combination with the logarithmic attenuation law of the elastic modulus and internal friction angle in the test results. The parameter analysis method is given, and the damage development curve is obtained. After that, the new model is used to identify the test curves of siltstone and argillaceous dolomite and sandstone in the literature, and simulations are performed for comparisons. The results show that the elastic modulus, cohesion, and internal friction angle of siltstone decrease gradually with the increase in the number of dry-wet cycles. When the number of cycles reaches 16, the attenuation curve tends to be stable, and the attenuation law

收稿日期: 2022-05-16

*基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2017YFD0800501)

作者简介: 张铁(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口水运及地质工程勘察。

can be expressed by the logarithmic function. The dry-wet cycle promotes the attenuation and deterioration of the mechanical properties of rock, and the macroscopic performance is represented by the reduction in peak stress. The feasibility of the new model is verified.

Keywords: port foundation project; siltstone; dry-wet cycle; deterioration; damage; Harris function; model

粉砂岩是我国西南地区常见的沉积岩，在水的不同作用下，力学性质差异较大^[1]。内陆港口地基工程中，岩石地基受降雨入渗和地下径流影响，经历不同程度的干湿循环，岩石地基承载性能衰减，对港口地基工程的安全带来潜在威胁^[2-3]，故而开展不同干湿循环作用下的岩石力学特性研究。

针对不同干湿循环作用下的岩石力学特性已取得一定的研究成果，如傅晏等^[4]通过砂岩试验，分析干湿循环作用下强度损失规律；李克钢等^[5]分析不同干湿循环次数下的砂岩强度特征，建立神经网络模型模拟本构关系；Zhang 等^[6]针对红砂岩开展试验，探究干湿循环次数对强度、超声波速度及岩石破坏特征的影响；宋勇军等^[7]采取核磁共振手段，探索不同干湿循环作用下弱胶结砂岩的孔隙度变化规律，基于此定义损伤，描述损伤变化情况；刘鹏程等^[8]针对泥质白云岩，完成不同干湿循环次数下的常规三轴压缩试验，基于 Weibull 分布建立损伤模型。

本文针对重庆忠县新生港粉砂岩，开展 5 种干湿循环条件下的常规三轴压缩试验，分析粉砂岩的弹性模量、黏聚力及内摩擦角与干湿循环次数之间的变化规律。假定粉砂岩微元强度服从改进 Harris 概率分布，从而定义损伤变量，选择 M-C 强度准则，结合试验结果中弹性模量及内摩擦角的对数型衰减规律，构建一种新的可反映干湿循环的统计损伤模型，推导参数的求解方法，得到损伤发展曲线。引用文献中泥质白云岩和砂岩试验数据，对 3 种岩石进行模拟对比，从而验证模型的可行性。研究成果可为粉砂岩在干湿循环作用下的力学特性研究及港口地基安全分析提供有益参考。

1 粉砂岩干湿循环加载试验

1.1 试验设计

本文结合重庆忠县新生港深基坑工程，基坑深 20~28 m。粉砂岩在降雨入渗、地下水作用下，经历不同程度的干湿循环，强度衰减，力学性能劣化，威胁基坑及港口的安全及稳定性。基坑内取新鲜粉砂岩，在实验室中制成直径 50 mm、长 100 mm 的圆柱样，粉砂岩在天然状态下的基本物理参数为：天然表观密度 2.16 g/cm³，孔隙率 0.56%，天然含水率 1.89%，天然密度 2.62 g/cm³，干密度 2.54 g/cm³。本文先对粉砂岩进行干湿循环，再进行常规三轴压缩试验。干湿循环周期为 2 d，首先将粉砂岩置于烘箱中烘干 1 d，然后将岩样放入水箱自由饱水 1 d，如此为 1 次干湿循环，本文将循环次数分别设为 0、1、4、8 和 16 次。试验采用 MTS815 岩石伺服试验系统（图 1），该系统轴压范围 0~4 600 kN，围压范围 0~140 MPa，最小采样时间为 50 μs，将常规三轴压缩试验围压分别设为 1、3 和 5 MPa，采用应变加载的方式，速率设为 0.05 mm/min。



图 1 MTS815 岩石伺服试验系统

1.2 试验结果

通过试验系统的电脑端数据采集，得到不同工况下的偏应力-应变曲线，如图 2 所示。

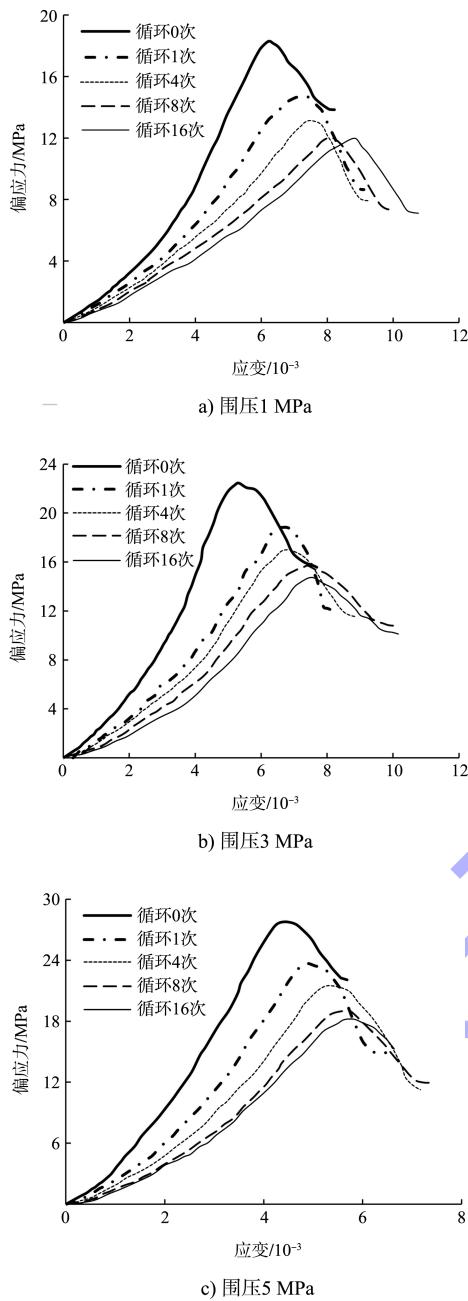


图2 粉砂岩偏应力-应变曲线

由图2可看出,在同一围压下,随着干湿循环次数的增加,粉砂岩峰值应力递减,峰值应变递增,这说明干湿循环作用会致使岩石力学性能衰减。在港口地基工程中,岩石地基经历不同程度的干湿循环作用,随着时间的推移,循环作用不断增强,岩石力学性能持续衰减,地基承载性能逐渐减弱,工程实践中应引起重视。

1.3 试验结果

根据文献[9],取岩石应力-应变曲线上近似

直线段的斜率为弹性模量,由此绘制不同工况下的弹性模量变化曲线,如图3所示。通过绘制不同围压下的莫尔圆做公切线的方法^[10],得到5种干湿循环次数下的黏聚力及内摩擦角变化曲线,如图4所示。

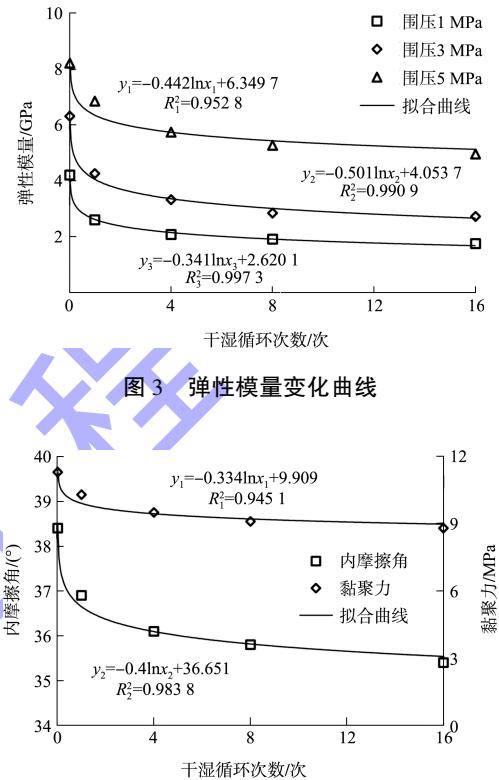


图3 弹性模量变化曲线

由图3可知,不同围压条件下,粉砂岩弹性模量均随着干湿循环次数n的增加而逐渐衰减,衰减幅度逐渐减小,当n达到16次,弹性模量变化曲线趋于稳定,该衰减规律可用对数函数表示,图3中拟合的平均 R^2 为0.9803,拟合效果较好。故可采用对数表达式拟合弹性模量的衰减规律,假设弹性模量随干湿循环次数n递增的衰减规律是连续的,则弹性模量拟合表达式为:

$$E_n = E_0 - A \ln(n+1) \quad (1)$$

式中: E_n 为干湿循环n次后的弹性模量拟合值; E_0 为循环0次的弹性模量; A 为拟合参数。当n=0时, $E_n = E_0$ 。

由图4可知,随着n的递增,黏聚力和内摩擦角均逐渐衰减,衰减幅度逐渐减小,当n达到

16 次, 黏聚力及内摩擦角变化曲线趋于稳定, 采用对数函数能较好地描述该衰减规律, R^2 分别为 0.945 1 和 0.983 8, 则黏聚力及内摩擦角拟合表达式为:

$$\begin{cases} c_n = c_0 - B \ln(n+1) \\ \varphi_n = \varphi_0 - C \ln(n+1) \end{cases} \quad (2)$$

式中: c_n 和 φ_n 分别为干湿循环 n 次后的黏聚力及内摩擦角拟合值; c_0 和 φ_0 分别为干湿循环 0 次的黏聚力拟合值和内摩擦角; B 、 C 为拟合参数。

总体上, 粉砂岩弹性模量、黏聚力、内摩擦角均随着 n 的递增而逐渐衰减, 干湿循环促进岩石力学性能衰减劣化, 宏观表现为峰值应力的降低。

2 粉砂岩统计损伤模型

2.1 损伤变量定义

在构建统计损伤模型前, 首先要定义损伤变量。假定岩石材料由 M 个微单元构成, 其中 M 包含无损微单元 M_1 和破坏微单元 M_2 。本文假设 M_1 与 M_2 的单元面积皆为 S , 破坏微单元不具备承载能力, 而无损微单元可在外界条件下转为破坏单元, 由此损伤变量 D ($0 \leq D \leq 1$) 可定义为:

$$D = \frac{M_2 S}{MS} = \frac{M_2}{M} \quad (0 \leq M_2 \leq M) \quad (3)$$

根据 Lemaitre 应变等价性原理^[11], 假定本文粉砂岩材料的损伤各向同性, 于是有:

$$\sigma^* = \sigma / (1 - D) = E \varepsilon / (1 - D) \quad (4)$$

式中: σ 为表观应力; σ^* 为有效应力; E 为岩石弹性模量; ε 为应变。

式(3)(4)中, 当 $D = 0$ 时, 认为岩石内部微单元未受损伤; 当 D 逐渐增大时, 岩石内部破坏微单元数量增长; 当 D 增至 1 时, 岩石结构破坏, 此时 $\sigma^* = 0$ 。在常规三轴压缩试验中, 岩石屈服后仍具备一定残余承载能力, D 不可能完全为 0, 由此引入损伤变量修正系数 δ , 式(4)可写为:

$$\sigma^* = E \varepsilon / (1 - \delta D) \quad (5)$$

曹瑞琅等^[12]将 δ 定义为:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma_r}{\sigma_{rc}}} \quad (6)$$

式中: σ_r 为残余强度; σ_{rc} 为峰值强度。

岩石材料具备非线性非均质的特点, 在承受外界荷载时, 材料内部微单元破坏, 这种破坏是随机发生的区域性破坏, 本文理解为损伤区域在岩石材料内部随机分布, 故假定岩石微元强度 F 与有效应力 σ^* 存在函数关联, 即 $F = f(\sigma^*)$, 且 F 遵从某概率分布 $Y(F)$ ^[13], 于是 D 为:

$$D = \int_0^{\sigma^*} Y[f(\sigma^*)] d\sigma^* \quad (7)$$

Harris 函数^[14]是一种常用的具有结构简单、线条灵活特点的衰减型函数, 其表达式为:

$$J = \frac{1}{1 + af^b} \quad (8)$$

式中: J 、 f 分别为函数中的因变量和自变量; a 、 b 为 Harris 函数参数, $a > 0$ 、 $b > 0$ 。

式(8)单调递减, 当 f 从 0 开始递增时, J 从 1 开始递减, 当 $f \rightarrow +\infty$ 时, $J \rightarrow 0$ 。假定 D 的累积规律与 $(1 - J)$ 相同, 于是参考式(8)有:

$$D = 1 - \frac{1}{1 + af^b} \quad (9)$$

将式(9)求导, 得到采用改进 Harris 概率密度分布的函数 $Y(F)$ 为:

$$Y(F) = \frac{abF^{b-1}}{(1 + af^b)^2} \quad (10)$$

2.2 模型构建

结合本文粉砂岩试验中的假三轴应力条件, 围压与中间主应力数值上相等, 假定粉砂岩在无损条件下遵从 Hooke 定律, 于是有:

$$\varepsilon_1 = (\sigma_1^* - 2\mu\sigma_3^*) / E \quad (11)$$

将式(5)(9)代入(11)可得:

$$\sigma_1 = E \varepsilon_1 (1 - \delta) + \frac{E \varepsilon_1 \delta}{1 + af^b} + 2\mu\sigma_3 \quad (12)$$

参考文献[10], 选择 M-C 强度准则, 将 F 表示为:

$$F = f(\sigma^*) = \sigma_1^* - \sigma_3^* \tan^2(45^\circ + \varphi/2) \quad (13)$$

式中: μ 为泊松比; σ_1^* 、 σ_3^* 分别为最大、最小有效主应力; σ_1 、 σ_3 分别为轴向应力、围压; φ 为

内摩擦角。

式(5)可写为:

$$\sigma_1^* = E\varepsilon_1 / (1 - \delta D) \quad (14)$$

式中: ε_1 为 σ_1^* 对应的应变。

联立式(11)(14)可得:

$$\varepsilon_1 = \frac{(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)}{E(1 - \delta D)} \quad (15)$$

将式(15)代入式(13)可得:

$$F = \frac{E\varepsilon_1 [\sigma_1 - \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi_n/2)]}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} \quad (16)$$

前文研究表明, 岩石材料的 E 和 φ 均随着 n 的增大而逐渐衰减, 且表现出对数型衰减规律, 结合式(1)(2), F 可反映不同 n 值条件下的微元强度, 则有:

$$F_n = \frac{E_n \varepsilon_1 [\sigma_1 - \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi_n/2)]}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} \quad (17)$$

将式(4)(5)(17)代入式(12)得:

$$\sigma_1 = \frac{E_n \varepsilon_1 \delta}{1 + a \left\{ \frac{E_n \varepsilon_1 [\sigma_1 - \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi_n/2)]}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} \right\}^b} + \frac{E_n \varepsilon_1 (1 - \delta) + 2\mu\sigma_3}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} \quad (18)$$

式(18)即为新建的考虑不同干湿循环作用的岩石统计损伤模型。

3 模型参数求解

3.1 参数求解方法

式(18)中, E_n 、 φ_n 和 μ 均由岩石试验便可确定, 参数 a 、 b 需要确定计算表达式, 对式(18)求偏微分得:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} = \frac{\delta E_n (1 + a F_n^b) + \delta E_n \varepsilon_1 (a b F_n^{b-1} R)}{(1 + a F_n^b)^2} + E_n (1 - \delta) \quad (19)$$

其中:

$$R = \frac{E_n [\sigma_1 - \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi_n/2)]}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} + \frac{E_n \varepsilon_1 \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1}}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} -$$

$$\frac{E_n \varepsilon_1 \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} [\sigma_1 - \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi_n/2)]}{(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)^2} \quad (20)$$

图 2 中, 峰值点具有极值性, 于是有:

$$\left. \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right|_{\sigma_1 = \sigma_{1c}, \varepsilon_1 = \varepsilon_{1c}} = 0 \quad (21)$$

式中: ε_{1c} 和 σ_{1c} 分别为图 2 曲线中峰值点对应的应变和应力。

将式(21)同时代入式(19)(20)可得:

$$\delta - 1 = \frac{\delta}{1 + a F_{nc}^b} + \frac{\delta \varepsilon_{1c} \left\{ a b F_{nc}^{b-1} \frac{E_n [\sigma_1 - \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi_n/2)]}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} \right\}}{(1 + a F_{nc}^b)^2} \quad (22)$$

式中: F_{nc} 为 F_n 的峰值点。

式(12)可写为:

$$\frac{1}{1 + a F_{nc}^b} = \frac{\sigma_{1c} - 2\mu\sigma_3}{\delta E_n \varepsilon_{1c}} + \frac{\delta - 1}{\delta} \quad (23)$$

联立式(22)(23)可得:

$$b = \frac{F_{nc} W \left(\frac{W}{\delta E_n \varepsilon_{1c}} + \frac{\delta - 1}{\delta} \right)^2 \left(\delta - 1 - \frac{E_n \varepsilon_{1c} \delta^2}{W + (\delta - 1) E_n \varepsilon_{1c}} \right)}{(W - E_n \varepsilon_{1c}) [\sigma_1 - \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi_n/2)]} \quad (24)$$

$$a = \frac{W - E_n \varepsilon_{1c}}{E_n \varepsilon_{1c} \delta F_{nc}^b} \quad (25)$$

其中:

$$W = \sigma_{1c} - 2\mu\sigma_3 \quad (26)$$

式(19)~(26)即为模型参数 a 、 b 的求解方法, 参数 b 由 σ_{1c} 、 ε_{1c} 、 μ 、 σ_3 、 F_{nc} 、 δ 、 E_n 和 φ_n 等 8 个参数计算而得, 这 8 个参数值均通过岩石常规三轴压缩试验获取, 求取 b 值后, 便可得到 a 值。

3.2 参数确定

通过本文参数的求解方法, 得到不同工况下的模型参数, 见表 1。试验得到 $\mu = 0.24$, 不再列入表中。

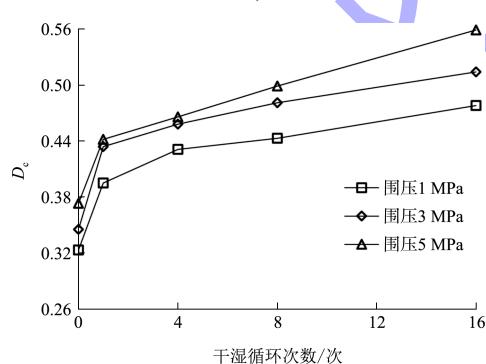
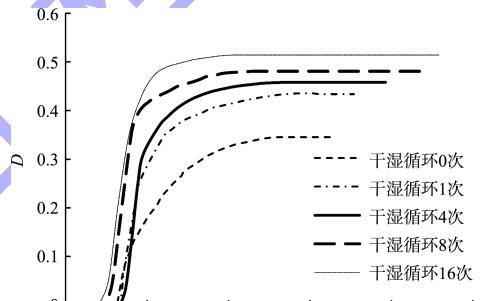
表 1 模型参数

σ_3 /MPa	n/次	σ_{1c} /MPa	$\varepsilon_{1c}/10^{-3}$	δ	E_n /GPa	$\varphi_n/(\circ)$	F_{nc} /MPa	a	b
1	0	18.150	6.362	0.873	4.207	38.362	21.021	0.003	1.579
	1	14.709	7.363	0.767	3.971	38.084	21.555	0.144	0.501
	4	13.088	7.621	0.779	3.659	37.718	19.765	0.196	0.427
	8	12.034	8.076	0.780	3.460	37.483	19.167	0.280	0.334
3	16	11.938	8.729	0.772	3.243	37.228	19.456	0.316	0.301
	0	22.449	5.321	0.833	6.309	38.362	15.393	0.075	0.655
	1	18.812	6.595	0.803	6.073	38.084	14.188	0.440	0.178
	4	16.982	6.844	0.824	5.761	37.718	11.485	0.538	0.128
5	8	15.696	7.403	0.829	5.562	37.483	9.732	0.664	0.078
	16	14.739	7.528	0.828	5.345	37.228	7.714	0.723	0.057
	0	27.783	4.434	0.891	8.210	38.362	9.213	0.001	0.576
	1	23.697	4.876	0.793	7.974	38.084	6.747	0.003	0.451
5	4	21.488	5.361	0.724	7.663	37.718	4.571	0.006	0.247
	8	19.013	5.753	0.793	7.463	37.483	2.958	0.011	0.119
	16	18.198	5.828	0.756	7.247	37.228	1.609	0.044	0.008

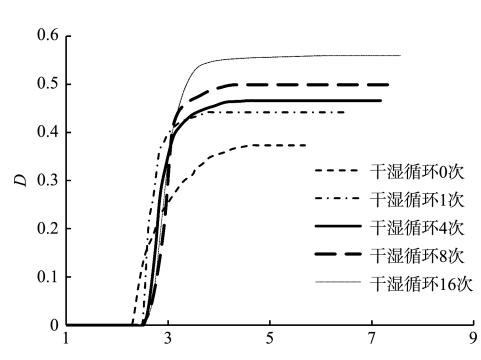
4 损伤分析及模型验证

4.1 损伤分析

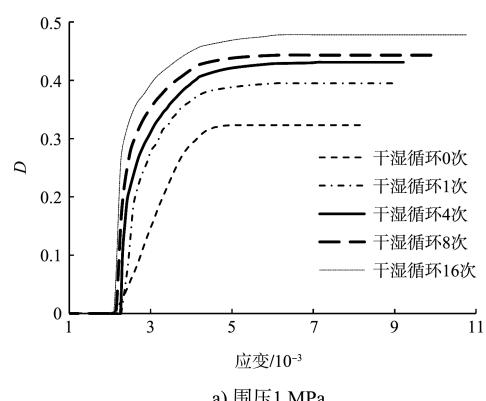
图 2 中峰值点对应的损伤变量 D 为临界损伤度, 记为 D_c , 将式(17)代入式(9), 依据表 2 中参数, 得到不同围压下的 D_c , 见图 5。将式(16)代入式(9), 通过表 2 中参数以及图 2 中应变数据, 绘制不同围压下的 D , 见图 6。

图 5 不同围压下的 D_c 曲线

b) 围压3 MPa



c) 围压5 MPa

图 6 不同围压下的 D 曲线

a) 围压1 MPa

由图 5 可看出, 当 σ_3 恒定时, D_c 随着 n 的增大而递增, 当 n 保持不变时, D_c 总体上随着 σ_3 的增大而递增。

由图 6 可看出, 损伤变量曲线大致呈 S 形, 首先损伤变量保持为 0, 在应变 0.002 0~0.002 5

范围内, 损伤变量开始剧增, 当应变超过 0.004 0 后, 损伤变量趋于稳定。在同样围压条件下, D 随着 n 的增大而递增, 这说明干湿循环作用对粉砂岩损伤发展起一定的促进作用。

4.2 模型验证

依据表 1 中参数及式(18), 绘制不同工况下预测值与试验值对比曲线, 如图 7 所示。

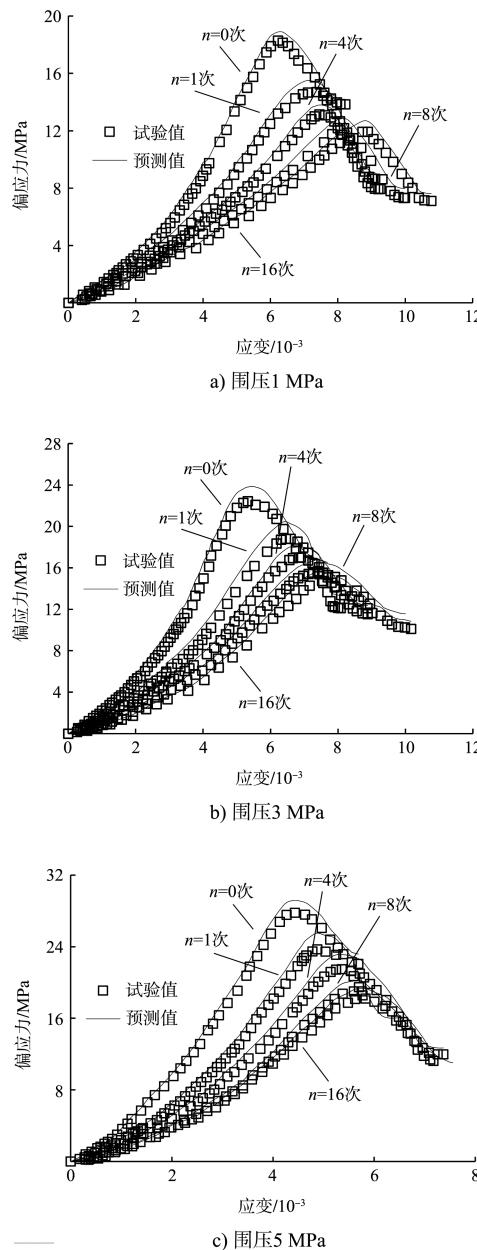


图 7 预测值与试验值对比曲线

由图 7 可看出, 本文新建模型对粉砂岩偏应力-应变曲线的识别能力较强, 辨识效果较好, 平均 R^2 为 0.986 3, 尽管预测值略高于试验值, 对曲

线峰值部分的模拟存在一定的误差, 但总体上本文新建模型能较为准确地反映粉砂岩在不同干湿循环条件下的力学特性。

为初步验证本文新建模型辨识不同干湿循环次数下岩石应力-应变曲线的适用性, 引用文献[8]中的泥质白云岩和文献[15]中的砂岩试验数据, 利用本文的模型识别方法, 得到验证对比曲线, 如图 8 所示。

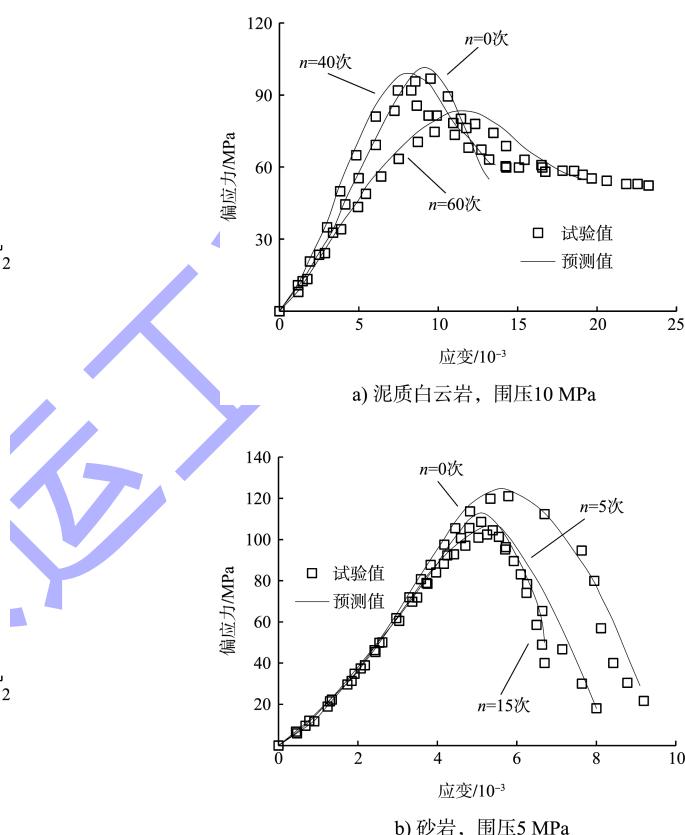


图 8 预测值与试验值对比曲线

由图 8 可看出, 本文新建模型对泥质白云岩和砂岩试验数据的识别效果相对较好, 平均 R^2 分别为 0.968 5 和 0.957 1, 辨识效果略低于本文的粉砂岩, 这可能是由于泥质白云岩和砂岩的偏应力-应变曲线存在一定的不规则性, 尤其是曲线峰后部分数据。总体上, 本文新建模型能较好地反映粉砂岩、泥质白云岩和砂岩在不同干湿循环次数下的力学特性, 证明了本文所建统计损伤模型具有一定的可行性和适用性。

港口地基工程中, 岩石经历干湿循环作用,

导致力学性能衰减劣化,随着时间增加,干湿循环作用增强,降雨入渗和地下径流与岩石地基充分接触、反应,岩石地基承载性能持续衰减,威胁地基基础安全。在地基设计过程中,应充分考虑设计参数赋值的合理性,尤其是黏聚力和内摩擦角这两项重要指标会持续衰减降低,计算和验算过程应高度重视。施工及营运过程中,注意水的作用影响,必要时可采取位移监测手段,做好监测和预警,防止事故发生。

5 结论

1) 粉砂岩弹性模量、黏聚力、内摩擦角均随着 n 的增加而逐渐衰减,衰减幅度逐渐减小,当 n 达到 16 次,衰减趋于稳定,该衰减规律可用对数函数表示。

2) 假定 F 服从改进 Harris 概率分布,从而定义损伤变量。选择 M-C 强度准则,结合试验结果中弹性模量及内摩擦角的对数型衰减规律,构建一种新的考虑干湿循环作用的统计损伤模型。

3) 利用岩石偏应力-应变曲线峰值点的极值特性,推导参数求解方法,从而得到损伤变量曲线。损伤变量曲线大致呈 S 形,在应变 0.0020~0.0025 范围内,损伤变量开始激增,当应变超过 0.0040 后,损伤变量趋于稳定,干湿循环作用促进岩石损伤发展。

4) 采用新建模型辨识本文粉砂岩和文献中泥质白云岩和砂岩试验数据,经模拟对比发现,新建模型能较好地反映粉砂岩、泥质白云岩和砂岩在不同干湿循环次数下的力学特性,证明所建统计损伤模型的可行性。

参考文献:

- [1] 高祥. 饱水粉砂岩破裂失稳的红外温度突变前兆及 SVM 预警模型[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
- [2] 舒丹. 内河软岩地基框架码头桩基承载特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.

- [3] TANG S C, WANG J J, QIU Z F, et al. Effects of wet-dry cycle on the shear strength of a sandstone-mudstone particle mixture [J]. International journal of civil engineering, 2019, 17(6): 921-933.
- [4] 傅晏, 刘新荣, 张永兴, 等. 水岩相互作用对砂岩单轴强度的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 54-58.
- [5] 李克钢, 郑东普, 黄维辉. 干湿循环作用下砂岩力学特性及其本构模型的神经网络模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(S2): 168-173.
- [6] ZHANG Z H, JIANG Q H, ZHOU C B, et al. Strength and failure characteristics of Jurassic Red-Bed sandstone under cyclic wetting-drying conditions [J]. Geophysical journal international, 2014, 198(2): 1034-1044.
- [7] 宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 等. 基于核磁共振技术的弱胶结砂岩干湿循环损伤特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 825-831.
- [8] 刘鹏程, 黄武峰, 包太, 等. 泥质白云岩干湿循环力学特性试验研究及其本构模型[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(8): 101-105, 112.
- [9] 梁亚飞, 李化敏, 李回贵, 等. 煤层顶板砂岩微观结构及力学特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S2): 579-586.
- [10] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [11] LEMAITRE J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. Journal of engineering materials and technology, 1985, 107(1): 83-89.
- [12] 曹瑞琅, 贺少辉, 韦京, 等. 基于残余强度修正的岩石损伤软化统计本构模型研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1652-1660, 1667.
- [13] 曹文贵, 杨尚, 张超, 等. 考虑弹性模量变化的岩石统计损伤本构模型[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(3): 42-48.
- [14] 齐欢. 数学模型方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.
- [15] 张亮. 干湿循环下节理砂岩力学特性损伤效应及本构模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.