

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.03.003

水岩作用下砂岩劣化损伤统计本构模型

邓华锋, 胡安龙, 李建林, 张小景, 胡 玉, 常德龙, 朱 敏

(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)

摘 要: 水库蓄水运行后, 库水位反复升降变化对库岸边坡岩土体来说是一种疲劳作用, 水岩作用下边坡岩体力学性质的劣化将影响整个边坡的稳定。基于此, 在前期浸泡-风干循环水岩作用试验数据分析基础上, 根据水岩作用过程中砂岩三轴压缩试验应力-应变曲线的特点, 借助连续损伤力学和统计理论, 将浸泡-风干循环水岩作用的损伤效应耦合到损伤统计本构模型中, 并重点考虑了压密段的影响, 分段建立了水岩作用下砂岩的统计损伤本构方程。对比分析表明, 所建立的分段统计损伤本构模型计算与试验曲线符合较好, 说明所建立的统计损伤本构方程可以较好地反映砂岩在浸泡-风干循环水岩作用的损伤效应, 在水岩作用过程中, 本构模型第 2 段的 Weibull 分布参数 m 和 F_0 均逐渐减小, 反映了水岩作用下砂岩脆性逐渐减弱, 宏观强度逐渐降低的力学特性。研究成果对大量存在的库岸边坡长期变形稳定分析具有较好的参考价值, 同时, 相关分析方法也可以为类似试验提供参考。

关 键 词: 水岩作用; 浸泡-风干循环; 压密段; 损伤; 统计模型

中图分类号: TV 697.2+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)03-0631-09

Statistical damage constitutive model of sandstone under water-rock interaction

DENG Hua-feng, HU An-long, LI Jian-lin, ZHANG Xiao-jing, HU Yu, CHANG De-long, ZHU Min

(Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education,
China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: After the impoundment and operation of reservoirs, the repeated change of water level has “fatigue effect” on the rock mass of the reservoirs slope, and the deterioration of the rock mass under water-rock interaction will affect the stability of the whole slope. Based on these, we acquired the following results on the foundation of the trial data analyses of the immersion-air dry cycle water-rock interaction in earlier stage. According to the characteristics of stress-strain curve acquired in the process of triaxial compression test under the water-rock interaction, and in virtue of continuum damage mechanics and statistical theory, the damage effect of the immersion-air dry cycle water-rock interaction is coupled into the damage statistical constitutive model. The damage constitutive equation of sandstone under water-rock interaction is established by considering the influence of compacted section. Comparative analysis reveals that the calculated curve based on the established sectional statistical damage constitutive model conforms well to the trial curve, which means the statistical damage constitutive model can accurately reflect the damage effect of sandstones under the immersion-air dry cycle water-rock interaction. In the process of water-rock interaction, the constitutive model parameters m and F_0 all diminish gradually, which reflect the mechanical characteristics of sandstones that the brittleness weakens and the macroscopic strength reduces gradually. The results of the study can be used as a reference for long-term deformation stability analysis of a large number of existing bank slopes, and the correlation analysis method can also provide reference for similar experiments.

Keywords: water-rock interaction; immersion-air dry cycle; compression sections; damage; statistical model

收稿日期: 2015-04-10

基金项目: 湖北省自然科学基金重点项目 (No.2015CFA140); 国家自然科学基金资助项目 (No.51309141, No.51679127, No.51439003)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of Hubei Province (2015CFA140) and the National Nature Science Foundation of China (51309141, 51679127, 51439003).

第一作者简介: 邓华锋, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 主要从岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn

1 引言

三峡水库蓄水运行后,根据防洪和发电的需要,库水位每年会在 145 m 和 175 m 之间反复变化。在库水大幅度涨落的条件下,库岸边坡部分岩土体将处于浸泡-风干循环状态,这种浸泡-风干循环作用对岩土体来说是一种疲劳作用^[1-3],将导致岩土体物理、力学性质的劣化,进而导致库岸边坡的变形破坏。

近年来,一些学者逐渐开始关注库岸边坡岩体的水岩作用,并开展了一系列针对性试验,刘新荣等^[4]通过试验模拟了库水涨落情况下水岩作用的过程,研究发现,砂岩的抗剪强度随着饱水-风干水-岩循环作用次数的增加而降低;周世良等^[5]在干湿循环水岩作用试验基础上,提出了泥岩库岸时变稳定性分析方法;傅晏等^[6-7]、郭义^[8]、姚华彦等^[9]、黄维辉^[10]、Hale 等^[11]、Apollaro 等^[12]、Tallini 等^[13]、Alt-Epping 等^[14]、Hurowitz 等^[15]对页岩、砂岩、泥岩等涉水边坡岩体在水岩作用下的物理力学性质劣化规律进行了研究。

有的学者逐渐开始研究建立考虑水岩作用的损伤演化模型,傅晏^[6]通过完整砂岩的干-湿循环试验,推导建立了干-湿循环作用下砂岩的统计损伤本构模型;邓建华^[16]建立了考虑膨胀和损伤影响的膏溶角砾岩弹塑性本构模型;刘业科^[17]运用损伤力学理论建立了分别以膨胀率、孔隙度和浸水时间为损伤变量的斜长角闪岩的水损伤演化方程和本构关系;朱敏^[18]在试验数据分析基础上,建立了考虑循环加、卸载初始损伤和风干-浸泡循环作用耦合损伤效应的统计损伤本构模型。

这些研究工作为正确认识库岸边坡消落带水岩作用奠定了较好的基础,但主要着重于水岩作用下各类岩石力学参数劣化规律统计分析,在有关库岸边坡消落带水岩作用的损伤本构模型研究还不够完善,特别是关于水岩作用过程中由于岩石孔隙率增加和岩石骨架软化而导致的岩石压密变形分析较少,不能很好地反映水岩作用导致的岩石损伤劣化效应。因此,本文拟在前期完成的库岸边坡消落带水岩作用试验数据^[18-23]分析基础上,重点考虑应力-应变曲线压密段的影响,将浸泡-风干循环水岩作用的劣化效应耦合到力学损伤中,分段建立岸坡消落带典型砂岩在水岩作用下的统计损伤本构模型。

2 浸泡-风干循环水岩作用下砂岩力学参数劣化规律分析

在前期库岸边坡水岩作用研究中,研究团队针

对库岸边坡消落带水岩作用研发了专用的岩石浸泡试验仪器,设计进行了模拟库水位反复升降变化的浸泡-风干循环水岩作用试验^[18-23],试验流程图如图 1 所示。

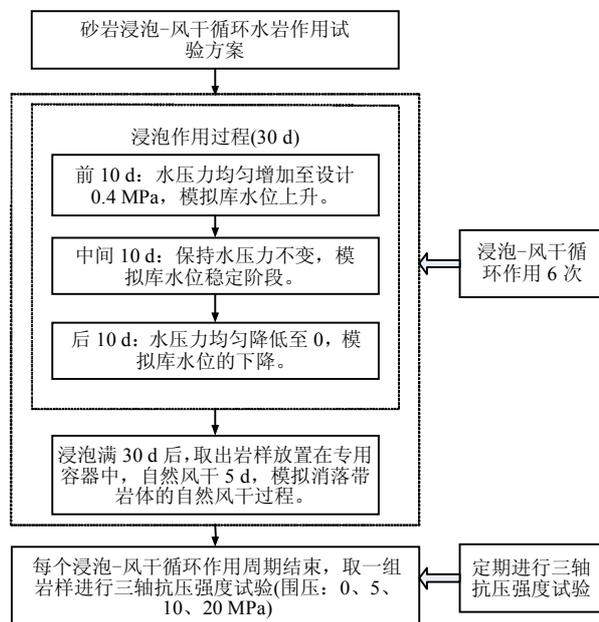
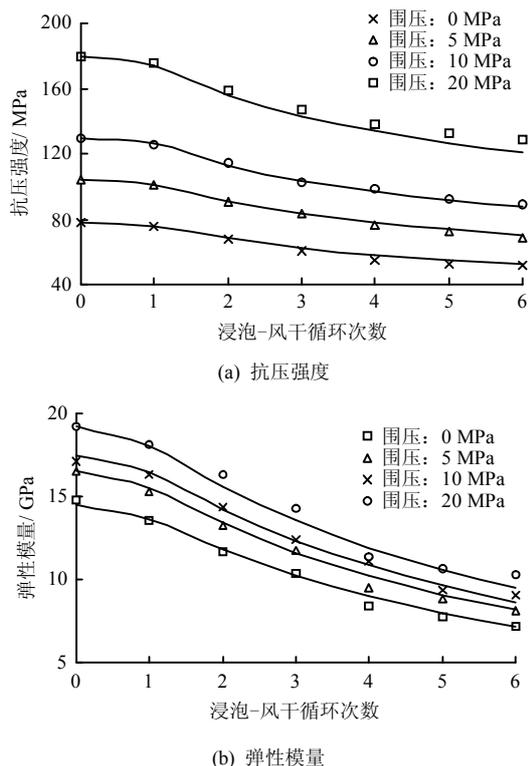


图 1 浸泡-风干循环作用试验流程图
Fig.1 Test process diagram of immersion-air dry cycle

文献^[19-23]分别对浸泡-风干循环水岩作用下典型砂岩的力学特性及变形破坏特征变化规律进行了比较深入的分析,试验结果如图 2 所示。

在水岩作用过程中,砂岩的抗压强度、弹性模



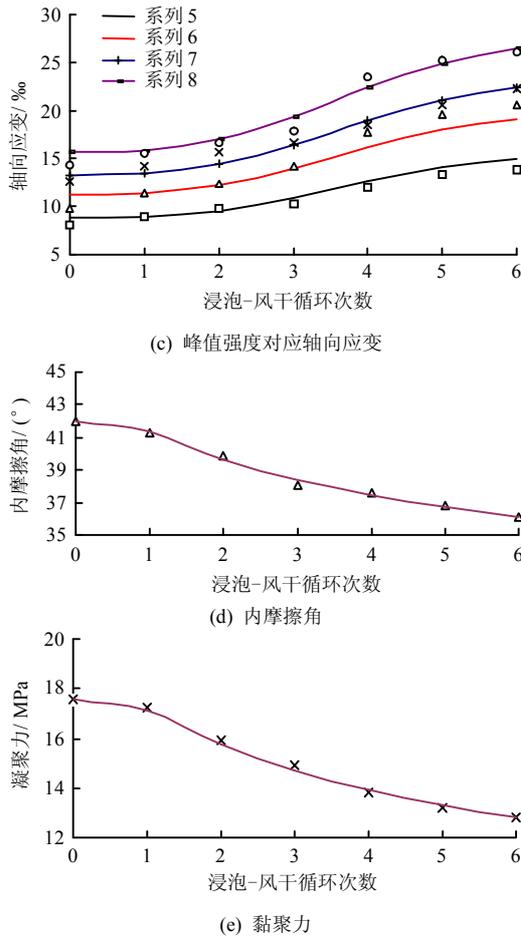


图 2 水岩作用下砂岩典型力学参数劣化曲线
Fig.2 Degradation curves of typical mechanical parameters of sandstone under water-rock interaction

量、黏聚力和内摩擦角等参数随着浸泡-风干循环次数 n 的增加而逐渐降低,说明浸泡-风干循环水岩作用导致了砂岩不可逆的渐进损伤,若假定这个损伤过程随着浸泡-风干循环水岩作用次数的增加连续变化,则可以建立各力学参数的损伤演化方程,具体如表 1 所示。

表 1 浸泡-风干循环作用下砂岩力学参数拟合函数关系式
Table 1 The fitting function formula of mechanical parameters of sandstone under immersion-air dry cycle

参数	损伤演化方程
三轴抗压强度	$\sigma_n = \sigma_0 [1 - 0.041 \cdot 0 \ln(1 + 1.084 \cdot 71 n^{4.3973})]$ 其中,围压为 0、5、10、20 MPa 时, σ_0 分别为 78.31、104.38、129.90、179.27 MPa
弹性模量	$E_n = E_0 [1 - 0.128 \cdot 0 \ln(1 + 0.589 \cdot 41 n^{2.4881})]$ 其中,围压为 0、5、10、20 MPa 时, E_0 分别为 14.51、16.49、17.49、19.20 GPa
峰值应变	$\varepsilon_n = 1.9 \varepsilon_0 [1 - 0.156 \cdot 7 \exp(1 - 0.018 \cdot 51 n^{2.7784})]$ 其中,围压为 0、5、10、20 MPa 时, ε_0 分别为 8.08、10.32、12.13、15.62%
内摩擦角	$\varphi_n = \varphi_0 [1 - 0.021 \cdot 8 \ln(1 + 1.008 \cdot 5 n^{3.5663})]$ 其中, $\varphi_0 = 42.00^\circ$
黏聚力	$c_n = c_0 [1 - 0.042 \cdot 0 \ln(1 + 0.816 \cdot 7 n^{3.69658})]$ 其中, $c_0 = 17.56$ MPa

3 浸泡-风干循环水岩作用下砂岩损伤变量的确定

3.1 损伤变量的确定

基于岩石材料内部所含缺陷分布的随机性,较多学者^[24-29]从岩石微元强度服从正态分布或 Weibull 分布的角度出发,结合岩石三轴试验结果分析,通过引入参量描述岩石微元强度分布的规律,建立了岩石损伤演化方程和岩石损伤软化本构模型^[18],研究表明,统计损伤力学是描述岩石破坏过程的有效方法之一,因此,本文分析中借助 Weibull 统计分布理论,对三峡库区典型砂岩在水岩作用下的损伤效应进行描述^[18]。

根据 Lemaitre 应变等效假说^[30],材料在变形前后应变等价,则岩石损伤本构关系为

$$[\sigma^*] = \frac{[\sigma]}{1-D} = \frac{[C][\varepsilon]}{1-D} \quad (1)$$

式中: $[\sigma^*]$ 为岩石的有效应力矩阵; $[\sigma]$ 为岩石的名义应力矩阵; D 为岩石的损伤变量; $[C]$ 为岩石材料弹性矩阵; $[\varepsilon]$ 为岩石的应变矩阵^[18]。

在外荷载作用下,岩石材料内部微元体的破坏是随机分布的,定义损伤变量 D 为岩石内材料破坏的微元数量 N_f 与岩石材料微元总数 N 的比值,假定岩石材料微元体破坏的概率密度函数为 $P[F]$ ^[18, 30],则可以得到岩石材料损伤变量的表达式为

$$D = \frac{N_f}{N} = \frac{\int_0^F NP[x]dx}{N} = \int_0^F P[x]dx \quad (2)$$

假定岩石材料宏观上满足各向同性条件,材料微元体强度 F 服从 Weibull 分布,而且,微元体在破坏具有线弹性性质,服从虎克定律^[18, 30],岩石材料微元体强度的概率密度函数可表示为

$$P(F) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (3)$$

将上式(3)代入式(2),可以得到基于 Weibull 分布的损伤变量表达式为

$$D = \int_0^F P(x)dx = 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (4)$$

式中: F 为岩石微元强度 Weibull 分布的随机分布变量; m 和 F_0 为 Weibull 分布参数。由上式分析

可知, 岩石材料微元体破坏概率一旦确定, 则损伤变量确定的关键在于微元体强度的确定^[6]。

3.2 岩石微元强度的确定

假定岩石材料破坏准则为^[29-30]

$$f(\sigma^*) - k_0 = 0 \quad (5)$$

式中: k_0 为与岩石材料内摩擦角和黏聚力有关的一个常数^[29-30]。

Drucker-Prager 破坏准则常用于各类岩石类材料, 参数形式简单^[18], 因此, 本文采用该准则表示岩石材料微元体的强度。

$$F = f(\sigma^*) = \alpha_0 I_1 + J_2^{1/2} \quad (6)$$

$$\alpha_0 = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi}} \quad (7)$$

$$I_1 = \sigma_x^* + \sigma_y^* + \sigma_z^* = \sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^* \quad (8)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_1^* - \sigma_3^*)^2] \quad (9)$$

式中: φ 为内摩擦角; I_1 为应力张量第 1 不变量; J_2 为应力偏量第 2 不变量; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为名义应力; σ_1^* 、 σ_2^* 、 σ_3^* 为名义应力对应的有效应力^[18]。

根据广义虎克定律:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1^* - \nu(\sigma_2^* + \sigma_3^*)}{E} \quad (10)$$

$$\sigma_i^* = \frac{\sigma_i}{1-D}, \quad i=1, 2, 3 \quad (11)$$

$$\sigma_1 = E \varepsilon_1 (1-D) + \nu(\sigma_3 + \sigma_2) = E \varepsilon_1 \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] + \nu(\sigma_3 + \sigma_2) =$$

$$E \varepsilon_1 \exp \left[- \left(\frac{\frac{E \varepsilon_1}{\sqrt{3} \times (\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)} \times \left(\frac{\sin \varphi \times (\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} + \sigma_1 - \sigma_3 \right)}{F_0} \right)^m \right] + 2\nu\sigma_3 \quad (15)$$

根据前期的试验结果分析可知, 在浸泡-风干循环水岩作用下, 砂岩的弹性模量 E 和内摩擦角 φ 的劣化规律与浸泡-风干循环作用次数 n 具有很好的相关性, 将表 1 中建立的浸泡-风干循环水岩作用下砂岩力学参数劣化规律拟合函数关系式代入式 (15), 则可以得到浸泡-风干循环作用下砂岩的 Weibull 分布损伤软化本构关系为

式中: ν 为岩石的泊松比; E 为岩石的弹性模量, 常规三轴压缩试验中, $\sigma_2 = \sigma_3$ 。

将式 (10)、(11) 代入式 (8)、(9) 得:

$$I_1 = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3) E \varepsilon_1}{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3} \quad (12)$$

$$\sqrt{J_2} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) E \varepsilon_1}{\sqrt{3} \times (\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)} \quad (13)$$

根据式 (6)、(7)、(12)、(13) 可确定岩石的微元强度为

$$F = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi}} \times \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3) E \varepsilon_1}{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) E \varepsilon_1}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)} = \frac{E \varepsilon_1}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)} \cdot \left(\frac{\sin \varphi (\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} + \sigma_1 - \sigma_3 \right) \quad (14)$$

4 浸泡-风干循环水岩作用下砂岩统计损伤本构模型

4.1 砂岩统计损伤本构方程

(1) 不考虑应力-应变曲线压密段的影响

将式 (4) 和 (14) 代入式 (1), 可以得到基于

Weibull 分布的岩石软化损伤本构关系为

$$\sigma_1 = E_n \varepsilon_1 \exp \left[- \left(\frac{E_n \varepsilon_1 \left(\frac{\sin(\varphi_n)(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\sqrt{3 + \sin^2(\varphi_n)}} + \sigma_1 - \sigma_3 \right)}{F_0 \sqrt{3}(\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)} \right)^m \right] + 2\nu\sigma_3 \quad (16)$$

这是以往统计损伤模型分析中采用的分析思路，但从对比分析结果来看，在应力较小时，采用式 (16) 拟合得到应力-应变曲线一般为近似直线或者上凸形状^[28]，而本文试验过程中，岩样在较低应力水平时存在明显的压密段，而且随着水岩作用周期的增加，压密段逐渐增长，应力-应变曲线上（见图 3）就表现为明显的下凸形，如果直接用式 (16) 的函数形式，将无法反映压密阶段的特点，也不能很好地反映水岩作用下砂岩的劣化损伤效应。

(2) 考虑应力-应变曲线压密段的影响

文献[21]中详细介绍了不同浸泡-风干循环作用次数岩样的应力-应变曲线，不同围压下岩样的应力-应变曲线形态基本一致，均存在明显的压密阶段，而且变化规律基本一致，水岩作用下典型的应力-应变曲线如图 3 所示，随着浸泡-风干循环水岩作用次数的增加（图中，数字 0~6 表示浸泡-风干循环水岩作用次数），压密段越来越长，因此，在水岩作用统计损伤模型分析中，应该重点考虑压密段的影响。

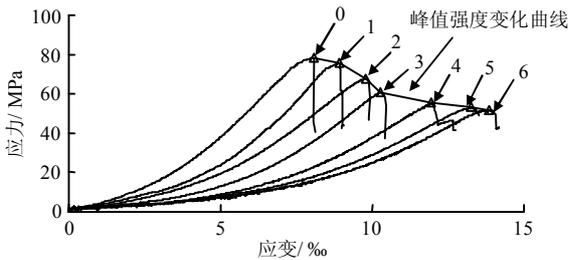


图 3 水岩作用下砂岩单轴抗压强度试验应力-应变曲线^[21]
Fig.3 Stress-strain curves of uniaxial compressive strength test of sandstone under water-rock interaction^[21]

从图 3 可以看出，砂岩的单轴压缩应力-应变曲线压密段呈下凹形，随着应力的增加，应力-应变曲线的斜率逐渐增大，岩石有逐渐强化的趋势，具有明显的非线性特点，分析其原因是水岩作用逐渐导致岩石内部的细微观裂隙的集中化及扩展，向宏观裂纹、裂隙的转变，内部的次生孔隙率增加^[22]，在宏观上就表现为岩石的抗压强度逐渐衰减、应力-应变曲线变缓、压密段变长、弹性模量降低等。

在水岩作用下砂岩统计损伤本构模型分析中，将应力-应变曲线中压密段分开单独进行考虑，令压密段终点的应力、应变分别为 σ_{1c} 、 ε_{1c} ， σ_{1c} 与峰值应力 σ_1 的比值为 α 。假定岩样内部的微观孔隙、裂隙是随机分布的，根据 Weibull 分布函数形式的特点，应力-应变曲线的形状主要与式中的 $\exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right]$ 有关，根据压密阶段应力-应变曲线下

凸形的特点，特将该部分变化为 $1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right]$ ，

可以得到压密段的本构方程，如式 (17) 所示，经验证该部分应力-应变与试验数据吻合较好，可以较好地反映压密段的特点；压密段以后的本构关系采用式 (16) 相同的形式，水岩作用下砂岩的统计损伤本构方程分段表达为

当 $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1c}$ 时

$$\sigma_1 = E_n \varepsilon_1 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{E_n \varepsilon_1}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)} \left[\frac{\sin \varphi_n \times (\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi_n}} + \sigma_1 - \sigma_3 \right] \right)^m \right] \right\} + 2\nu\sigma_3 \quad (17)$$

当 $\varepsilon_1 > \varepsilon_{1c}$ 时

$$\sigma_1 = E_n (\varepsilon_1 - \varepsilon_{1c}) \exp \left[- \left(\frac{E_n (\varepsilon_1 - \varepsilon_{1c})}{\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_{1c} - 2\nu\sigma_3)} \left[\frac{\sin(\varphi_n)(\sigma_1 - \sigma_{1c} + 2\sigma_3)}{\sqrt{(3 + \sin^2(\varphi_n))}} + \sigma_1 - \sigma_{1c} - \sigma_3 \right] \right)^m \right] + \sigma_{1c} + 2\nu\sigma_3 \quad (18)$$

在本文的模型中压密段终点选取时参照弹性模量的取值方法，取曲线段的终点（直线段的起点）作为压密段的终点，物理意义明确。而且，分析表明浸泡-风干循环水岩作用过程中，压密段终点应力与峰值应力比值 α 逐渐增大，这与岩样在水岩作用

过程中孔隙率逐渐增加是一致的^[22]。

4.2 砂岩统计损伤本构方程参数的确定

上述本构关系建立的关键在于浸泡-风干循环水岩作用过程中 Weibull 分布参数 m 和 F_0 的确定，现在关于统计模型求解的思路主要有两种，一种是

直接解方程求解,一种是采用数据拟合方法求解。虽然直接求解法具有严格的数学逻辑和物理意义,但求解过程复杂,拟合求解法虽不能严格满足各项求解条件,但是过程简单,而且拟合效果较好,因此,本论文分析中根据数据拟合方法进行求解。

(1) 当 $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1c}$ 时,对式(17)移项变形得

$$1 - \frac{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3}{E_n \varepsilon_1} = \exp \left\{ - \left[\frac{\frac{E_n \varepsilon_1}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)} \left[\frac{\sin(\varphi_n)(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\sqrt{3 + \sin^2(\varphi_n)}} + \sigma_1 - \sigma_3 \right]}{F_0} \right]^m \right\} \quad (19)$$

两边取对数得

$$\ln \left(1 - \frac{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3}{E_n \varepsilon_1} \right) = - \left[\frac{\frac{E_n \varepsilon_1}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)} \left[\frac{\sin(\varphi_n)(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\sqrt{3 + \sin^2(\varphi_n)}} + \sigma_1 - \sigma_3 \right]}{F_0} \right]^m \quad (20)$$

移项变形取对数得:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_{1c} - 2\nu\sigma_3}{E_n (\varepsilon_1 - \varepsilon_{1c})} = \exp \left\{ - \left[\frac{\frac{E_n (\varepsilon_1 - \varepsilon_{1c})}{\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_{1c} - 2\nu\sigma_3)} \left[\frac{\sin(\varphi_n)(\sigma_1 - \sigma_{1c} + 2\sigma_3)}{\sqrt{3 + \sin^2(\varphi_n)}} + \sigma_1 - \sigma_{1c} - \sigma_3 \right]}{F_0} \right]^m \right\} \quad (24)$$

两边取对数得

$$\ln \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_{1c} - 2\nu\sigma_3}{E_n (\varepsilon_1 - \varepsilon_{1c})} \right) = - \left[\frac{\frac{E_n (\varepsilon_1 - \varepsilon_{1c})}{\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_{1c} - 2\nu\sigma_3)} \left[\frac{\sin(\varphi_n)(\sigma_1 - \sigma_{1c} + 2\sigma_3)}{\sqrt{3 + \sin^2(\varphi_n)}} + \sigma_1 - \sigma_{1c} - \sigma_3 \right]}{F_0} \right]^m \quad (25)$$

移项变形取对数得:

$$\ln \left(- \ln \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_{1c} - 2\nu\sigma_3}{E_n (\varepsilon_1 - \varepsilon_{1c})} \right) \right) = m \ln \left[\frac{\frac{E_n (\varepsilon_1 - \varepsilon_{1c})}{\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_{1c} - 2\nu\sigma_3)} \left[\frac{\sin(\varphi_n)(\sigma_1 - \sigma_{1c} + 2\sigma_3)}{\sqrt{3 + \sin^2(\varphi_n)}} + \sigma_1 - \sigma_{1c} - \sigma_3 \right]}{F_0} \right] \quad (26)$$

$$\text{令: } Y = \ln \left(- \ln \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_{1c} - 2\nu\sigma_3}{E_n (\varepsilon_1 - \varepsilon_{1c})} \right) \right), \quad b = -m_2 \ln(F_{02}),$$

$$\ln \left(- \ln \left(1 - \frac{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3}{E_n \varepsilon_1} \right) \right) = m \ln \left[\frac{\frac{E_n \varepsilon_1}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)} \left[\frac{\sin(\varphi_n)(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\sqrt{3 + \sin^2(\varphi_n)}} + \sigma_1 - \sigma_3 \right]}{F_0} \right] \quad (21)$$

$$\text{令: } Y = \ln \left(- \ln \left(1 - \frac{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3}{E_n \varepsilon_1} \right) \right), \quad b_1 = -m_1 \ln(F_{01}),$$

$$X = \ln \left[\frac{E_n \varepsilon_1}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)} \left[\frac{\sin(\varphi_n)(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\sqrt{3 + \sin^2(\varphi_n)}} + \sigma_1 - \sigma_3 \right] \right]$$

则有

$$Y = m_1 X + b_1 \quad (22)$$

通过对应力-应变曲线压密段的数据进行线性拟合,即可求解得到损伤本构模型第1段的参数 m_1 、 b_1 ,从而得到

$$F_{01} = \exp \left(- \frac{b_1}{m_1} \right) \quad (23)$$

(2) 当 $\varepsilon_1 > \varepsilon_{1c}$ 时,对式(18)移向变形得

$$X = \ln \left(\frac{E_n(\varepsilon - \varepsilon_{1c})}{\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_{1c} - 2\nu\sigma_3)} \left[\frac{\sin(\varphi_n)(\sigma_1 - \sigma_{1c} + 2\sigma_3)}{\sqrt{(3 + \sin^2(\varphi_n))}} + \sigma_1 - \sigma_{1c} - \sigma_3 \right] \right)$$

则有：

$$Y = m_2 X + b_2 \tag{27}$$

同样，通过对应力-应变曲线压密段以后的试验数据进行线性拟合，即可求解第 2 段的 m_2 、 b_2 ，从而得到：

$$F_{02} = \exp \left(-\frac{b_2}{m_2} \right) \tag{28}$$

4.3 砂岩统计损伤本构模型的验证

将砂岩试样在不同浸泡-风干循环水岩作用周期下的应力-应变曲线按照上述过程进行分段拟合求解，可以得到各段曲线对应的 m 和 F_0 ，如表 2 所示。限于篇幅，这里以单轴压缩的试验结果进行示例分析。

根据表 2 中参数计算得到水岩作用过程中的砂岩单轴压缩应力-应变曲线与实际试验曲线对比，如图 4 所示，图中从左至右分别表示 0~6 次浸泡-风干循环水岩作用，与图 3 对应。

表 2 浸泡-风干循环作用过程中试验曲线拟合结果
Table 2 Fitting results of test curves under immersion-air dry cycle

浸泡-风干 循环次数	压密段终点 应力与峰值 应力比值 α	拟合参数			
		第 1 段 ($\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1c}$)		第 2 段 ($\varepsilon_1 > \varepsilon_{1c}$)	
		m_1	F_{01}	m_2	F_{02}
0	0.340 0	0.546 6	132.741 2	25.63	48.152 20
1	0.360 4	0.902 3	130.581 0	24.63	43.991 80
2	0.370 4	0.929 5	116.192 1	24.13	39.321 80
3	0.379 8	1.155 0	115.960 2	23.71	34.211 58
4	0.389 4	1.162 0	111.913 7	18.21	30.328 90
5	0.398 2	1.335 0	109.085 8	18.01	30.322 80
6	0.407 1	1.356 0	105.328 0	17.275	28.999 90

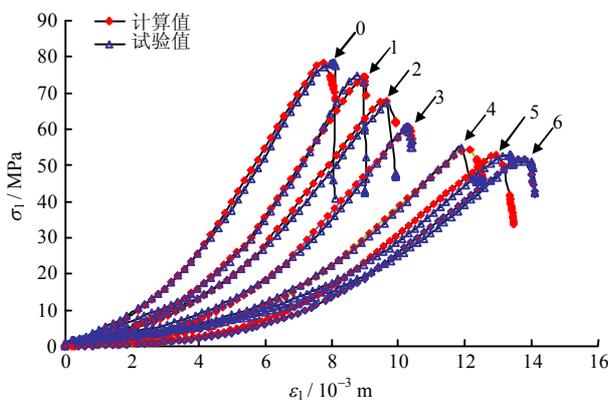


图 4 单轴压缩应力-应变曲线模型计算值与试验值
Fig.4 Calculated and experimental values of uniaxial compression stress-strain curve model

综合表 2 和图 4 可以看出：

(1) 建立的分段损伤统计本构模型计算与试验曲线符合较好，说明考虑水岩作用过程对岩石应力-应变曲线压密阶段的影响分析思路是合理可行的，而且可以较好地反映浸泡-风干循环水岩作用对砂岩的劣化损伤效应。

(2) 在水岩作用过程中，随着浸泡-风干循环次数的增加，应力-应变曲线压密段终点应力与峰值应力比值逐渐增大，一方面，说明在损伤本构模型分析中必须要考虑压密段的非线性特征；另一方面，说明在水岩作用过程中砂岩的次生孔隙率增加及岩石骨架软化导致的岩石压密变形逐渐增大。

(3) 在 Weibull 分布中，参数 m 的物理意义可理解为岩石脆性程度的指标， m 值越大，对应脆性程度越强，参数 F_0 的物理意义可理解为岩石宏观平均强度大小的指标^[31]，从应力-应变曲线第 2 段的参数 m 和 F_0 变化规律可以看出，随着浸泡-风干循环水岩作用次数的增加， m 和 F_0 均逐渐减小，说明水岩作用导致砂岩的脆性逐渐减弱，宏观强度逐渐降低，这与水岩作用下砂岩的实际变形破坏特征^[20-21]是一致的。

5 结 论

(1) 在浸泡-风干循环水岩作用过程中，砂岩的抗压强度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角等参数劣化规律明显，建立了各力学参数的损伤演化方程。

(2) 根据水岩作用过程中砂岩三轴压缩过程中应力-应变曲线的特点，借助连续损伤力学和统计理论，将浸泡-风干循环水岩作用的损伤效应直接耦合到损伤统计本构模型中，重点考虑了压密段的影响，分段建立了水岩作用下砂岩的统计损伤本构方程。

(3) 对比分析表明，所建立的分段统计损伤本构模型计算与试验曲线符合较好，说明所建立的统计损伤本构方程可以较好地反映浸泡-风干循环水岩作用的损伤效应，在水岩作用过程中，本构模型第 2 段的参数 m 和 F_0 均逐渐减小，反映了水岩作用下砂岩脆性逐渐减弱，宏观强度逐渐降低的力学特性，这与水岩作用下砂岩的实际变形破坏特征也是一致的。

参 考 文 献

[1] 王士天, 刘汉超, 张倬元. 大型水域水岩相互作用及其

- 环境效应研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(1): 69—88.
- WANG Shi-tian, LIU Han-chao, ZHANG Zhuo-yuan. Research on water-rock interaction and its environment effect in large-scale water areas[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 1997, 8(1): 69—88.
- [2] 王思敬, 马凤山, 杜永廉. 水库地区的水岩作用及其地质环境影响[J]. 工程地质学报, 1996, 4(3): 1—9.
- WANG Si-jing, MA Feng-shan, DU Yong-lian. The water-rock interaction and its geological environment effect in reservoir areas[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1996, 4(3): 1—9.
- [3] 徐千军, 陆杨. 干湿交替对边坡长期安全性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 1021—1024.
- XU Qian-jun, LU Yang. Effect of alternate wetting and drying on the long term stability of slope[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(6): 1021—1024.
- [4] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. (库)水-岩相互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 under water-rock interaction of reservoir[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(9): 1298—1302.
- [5] 周世良, 刘小强, 尚明芳, 等. 基于水-岩相互作用的泥岩库岸时变稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, 07: 1933—1939.
- ZHOU Shi-liang, LIU Xiao-qiang, SHANG Ming-fang, et al. Time-varying stability analysis of mudstone reservoir bank based on water-rock interaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 07: 1933—1939.
- [6] 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]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [7] 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.
- FU Yan, LIU Xin-rong, ZHANG Yong-xing, et al. Study on the influence of water-rock interaction to the strength of sandstone[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2009, 36(6): 54—58.
- [8] 郭义. 香溪河岸坡粉砂岩干湿循环损伤机理试验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- GUO Yi. Research on the damage mechanism of siltstone from Xiangxi river bank in drying and wetting cycle[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [9] 姚华彦, 张振华, 朱朝辉. 干湿交替对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3704—3708.
- YAO Hua-yan, ZHANG Zhen-hua, ZHU Chao-hui. Experimental study of mechanical properties of sandstone under cyclic drying and wetting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 3704—3708.
- [10] 黄维辉. 干湿交替作用下砂岩劣化效应研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- HUANG Wei-hui. Study on deterioration effect of sandstone under cyclic drying and wetting[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology.
- [11] HALE P A, SHAKOOR A. A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones[J]. **Environmental and Engineering Geoscience**, 2003, 9(2): 117—130.
- [12] APOLLARO C, MARINI L, CRITELLI T, et al. The standard thermodynamic properties of vermiculites and prediction of their occurrence during water-rock interaction[J]. **Applied Geochemistry**, 2013, 35: 264—278.
- [13] TALLINI M, PARISSÉ B, PETITTA M, et al. Long-term spatio-temporal hydro chemical and Rn-222 tracing to investigate groundwater flow and water-rock interaction in the Gran Sasso (central Italy) carbonate aquifer[J]. **Hydrogeology Journal**, 2013, 21(7): 1447—1467.
- [14] ALT-EPPING, DIAMOND L W, HARING M O, et al. Prediction of water-rock interaction and porosity evolution in a granitoid-hosted enhanced geothermal system, using constraints from the 5 km Basel-1 well[J]. **Applied Geochemistry**, 2013, 38: 121—133.
- [15] HUROWITZ J A, FISCHER W W. Contrasting styles of water-rock interaction at the Mars Exploration Rover landing sites[J]. **Geochimica ET Cosmochimica Acta**, 2014, 127: 25—38.
- [16] 邓建华. 膏溶角砾岩力学特性及水损伤模型研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- DENG Jian-hua. Study on the water damage evolution model of gypsum breccia and its mechanical properties[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University.

- [17] 刘业科. 水岩作用下深部岩体的损伤演化与流变特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
LIU Ye-ke. Damage evolution and rheological behavior of deep rock mass under water-rock interaction[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [18] 朱敏. “风干-浸泡”循环作用下损伤砂岩力学特性研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2013.
ZHU Min. Research on mechanical properties of damage sandstone under “air dry-immersion” circulation function[D]. Yichang: Three Gorges University, 2013.
- [19] 邓华锋. 库水变幅带水-岩作用机制和作用效应研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
DENG Hua-feng. Study on the mechanism and effects of water-rock interaction under water level change region[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [20] 邓华锋, 李建林, 朱敏, 等. 饱水-风干循环作用下砂岩强度劣化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3306—3312.
DENG Hua-feng, LI Jian-lin, ZHU Min, et al. Experimental research on strength deterioration rules of sandstone under “saturation-air dry” circulation function[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(11): 3306—3312.
- [21] 邓华锋, 李建林, 刘杰, 等. 浸泡-风干循环作用对砂岩变形及破坏特征影响研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1620—1626.
DENG Hua-feng, LI Jian-lin, LIU Jie, et al. Influence of immersion-air dry circulation function on deformation and fracture features of sandstone[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(9): 1620—1626.
- [22] 邓华锋, 李建林, 邓成进, 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, DENG Cheng-jin, et al. Research on secondary porosity changing law of sandstone under the “saturation-air dry” cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(2): 483—488.
- [23] 邓华锋, 李建林, 孙旭曙, 等. 水作用下砂岩断裂力学效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 07: 1342—1348.
DENG Hua-feng, LI Jian-lin, SUN Xu-shu, et al. Experimental research on fracture mechanical effect of sandstone under water corrosion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 07: 1342—1348.
- [24] KRAJČINOVIC D, SILVA M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1982, 18(7): 551—562.
- [25] KRAJČINOVIC D. Continuous damage mechanics[J]. **Applied Mechanics Review**, 1984, 37(1): 1—5.
- [26] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
TANG Chun'an. Catastrophe in rock unstable failure[M]. Beijing: Chinese Coal Industry Press, 1993.
- [27] 徐卫亚, 韦立德. 岩石损伤统计本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 787—791.
XU Wei-ya, WEI Li-de. Study on statistical damage constitutive model of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 787—791.
- [28] 曹文贵, 赵明华, 刘成学. 基于 Weibull 分布的岩石损伤软化模型及其修正方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3226—3231.
CAO Wen-gui, ZHAO Ming-hua, LIU Cheng-xue. Study on the model and its modifying method for rock softening and damage based on Weibull random distribution[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3226—3231.
- [29] 曹文贵, 莫瑞, 李翔. 基于正态分布的岩石软化损伤统计本构模型及其参数确定方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 671—675.
CAO Wei-gui, MO Rui, LI Xiang. Study on statistical constitutive model and determination of parameters of rock based on normal distribution[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(5): 182—187.
- [30] LEMAITRE J, CHABOCHE J L. Mechanics of solid materials[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990: 159—168.
- [31] 吴政, 张承娟. 单向荷载作用下岩石损伤模型及其力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 55—61.
WU Zheng, ZHANG Cheng-juan. Investigation of rock damage model and its mechanical behaviour[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1990, 15(1): 55—61.