

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.04.11

砂岩单轴压缩与干湿循环耦合损伤试验研究

谢学斌, 周 瀚, 向天元

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 设计并进行了不同干湿循环次数下的砂岩单轴压缩试验, 得到试验应力-应变曲线。观察对比各组曲线的各阶段特征, 分析干湿循环作用对砂岩的变形破坏和力学性能的影响规律, 发现干湿循环交替过程导致砂岩试件单轴抗压强度和弹性模量均显著降低并逐渐趋于一个定值, 破坏特征则由脆性向脆-延性转变, 砂岩受到了不可逆的渐进损伤作用。建立了单轴压缩与干湿循环耦合作用的随机损伤力学模型, 推导出随机损伤力学本构关系表达式, 拟合出理论曲线并与试验曲线进行对比分析, 证明该模型能较好地反映干湿循环作用下砂岩的力学特性曲线。

关键词: 干湿循环; 砂岩; 力学特性; 随机损伤

中图分类号: TU458⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)04-0066-06

An experimental study and simulation of damage of the single shaft compression and drying-wetting cycle in sandstone

XIE Xuebin, ZHOU Han, XIANG Tianyuan

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: A series uniaxial compression tests of sandstone under different drying-wetting cycle times are designed and carried out, and the stress-strain curves are obtained. The effects of drying-wetting cycles on the deformation and mechanical properties of sandstone are analyzed. The results show that the uniaxial compressive strength and elastic modulus of the sandstone specimens decrease significantly and tends gradually to a constant value. The failure characteristics are changed from brittle to brittle ductile transition. The mechanical parameters of sandstone are dispersed and the uniaxial compressive strength and elastic modulus decrease gradually. A stochastic damage mechanics model for the coupling effect of the single axis compression with dry wet cycle is established. The theoretical curves are fitted with the experimental curves. The expression of the constitutive relation is given, indicating that the model can well reflect the mechanical properties of sandstone under the action of drying and wetting cycles.

Keywords: drying and wetting cycles; sandstone; mechanical properties; random damage

水在岩土边坡失稳过程中扮演着极为重要的角色, 干湿循环条件下岩石损伤机理的研究是水岩相互作用的重要分支^[1], 研究干湿循环作用对岩石力学性能的影响具有广泛的工程实际作用。

复杂多变的环境中, 岩体不同位置的裂隙系统具

有明显的差异, 即便是作为实验试样的不同岩石试件, 从微观上来看, 其内部微裂隙发育情况也是形态各异, 少量的岩样裂隙特征难以表征岩石整体情况, 而干湿循环的损伤作用与岩石内部微裂隙发育情况具有很大关系^[2]。连续损伤力学虽然已被广泛应用于多种受

收稿日期: 2015-12-07; 修订日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374246); 湖南省科技计划项目(2013FJ6002)

第一作者: 谢学斌(1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为深井岩爆灾害、矿山地压监测。E-mail:xbxie@csu.edu.cn

通讯作者: 周瀚, E-mail:691283176@qq.com

力情况下不同材料的损伤力学模拟,但其是基于确定性的构形,而鉴于岩石本身的非均质性和非均匀性以及干湿循环损伤演化的复杂性,通过显性的本构关系来研究干湿循环对砂岩力学特性的影响,既是一件工程量浩繁的工作,同时其成果也不具备普适性。

岩石的微裂隙、孔隙等缺陷表现出随机分布的特征,而干湿循环损伤具有随机演化的特征。概率分析方法可为干湿循环下岩石材料的损伤本构模型模拟提供理论基础。光耀华提出考虑岩体性质的变异性,因此应当对岩体进行概率分析^[3]。张玉卓将模糊强度理论引入岩石断裂破坏研究,建立了岩石模糊强度理论^[4]。徐卫亚基于概率论和损伤力学的原理,探讨了载荷作用下岩石的破坏、损伤和弹塑性变形特征,并建立了损伤本构模型^[5]。J. F. Shao 等^[5]建立了饱水岩石在风干和浸湿条件下的各向异性损伤模型。本文着手构建砂岩干湿循环与单轴压缩耦合作用下砂岩的损伤力学本构关系,得出模拟曲线,并对照试验曲线,探讨砂岩的损伤变形特征。

1 试验研究

1.1 试验方案

试验岩样取自安徽某矿区公路边坡的黄砂岩,由现场取得的新鲜大块岩石制备成标准圆柱体试件。根据规范要求,单轴抗压试件直径 $D = 50 \text{ mm}$,高 $H = 100 \text{ mm}$ 。试件加工精度要求两端面不平行度误差 $\leq 0.05 \text{ mm}$,直径误差 $\leq 0.3 \text{ mm}$,轴线端面垂直误差 $\leq 0.25^\circ$ 。根据上述要求共加工得到试件 30 块。

选取 6 组砂岩试件分别进行 0, 1, 3, 6, 10, 15 次干湿循环,其中干湿循环方式选用“常温下浸泡 12 h 后自然晾晒 30 min—60℃烘 12 h 后自然晾晒 30 min”为 1 次干湿循环^[7]。实验仪器单轴压缩使用 RYL-600 型微机控制岩石剪切流变仪和 DH3816 静态应变仪,加载速率 0.1 mm/min 。测得每次干湿循环后的试件吸水率如图 1 所示。由图 1 可见,剔除个别点位,试件的吸水率增值趋势随干湿循环次数增加逐渐减缓。

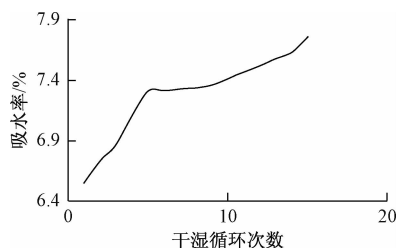


图1 砂岩吸水率随干湿循环次数的变化

Fig. 1 Changes in water absorption of sandstone with drying-wetting cycle times

1.2 干湿循环对砂岩力学性能的影响探究

试验得到 6 组不同循环次数下砂岩试件的单轴压缩试验的应力—应变曲线,据此可以得到砂岩的单轴抗压强度、泊松比以及弹性模量等参数。

考虑砂岩属于强度较高的脆性岩石,因而整个破坏过程的变形相对较小,峰值前变形基本呈现为曲线斜率较大的线弹性变形,由于试验机的限制,难以得到完整的峰后曲线。如图 2 所示,砂岩单轴压缩的应力—应变曲线基本呈现为 5 个阶段:微裂隙压密阶段、线弹性变形阶段、裂纹稳定发育及扩展阶段、非稳定破裂阶段(塑性变形阶段)以及破裂后阶段。

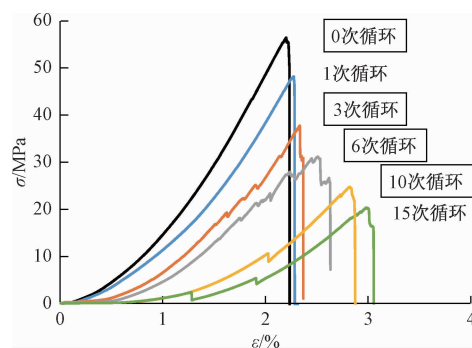


图2 不同干湿循环次数下砂岩应力—应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of sandstone under different drying-wetting cycle times

比较岩样的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线,在干湿循环次数较少时,曲线微裂隙压密阶段曲线较短,而随着循环次数的增多,受干湿循环损伤作用,该阶段曲线长度呈现出明显的递增趋势。弹性变形阶段曲线则随干湿循环次数增多而逐渐缩短,并出现曲线涨落的现象,可见试件内部损伤作用愈加明显,内部弱面增多,弹性模量降幅明显。试件的塑性变形阶段在循环次数较少时不甚明显,而在循环次数增多后显著增长。循环次数较少时,曲线主要部分为微裂隙压密阶段、线弹性变形阶段和微裂隙发展阶段,存在极短的塑性变形阶段,这与砂岩高脆性、高强度的力学性能相吻合。在多循环次数下,塑性变形阶段十分明显,呈现出显著的塑性屈服,可见随着干湿循环次数的增加,岩石试件逐渐由脆性向脆—延性转化,岩石性能出现明显的损伤劣化。

随着干湿循环次数的增多,曲线的微裂隙变形阶段逐渐增长,说明其内部裂隙不断发育延伸。结合已有研究成果,当岩石试件承受荷载作用时,在宏观裂隙产生之前,岩石内部已经存在大量的原生裂隙,而经过浸水过程后,水会渗入岩石内部,进入裂隙尖端微细裂纹损伤区的水形成劈裂作用,作用在微细裂纹表面水

压力使裂纹尖端的应力强度因子提高^[8],促使岩样内部微细裂缝起裂延伸,岩石孔隙率增加,体积膨胀,原生微裂隙在水的损伤作用下逐渐发育,并且产生出新的次生裂隙,对岩石造成不可逆的渐进损伤作用,因此,微裂隙压密阶段曲线被显著延长。而在线弹性变形阶段,其内部的微裂隙存在会使应力分布有较小的涨落^[9]。由于干湿损伤效应作用,原生裂隙和次生裂隙随机发育扩展,考虑岩石材料本身的非均匀性影响,试件受单向荷载和干湿循环耦合作用,导致已经存在和新生成的裂隙复杂性深化、随机性增强,表现为应力—应变曲线的起伏波动增多,岩石内部裂隙出现更多起伏波折,应力、应变和弹性模量等力学参数的分布区间明显增大,曲线呈现出一定范围内的锯齿状。

1.3 试件的力学参数统计

对照表 1,砂岩的抗压强度与干湿循环次数呈现显著的负相关性。经过 1 次干湿循环,岩石的单轴抗压强度降低 14.56%,弹性模量降低 20.05%,且随着干湿循环次数的累增,单轴抗压强度和劈裂抗拉强度均呈现出单调递减的趋势,在 15 次干湿循环后,单轴抗压强度降低达 60.84%,弹性模量降低了 64.86%。由此可见,干湿交替循环对岩石的力学性能影响产生了显著的损伤劣化作用。

表 1 试件力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the specimen

循环次数 n	σ_c /MPa	ε_c /%	弹性模量/GPa
0	56.47	2.20	37.65
1	48.25	2.27	30.10
3	37.75	2.34	24.56
6	31.16	2.51	20.71
10	24.77	2.81	16.64
15	22.11	2.99	13.23

图 3 显示了各组试样平均单轴抗压强度、弹性模量与干湿循环次数之间的负相关关系,随着循环次数的增加,单轴抗压强度呈现单调递减的趋势,而曲线的下降趋势逐渐趋于平缓,其渐进线趋向于与 X 轴平行。表明试样的单轴抗压强度随干湿循环次数减小的效应会逐渐减弱,在循环一定次数后会趋于一个定值。这表明干湿循环的损伤劣化效应对新近暴露的岩土体工程作用更为显著。

由表 1 数据可以将单轴抗压强度与干湿循环次数 (n) 的关系由式 (1) 表示出来,其相关系数为 $R^2 = 0.997931$ 。弹性模量与干湿循环次数的关系可由式 (2) 表示,其相关系数 $R^2 = 0.997749$ 。

$$\sigma_c = -12.797 \ln(n+1) + 56.47 \quad (1)$$

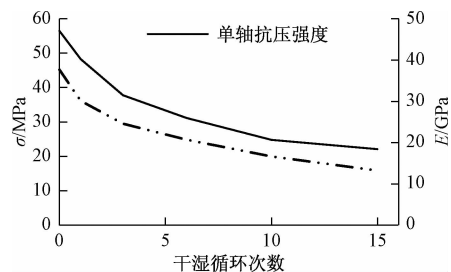


图 3 试件力学性能参数与干湿循环次数的关系

Fig. 3 Relationship of specimen mechanical performance parameters and drying-wetting cycles

$$E_n = -8.76 \ln(n+1) + 37.65 \quad (2)$$

式中: σ_c ——单轴抗压强度;

E_n —— n 次循环后砂岩弹性模量。

2 随机损伤力学模拟

从微观上来看,岩石材料组成成分和内部微裂隙分布具有明显的非均质性和非均匀性,在干湿循环作用下,其内部的微裂隙发育情况也呈现出随机特征,而且,岩石内部的损伤不仅包括这样的直观情况,还会出现更多复杂的损伤形式^[10],而其宏观力学性能则表现为大致的各项同性^[11]。在这样的情况下,以传统的方法构建砂岩的干湿循环损伤模型难以准确地描述试件内部变化的复杂性,而基于概率统计和岩石力学理论的随机损伤力学模型则可能具有独到的优势^[12]。

本次建模假设砂岩材料强度服从 Weibull 分布,其概率密度函数与砂岩的弹性模量、泊松比等力学参数相关,这些参数在砂岩干湿循环过程中的曲线变化趋势与强度变化趋势一致。因此,Weibull 假设与砂岩干湿循环损伤模型具有较好的吻合性。考虑砂岩试件经历了干湿循环损伤和单轴压缩损伤,故需分别考虑两者的损伤效应。

2.1 单轴压缩与干湿循环耦合损伤模型

考虑干湿循环对砂岩试件的损伤效应,基于损伤力学理论,定义裂隙的损伤变量。根据前人研究成果^[13],考虑岩石弹性模量在干湿循环后的变化情况,定义其为干湿循环损伤张量的基本考虑因素,即:

$$\Omega_n = (E_0 - E_n)/E_0 \quad (3)$$

式中: E_0 、 E_n ——干湿循环 0 次、 n 次时的弹性模量/GPa。

在试件承受单向荷载作用后,内部同样受到损伤作用。根据 Lemaitre 的应变等价原理,作用在任何损伤材料的全应力 σ 引起的应变与作用在无损伤材料有效应力 σ' 引起的应变等价,则:

$$\sigma = E\varepsilon(1 - \Omega) \quad (4)$$

式中: σ ——单向荷载下的试件应力/MPa;

E ——无损材料的弹性模量/GPa;

ε ——单向荷载下的试件应变;

Ω ——单向荷载下的试件损伤变量。

由于岩石材料都带有天然损伤,故而难以得到无损弹性模量,吴政等^[14]提出推广的应变等价原理,即材料在不同的两种损伤状态下,第一种条件下的有效应力作用于第二种条件下的有效应变与第二种条件下的有效应力作用于第一种条件下的有效应变等价。则在干湿循环过程中,可以将无损材料弹性模量视为初始状态(即0次干湿循环)下的试件弹性模量,则经干湿循环后试件受单向荷载作用的本构关系为:

$$\sigma_n = E_n \varepsilon(1 - \Omega_n) \quad (5)$$

式中: Ω_n ——总损伤变量, $\Omega_n = \Omega + \Omega_n - \Omega\Omega_n$ 。

假定岩石的损伤过程是微裂隙的扩展和聚集而导致岩石材料渐进破坏,曹文贵等^[15]提出了一种应用于岩石单轴压缩力学特性研究的细观杆损伤模型引用于受干湿循环作用后的岩石力学性能研究,其假设Weibull分布的概率密度函数:

$$P(\varepsilon) = \frac{m}{F} \left(\frac{\varepsilon}{F} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon}{F} \right)^m \right] \quad (6)$$

式中: F, m ——Weibull分布表征岩石力学性质的参数,与弹性模量、泊松比等参数相关。

假定单轴压缩过程中砂岩试件的损伤是由局部微元体的不均匀破坏引起^[11],可设 N_c 为荷载作用下已破坏微元体数目,微元体总数为 N ,则损伤张量公式为:

$$\Omega = N_c / N \quad (7)$$

设在任意变形区间 $[\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon]$ 内,产生了 $NP(x)$ $d\varepsilon$ 条微元体,则

$$N_c(\varepsilon) = \int_0^\varepsilon P(\varepsilon) d\varepsilon = N \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon}{F} \right)^m \right] \right\} \quad (8)$$

$$\Omega = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon}{F} \right)^m \right] \quad (9)$$

则有:

$$\sigma_n = \varepsilon E_n \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon}{F} \right)^m \right] \quad (10)$$

对于单向荷载作用,由于此模型是分析受拉金属的损伤而引入的,在考虑岩石受压时,其微元破坏后还可以传递部分压应力和剪应力,因此引入修正系数 $\beta^{[5]}$,即:

$$\sigma_n = E_0 \varepsilon(1 - \beta\Omega - \Omega_n + \beta\Omega\Omega_n) \quad (11)$$

由此,可以导出 n 次干湿循环后砂岩的单轴抗压强度损伤统计本构模型为:

$$\sigma_n = E_n \varepsilon \left\{ 1 - \beta + \beta \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon}{F} \right)^m \right] \right\} \quad (12)$$

式中, β 在 0 ~ 1 之间变化,当仅考虑岩石微元的拉伸破坏时, $\beta = 1$ 。

结合式(2),可得出:

$$\sigma_n = (-8.76 \ln(n+1) + 37.65) \left\{ 1 - \beta + \beta \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon}{F} \right)^m \right] \right\} \varepsilon \quad (13)$$

该模型中的弹性模量仅为试件弹性变形阶段,而干湿循环损伤对岩石微裂隙变形阶段影响十分显著,微裂隙变形阶段对岩体的工程性能影响细微,因此在与试验曲线对比时,可忽略微裂隙变形阶段曲线。

2.2 随机损伤曲线模拟

损伤统计本构模型参数 F, m 依据单轴压缩下的砂岩全应力-应变曲线上的峰值强度点 $C(\varepsilon_c, \sigma_c)$ 来确定。考虑峰值点处曲线斜率为零,即:

$$\left. \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right|_{\sigma=\sigma_c, \varepsilon=\varepsilon_c} = 0 \quad (14)$$

可求得:

$$m = - \frac{\sigma_c}{\left\{ [\sigma_c + (\beta - 1) E_n \sigma_c] \ln \left[\frac{1}{\beta} \left(\frac{\sigma_c}{E_n \varepsilon_c} + \beta - 1 \right) \right] \right\}} \quad (15)$$

$$F = \varepsilon_c \left[\frac{1}{m} \frac{\sigma_c}{\sigma_c + (\beta - 1) E_n \varepsilon_c} \right]^{-\frac{1}{m}} \quad (16)$$

依据试验测得的不同循环次数下试件 $\sigma - \varepsilon$ 曲线及试验数据,取3次试验的平均值,代入 m, F 的求值公式中,可求得不同循环次数下的试验参数。由于此次模拟忽略微裂隙压密阶段曲线,而微裂隙压密阶段应变较长,因此,计算 m, F 值时应对 ε_c 进行相应的折减。取 $\beta = 1$,理论曲线与试验曲线吻合较好,此时,岩样的损伤统计力学参数如表2所示。由此可得出各干湿循环次数下岩石的 $\sigma - \varepsilon$ 随机损伤理论曲线(图4)。

表2 试件的损伤力学参数

循环次数 n	m	F
0	8.82	2.15
1	21.31	1.94
3	15.42	1.96
6	13.53	1.96
10	13.85	1.93
15	27.42	1.88

观察图 4,随机损伤模拟曲线与试验曲线相比,曲线的微裂隙压密阶段未能呈现,由于该阶段对岩石试件的力学性能影响甚微,而干湿循环作用对此阶段影响显著,故本文剔除了此阶段的曲线。试验曲线的峰后阶段受加载机限制,难以完整呈现出来。试验曲线呈现出下凹状,这是由于在加载过程中,试件会被不断压密,相同的应力区间内应变减小,曲线呈现为斜率递增的形态。与之相比,随着干湿循环次数的增加,模拟

曲线的峰后阶段逐渐趋于平缓,这与试验曲线前面阶段呈现的特征相吻合,即弹性模量逐渐降低,试件由弹性趋于塑性,模拟峰后曲线与前期试验特征吻合较好。当干湿循环次数较少时,曲线的微裂隙压密阶段较短,因此,理论模拟曲线与试验曲线较为贴近,可以反映试件的基本力学参数。根据模拟曲线计算的弹性模量与试验曲线一致,其峰值、弹性变形阶段和弹塑性变形阶段可以与试验曲线吻合较好。

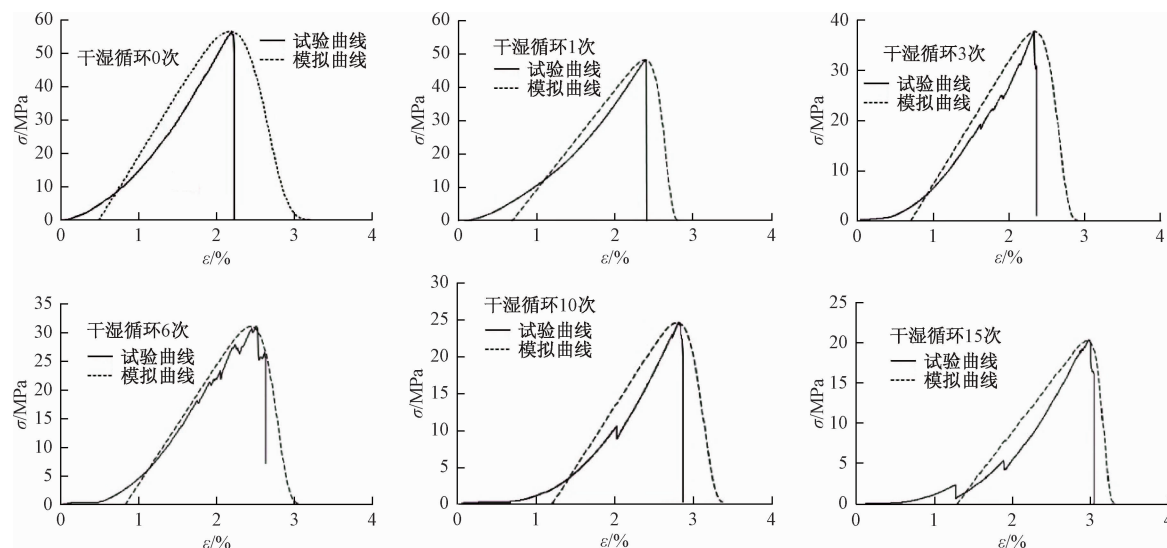


图 4 模拟与试验的应力—应变曲线对比

Fig. 4 Comparison of the simulation and experimental stress-strain curves

2.3 干湿循环作用下砂岩曲线预测

考虑 n 次干湿循环作用下砂岩峰值强度和弹性模量可由式(1)和式(2)得出,考虑干湿循环作用对试件弹性变形阶段和塑性变形阶段应变区间范围影响较小,因此忽略微裂隙变形阶段后,峰值点应变增量较小,可根据 m, F 参数变化进行适度微调,因此,本模型可对受 n 次干湿循环作用的砂岩应力—应变关系进行预测。本文利用该模型对 20 次、25 次和 30 次干湿循环下砂岩的曲线进行预测,如图 5 所示。

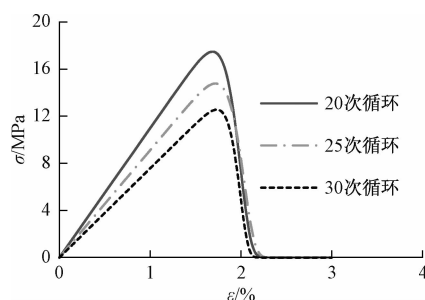


图 5 多次干湿循环下砂岩应力—应变曲线预测

Fig. 5 Prediction of sandstone stress-strain curve under drying-wetting cycle times

3 结论

(1) 干湿循环作用对砂岩产生了明显劣化作用,多次干湿循环作用导致砂岩的抗压强度显著降低,但随着干湿循环次数增多,这种劣化作用逐渐降低,最后趋于一个定值。在工程实践中,对于水位经常变动的岩土体工程或是新近暴露在地表的边坡工程,应当充分考虑干湿循环的损伤劣化作用。

(2) 砂岩在干湿循环作用下出现了明显的软化现象,全应力—应变曲线的应变区间增长,其延性逐渐增强,弹性模量逐渐降低,砂岩试件由脆性趋于延性,试件微裂隙变形阶段显著增长,说明其内部裂隙不断增多,弹性模量和抗压强度则显著降低。

(3) 对比理论曲线和试验曲线,发现随机损伤本构模型能够较好地呈现出砂岩试件除微裂隙压密阶段外的曲线特征,模拟得出了反映干湿循环与单向荷载耦合作用下砂岩的本构关系模型,并可对多次干湿循环作用下砂岩应力—应变曲线进行预测。

参考文献:

- [1] 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 Y. Research on the damage mechanism of siltstone from Xiangxi River bank in drying and wetting cycle[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese)]
- [2] 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 J R, XU Q, SUN D A. Simulation of soil-water characteristic curves during drying and wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 689 - 695. (in Chinese)]
- [3] 光耀华. 岩石力学参数概率统计的几个问题[J]. 红水河, 1995, 14(1): 37 - 41. [GUANG Y H. Some Problems on the Probability Statistics of Rock Mechanics Parameters[J]. Hong-Shui River, 1995, 14(1): 37 - 41. (in Chinese)]
- [4] 张玉卓. 岩石模糊强度理论及其应用[J]. 煤炭学报, 1994, 19(5): 450 - 455. [ZHANG Y Z. Fuzzy strength theory of rock and its application[J]. Journal of China Coal Society, 19(5): 450 - 455. (in Chinese)]
- [5] Shao J F, Lu Y F, Lydzba D. Damage modeling of saturated rocks in drained and undrained conditions [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(6): 733 - 740.
- [6] 徐卫亚, 韦立德. 岩石损伤统计本构模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 787 - 791. [XU W Y, WEI L D. Study on statistical constitutive model of rock damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 787 - 791. (in Chinese)]
- [7] 傅晏, 刘新荣, 张永新, 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 Y, LIU X Y, ZHANG Y X, et al. Study on the influence of water-rock interaction to the strength of sandstone [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(6): 54 - 58. (in Chinese)]
- [8] 易顺民, 朱珍德. 裂隙岩体损伤力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2005. [YI S M, ZHU Z D. Introduction to damage mechanics of fractured rock mass [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)]
- [9] 许江, 李树春, 尹光志, 等. 周期荷载作用下岩石非线性变形与损伤特性[M]. 北京: 科学出版社, 2012. [XU J, LI S C, YIN G Z, et al. Nonlinear deformation and damage characteristics of rock under cyclic loading[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)]
- [10] Xiang Li, Wen Gui, Honghua Su. A Statistical Damage Constitutive Model for Softening Behavior of Rocks[J]. Engineering Geology, 2012, 17(1): 143 - 144.
- [11] 汪辉平, 曹文贵, 王江营, 等. 模拟岩石应变软化变形全过程的统计损伤本构模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 44 - 49. [WANG H P, CAO W G, WANG J Y, et al. A study of the statistical damage constitutive model of rocks considering a full deformation process [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(4): 44 - 49. (in Chinese)]
- [12] 张我华, 孙林柱, 王军, 等. 随机损伤力学与模糊随机有限元[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [ZHANG W H, SUN L Z, WANG J, et al. Stochastic damage mechanics and fuzzy stochastic finite element method[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)]
- [13] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 30 - 34. [ZHANG Q S, YANG G S, REN J X. New study of damage variable and constitutive equation of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 30 - 34. (in Chinese)]
- [14] 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 Z, ZHANG C J. Damage model of rock under uniaxial loading and its mechanical properties [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(1): 55 - 61. (in Chinese)]
- [15] 曹文贵, 李翔. 岩石损伤软化统计本构模型及参数确定方法的新探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2952 - 2956. [CAO W G, LI X. A new discussion on damage softening statistical constitutive model for rocks and method for determining its parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 2952 - 2956. (in Chinese)]