

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.014

蟠龙抽水蓄能电站硐室围岩三轴试验及本构模型

陈张华¹,朱其志²,吕超洋¹,胡光平¹,苏超³

(1.重庆蟠龙抽水蓄能电站有限公司,重庆 401452;
2.河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098;3.河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:利用岩石全自动伺服试验机对重庆蟠龙抽水蓄能电站硐室围岩的砂岩试样开展了不同围压下的常规三轴压缩试验,进而构建了包含统一硬化/软化函数的弹塑性本构模型并进行了验证。试验结果表明,随着围压的增大,由原生缺陷闭合引起的初始非线性变形阶段逐渐减小,试样破坏时的峰值强度随围压增大而增大,由单轴压缩时的84.8 MPa增大到围压10 MPa时的168.5 MPa;峰值强度和围压之间呈现较好的线性关系,黏聚力和内摩擦角分别为15.2 MPa和52°。数值模拟与试验数据的比较表明,提出的弹塑性本构模型能够描述砂岩的主要力学现象,验证了该模型的可靠性。

关键词:围岩;砂岩;三轴压缩试验;弹塑性模型;数值模拟;蟠龙抽水蓄能电站

中图分类号:TV743 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2022)05-0105-06

Triaxial compression test and constitutive model of surrounding rock of tunnels in Panlong Pumped-Storage Power Station

CHEN Zhanghua¹, ZHU Qizhi², LYU Chaoyang¹, HU Guangping¹, SU Chao³

(1. Chongqing Panlong Pumping and Energy Storage Co., Ltd., Chongqing 401452, China;
2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper focuses on the mechanical properties of the surrounding rock (sandstone) in the chamber of Chongqing Panlong Pumped-Storage Power Station. Conventional triaxial compression instantaneous tests under different confining pressures were first performed using a servo-controlled triaxial testing machine for rocks, based on which a macroscopic elastoplastic constitutive model was developed and validated. The testing results show that with the increase of confining pressure, the compaction stage caused by the progressive closure of initial voids and microcracks becomes less and less obvious, and the nonlinearity disappears gradually. In addition, the peak strengths of rock specimen increase with the confining pressure, ranging from 84.8 MPa under uniaxial compression to 168.5 MPa under the confining pressure of 10 MPa. There presents a satisfactory linear relationship between peak strengths and confining pressures, from which we derive the material cohesion 15.2 MPa and the friction angle 52 degrees. Numerical results show that the proposed model containing a unified hardening/softening function can describe quite well the fundamental mechanical behaviors of the investigated sandstone, which demonstrates the feasibility of the proposed constitutive model.

Key words: surrounding rock; sandstone; triaxial compression test; elastoplastic constitutive model; numerical modelling; Panlong Pumped-Storage Power Station

蟠龙抽水蓄能电站位于重庆市綦江县西南部,属于I等大(1)型工程。该工程地质环境较复杂,工程结构设计和施工需要确定地下硐室围岩的基本力学特性。根据地质调查,硐室围岩主要为砂岩。砂岩是抽水蓄能电站建设工程经常遇到的岩石类型,如山西垣曲抽水蓄能电站、宜兴抽水蓄能电站等。

利用常规三轴压缩试验获得不同围压下的应力-应变曲线,是研究围岩力学特性、确定其基本力学参数的常见手段。国内外不少学者针对砂岩的力学特性甚至是多场耦合行为开展了室内试验研究。例如:孟召平等^[1]研究了不同围压下的砂岩及泥质粉砂岩的变形破坏特征和抗压强度,发现不同类型岩石材料的强度

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(11872172)

作者简介:陈张华(1980—),男,高级工程师,主要从事水利水电工程施工和管理的工作。E-mail:17762481@qq.com

通信作者:朱其志(1979—),男,教授,博士,主要从事岩土本构关系研究。E-mail:qizhi_zhu@163.com

引用本文:陈张华,朱其志,吕超洋,等.蟠龙抽水蓄能电站硐室围岩三轴试验及本构模型[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):105-110.

CHEN Zhanghua, ZHU Qizhi, LYU Chaoyang, et al. Triaxial compression test and constitutive model of surrounding rock of tunnels in Panlong Pumped-Storage Power Station[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(5): 105-110.

和弹性模量随围压增大而增大,且应变软化和破坏形态也发生相应改变;韩铁林等^[2]研究了不同应力路径下砂岩的基本力学特性,结果表明定围压升轴压下岩石试样呈现剪切破坏,围压与峰值强度大致为线性关系;王军保等^[3]针对砂岩开展的常规三轴压缩试验表明,随着围压的增大,砂岩峰值强度、应变、残余应力均逐渐增大;徐卫亚等^[4-5]研究了致密砂岩在循环荷载作用下的力学行为和能量演化特征。综合来说,砂岩是一种典型的准脆性岩石,应力-应变曲线包括初始压实段、线弹性段、应变强度段、应变软化段和残余应力阶段。除基本力学行为,部分学者还开展了应力-渗流(孔压)耦合作用下的砂岩力学特性试验研究^[6-7]、砂岩的脆-岩性转变力学行为研究等^[8]。Liu等^[6]研究表明,随着围压的不断增大,砂岩会逐渐表现出延性力学行为,即不再出现峰后软化现象,围压对峰值应力的增大效应越来越不明显,岩样破坏逐渐从剪胀型向鼓胀型转变。需要强调的是,不同砂岩发生脆-延性转变的临界围压并不相同。当硐室埋深不大,地应力不高时,围岩不会发生延性力学行为。

砂岩等准脆性岩石非线性力学现象背后的力学机理主要是裂隙扩展引起的材料损伤和摩擦滑移引起的不可恢复变形^[9],构建弹塑性损伤耦合模型是研究准脆性岩石非线性力学的常见方法。例如:Shao等^[10]针对黏土岩提出的弹塑性损伤本构模型可以反映准脆性岩石的主要力学现象;周维垣等^[11]引用弹塑性本构理论中的临界状态理论和非关联流动法则,提出了一种新的岩石弹塑性本构模型;王者超等^[12]提出了岩石横观各向同性岩石弹塑性本构模型,并利用炭质板岩试样的试验数据,对提出的塑性模型进行了验证;Liu等^[13]采用宏观损伤-摩擦耦合本构模型模拟了砂岩的力学行为,试验结果和预测结果之间具有较好的一致性;朱其志^[9]开展的细观力学研究表明,岩石损伤演化和塑性应变流动具有一定的关联性,这为构建仅含单一内变量的弹塑性本构模型提供了依据。

本文利用岩石全自动三轴压缩伺服试验机,对采自重庆蟠龙抽水蓄能电站硐室围岩的砂岩试样开展不同围压下的常规三轴压缩试验,确定岩石基本力学特性并标定关键的力学参数,进而建立弹塑性本构模型,最后通过对比数值模拟结果和试验数据验证模型的可靠性。

1 硐室围岩常规三轴压缩试验

1.1 试验仪器

室内试验在岩石多场耦合三轴试验机(图1)上进行,该仪器可进行岩石常规三轴瞬时力学试验、流变力学试验、三轴排水/不排水试验、水压/气压渗透试验、温度-渗流-应力耦合试验。围压伺服泵测量精度为0.01 MPa,压力室最大工作压力和最大渗透压差均为150 MPa;应变测量系统包含轴向LVDT和环向应变传感器测量环,轴向位移测量精度为 10^{-3} mm,量程达20 mm;环向应变传感器测量环可直接输出岩样的环向应变值,测量精度达 10^{-3} mV/V。该试验系统可采用多种加载方式,如轴向压力控制、轴向位移控制、环向位移控制、流量控制等,可以得到岩石试样从开始加载到完全破坏的较为完整的试验数据。

1.2 试样制备

砂岩块石取自蟠龙抽水蓄能电站场址。根据SLT264—2020《水利水电工程岩石试验规程》和GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》要求加工标准圆柱形试样,试样直径50 mm、高100 mm。各砂岩试样的基本参数见表1,可以看出,各试样的物理参数较为均匀和稳定。

1.3 试验方案

试验室温度控制在 $(21 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$,以减小温度对试验数据采集设备的扰动。采用位移控制方式,加载速率为



图1 全应力多场耦合三轴试验机

Fig.1 Full-stress and multi-field coupling triaxial apparatus

表1 砂岩试样物理参数

Table 1 Physical parameters of sandstone samples

编号	直径/mm	高度/mm	质量/g	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
1	49.10	100.13	483.1	2.55
2	49.13	100.35	483.4	2.54
3	49.16	100.36	484.2	2.54
4	49.14	100.86	486.1	2.54
5	49.09	100.37	483.6	2.54
6	49.15	100.36	484.0	2.54
7	49.15	100.32	483.5	2.54
8	49.13	100.40	484.4	2.55

0.02 mm/min,考虑了 0 MPa、5 MPa 和 10 MPa 共 3 种围压条件。试样安装如图 2 所示。加载过程分为 2 个阶段,首先通过压力室内的液压油施加围压至预定围压值,然后通过轴向位移控制形成偏应力直至岩样破坏。

1.4 试验结果与分析

1.4.1 试验结果

由表 2 和图 3 可知,岩样在加载过程中基本上经历了弹性变形阶段、塑性变形阶段直至完全破坏,获得的应力-应变曲线良好无异常。围压越高,应力-应变曲线上的初始压密阶段越不明显,这可以解释为在高围压作用下岩石试样中的大部分原生缺陷逐渐闭合。进一步对比发现,增加围压能有效抑制轴向变形的发展。例如,偏压为 70 MPa 时,围压 0 MPa、5 MPa 和 10 MPa 情况下的岩样轴向应变分别为 0.5112%、0.4265% 和 0.3576%。另外,随着围压的增加,试样破坏时的峰值应力不断提高,单轴强度为 84.8 MPa,围压 5 MPa 和 10 MPa 时的峰值强度分别达到了 133.5 MPa 和 168.5 MPa,较单轴强度分别增加了 57.3% 和 98.6%。

表 2 砂岩常规三轴压缩试验结果

Table 2 Results of conventional triaxial compression test for the sandstone

编号	围压/MPa	峰值应力/MPa	峰值轴向应变/%	峰值环向应变/%	杨氏模量/GPa	泊松比
1	0	93.138	0.705	-0.107	16.893	0.060
2	0	84.834	0.658	-0.067	16.162	0.070
3	0	81.313	0.627	-0.071	14.288	0.083
4	5	133.478	0.873	-0.565	18.988	0.121
5	5	138.861	0.864	-0.555	19.536	0.110
6	5	136.202	0.841	-0.495	19.537	0.080
7	10	172.306	0.971	-0.592	21.510	0.099
8	10	168.517	0.945	-0.615	21.472	0.064

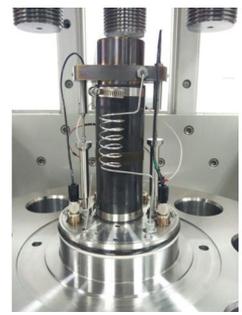


图 2 砂岩试样安装示意图
Fig.2 Installation diagram of sandstone specimen

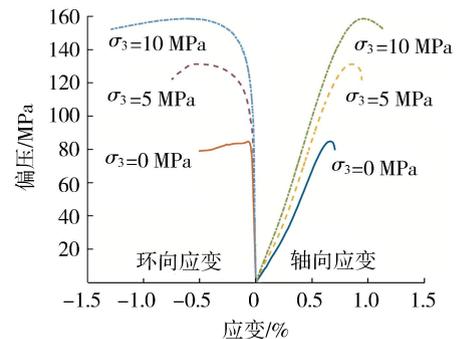


图 3 不同围压下砂岩试样应力-应变代表性曲线
Fig.3 Representative stress-strain curves for sandstone specimens under different confining pressures

1.4.2 岩石特征强度分析

图 4 给出了不同围压下的砂岩试样峰值强度及其线性拟合情况(σ_1 和 σ_3 分别为大主应力和小主应力),可见砂岩试样峰值强度和围压呈现出较好的线性关系。结合图 4 拟合曲线和摩尔-库伦强度准则,得到砂岩的抗剪强度参数黏聚力 $c=15.2$ MPa,内摩擦角 $\varphi=52^\circ$ 。

1.4.3 岩石变形特征分析

试验过程中,应力状态及加载历史、加载路径和方式、环境温度以及岩石本身的物理力学性质等因素均会对试样的破坏形式产生影响。理论上,加载过程中,试样内部裂隙扩展应沿着最大剪切应力方向,最终形成宏观剪切带或宏观裂隙,即在常规三轴压缩试验中,砂岩试样的破坏形式一般应为剪切破坏。由图 5 可知,单轴压缩试验中的岩样破坏表现为劈裂破坏模式,这是端部效应的结果。在围压 5 MPa 和 10 MPa 时,岩石试样出现剪切破坏面,呈现出剪切破坏形式。

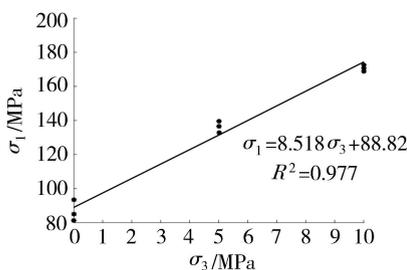


图 4 试样强度包络图

Fig.4 Strength envelop of specimens



(a) 围压为 0 MPa (b) 围压为 5 MPa (c) 围压为 10 MPa

图 5 不同围压下砂岩试样代表性破坏形式

Fig.5 Representative failure patterns of sandstone specimens under different confining pressure

2 硇室围岩弹塑性本构模型

2.1 弹塑性模型基本表达式

岩石类材料从受力至破坏往往经历明显的非线性变形过程。当岩石处于线弹性阶段时,其力学特性服从广义胡克定律;当岩石进入塑性变形状态时,可以采用弹塑性理论或弹塑性损伤理论来描述其非线性力学行为^[10-13]。在小变形假设下,根据经典弹塑性理论,应变及其增量可被分解为弹性应变 $\boldsymbol{\varepsilon}_e$ 和塑性应变 $\boldsymbol{\varepsilon}_p$:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_e + \boldsymbol{\varepsilon}_p \quad d\boldsymbol{\varepsilon} = d\boldsymbol{\varepsilon}_e + d\boldsymbol{\varepsilon}_p \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = 2G\boldsymbol{\varepsilon}_{dev,e} + K\text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}_e)\mathbf{I} \quad (2)$$

式中: G 、 K 分别为岩石的剪切模量和体积压缩模量; $\boldsymbol{\varepsilon}_{dev,e}$ 为弹性应变偏张量; $\text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}_e)$ 为弹性体积应变; \mathbf{I} 为二阶单位张量。

a. 塑性屈服函数。根据第 1.4.2 节的强度分析,本文采用基于 Drucker-Prager 准则的线性屈服函数:

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \gamma_p) = q - \eta \bar{h}(p + p_0) \leq 0 \quad (3)$$

其中

$$p = \text{tr}\boldsymbol{\sigma}/3 \quad q = \sqrt{\frac{3}{2}\boldsymbol{\sigma}_{dev} : \boldsymbol{\sigma}_{dev}}$$

式中: γ_p 为广义塑性剪应变; p 、 q 分别为平均应力和等效剪切应力; $\boldsymbol{\sigma}_{dev}$ 为应力偏张量; η 为广义摩擦系数; \bar{h} 为描述岩石峰前硬化和峰后软化行为的函数,称为统一硬化/软化函数; p_0 为屈服面与 p 轴的交点坐标。

b. 塑性势函数。岩土经典塑性理论通常用非关联塑性流动法则来准确描述材料的塑性体积变形。为此,采用以下塑性势函数:

$$g = q + \beta p \quad (4)$$

式中 β 为体积膨胀系数。根据正交化准则得到塑性应变增量的表达式:

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_p = \lambda_p \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (5)$$

式中 λ_p 为非负塑性乘子,由塑性一致性条件确定。

c. 硬化/软化函数。借鉴细观力学分析结果^[9],采用以下统一塑性硬化/软化函数:

$$\bar{h}(\gamma_p) = \bar{h}_0 + (1 - \bar{h}_0) \frac{N\xi}{N - 1 + \xi^N} \quad (6)$$

其中

$$\xi = \gamma_p / \gamma_{pc} \quad \gamma_p = \int d\gamma_p \quad d\gamma_p = \sqrt{\frac{2}{3}d\boldsymbol{\varepsilon}_{dev,p} : d\boldsymbol{\varepsilon}_{dev,p}}$$

式中: \bar{h}_0 为硬化函数的初始值; $d\boldsymbol{\varepsilon}_{dev,p}$ 为塑性应变偏张量的增量; γ_{pc} 为峰值应力处的广义塑性剪应变,称为广义剪切应变临界值; ξ 为广义塑性剪应变与其临界值 γ_{pc} 的比值; $N > 1$ 为控制软化速度的模型参数。

由图 6 可以看出,参数 N 主要影响材料的强度-软化速度和曲线形态; γ_{pc} 与岩石达到峰值应力时的塑性变形有关, γ_{pc} 越大,峰值应力对应的塑性应变越大。分析表明,不同围压下的岩石峰值强度都发生在 $\bar{h}(\xi) = 1$ (最大值)处,即屈服函数对应的破坏面函数为

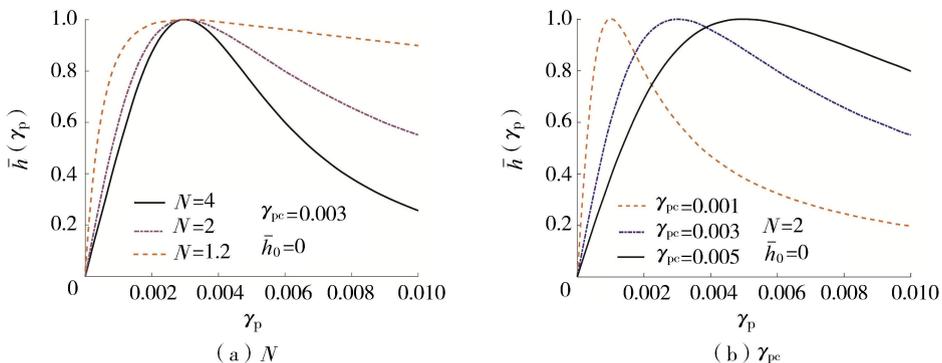


图 6 参数 N 、 γ_{pc} 对硬化/软化函数 $\bar{h}(\gamma_p)$ 的影响规律

Fig. 6 Effect of parameter N and γ_{pc} on the hardening-softening function $\bar{h}(\gamma_p)$

$$f(\boldsymbol{\sigma}) = q - \eta(p + p_0) = 0 \quad (7)$$

在常规三轴压缩路径下,有 $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 和 $q = \sigma_1 - \sigma_3$, 此时式(7)可以用 σ_1 和 σ_3 表示为

$$\sigma_1 = \frac{3 + 2\eta}{3 - \eta}\sigma_3 + \frac{3\eta}{3 - \eta}p_0 \quad (8)$$

2.2 参数标定及数值模拟

本文提出的宏观塑性模型包含8个参数,均可以通过一组室内常规三轴力学试验来确定。参数的确定方法如下:①弹性模量 E 和泊松比 ν 可以根据室内单轴压缩或三轴压缩试验获得的应变-应力曲线的线弹性段的斜率来确定;②强度参数 η 和 p_0 通过比较图4拟合线和式(8)可以确定;③塑性参数 \bar{h}_0 、 N 、 γ_{pc} 和 β , 其中 \bar{h}_0 可根据初始屈服面来确定;通过不同围压下常规三轴压缩试验残余强度包线可以确定残余应力硬化参量,进而求参数 N ;参数 γ_{pc} 由应力峰值处的塑性应变状态来确定。根据常规三轴压缩瞬时试验结果,确定宏观唯象弹塑性本构模型参数: $E = 18 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.08$ 、 $\eta = 2.14$ 、 $p_0 = 11.9 \text{ MPa}$ 、 $\bar{h}_0 = 0.71$ 、 $N = 1.5$ 、 $\gamma_{pc} = 0.003$ 和 $\beta = 0.3$ 。

运用上述弹塑性模型对围岩常规三轴压缩结果进行模拟,试验和理论预测的应力-应变曲线的比较(图7)表明,本文构建的统一硬化/软化弹塑性模型能够较为准确地描述了砂岩的宏观力学行为和强度特征,尤其是较好地描述了不同围压条件下岩样的强化及软化特征。

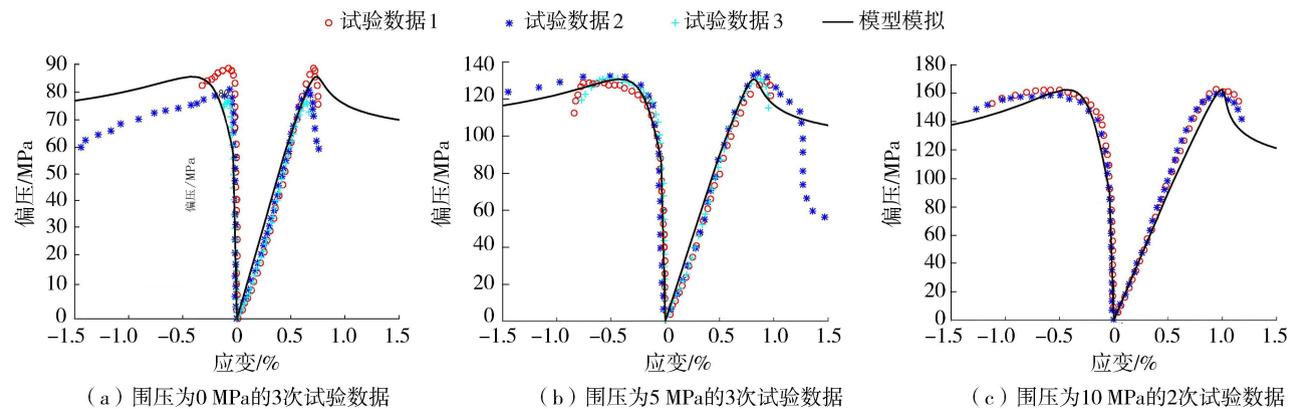


图7 试验数据与数值模拟结果比较

Fig. 7 Comparison between experimental data and numerical simulation results

3 结 语

a. 砂岩试样在加载过程中经历了压密、线弹性、裂纹扩展、应变软化和峰后破坏5个阶段。随着围压的增加,由初始空隙和微裂纹闭合引起的初始压密阶段越来越不明显,非线性逐渐消失;在一定程度内,围压能有效抑制轴向变形的发展;岩石试样破坏的峰值强度随围压增加而增大,具有较明显的线性关系;岩石试样破坏形式基本呈现剪切破坏,仅在单轴试验中呈现劈裂破坏。

b. 基于 Drucker-Prager 准则建立了弹塑性本构模型,基于等效塑性剪切应变的统一硬化/软化函数较好地反映了岩石试样的宏观力学行为特征,包括峰值强度、残余强度、应力-应变关系的非线性(峰前硬化和峰后软化)等,数值模拟结果验证了模型的可靠性和准确性。

本文聚焦砂岩的常规三轴压缩力学行为,没有考虑中间主应力的影响。更为全面的精细化数值模拟,还需要开展真三轴力学特性和本构模型研究。

参考文献:

- [1] 孟召平,彭苏萍,凌标灿. 不同侧压下沉积岩石变形与强度特征[J]. 煤炭学报,2000,25(1):15-18. (MENG Zhaoping, PENG Suping, LING Biaocan. Characters of the deformation and strength under different confining pressures on sedimentary rock [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 15-18. (in Chinese))
- [2] 韩铁林,陈蕴生,宋勇军,等. 不同应力路径下砂岩力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(增刊2):3959-3966. (HAN Tielin, CHEN Yunsheng, SONG Yongjun, et al. Experimental study of mechanical characteristics of sandstone under different loading paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup2): 3959-3966. (in Chinese))

Chinese))

- [3] 王军保,刘新荣,刘俊,等. 砂岩力学特性及其改进 Duncan-Chang 模型[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(12): 2388-2397. (WANG Junbao, LIU Xinrong, LIU Jun, et al. Mechanical properties of sandstone and an improved Duncan-Chang constitutive model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(12): 2388-2397. (in Chinese))
- [4] 徐卫亚,黄威,张涛,等. 含软弱夹层的层状岩体流变力学特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4): 327-333. (XU Weiya, HUANG Wei, ZHANG Tao, et al. Experimental study on rheological properties of layered rock mass with soft interlayers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(4): 327-333. (in Chinese))
- [5] 李浩,徐卫亚,王苏生. 致密砂岩循环加载试验及能量演化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2): 176-181. (LI Hao, XU Weiya, WANG Susheng. Cyclic loading test and energy evolution analysis of tight sandstone[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(2): 176-181. (in Chinese))
- [6] LIU Sili, ZHU Qizhi, SHAO Jianfu. Deformation and mechanical properties of rock; effect of hydrdomechanical coupling under unloading conditions[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2020,79: 5517-5534.
- [7] 盛金昌,高鹏,王珂,等. 渗流侵蚀作用对岩石裂隙剪切特性的影响试验[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):42-48. (SHENG Jinchang, GAO Peng, WANG Ke, et al. Experiments of seepage erosion influence on shear characteristics of rock fracture[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(2):42-48. (in Chinese))
- [8] WALTON G. A new perspective on the brittle-ductile transition of rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2021,54: 5993 -6006.
- [9] 朱其志. 多尺度岩石损伤力学[M]. 北京: 科学出版社,2019.
- [10] SHAO Jianfu, JIA Yun, KONDO D, et al. A coupled elastoplastic damage model for semi-brittle materials and extension to unsaturated conditions[J]. Mechanics of Materials,2006,38(3): 218-232.
- [11] 周维垣,孙卫军. 岩石的临界状态非关联弹塑性本构模型[J]. 岩石力学与工程学报,1990,9(1): 1-10. (ZHOU Weiyuan, SUN Weijun. The non-associate critical elastoplastic constitutive model for rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1990,9(1): 1-10. (in Chinese))
- [12] 王者超,宗智,乔丽苹,等. 横观各向同性岩石弹塑性本构模型与参数求解方法研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(8): 1457-1465. (WANG Zhechao, ZONG Zhi, QIAO Liping, et al. Elastoplastic constitutive model and parameter determination for transversely isotropic rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(8): 1457-1465. (in Chinese))
- [13] LIU Sili, CHEN Huanran, YUAN Shuangshuang, et al. Experimental investigation and micromechanical modeling of the brittle-ductile transition behaviors in low-porosity sandstone[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2020,179: 105654.

(收稿日期:2021-09-18 编辑:刘晓艳)

(上接第88页)

- [18] 李玉荣. 长江流域重要水情报告(第2期)[R]. 武汉:长江水文情报预报中心,2021.
- [19] 李玉荣. 长江流域重要水情报告(第10期)[R]. 武汉:长江水文情报预报中心,2021.
- [20] 张哲,陈亮,雷崇武,等. 不同形式变水头作用下土体的管涌特性[J]. 河南科学,2019,37(7):1116-1121. (ZHANG Zhe, CHEN Liang, LEI Chongwu, et al. Piping characteristics of ungraded soil under variable water head[J]. Henan Science,2019,37(7):1116-1121. (in Chinese))
- [21] KENNY T C, LAU D. Internal stability of granular filters[J]. Canadian Geotechnical Journal,1985,22:215-225.
- [22] 彭宇,丁选明,肖杨,等. 基于染色标定与图像颗粒分割的钙质砂颗粒破碎特性研究[J]. 岩土力学,2019,40(7):2663-2672. (PENG Yu, DING Xuanming, XIAO Yang, et al. Study of particle breakage behavior of calcareous sand by dyeing tracking and particle image segmentation method[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(7):2663-2672. (in Chinese))
- [23] SIBILLE L, MAROT D, SAIL Y. A description of internal erosion by suffusion and induced settlements on cohesionless granular matter[J]. Acta Geotechnica,2015,10(6):735-748.
- [24] LE V T, MAROT D, ROCHIM A, et al. Suffusion susceptibility investigation by energy-based method and statistical analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal,2018,55(1):57-68.
- [25] 蒋中明,王为,冯树荣,等. 砂砾石土渗透变形特性的应力状态相关性试验研究[J]. 水利学报,2013,44(12):1498-1505. (JIANG Zhongming, WANG Wei, FENG Shurong, et al. Experimental of study on the relevance between stress state and seepage failure of sandy-gravel soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(12):1498-1505. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-04 编辑:刘晓艳)