

DOI: 10.11779/CJGE201905009

单裂隙砂岩蠕变模型参数时间尺度效应及颗粒流数值模拟研究

胡 波¹, 杨圣奇^{*1, 2}, 徐 鹏³, 田文岭¹

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116;
3. 中建三局工程设计有限公司, 湖北 武汉 430064)

摘要: 深部高应力环境下硬岩的蠕变变形不可忽略, 尤其是裂隙岩体的蠕变变形。为研究含裂隙硬岩的长期蠕变变形行为及蠕变模型, 采用高速水射流技术在红砂岩试样中预制了一条贯穿的 $\alpha=45^\circ$ 单裂隙。确定了该裂隙岩石在围压 30 MPa 下的三轴压缩强度, 采用单级加载方式对试样进行长期压缩蠕变试验, 蠕变应力水平约为峰值偏应力的 80%。试验结果表明: 经历 539 h (约 22 d) 的含 45° 单裂隙红砂岩只出现衰减和稳态蠕变变形, 未发生加速蠕变破坏。为描述裂隙岩石的蠕变变形, 在 Burgers 模型基础上基于有效应力原理建立了考虑损伤的蠕变模型。通过最小二乘法得到的蠕变模型参数显示出显著的时间效应, 据此提出了考虑时间尺度的损伤蠕变模型, 该模型可以描述裂隙岩石在不同时间尺度下的蠕变变形。最后, 采用颗粒流程序 PFC^{2D} 对试样的三轴压缩及蠕变进行了数值模拟, 数值计算结果与试验结果吻合程度较高。研究工作为进一步研究裂隙硬岩的蠕变变形和模型提供了一定的参考价值。

关键词: 裂隙岩石; 蠕变模型参数; 时间尺度效应; 非线性蠕变模型; 颗粒流模拟

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)05-0864-10

作者简介: 胡 波(1990—), 男, 内蒙古包头市人, 博士研究生, 从事深部岩石流变力学行为与数值模拟方面的研究。
E-mail: huboskl@hotmail.com

Time-scale effect of the creep model parameters and particle flow simulation of sandstone with a single crack

HU Bo¹, YANG Sheng-qi^{1,2}, XU Peng¹, TIAN Wen-ling¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
3. China Construction Third Engineering Design Bureau Co., Ltd., Wuhan 430064, China)

Abstract: The creep deformation behaviors of the hard rocks in deep high-stress environment, especially for the fractured hard rocks, cannot be neglected. To investigate the long-term creep deformation behaviors and the creep model for the fractured hard rock, the rocks with a single crack ($\alpha=45^\circ$) are obtained using the high speed water jet technology. The peak deviatoric stress (σ_p) of the fractured rock under a confinement of 30 MPa is obtained before single-step creep test. The applied creep deviatoric stress is approximately 80% of σ_p and the creep time is 539 h. The experimental results show that the fractured rock exhibits the primary and secondary creep deformations without the tertiary creep deformation and creep failure. To characterize the creep deformation behaviors of the fractured sandstone, a damage creep model based on the Burgers model and the effective stress principle is established. The parameters of the damage creep model determined by the least squares method show distinct time-scale effect. Therefore, a damage creep model considering time-scale effect is proposed to describe the creep deformation behaviors of the fractured hard rock under different time-scales. In contrast, the proposed model agrees well with the test data. Finally, the triaxial compressive tests and creep experiments are simulated using the particle flow code (PFC^{2D}). The numerical results agree well with the experimental ones. The research work may provide references for further investigations on the creep deformation behaviors and models for the fractured hard rock.

Key words: fractured rock; creep model parameter; time-scale effect; nonlinear creep model; particle flow simulation

基金项目: 江苏省六大人才高峰资助项目 (JNHB-090); 江苏省杰出青年基金项目 (BK20150005)

收稿日期: 2018-07-11

*通讯作者 (E-mail: yangsqi@hotmail.com)

0 引言

随着深部地下工程的不断发展, 高应力状态下的硬质岩石除了发生岩爆, 也会产生越来越显著的时效变形^[1-4]。目前, 核废料深埋处置、深埋隧道、地热资源开采等地下工程中围岩的长期稳定性至关重要。硬岩在深部地下工程中经常遇到, 而其蠕变特性对于深部地下工程的设计施工以及长期变形预测是必须考虑的因素。因此, 有必要对硬岩的长期蠕变特征进行研究, 以期为深埋地下工程长期稳定性设计提供重要的参考依据。

国内外诸多学者开展了高应力条件下硬岩的蠕变试验和理论研究。Malan^[5]发现南非 Hartebeestfontein 金矿的单轴压缩强度在 130~180 MPa 的泥质石英岩具有显著的时效变形行为, 采用黏弹性理论模拟了该硬岩的蠕变变形。Heap 等^[6]针对 Darley Dale 脆性砂岩进行了水饱和条件下的三轴压缩蠕变试验, 通过应力侵蚀理论解释了蠕变破坏机理并用基于亚临界裂纹扩展的平均场模型^[7]描述了砂岩的三阶段蠕变变形。徐卫亚等^[8-9]、杨圣奇等^[10]、闫子舰等^[11]、朱杰兵等^[12]、黄达等^[13]依托锦屏水电站的绿片岩、大理岩和砂岩进行了不同加载路径下的三轴压缩蠕变试验, 得到蠕变变形和稳态蠕变速率随着应力水平增大而增大的结果, 并提出不同的蠕变模型来描述硬岩的蠕变行为。但实际工程中, 岩体中往往包含着各种天然裂隙等不连续面, 裂隙岩体的蠕变特性也引起了诸多学者的关注。Fabre 等^[14]对不同弱面倾角的泥岩进行了单轴压缩蠕变试验。Zhao 等^[15]对完整和含天然裂隙的石灰岩进行了循环加卸载蠕变试验, 分离了弹-黏-塑性应变并得到了含裂隙石灰岩的蠕变变形特征。Patton 等^[16]提出了一种基于两组相交弱表面的岩石流变模型。Matsuki 等^[17]基于黏弹性理论建立了一个岩石粗糙表面受法向应力作用的裂纹时效闭合模型。赵延林等^[18]对类岩石材料进行了双轴压缩条件下的流变试验, 证实了类岩石裂纹蠕变断裂现象的存在, 并得到 3 种不同的蠕变断裂裂纹扩展模式。黄达等^[19]、杨超等^[20-22]对天然岩石进行人工切缝处理, 制作成边缘含不同倾角裂隙的试样并对其进行了相关的蠕变试验, 最终提出了考虑裂隙损伤的蠕变模型。潘鹏志等^[23]考虑裂隙岩石蠕变过程中的各向异性, 建立了裂隙岩石的蠕变方程并程序化, 利用试验数据验证了模型的合理性。此外, 诸多学者采用理论模型来描述岩石的蠕变行为, 发现蠕变模型参数在蠕变过程中往往不是定常的, 而是与应力、温度等外界环境, 甚至与时间是相关的^[24-28]。

目前, 对于裂隙硬岩的蠕变试验和模型的研究成

果不多。本文对含贯通裂隙的硬质岩石进行了长时间的蠕变试验, 研究其长期蠕变变形特征, 并基于 Burgers 模型研究蠕变参数的时效特征, 基于损伤力学提出一个考虑时间尺度效应的非线性蠕变模型。最后采用颗粒流程序 PFC^{2D} 模拟了该试样的常规三轴和蠕变压缩试验。

1 蠕变试验及结果分析

1.1 试样制备及方案

试验所用硬岩为取自山东省日照市的红砂岩, 主要矿物成分为长石、石英、云母、赤铁矿和黏土矿物等^[29]。该岩石是一种高硬度、均质度较高的致密细粒砂岩, 微观结构如图 1 所示, 其平均密度约为 2402 kg/m³。先将红砂岩加工成比标准圆柱形试样稍大的长方体试样, 然后利用高速水射流在试样中部切割一条贯穿单裂隙, 裂隙角度 $\alpha = 45^\circ$, 裂隙长度 $2a=12.0$ mm, 宽度 $d=2.0$ mm。最后利用金刚钻头钻取直径 50 mm 的圆柱试样, 再用磨石机将该试样打磨成高度 100 mm 的标准圆柱形试样, 如图 2 所示。

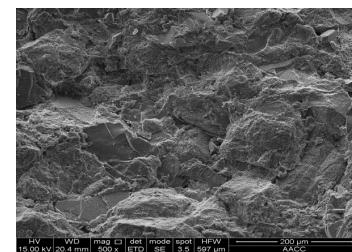


图 1 微观结构扫描图(电镜扫描)^[30]

Fig. 1 Micro-structure of red sandstone (SEM)^[30]

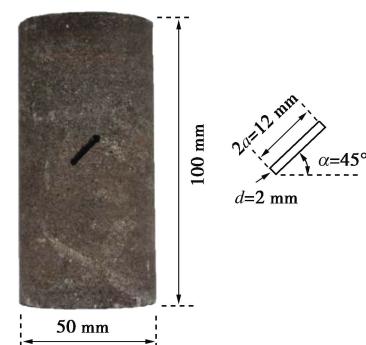


图 2 单裂隙试样几何参数

Fig. 2 Geometric parameters of a single fractured sample

对加工好的 45° 单裂隙红砂岩在烘干箱内进行 105℃恒温烘干, 然后进行常规三轴压缩试验。试验仪采用 TOP 多功能岩石三轴测试系统。该试验仪具备独立的伺服控制系统, 由高精度的电液伺服电机分别控制轴压、围压和孔隙水压, 最大轴压可施加至 400 MPa, 最大围压和孔隙水压可达 70 MPa 和 60 MPa, 精度可达 0.01 MPa。可实现单轴、三轴常规压缩和长

期蠕变试验。试样的轴向位移由两个 LVDT 传感器进行测量, 侧向变形由一个环向传感器进行测量, 试样由一个胶套和两个喉箍与上下压头进行密封, 以隔离液压油。

为模拟深部高地应力状态, 故施加静水压力 30 MPa, 加载速度为 5 MPa/min, 轴向应力采用位移控制方式加载, 加载速度为 0.04 mm/min。三轴压缩蠕变试验采用单级加载方式, 施加的应力水平约为峰值偏应力(σ_p)的 80%, 待应力水平施加到设计值后, 恒定轴向应力, 试样产生蠕变变形。为研究裂隙岩石的长期蠕变效应, 该蠕变试验持续时间 539 h(约 22 d)。围压 30 MPa 条件下, 试样的峰值偏应力为 168.16 MPa, 施加的蠕变应力水平为 $\sigma_1 - \sigma_3 = 135.63$ MPa。偏应力-应变曲线和蠕变曲线如图 3 所示。

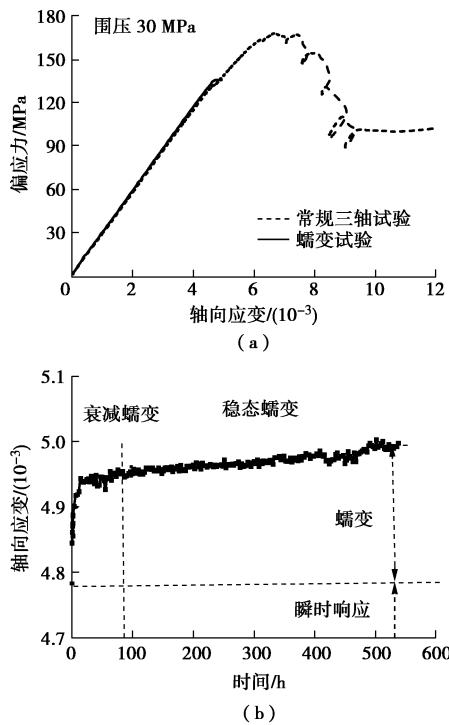


图 3 偏应力-应变曲线和蠕变曲线

Fig. 3 Deviatoric stress-strain curve and creep curve

1.2 蠕变变形特征

根据图 3 所示, 含单裂隙红砂岩在蠕变应力水平下产生瞬时响应, 瞬时轴向应变为 4.78×10^{-3} , 随后, 轴向应变随着时间的发展逐渐增大, 经历约 80 h 后, 应变增长速率逐渐减小至最小值, 此阶段为衰减蠕变阶段, 接着, 轴向应变随着时间的发展以该最小值的应变率逐渐线性增大, 进入稳态蠕变阶段, 试样经过 22 d 的蠕变变形后没有发生加速蠕变, 其中蠕变变形量约为 0.21×10^{-3} 。

2 裂隙岩石损伤蠕变模型

根据长期蠕变试验结果, 可以用基于元件组合的

Burgers 模型描述含单裂隙红砂岩的蠕变变形。采用 Burgers 模型描述完整岩石和含裂隙岩石的蠕变变形在形式上相同, 仅在蠕变参数上不同, 从另一种观点来看, 含缺陷岩石可视为含损伤的完整岩石^[20-21]。因此, 如果可以根据完整岩石的蠕变模型得出含裂隙岩石的蠕变模型和参数将在很大程度上提高实际运用价值。杨超^[22]根据裂隙扩展情况提出了两种蠕变模型, 即裂隙扩展与不扩展, 本文蠕变试验没有发生加速蠕变, 因此可视为裂隙未扩展情形。基于损伤力学理论, 将该预制裂隙视为初始损伤且不发生扩展, 定量描述裂隙的损伤程度, 最终利用损伤力学建立裂隙岩石与对应的完整岩石蠕变模型的关系, 推导出基于损伤力学的 Burgers 模型。

2.1 基于损伤力学的 Burgers 模型

根据试验结果, 单裂隙砂岩蠕变曲线可以用 Burgers 模型来描述, 如图 4 所示。该模型由弹簧元件和牛顿黏壶串并联组成, 其中弹性元件用来描述材料在受力后的瞬时变形, 另一个并联的弹簧元件和牛顿黏壶(开尔文体)用来描述材料的衰减蠕变, 用一个单独的牛顿黏壶来描述材料的稳态蠕变变形。

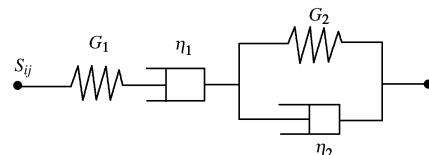


图 4 Burgers 模型示意图

Fig. 4 Burgers model

材料在压缩过程中产生的变形可分为体积变形 ε_m 和形状变形 e_m , 其中体积变形由球应力 σ_m 产生, 形状变形由偏应力 S_{ij} 产生, 假设岩石的蠕变变形仅由偏应力导致, Burgers 模型的状态方程为^[31]

$$\left. \begin{aligned} S_H &= 2G_1 e_H, \\ S_K &= 2G_2 e_H + 2\eta_2 \dot{e}_H, \\ S_N &= 2\eta_1 \dot{e}_N, \\ e &= e_H + e_K + e_N, \\ S_{ij} &= S_H + S_K + S_N, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, S_H , S_K , S_N 为弹簧元件、开尔文体和牛顿黏壶各部分所受偏应力, e_H , e_K , e_N 为对应的应变, G_1 和 G_2 为弹簧元件的弹性参数, η_1 和 η_2 为牛顿黏壶的黏滞系数。

球应力与球应变的关系为

$$\sigma_m = 3K\varepsilon_m, \quad (2)$$

式中, K 为体积模量, 球应力为

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (3)$$

偏应力可为

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \quad , \quad (4)$$

三维蠕变方程为

$$e_{ij} = \frac{S_{ij}}{2G_1} + \frac{S_{ij}}{2\eta_1} \cdot t + \frac{S_{ij}}{2G_2} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} \cdot t\right) \right], \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ij} = e_{ij} + \varepsilon_m \quad . \quad (6)$$

常规三轴压缩条件下($\sigma_2 = \sigma_3$), 则轴向蠕变方程为

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_1} \cdot t + \\ &\quad \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_2} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} \cdot t\right) \right] \quad . \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)与完整岩石的蠕变方程的形式相同, 但实际上, 如果对完整岩石和含裂隙岩石施加相同的偏应力, 试样内部真实受力会截然不同。因此, 应将裂隙视为损伤, 对 Burgers 模型进行修正, 使其更加符合裂隙岩石的蠕变变形特征。根据有效应力原理, 表观应力 σ_{ij} 作用在有损材料上的效果与有效应力 σ_{ij}^e 作用在无损材料上的效果相同, 即

$$F = \sigma_{ij} A = \sigma_{ij}^e A_e \quad , \quad (8)$$

定义损伤变量为

$$D = \frac{A - A_e}{A} \quad , \quad (9)$$

式中, A 为试样的横截面积, A_e 为试样有效承载面积。

朱维申等^[26]提出了一个二阶张量来描述节理岩体的损伤, 其中损伤变量是由结构面总面积与截面积计算得到, 即内部 N 组结构面在 3 个直角坐标方向上的损伤进行叠加计算, 得到直角坐标方向上的损伤率和二阶张量:

$$D_1 = \sum_{i=1}^N D_1^i, D_2 = \sum_{i=1}^N D_2^i, D_3 = \sum_{i=1}^N D_3^i \quad , \quad (10)$$

损伤张量为

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_1}{A} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A_2}{A} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_3}{A} \end{bmatrix} \quad . \quad (11)$$

本文研究中, 45° 裂隙在试样 3 个直角坐标方向上的投影面积约 $A_1 = 418.09 \text{ mm}^2$, $A_2 = 24.0 \text{ mm}^2$, $A_3 = 418.09 \text{ mm}^2$, 其中试样横截面积 $A = 1962.5 \text{ mm}^2$, 因此, 损伤张量为

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 0.21 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0.21 \end{bmatrix} \quad . \quad (12)$$

根据式(8)、(9)得有效应力为

$$\sigma_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij}}{1 - D_{ij}} \quad . \quad (13)$$

考虑损伤的三维蠕变方程为

$$e_{ij} = \frac{S_{ij}^e}{2G_1} + \frac{S_{ij}^e}{2\eta_1} \cdot t + \frac{S_{ij}^e}{2G_2} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} \cdot t\right) \right] \quad , \quad (14)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m^e}{K} \quad . \quad (15)$$

有效偏应力为

$$S_{ij}^e = \sigma_{ij}^e - \sigma_m^e \quad , \quad (16)$$

式中, S_{ij}^e 为有效偏应力, σ_{ij}^e 为有效应力, σ_m^e 为有效球应力。其中,

$$S_{11}^e = \frac{2\sigma_1}{3(1 - D_1)} - \frac{\sigma_2}{3(1 - D_2)} - \frac{\sigma_3}{3(1 - D_3)} \quad , \quad (17)$$

$$\sigma_m^e = \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_1}{1 - D_1} - \frac{\sigma_2}{1 - D_2} - \frac{\sigma_3}{1 - D_3} \right) \quad . \quad (18)$$

得到考虑损伤的轴向蠕变方程为

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_m^e}{3K} + \frac{S_{11}^e}{2G_1} + \frac{S_{11}^e}{2\eta_1} \cdot t + \frac{S_{11}^e}{2G_2} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} \cdot t\right) \right] \quad . \quad (19)$$

根据瞬时应变 ε_0 可以计算得出弹性模量 E , 从而计算得出 K 和 G_1 , 即

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_m^e}{3K} + \frac{S_{11}^e}{2G_1} \quad , \quad (20)$$

其中假设 $\mu = 0.25$, K 和 G_1 由下式计算得出:

$$\left. \begin{array}{l} K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \\ G_1 = \frac{E}{2(1 + \mu)} \end{array} \right\} \quad (21)$$

2.2 损伤蠕变模型参数时效特征

根据损伤原理推导的损伤蠕变方程可以描述含裂隙岩石不发生加速蠕变的蠕变变形。根据以往的研究, 岩石在恒定载荷作用下的蠕变时间一般为几小时到几天。然后根据试验数据通过最小二乘法来计算蠕变模型参数, 得到的这些参数仅能反映短时期内的蠕变变形特征。实际工程中, 围岩变形时间比蠕变试验设计时间要长很多, 能否通过短时间的蠕变试验得到的参数来反映更长时间的蠕变变形特征还是值得研究。诸多学者也发现岩石蠕变过程中蠕变参数往往具有时间尺度效应^[24-26]。因此, 本文这部分研究主要是探究时间尺度对蠕变参数的影响。根据式(19)计算得出不同时间尺度下考虑损伤和不考虑损伤时含 45° 单裂隙砂岩的蠕变参数如表 1, 2 所列。首先根据瞬时应变来计算弹性模量, 假设泊松比为 0.25, 可通过式(21)计算得出 K 和 G_1 , 然后通过最小二乘法计算其余蠕变参数。

表 1 不同时间尺度下考虑损伤的 Burgers 模型参数拟合结果
Table 1 Fitting results of Burgers model considering damage at different time scales

时间 /h	K /GPa	G_1 /GPa	η_1 /(GPa·h ⁻¹)	G_2 /GPa	η_2 /(GPa·h ⁻¹)	R^2
2	26.68	16.12	2633.01	887.94	91.72	0.94
5	26.68	16.12	5570.00	714.01	141.26	0.94
10	26.68	16.12	9517.91	640.50	173.29	0.94
15	26.68	16.12	12974.23	604.02	196.06	0.94
20	26.68	16.12	16877.41	571.26	223.39	0.94
25	26.68	16.12	20904.13	543.48	252.23	0.94
30	26.68	16.12	28361.02	506.52	297.32	0.93
35	26.68	16.12	37821.55	477.27	336.45	0.92
40	26.68	16.12	53014.48	451.18	372.49	0.92
45	26.68	16.12	69759.23	435.16	394.97	0.92
50	26.68	16.12	125391.26	425.60	408.55	0.92
60	26.68	16.12	208029.11	415.88	422.69	0.93
80	26.68	16.12	346709.53	401.54	444.19	0.93
100	26.68	16.12	422908.32	395.89	453.00	0.93
120	26.68	16.12	462546.18	390.12	467.45	0.93
150	26.68	16.12	489557.02	385.69	469.71	0.93
200	26.68	16.12	502968.38	378.74	481.65	0.93
250	26.68	16.12	528149.33	374.28	489.56	0.93
300	26.68	16.12	531973.25	370.43	496.57	0.93
350	26.68	16.12	547420.06	367.96	501.18	0.93
400	26.68	16.12	589295.68	365.69	505.46	0.93
450	26.68	16.12	593795.11	363.84	509.02	0.93
500	26.68	16.12	580329.15	363.53	509.62	0.93
539	26.68	16.12	607326.29	364.33	508.06	0.93

表 2 不同时间尺度下 Burgers 模型参数拟合结果

Table 2 Fitting results of Burgers model at different time scales

时间 /h	K /GPa	G_1 /GPa	η_1 /(GPa·h ⁻¹)	G_2 /GPa	η_2 /(GPa·h ⁻¹)	R^2
2	21.0	12.6	2055.17	712.55	82.09	0.95
5	21.0	12.6	4384.25	567.14	119.66	0.94
10	21.0	12.6	7442.43	507.59	145.71	0.94
15	21.0	12.6	10158.32	477.46	164.73	0.94
20	21.0	12.6	13252.11	450.21	187.87	0.94
25	21.0	12.6	16490.28	427.03	212.29	0.94
30	21.0	12.6	22533.84	369.82	249.15	0.93
35	21.0	12.6	30143.26	373.77	279.57	0.92
40	21.0	12.6	42280.51	353.57	306.95	0.92
45	21.0	12.6	55670.02	341.19	324.03	0.92
50	21.0	12.6	68084.32	333.86	334.32	0.92
60	21.0	12.6	205649.65	326.49	344.89	0.92
80	21.0	12.6	331512.42	315.44	361.33	0.92
100	21.0	12.6	369227.06	311.13	368.03	0.92
120	21.0	12.6	374605.54	306.58	375.37	0.92
150	21.0	12.6	425846.69	303.21	380.99	0.93
200	21.0	12.6	430152.33	297.74	390.39	0.93
250	21.0	12.6	440282.60	294.24	396.65	0.93
300	21.0	12.6	459462.81	291.19	402.24	0.93
350	21.0	12.6	464384.11	289.24	405.90	0.93
400	21.0	12.6	496597.25	287.44	409.33	0.93
450	21.0	12.6	503120.21	285.98	412.17	0.93
500	21.0	12.6	487981.55	285.74	412.64	0.94
539	21.0	12.6	497774.05	286.39	411.36	0.94

基于表 1, 图 5 给出了考虑损伤和不考虑损伤情况的 Burgers 模型蠕变参数随时间的变化规律。其中, K 和 G_1 在恒定应力水平下是恒定的, 只反映试样的瞬时变形, 不会随着时间而发生变化, 但 G_2 , η_1 , η_2 具有显著的时间效应。从图 5 可看出, 黏弹性参数 G_2 随着时间的增大而非线性减小, 黏性参数 η_2 随时间增大而逐渐增大, 反映岩石稳态蠕变速率的黏性参数 η_1 随着时间增大而呈现非线性增大趋势, 而且考虑损伤的蠕变参数要比不考虑损伤的蠕变参数稍大。3 个蠕变参数与时间的关系如式 (22) ~ (24) 所示, 拟合相关系数较高, 其 R^2 均大于 0.97。

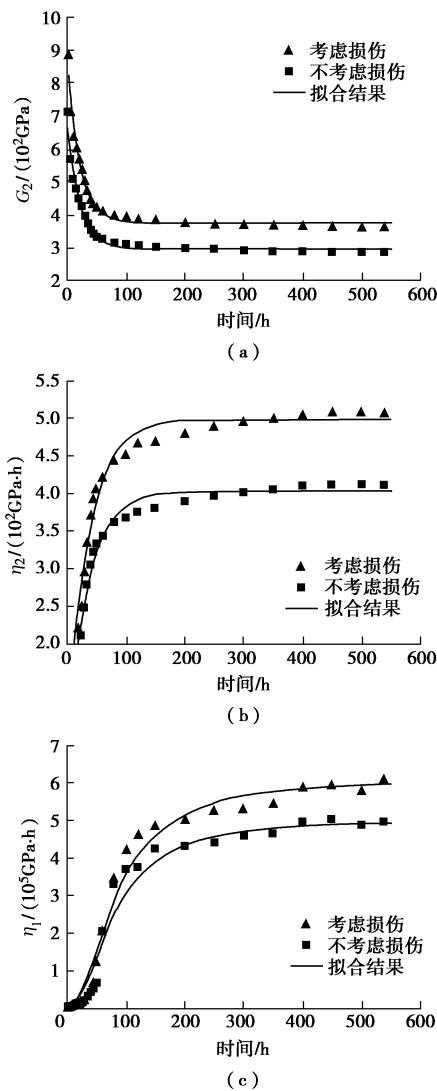


图 5 Burgers 蠕变模型参数时效特征

Fig. 5 Creep parameters of Burgers vs. time

可以看出, Burgers 蠕变模型参数具有显著的时间效应, 如果利用短期蠕变试验识别的蠕变参数来预测岩石的长期蠕变变形, 势必会产生较大的偏差。因此, 建立考虑时间尺度的非线性蠕变损伤模型来准确预测裂隙岩石的黏弹性蠕变行为显得尤为重要。图 6 给出

了蠕变试验结果和模型计算结果, 可见, 提出的考虑损伤和时间尺度的非线性蠕变模型与试验结果吻合程度较高, 该模型可以描述裂隙岩石的不同时间尺度的蠕变变形。

蠕变参数与时间的关系如下:

$$G_2 = 376.18 + 492.82 \times \exp\left(\frac{-t}{20.96}\right) \quad (R^2=0.98), \quad (22)$$

$$\eta_2 = 498.54 + 429.32 \times \exp\left(\frac{-t}{37.09}\right) \quad (R^2=0.97), \quad (23)$$

$$\eta_1 = \frac{1}{1.64 \times 10^{-6} + \frac{1.21 \times 10^{-2}}{t}} \quad (R^2=0.97). \quad (24)$$

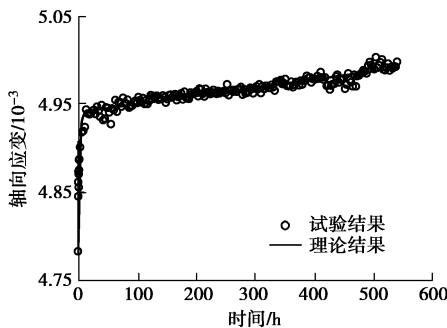


图 6 试验和模型计算曲线对比

Fig. 6 Comparison between test and model results

考虑时间尺度的非线性蠕变模型为

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_m^e}{3K} + \frac{S_{11}^e}{2G_1} + \frac{S_{11}^e}{2\eta_1(t)} \cdot t + \frac{S_{11}^e}{2G_2(t)} \cdot \\ &\left[1 - \exp\left(-\frac{G_2(t)}{\eta_2(t)} \cdot t\right) \right]. \end{aligned} \quad (25)$$

3 颗粒流程序数值模拟

室内长期蠕变试验是揭示岩石蠕变特征的重要手段, 但蠕变试验耗时长、工作量大, 很大程度上限制了该方法高效实施。随着计算机技术的迅速发展, 结合理论的数值模拟和试验研究是当前相关科学的主要方法。而颗粒流程序 PFC^{2D} 能够从微观机制方面揭示岩石破坏机理, 从而得到广泛应用^[32]。因此本文基于 PFC^{2D} 对单裂隙砂岩的常规三轴试验和蠕变试验进行数值模拟。

3.1 单裂隙砂岩数值模型建立

PFC^{2D} 通过圆盘颗粒的运动和相互作用来模拟材料的力学行为, 其中平行黏结模型可以很好的模拟岩石的力学特性^[33-34]。考虑本文蠕变试验曲线满足 Burgers 模型, 因此本文对颗粒之间的接触采用平行黏结模型和 Burgers 接触模型来模拟单裂隙砂岩的蠕变力学特征。

基于试样几何参数, 本文在 PFC^{2D} 中生成 50 mm

$\times 100$ mm 的完整试样模型, 然后再删除指定区域范围内的颗粒来模拟试验中试样的裂隙, 共生成 5341 个不同尺度的圆盘颗粒。具体微观参数如表 3 所列。蠕变试验之前需对三轴压缩强度进行试算标定, 然后进行蠕变模拟。围压 30 MPa 条件下的数值计算应力-应变曲线和三轴压缩破坏模式如图 7, 8 所示。可以看出数值模拟结果与试验结果吻合程度非常高。峰前主要以弹性压缩变形为主, 靠近峰值时发生较小的应力跌落, 红色和蓝色代表颗粒接触的拉伸和剪切裂纹, 诸多微观拉伸裂纹最终形成宏观剪切裂纹。试验和模拟的破坏模式均为反向裂纹的扩展。说明采用 PFC^{2D} 模拟裂隙砂岩力学特征是可行的。

表 3 PFC^{2D} 细观参数

Table 3 Mesoscopic parameters in PFC^{2D}

细观参数	取值	细观参数	取值
颗粒最小半径/mm	0.4	颗粒半径比	1.66
密度/(kg·m ⁻³)	2400	颗粒接触模量/GPa	22
颗粒刚度比	2.0	颗粒摩擦系数	0.6
平行黏结模量/GPa	22	平行黏结刚度比	2.0
法向黏结强度/MPa	13.0±3.25	切向黏结强度/MPa	13.0±3.25

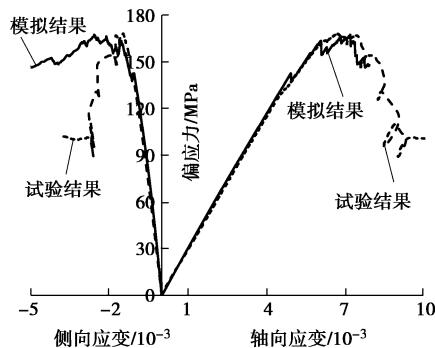


图 7 试验和数值模拟应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of tests and numerical simulations

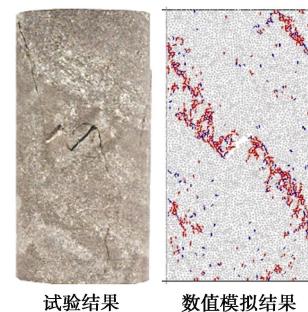


图 8 三轴压缩破坏模式对比 (围压 30 MPa)

Fig. 8 Failure models of test and numerical simulation

3.2 蠕变试验数值模拟

基于围压 30 MPa 条件下确定了单裂隙砂岩的强

度参数, 然后采用一维的 Burgers 接触模型来模拟试样的长期蠕变变形行为。在 PFC^{2D} 中颗粒和颗粒之间、颗粒和墙体之间的蠕变接触模型法向和切向示意图如图 9 所示。PFC 程序在颗粒之间赋予的接触本构模型均为简单的一维问题, 并不考虑复杂三维本构, 因此, 根据软件内置的一维 Burgers 接触模型可以计算得出试样的宏观蠕变变形, 随后, 将模拟得出的蠕变曲线反演得出相应的宏观一维 Burgers 模型的参数, 来寻找细观接触模型参数与宏观一维蠕变模型参数的关系。若想建立细观参数与宏观三维 Burgers 模型参数之间的关系, 可间接通过宏观的一维 Burgers 模型来建立。因此, 细观参数 K_{mn} , K_{ms} 与 E_1 对应; C_{mn} , C_{ms} 与 η_1 对应; K_{kn} , K_{ks} 与 E_2 对应; C_{kn} , C_{ks} 与 η_2 对应。 f_s 与峰值强度呈正比。限于篇幅, 图 10 给出了一维 Burgers 模型的细观参数与相应的一维宏观模型参数之间的关系。

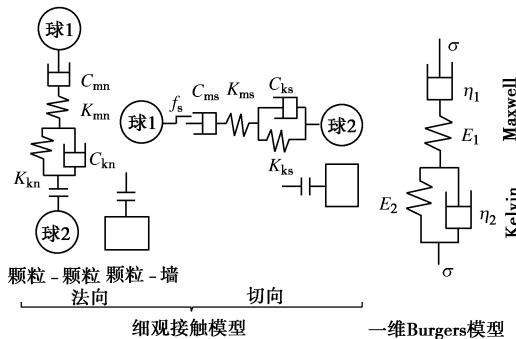


图 9 Burgers 蠕变模型

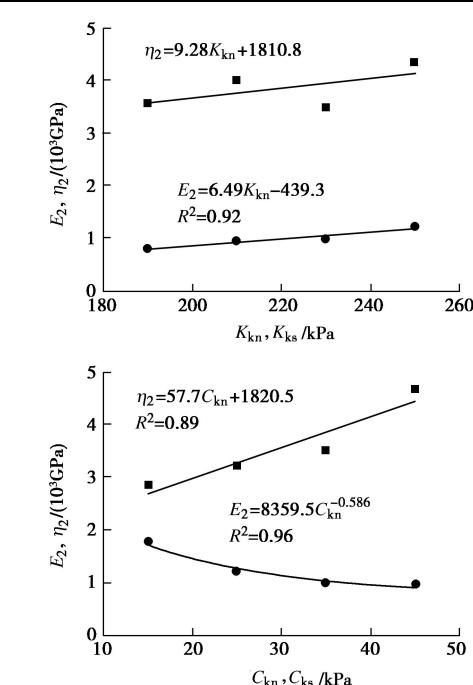
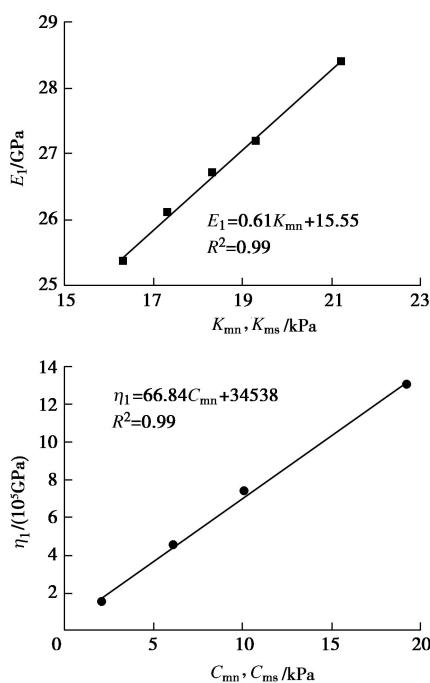
Fig. 9 Burgers model in PFC^{2D}

图 10 一维 Burgers 模型细 - 宏观参数对应关系

Fig. 10 Relationship between micro- and macro-parameters of one-dimensional Burgers model

根据蠕变试验结果调试出一组合适的细观参数, 如表 4 所列。经历约 22 d 的单裂隙砂岩蠕变变形数值计算结果和蠕变试验结果对比如图 11 所示。可见数值模拟结果很好的吻合了试验蠕变曲线, 而且在蠕变结束时数值模型中微观裂纹扩展情况如图 12 所示。可见, 单裂隙上段的下侧主要产生细观拉伸裂纹, 周边产生少量的细观剪切裂纹, 试样最终没有发生加速蠕变。

表 4 Burgers 模型细观参数

Table 4 Mesoscopic parameters of Burgers model

细观参数	取值	细观参数	取值
K_{mn}/GPa	21.2	K_{ms}/GPa	21.2
$C_{mn}/(\text{GPa}\cdot\text{d})$	19238	$C_{ms}/(\text{GPa}\cdot\text{d})$	19238
K_{kn}/GPa	230	K_{ks}/GPa	230
$C_{kn}/(\text{GPa}\cdot\text{d})$	35	$C_{kn}/(\text{GPa}\cdot\text{d})$	35
f_s	0.47		

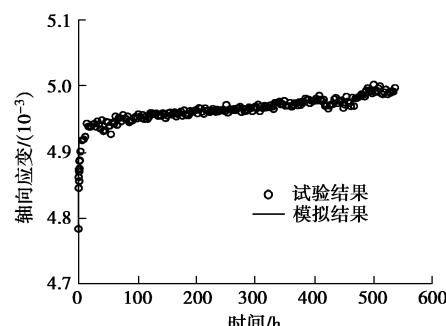


图 11 蠕变试验和数值模拟曲线

Fig. 11 Creep curves of test and numerical simulation

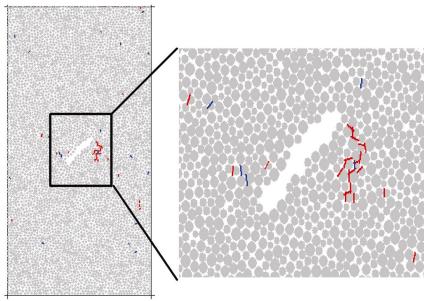


图 12 数值模拟蠕变末期裂纹扩展情况

Fig. 12 Crack evolution of numerical sample at the end of creep

4 结语

在围压 30 MPa, 轴向偏应力为峰值偏应力 80% 的载荷下, 经历约 22 d 的含 45° 单裂隙红砂岩显示出显著地黏弹性变形行为, 蠕变曲线只出现衰减和稳态蠕变阶段, 未发生加速蠕变。采用基于损伤原理和 Burgers 模型建立的损伤蠕变模型来描述裂隙岩石的蠕变变形, 采用最小二乘法确定的蠕变模型参数具有显著的时间效应, 黏弹性剪切模量 G_2 随着时间的增大而非线性减小, 而黏弹性黏滞系数 η_2 和黏滞系数 η_1 随时间增大而非线性增大。对比考虑损伤和不考虑损伤时的蠕变参数可以发现, 考虑损伤的蠕变参数要比不考虑损伤的蠕变参数稍大。据此提出考虑损伤和时间尺度的非线性蠕变模型与试验结果吻合程度较高。因此, 在实际应用中, 应考虑蠕变模型参数的时间效应。数值模拟单裂隙砂岩常规压缩应力 - 应变曲线及破坏模式与试验结果吻合程度很高, 均为反裂纹扩展破坏。数值模拟的应变 - 时间曲线也与蠕变试验结果非常吻合, 得到了细观参数与宏观参数的关系, PFC^{2D} 可以很好的描述单裂隙砂岩的常规及蠕变力学行为。

参考文献:

- [1] MALAN D F. Time-dependent behavior of deep level tabular excavations in hard rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, **32**: 123 – 155.
- [2] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(6): 2803 – 2813. (HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(6): 2803 – 2813. (in Chinese))
- [3] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究与探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(11): 161 – 2178. (XIE He-ping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(11): 2161 – 2178. (in Chinese))
- [4] 陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 时滞型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **1**(3): 562 – 569. (CHEN Bing-rui, FENG Xia-ting, MING Hua-jun, et al. Evolution law and mechanism of rockburst in deep tunnel: time delayed rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **1**(3): 562 – 569. (in Chinese))
- [5] MALAN D F. Simulation of the time-dependent behavior of excavations in hard rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, **35**(4): 225 – 254.
- [6] HEAP M J, BAUD P, MEREDITH P G, et al. Time-dependent brittle creep in Darley Dale sandstone[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2009, **114**(B7): 4288 – 4309.
- [7] MAIN I G. A damage mechanics model for power-law creep and earthquake aftershock and foreshock sequences[J]. Geophysical Journal International, 2000, **142**: 151 – 161.
- [8] 徐卫亚, 杨圣奇, 杨松林. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(I): 试验结果[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 531 – 537. (XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, YANG Song-lin, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen: I experimental results[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4): 531 – 537. (in Chinese))
- [9] 徐卫亚, 杨圣奇, 谢守益. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(II): 模型分析[J]. 岩土力学, 2005, **26**(5): 693 – 698. (XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, XIE Shou-yi, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen: II model analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(5): 693 – 698. (in Chinese))
- [10] 杨圣奇, 徐卫亚, 谢守益, 等. 饱和状态下硬岩三轴流变变形与破裂机制研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(8): 962 – 969. (YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, XIE Shou-yi, et al. Studies on triaxial rheological deformation and failure mechanism of hard rock in saturated state[J]. Chinese Journal of Geological Engineering, 2006, **28**(8): 962 – 969. (in Chinese))
- [11] 闫子舰, 夏才初, 李宏哲, 等. 分级卸荷条件下锦屏大理岩流变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(10): 2153 – 2159. (YAN Zi-jian, XIA Cai-chu, LI Hong-zhe, et al. Study on rheological rules of marble in Jinping hydropower station under condition of step unloading[J]. Chinese

- Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(10): 2153 - 2159. (in Chinese))
- [12] 朱杰兵, 汪斌, 邬爱清. 锦屏水电站绿砂岩三轴卸荷流变试验及非线性损伤蠕变本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(3): 528 - 534. (ZHU Jie-bing, WANG Bin, WU Ai-qing. Study of unloading triaxial rheological tests and its nonlinear damage constitutive model of Jinping hydropower station green sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(3): 528 - 534. (in Chinese))
- [13] 黄达, 杨超, 黄润秋, 等. 分级卸荷量对大理岩三轴卸荷蠕变特性影响规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊 1): 2801 - 2807. (HUANG Da, YANG Chao, HUANG Run-qiu, et al. Experimental research of unloading triaxial rheological characteristics of marble affected by different step unloading values[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S1): 2801 - 2807. (in Chinese))
- [14] FABRE G, PELLET F. Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2006, **6**: 950 - 960.
- [15] ZHAO Y L, ZHANG L Y, WANG W J, et al. Creep behavior of intact and cracked limestone under multi-level loading and unloading cycles[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, **50**(6): 1 - 16.
- [16] PATTON T L, FLETCHER R C. A rheological model for fractured rock[J]. Journal of Structural Geology, 1998, **20**(20): 491 - 502.
- [17] MATSUKI K, WANG E Q, SAKAGUVHI K. Time-dependent closure of a fracture with rough surfaces under constant normal stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**(5): 607 - 619.
- [18] 赵延林, 万文, 王卫军. 类岩石裂纹压剪流变断裂与亚临界扩展实验及破坏机制[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 1050 - 1059. (ZHAO Yan-lin, WAN Wen, WANG Wei-jun, et al. Compressive-shear rheological fracture of rock-like cracks and subcritical crack propagation test and fracture mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 1050 - 1059. (in Chinese))
- [19] 黄达, 黄润秋. 卸荷条件下裂隙岩体变形破坏及裂纹扩展演化的物理模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(3): 502 - 512. (HUANG Da, HUNAG Run-qiu. Physical model test on deformation failure and crack propagation evolvement of fissured rocks under unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(3): 502 - 512. (in Chinese))
- [20] 杨超, 黄达, 黄润秋, 等. 断续双裂隙砂岩三轴卸荷蠕变特性试验及损伤蠕变模型[J]. 煤炭学报, 2016, **41**(9): 2203 - 2211. (YANG Chao, HUANG Da, HUANG Run-qiu, et al. Experimental study on the triaxial unloading creep characteristics of stone with two pre-existing cracks and its damage creep model[J]. Journal of China Coal Society, 2016, **41**(9): 2203 - 2211. (in Chinese))
- [21] 杨超, 冯振华, 王鑫, 等. 多级时效荷载下双裂隙砂岩变形与破裂特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(9): 2092 - 2101. (YANG Chao, FENG Zhen-hua, WANG Xin, et al. Experimental research on deformation and crack coalescence properties of sandstone containing two pre-existing fissures under multistage time-dependent loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(9): 2092 - 2101. (in Chinese))
- [22] 杨超. 硬质裂隙岩体三轴加载及卸荷蠕变特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015. (YANG Chao. Study on the triaxial loading and unloading creep properties of fractured hard rock [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese))
- [23] 潘鹏志, 冯夏庭, 申林方, 等. 裂隙花岗岩各向异性蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(1): 36 - 44. (PAN Peng-zhi, FENG Xia-ting, SHEN Lin-fang, et al. Study of anisotropic creep behavior of fractured granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(1): 36 - 44. (in Chinese))
- [24] YANG S Q, CHENG L. Non-stationary and nonlinear visco-elastic shear creep model for shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, **48**: 1011 - 1020.
- [25] 杨圣奇, 倪红梅. 泥岩黏弹性剪切蠕变模型及参数辨识[J]. 中国矿业大学学报, 2012, **41**(4): 551 - 557. (YANG Sheng-qi, NI Hong-mei. A viscoelastic shear creep model of mudstone: parameter identification[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, **41**(4): 551 - 557. (in Chinese))
- [26] 朱维申, 齐银萍, 郭运华, 等. 锦屏 I 级水电站地下厂房围岩变形破裂的三维损伤流变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(5): 865 - 872. (ZHU Wei-shen, QI Yin-ping, GUO Yun-hua, et al. 3D damage rheological analysis of deformation and fracture of surrounding rocks in Jinping I hydropower station underground powerhouse[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(5):

- 865 – 872. (in Chinese))
- [27] 蒋昱州, 徐卫亚, 王瑞红, 等. 岩石非线性蠕变损伤模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(3): 331 – 335. (JIANG Yu-zhou, XU Wei-ya, WANG Rui-hong, et al. Nonlinear creep damage constitutive model of rock[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2009, 38(3): 331 – 335. (in Chinese))
- [28] 吕爱钟, 丁志坤, 焦春茂, 等. 岩石非定常蠕变模型辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 17 – 21. (LÜ Ai-zhong, DING Zhi-kun, JIAO Chun-mao, et al. Identification of non-stationary creep constitutive models of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 17 – 21. (in Chinese))
- [29] YANG S Q, XU P, LI Y B, et al. Experimental investigation on triaxial mechanical and permeability behavior of sandstone after exposure to different high temperature treatments[J]. Geothermics, 2017, 69: 93 – 109.
- [30] YANG S Q, HU B, RANJITH P, XU P. Multi-step loading creep behavior of red sandstone after thermal treatments and
- a creep damage model[J]. Energies, 2018, 11(1): 212.
- [31] 孙 钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (SUN Jun. Rheological behavior of geomaterials and its engineering applications[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))
- [32] Itasca Consulting Group Inc. Particle flow code[R]. Sudbury: Itasca Consulting Group Inc. 2004.
- [33] 黄彦华, 杨圣奇. 非共面双裂隙红砂岩宏细观力学行为颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8): 1644 – 1653. (HUANG Yan-hua, YANG Sheng-qi. Particle flow simulation of macro-and meso-mechanical behavior of red sandstone containing two pre-existing non-coplanar fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(8): 1644 – 1653. (in Chinese))
- [34] HEEKWANG L, SEOKWON J. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(6): 979 – 999.

《岩土工程学报》第十二届编委会第四次全体会议纪要

《岩土工程学报》第十二届编委会第四次全体会议于2019年4月20日在南京举行, 参加会议的代表为55人, 其中编委代表49人, 编委委托人代表6人。会议由《岩土工程学报》第十二届编委会主任、南京水利科学研究院院长陈生水教授主持, 《岩土工程学报》第十二届编委会副主任汪小刚教授、孔令伟研究员和学报编委会前主任殷宗泽教授出席会议。会上学报编辑部主任明经平向大会汇报了《岩土工程学报》2018年的工作情况, 学报主编蔡正银教授对《岩土工程学报》创刊四十周年活动的情况作了说明。代表们对《岩土工程学报》的工作进行了讨论, 大家畅所欲言, 对学报未来的工作提出了意见和建议。会议认为, 《岩土工程学报》要关注国家建设发展的重要战略部署, 重点和专门报道粤港澳大湾区和沿长江经济带等国家重点建设规划区基础设施建设中涉及的大量岩土工程问题, 特别是沿长江化工区搬迁后的污染土壤修复问题、河道清淤物的处置问题及大量调水工程中的堆渣问题。学报应加强对国家重大工程中的岩土工程技术及国家重大科技成果转化的报

道, 并可考虑增设合适的栏目。学报要继续发挥学术讨论的作用, 进一步培育岩土工程界优良的学术风气。会上投票选举了第23讲黄文熙讲座主讲人, 南京水利科学研究院蔡正银教授和中国地震局兰州地震研究所王兰民研究员得票领先, 当选为第23讲黄文熙讲座主讲人。

本次编委会会议是在第22讲黄文熙讲座暨《岩土工程学报》创刊40周年学术报告会期间召开。第22讲黄文熙讲座暨《岩土工程学报》创刊40周年学术报告会于2019年4月21日在南京水利科学研究院隆重举行, 参加学术报告会的代表600多人。河海大学高玉峰教授作了题为“河谷场地地震波传播解析模型及放大效应”的黄文熙讲座主讲报告, 天津大学蒋明镜教授作了题为“现代土力学研究的新视野——宏微观土力学”的黄文熙讲座主讲报告。另外, 清华大学的张丙印教授、西安理工大学的党发宁教授, 中国地质大学的殷坤龙教授、四川大学的刘恩龙教授和南京水利科学研究院的傅中志高级工程师分别作了特邀学术报告。本次黄文熙讲座学术报告会取得圆满成功。

(本刊编辑部)