

文章编号: 1000-7598 (2012) 12-3529-10

岩石内变量蠕变模型研究

乔丽苹¹, 王者超¹, 李术才¹, 王永刚², 杨文东³, 原小帅¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 甘肃省交通规划勘察设计院有限责任公司, 兰州 730030;

3. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266555)

摘 要: 通过一系列砂岩、页岩和辉绿岩室内蠕变试验, 获得了不同应力和初始应变状态下岩石蠕变特性。通过误差分析讨论了计算蠕变速率时如何选择时间增量。讨论了复杂加、卸载条件下时间相关蠕变模型的局限性, 提出采用不可恢复应变作为内变量来描述复杂条件下岩石蠕变性质, 并据此提出了岩石的内变量蠕变模型。试验数据与模型拟合结果对比表明, 内变量蠕变模型较好地反映了 3 种岩石的蠕变行为。此外, 还初步讨论了模型在岩石率相关性研究中的适用性, 并利用相关试验数据进行了验证。

关 键 词: 岩石力学; 蠕变; 本构模型; 内变量; 不可恢复应变; 时间相关; 率相关

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

An internal-variable creep model for rocks

QIAO Li-ping¹, WANG Zhe-chao¹, LI Shu-cai¹, WANG Yong-gang²,
YANG Wen-dong³, YUAN Xiao-shuai¹

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Gansu Provincial Transportation Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China;

3. College of Transport & Storage and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266555, China)

Abstract: A series of laboratory creep tests have been performed on sandstone, shale and dolerite to investigate the creep behavior of rocks subjected to different stresses and at different initial strains. Error analysis has been performed to study how to select time increment for the calculation of creep rate. The applicability of time-dependent creep model in describing the creep behavior under complex conditions is examined. An internal state variable creep model is proposed, in which the irreversible strain is considered as the internal state variable. The fitting of test data into the model shows that the internal state variable creep model is capable of describing the creep behavior of the three rocks in laboratory tests. A primary study of the applicability of the internal state variable model in describing rate dependent behavior of rocks is performed; and test data in literatures are used to verify the applicability.

Key words: rock mechanics; creep; constitutive model; internal state variable; irreversible strain; time dependent; rate dependent

1 引 言

蠕变是岩石重要的力学性质之一。岩石蠕变性质研究可为评价和控制岩体工程长期稳定性提供理论依据, 具有重要的学术和应用价值^[1-3]。

岩石蠕变性质的研究始于 20 世纪初, Griggs^[4]通过试验发现, 砂岩和粉砂岩等岩石当荷载达到破坏荷载的 12.5%~80%时就会发生蠕变。Ito 等^[5]对花岗岩进行了历时 30 a 的弯曲蠕变试验, 结果表明,

花岗岩呈黏滞流动而没有屈服应力。Okubo 等^[6]研制了刚性流变仪, 获得了岩石完整的蠕变应变-时间关系曲线。Fujii 等^[7]开展了花岗岩和砂岩三轴蠕变试验, 分析了轴向、横向和体积应变蠕变性质, 指出横向应变可作为蠕变试验中判断岩石损伤的指标。Tsai 等^[8]对砂岩进行了加、卸载蠕变试验, 得到黏塑性势函数与塑性势函数类似。在国内, 陈宗基等^[9]首次对宜昌砂岩进行了扭转蠕变试验, 研究了岩石的封闭应力和蠕变扩容现象, 指出蠕变和封

收稿日期: 2011-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41202205); 中国博士后科学基金特别资助项目 (No. 2012T50615); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 20110131120075); 岩土力学与工程国家重点实验室开放课题 (No. Z011004)。

第一作者简介: 乔丽苹, 女, 1982 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土材料化学损伤特性方面的研究工作。E-mail: qiaolp@sdu.edu.cn

闭应力是岩石性状中的两个基本因素。孙钧等^[1]开展了大量岩土材料流变性质研究,从测试方法、本构模型、参数辨识和工程应用方面取得了大量成果。徐卫亚等^[10]提出了岩石非线性黏弹塑性流变模型。杨春和等^[11]针对能源地下储存问题中的层状盐岩流变问题开展了大量试验和理论研究。陈卫忠等^[12]开展了盐岩蠕变损伤机制研究,提出了盐岩非线性蠕变损伤本构模型。上述研究极大地提高了人们对岩石蠕变性质的认识,促进了相关工程实践活动的开展。

在岩石蠕变性质的研究中,人们普遍采用与时间相关的蠕变速率描述岩石的蠕变行为^[4-12]。具体到模型,体现在采用时间相关模型描述岩石的蠕变行为。在该类模型中,岩石的蠕变速率通常表达为一个与时间相关的函数。然而研究发现,该类模型的参数与岩石初始状态密切相关:岩石蠕变初始状态不同,模型参数也不同。而另一方面,工程实际中岩体往往要经历复杂的加、卸载过程。在此过程中,岩体要经历不同应力水平、不同应变状态下的蠕变过程^[1]。在此条件下,各个蠕变过程的岩石的内部微细观结构不同,继续采用时间相关的蠕变模型描述岩石的蠕变行为就遇到了困难。

连续介质力学内变量理论是一种基于材料内部结构变量(即内变量)描述材料性质的一种理论方法。Rice^[13]在研究金属微观结构变化与宏观塑性关系时,提出了连续介质力学内变量理论。从此,内变量理论在材料性质研究中逐步得到应用。近些年来,内变量理论开始应用于岩土材料本构模型研究中^[14-17]。本文应用内变量理论,提出了岩石的内变量蠕变模型。依据内变量理论作为岩石力学性质的一个重要方面,岩石的蠕变性质就不但取决于岩石所受外部荷载情况,而且与材料的内变量演化情况有关。在复杂应力、应变历史条件下,采用内变量描述岩石的蠕变性质不失为一种有益的尝试。

本文中,通过砂岩、页岩和辉绿岩的室内蠕变试验,研究了不同应力、应变状态下岩石的蠕变性质,讨论了蠕变速率-时间关系与蠕变速率-不可恢复应变关系,提出了岩石的内变量蠕变模型,并采用试验数据验证了模型的合理性。此外,还介绍了蠕变速率计算以及岩石蠕变与率相关性之间的联系。

2 岩石蠕变试验

为了研究不同应力和初始应变状态下岩石的蠕变性质,本文中开展了砂岩、页岩和辉绿岩 3 种岩石的室内蠕变试验。表 1 为蠕变试验详情表。

表 1 岩石蠕变试验情况表
Table 1 Lists of triaxial creep tests on oil sands

岩样	围压 / MPa	偏应力 / MPa	持续时间 / h
砂岩	0	12~36	70~120
页岩	5	5~66	65~120
辉绿岩	15	95~195	60~140

2.1 砂岩单轴蠕变试验

试验所用岩样取自重庆市地下侏罗纪沙溪庙组砂岩,接触孔隙式胶结细砂粒结构。主要矿物成分为石英、长石和绿泥石。常规单轴试验^[18]结果显示该砂岩弹性模量为 11.9 GPa,单轴抗压强度为 62 MPa,峰值强度对应轴向应变为 0.57%。蠕变试验采用 TAJW-2000 三轴蠕变试验机完成。为避免试验过程中温度影响,蠕变过程中室温控制在 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。

图 1 为砂岩单轴蠕变试验应力-应变曲线。试验过程中,在轴向应力为 12、20、28、36 MPa 作用下,获得了 4 个蠕变阶段。图 2 为 4 个蠕变阶段中轴向应变-时间关系曲线。轴向应变随时间增加而增加。

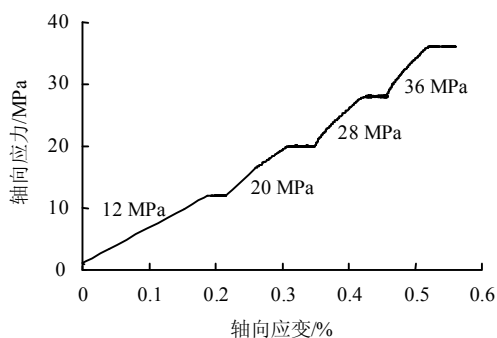


图 1 砂岩轴向应力-轴向应变关系

Fig.1 Relationship between axial stress and axial strain

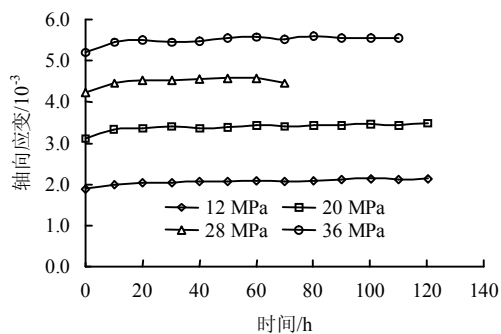


图 2 砂岩轴向应变-时间关系

Fig.2 Relations of axial strain versus time

2.2 页岩三轴蠕变试验

试验所用页岩取自贵广铁路天平山隧道围岩。

试验采用自然含水率试样进行。常规三轴试验^[19]测得弹性模量为 65 GPa, 黏聚力为 4.4 MPa, 内摩擦角为 36.7° 。蠕变试验采用全自动三轴伺服流变仪进行。在围压为 5 MPa 下, 得到了偏应力为 5、15、25、35、46、56、66 MPa 偏应力下的 7 个蠕变阶段。图 3 为试验获得的偏应力-轴向应变关系曲线。图 4 为各个蠕变阶段的轴向应变-时间关系曲线。轴向应变随时间增加而增加。

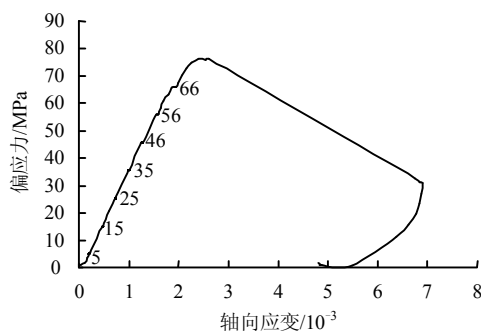


图 3 页岩偏应力-轴向应变关系

Fig.3 Relations of deviatoric stress versus axial strain

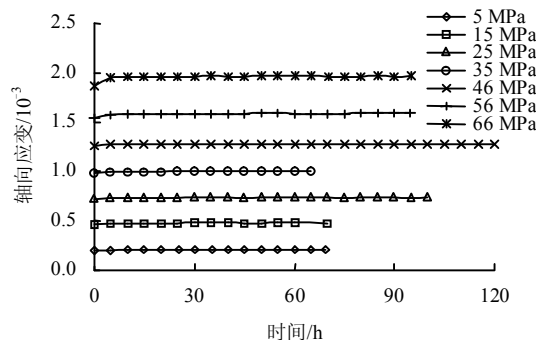


图 4 页岩轴向应变-时间关系曲线

Fig.4 Relations of axial strain versus time

2.3 辉绿岩三轴蠕变试验

试验所用辉绿岩取自大岗山水电站坝基, 矿物成分主要为辉石和基性斜长石, 矿物成分强度高、颗粒均匀, 胶结良好。干密度为 2.95 g/cm^3 。试验前对试样进行了饱和。根据常规三轴试验^[20]结果, 该辉绿岩弹性模量为 90 GPa, 凝聚力为 30.9 MPa, 内摩擦角为 49° 。蠕变试验采用全自动单轴伺服流变仪。研究共开展了围压分别为 0、5、10、15、20 MPa 共 5 个试验。本文选取围压为 15 MPa 的蠕变试验进行分析。

图 5 为试验获得的偏应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) - 轴向应变关系曲线, 图 6 为体积应变-轴向应变关系曲线。试验中, 辉绿岩表现出应变软化现象, 围压为 15 MPa 条件下, 峰值强度为 195 MPa, 残余强度

为 113 MPa。试验过程中试样体积先剪缩, 后剪胀。保持偏应力为 80、100、120、140、160、170 MPa, 允许试样蠕变。在偏应力为 80、100 MPa 下, 试样蠕变变形极小, 采用位移传感器无法测量其值大小, 其他偏应力下轴向应变-时间关系曲线如图 7 所示。轴向应变随时间增加而增加。

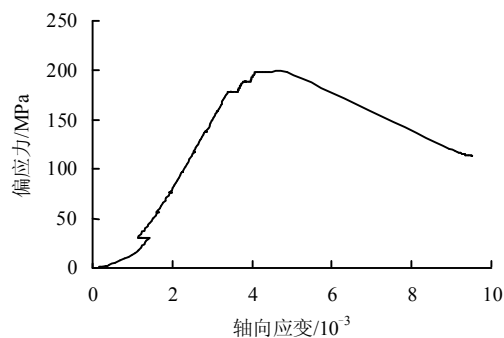


图 5 辉绿岩偏应力-轴向应变关系

Fig.5 Relations of deviatoric stress versus axial strain

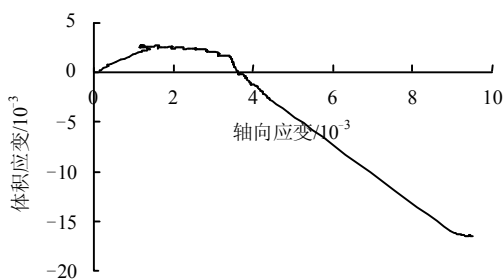


图 6 辉绿岩体积应变-轴向应变关系

Fig.6 Relations of volumetric strain versus axial strain

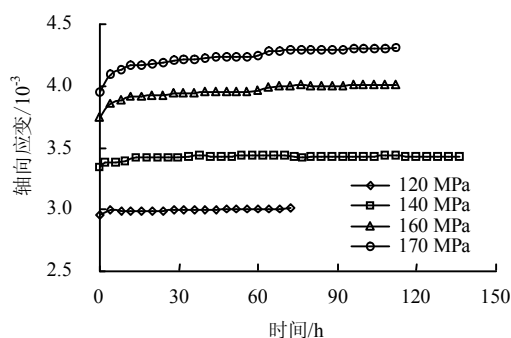


图 7 辉绿岩偏应力为 120~170 MPa 下轴向应变-时间关系曲线

Fig.7 Relations of axial strain versus time at the deviatoric stresses from 120 to 170 MPa

3 蠕变速率计算

试验中, 试样的蠕变速率是由应变增量除以时间增量得到。理论上, 时间增量越小, 蠕变速率越准确。但实际操作中存在着测量误差, 这时时间增量需要通过误差分析来选择。

图 8 为试样蠕变过程中应变的期望值与观测值对比情况。图中中间的粗实线为应变期望值, 假设测量误差为 δ , 且不随时间发生变化, 则观测值位于两条细实线之内。对应于某一时间段的起点 t_1 和终点 t_2 , 试样应变的观测值与期望值存在以下关系:

$$\varepsilon_1^O = \varepsilon_1^E \pm \delta \quad (1)$$

$$\varepsilon_2^O = \varepsilon_2^E \pm \delta \quad (2)$$

式中: ε_1^O 、 ε_2^O 为时刻 t_1 和 t_2 对应的应变观测值; ε_1^E 、 ε_2^E 为时刻 t_1 和 t_2 对应的应变期望值。由上述两式, 可以得到蠕变速率观测值:

$$\dot{\varepsilon}^O = \frac{\varepsilon_2^O - \varepsilon_1^O}{(t_2 - t_1)} = \dot{\varepsilon}^E \pm \frac{(\delta \mp \delta)}{(t_2 - t_1)} \quad (3)$$

式中: $\dot{\varepsilon}^E$ 为蠕变速率期望值。从式 (3) 看, 时间增量越大, 蠕变速率的观测值越趋近于期望值。

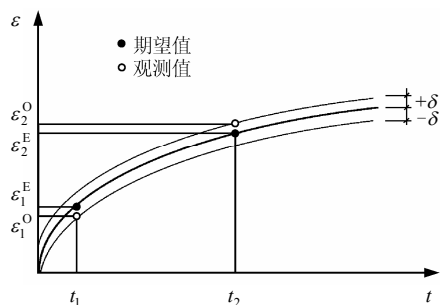


图 8 蠕变试验中试样应变-时间关系的观测值和期望值
Fig.8 Observation and expectation values of strain versus time of the specimens in creep tests

然而, 当时间增量超过一定值时, 时间增量的增大并不明显地降低蠕变速率计算误差, 可认为此时取得了一个较为合适的时间增量。图 9 为砂岩单轴蠕变试验中轴向应力为 20 MPa 蠕变阶段的蠕变速率-时间关系曲线。时间增量分别选用 10、20、30 h 得到的蠕变速率-时间关系。

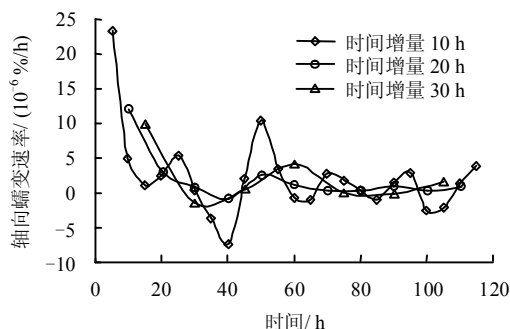


图 9 不同时间增量下砂岩蠕变速率-时间关系曲线
Fig.9 Relations of creep rate versus time using different time increments

从图 9 中看, 时间增量取为 20 h 时可减小曲线的波动, 而取为 30 h 时曲线与 20 h 时变化不明显, 故取 20 h 为计算砂岩蠕变速率时较为合理的时间增量。

如上述方法, 本研究中, 分别采用 20、24 h 作为时间增量计算页岩和辉绿岩的蠕变速率, 图 10~12 分别为砂岩、页岩和辉绿岩蠕变速率-时间曲线。

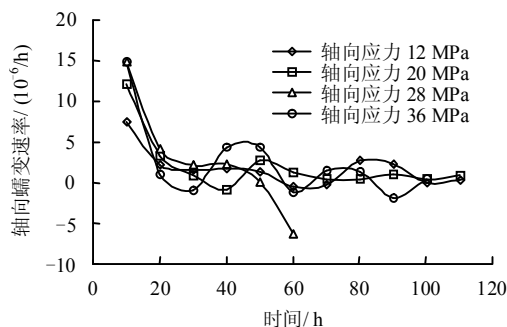


图 10 砂岩轴向蠕变速率-时间关系
Fig.10 Relations of creep rate versus time of sandstone

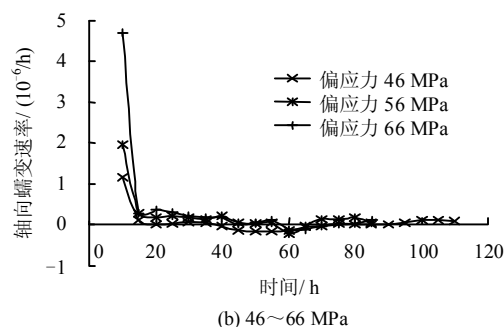
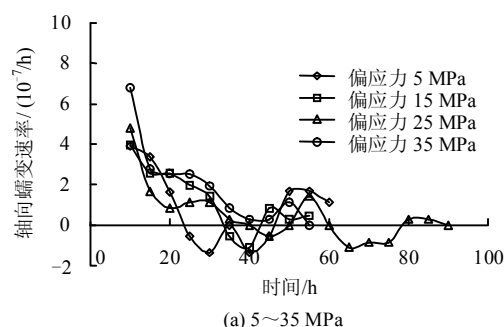


图 11 页岩轴向蠕变速率-时间关系
Fig.11 Relations of creep rate versus time of shale

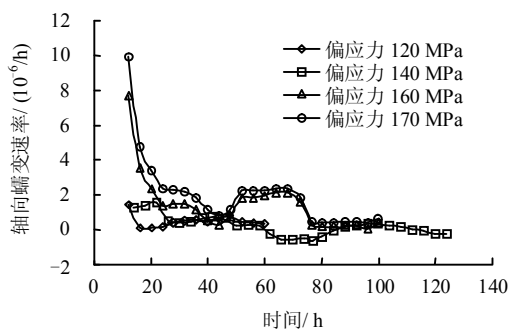


图 12 辉绿岩轴向蠕变速率-时间关系
Fig.12 Relations of creep rate versus time of dolerite

从图中可以看出, 应力水平越高, 岩石蠕变速率也越高, 并且, 进入稳定蠕变阶段所需时间也越长。

4 时间相关蠕变模型

在岩石蠕变研究中, 常常使用与时间相关的蠕变模型来描述岩石的蠕变性质。例如, 常见的幂函数时间硬化蠕变模型表示为

$$\dot{\varepsilon}^{\text{cr}} = A(\sigma)^n (t)^m \quad (4)$$

式中: $\dot{\varepsilon}^{\text{cr}}$ 为蠕变速率; σ 为应力; t 为时间; A 、 n 和 m 分别为模型参数。积分上式, 可以得到蠕变应变表达式如下:

$$\varepsilon^{\text{cr}} = \frac{A}{m+1} (\sigma)^n (t)^{m+1} \quad (5)$$

由于岩石蠕变过程中, 蠕变变形随时间增加, 因此, $m+1 > 0$, 即 $m > -1$ 。

图 13(a)所示为采用 3 种不同加载路径获得的岩石在同一应力水平下的 3 个蠕变过程, 图 13(b)为 3 种不同加载路径下, 最终在相同应力水平下进行蠕变的蠕变速率-时间关系, 其 A 、 B 、 C 代表相同应力水平下, 3 种不同加载路径所获得的岩石 3 种不同状态。如果采用上述模型, 可以发现采用不同加载路径得到的蠕变模型参数并不相同。换句话说, 即使应力状态相同, 加载路径不同, 蠕变行为不同 (参数不同)。这与材料本构模型的基本要求不符。通过试验数据可以看出, 同一偏应力水平下, 蠕变速率不只与时间有关, 还与试样本身的应变有关。

Yin 等^[21]提出采用等效时间概念来解决上述问题。所谓等效时间, 即将不同加、卸载过程产生的不可恢复塑性应变转化为时间。图 14 为采用等效时间 t_e 来描述图 13 中 3 个不同加、卸载过程得到的蠕变过程。采用等效时间, 不同加、卸载获得的蠕变行为可以采用一个表达式表述。考虑到工程实际中岩体可能受到反复加、卸载的作用, 将各个蠕变过程中时间转换为等效时间是十分复杂的。因此, 需要对如何描述复杂条件下岩体蠕变行为进行进一步分析。

若采用式 (4) 拟合图 11 曲线, 可以得到模型参数如下: $A = 2.57 \times 10^{-2}$, $n = 0.533$, $m = -2.041$ 。拟合所得 m 值不满足 $m > -1$ 条件, 这在另一方面说明了时间硬化蠕变模型的局限性。

5 内变量蠕变模型

5.1 内变量的选择

为了描述岩石在常值应力或变化荷载作用下的

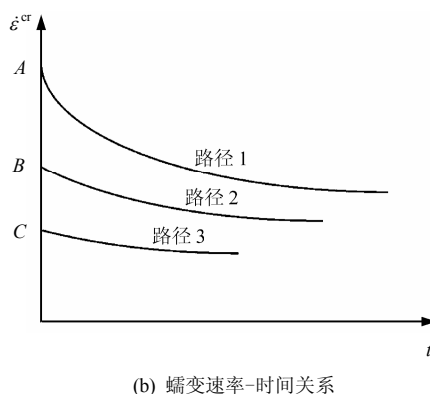
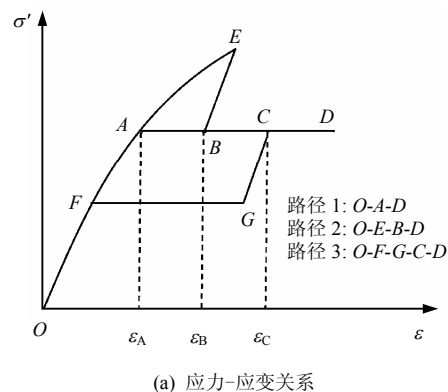


图 13 不同加载路径下应力-应变关系及蠕变速度-时间关系曲线

Fig.13 Relations of effective stress-strain and creep rate-time of soil in tests performed with different load paths

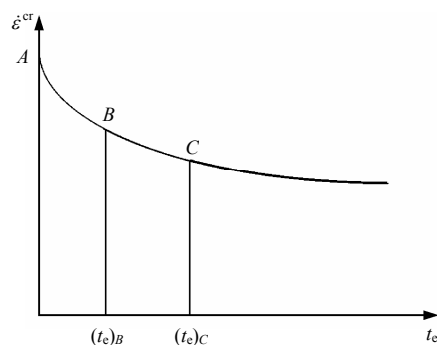


图 14 蠕变速率-等效时间关系曲线
Fig.14 Strain rate versus equivalent time relation of soil

变形过程, 本文引用塑性理论中的应变路径概念。应变路径是受力后试样在黏塑性应变空间内的变形轨迹, 在塑性理论中常常用来描述材料的加载历史^[13]。由于塑性势和蠕变势相同^[8], 应变路径可以反映岩石对所施加外载的内部响应, 或者从微观角度上讲, 可以反映试样微观结构的演化。这是因为试样的形状变化 (由黏塑剪应变描述) 和体积变化 (由黏塑体应变描述) 是试样微观结构演化的宏观反映。换句话说, 不管试样是在常值荷载下变形, 还是在变荷载下变形, 抑或两者兼有, 应变路径在宏观上反映了微观结构演化。

图 15(a)表示岩石典型的偏应力-不可恢复剪应变关系, 图 15(b)表示不可恢复体应变-不可恢复剪应变关系。三轴试验中, 不可恢复剪应变为 $\varepsilon_q^{vp} = \varepsilon_1^{vp} - \varepsilon_3^{vp}$, 不可恢复体积应变定义为 $\varepsilon_v^{vp} = \varepsilon_1^{vp} + 2\varepsilon_3^{vp}$ 。在图 15(a)中, 有两条路径可以使该试样从状态 A 到状态 C: 一种是通过蠕变试验; 而另一种是通过先加载至 B, 而后卸载至 C。因为土的蠕变和塑性变形具有相同的势函数, 两条路径在黏塑性应变空间内是重合的, 如图 15(b)所示。因此, 在改变试样的形状和体积大小上, 塑性变形和蠕变过程是等效的。

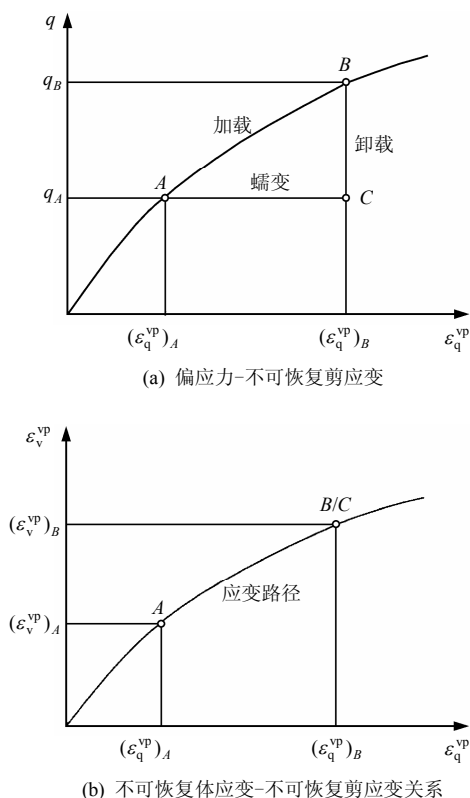


图 15 等效变形过程
Fig.15 Equivalent deformation processes

从岩石的微观和宏观结构关系分析, 岩石的应变是岩石微细观结构的宏观反映。岩石变形过程中, 岩石微细观结构变化信息在宏观上表现为试样体积和形状的变化^[2, 8]。而岩石的蠕变性质由岩石当前的微细观结构决定^[2]。因此, 岩石的蠕变速率与不可恢复应变具有内在联系。与此不同, 时间对蠕变行为的影响则有赖于加载历史, 因为加、卸载循环中产生的塑性变形同样改变了岩石的微细观结构, 继而改变蠕变行为^[20]。图 16 为图 13 所示不同加、卸载过程下岩石的蠕变速率-不可恢复应变间关系, 从图中可以看出岩石的蠕变速率与不可恢复应变之间存在一一对应关系。

图 17~19 分别为砂岩、页岩和辉绿岩各蠕变阶段轴向蠕变速率-不可恢复轴向应变之间的关系。

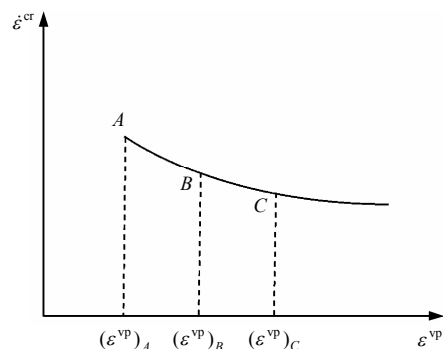


图 16 岩石蠕变速率与不可恢复应变一一对应关系
Fig.16 Unique relation between strain rate and inelastic strain of rock experienced different load-unload processes

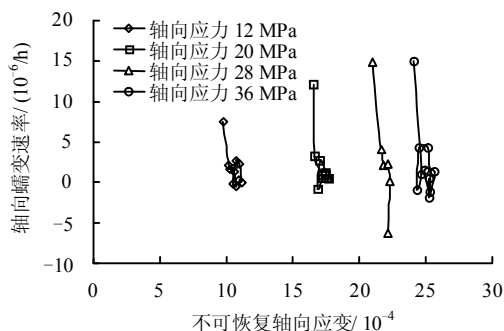


图 17 砂岩轴向蠕变速率与不可恢复轴向应变关系
Fig.17 Relations of axial creep versus irreversible axial strain of sandstone

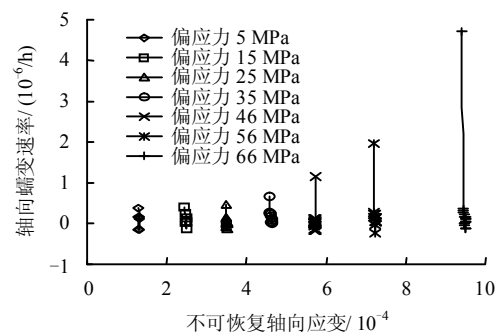


图 18 页岩轴向蠕变速率与不可恢复轴向应变关系
Fig.18 Relations of axial creep versus irreversible axial strain of shale

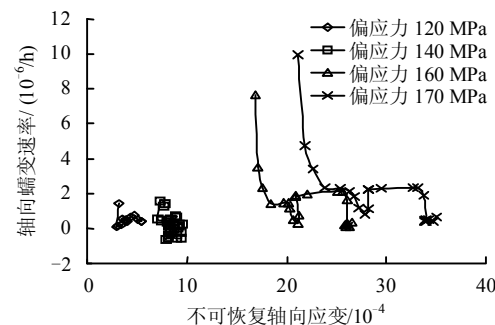


图 19 辉绿岩轴向蠕变速率与不可恢复轴向应变关系
Fig.19 Relations of axial creep versus irreversible axial strain of dolerite

从图中看, 3 种岩石蠕变过程中轴向蠕变速率与不可恢复轴向应变之间存在一一对应关系, 且可推测, 在相同不可恢复应变条件下, 偏应力水平越高, 蠕变速率越高。

5.2 内变量蠕变模型

根据上文讨论, 岩石的蠕变速率依赖于施加的应力水平和岩石的不可恢复应变。在相同不可恢复应变条件下, 施加的应力水平越高, 岩石的蠕变速率越高; 在施加相同应力条件下, 岩石的不可恢复应变越小, 岩石的蠕变速率越高。

为综合考虑平均主应力和偏应力对蠕变性质的影响, 在蠕变速率表达式中采用了等效应力概念^[22]。图 20 为等效应力概念示意图。在等效应力线上, 材料在不同的平均主应力和偏应力组合作用相同时间条件下蠕变速率相同。在三轴压缩蠕变试验中, 等效应力定义如下:

$$\bar{\sigma}^{\text{cr}} = \frac{q - p \tan \beta}{1 - \frac{1}{3} \tan \beta} \quad (6)$$

式中: $\bar{\sigma}^{\text{cr}}$ 为等效蠕变应力; p 、 q 分别为有效平均主应力和偏应力; β 为 $q-p$ 空间内摩擦角。图 20 中还提供了蠕变下限应力包络曲线和强度包络曲线。其中, 蠕变下限应力包络线用以描述低应力水平下岩石无明显蠕变变形的性质; 强度包络曲线用以描述岩石的峰值强度特征。

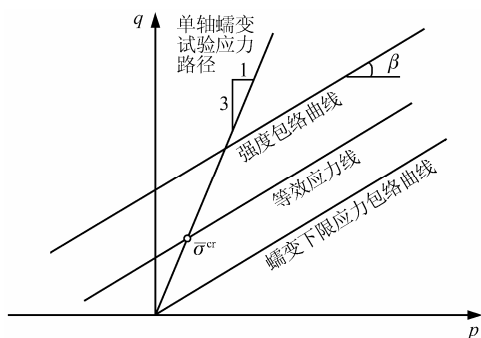


图 20 等效应力概念示意图
Fig.20 Concept of equivalent stress

采用等效应力概念, 土的蠕变速率可以用下式表达:

$$\dot{\bar{\epsilon}}^{\text{cr}} = A_a (\bar{\sigma}^{\text{cr}})^{n_a} (\bar{\epsilon}^{\text{vp}})^{m_a} \quad (7)$$

式中: $\dot{\bar{\epsilon}}^{\text{cr}}$ 为等效蠕变速率; $\bar{\epsilon}^{\text{vp}}$ 为等效不可恢复应变; A_a 、 n_a 和 m_a 均为参数。在三轴压缩蠕变试验中, 等效应变定义如下:

$$\bar{\epsilon}^{\text{cr}} = \epsilon_1^{\text{cr}} \quad (8)$$

$$\bar{\epsilon}^{\text{vp}} = \epsilon_1^{\text{vp}} \quad (9)$$

式中: ϵ_1^{cr} 和 ϵ_1^{vp} 分别为最大蠕变应变和不可恢复应变。

为了验证本文提出的蠕变模型, 对试样在峰前的各蠕变阶段进行了数据拟合, 得到的蠕变参数如表 2 所示。图 21 为砂岩蠕变试验数据与拟合结果对比, 图 22 为页岩蠕变试验数据与拟合结果比较, 而图 23 为辉绿岩对比曲线。从图中不难看出, 本文所提模型可以较好地反映岩石的峰前蠕变行为。

表 2 蠕变参数表
Table 2 Creep parameters

岩样	A_a	n_a	m_a
砂岩	1.600×10^{-22}	7.120	-8.676
页岩	1.572×10^{-24}	1.898	-4.166
辉绿岩	7.588×10^{-22}	6.578	-1.236

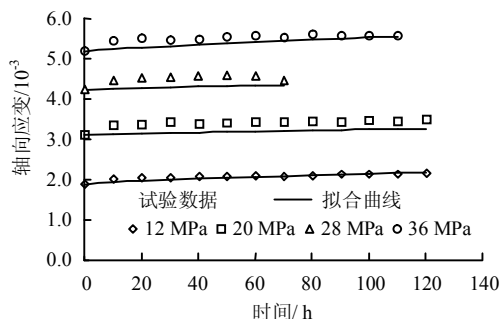


图 21 砂岩蠕变试验数据与拟合曲线对比
Fig.21 Comparison between test and fitting curves of sandstone

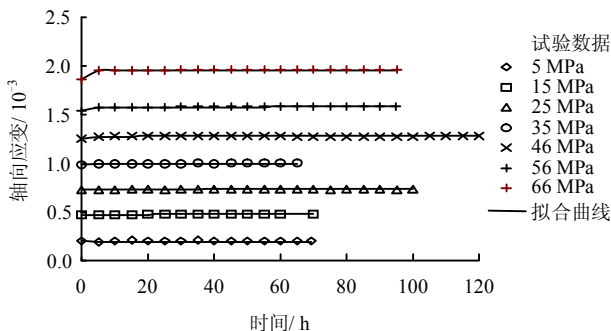


图 22 页岩蠕变试验曲线与拟合曲线对比
Fig.22 Comparison between test and fitting curves of shale

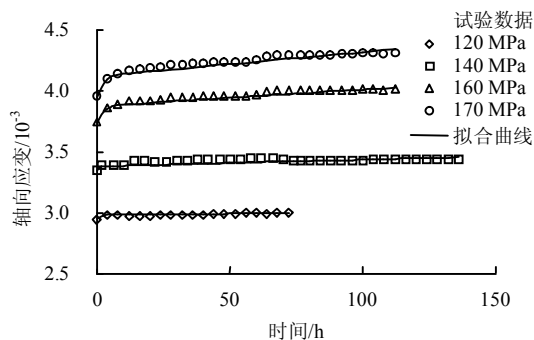


图 23 辉绿岩蠕变试验曲线与拟合曲线对比
Fig.23 Comparison between test and fitting curves of dolerite

需要说明的是,在岩石蠕变过程中,时间与不可恢复应变并不是独立变量,两者之间可以转化。由于塑性应变与时间无关,所以: $\dot{\varepsilon}_1^{\text{vp}} = \dot{\varepsilon}_1^{\text{cr}}$, 于是式 (7) 可写为

$$\dot{\varepsilon}_1^{\text{vp}} = A_a (\bar{\sigma}^{\text{cr}})^{n_a} (\varepsilon_1^{\text{vp}})^{m_a} \quad (10)$$

式 (10) 对时间积分有

$$\varepsilon_1^{\text{vp}} = {}^{1-m_a}\sqrt[1-m_a]{(1-m_a)A_a(\bar{\sigma}^{\text{cr}})^{n_a}(t)} + \varepsilon_{01}^{\text{vp}} \quad (11)$$

式中: $\varepsilon_{01}^{\text{vp}}$ 为蠕变初始状态下土的最大不可恢复应变。式 (11) 对时间求导可得传统幂函数时间硬化蠕变模型表达式:

$$\dot{\varepsilon}_1^{\text{cr}} = \frac{1}{1-m_a} {}^{1-m_a}\sqrt[1-m_a]{(1-m_a)A_a(\bar{\sigma}^{\text{cr}})^{n_a}(t)} \quad (12)$$

6 蠕变与率相关性质

时间相关性质是岩石的重要性质之一。岩石常见的时间相关性质包括:蠕变、松弛、长期强度、弹性后效和滞后效应、率相关性质。前 4 种性质统称岩石的流变特性,而率相关性质是指岩石的性质与加载速率相关。岩石的率相关特性和流变性都反映了岩石的黏性特征,因此,两者是相互联系的。对岩石工程来讲,加载速率是一个变化幅度较大的参数,岩爆发生时岩石卸载速率为每秒几分之一,而对已稳定的隧道围岩来讲,其变形速率每年不足 $0.1 \text{ mm}^{[23]}$ 。因此,岩石的率相关特性一直是岩石力学研究的重要内容。

在岩石的率相关特性研究方向上,李永盛^[23]开展了加载速率对红砂岩力学效应的试验研究。杨仕教等^[24]开展了加载速率对石灰岩力学效应影响的试验研究。研究发现,随着加载应变率的增大,岩石的峰值强度显著提高。本文研究中,通过岩石蠕变试验,获得了岩石的应变率-应力-应变之间关系,即式 (7)。整理式 (7),可以得到应力与应变和应变率之间的关系:

$$\bar{\sigma}^{\text{cr}} = A_a^{-\frac{1}{n_a}} (\bar{\varepsilon}^{\text{vp}})^{-\frac{m_a}{n_a}} (\dot{\bar{\varepsilon}})^{\frac{1}{n_a}} \quad (13)$$

式中: $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 为等效应变率。在单轴压缩条件下,有

$$\sigma_v = A_a^{-\frac{1}{n_a}} (\varepsilon_v^{\text{vp}})^{-\frac{m_a}{n_a}} (\dot{\varepsilon}_v)^{\frac{1}{n_a}} \quad (14)$$

式中: σ_v 为轴向压力; ε_v 为轴向应变率; $\varepsilon_v^{\text{vp}}$ 为不可恢复应变。从式 (14) 可以得到:单轴压缩试验中,若峰值对应不可恢复应变为常数,则峰值强度与应变率成幂函数关系。

表 3 为相关文献中岩石单轴压缩试验数据表。对于砂岩,在加载应变率从 $2.43 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 上升至 $4.38 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时,峰值强度从 26.42 MPa 上升至 31.50 MPa;对于石灰岩,在加载应变率从 $5.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 上升至 $5.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时,峰值强度从 86.96 MPa 上升至 116.88 MPa,但峰值强度对应应变变化不明显。图 24 为半对数空间内试样的峰值强度-应变率关系曲线。峰值强度与应变率的对数呈线性关系,说明本文提出的内变量蠕变模型不仅可以描述岩石的蠕变性质,还可用于描述岩石的率相关特性。此外,通过岩石率相关性质试验可以获得蠕变参数。对比式 (14) 和图 24 中拟合曲线表达式,可以推算砂岩和石灰岩蠕变参数 n_a 分别为 29 和 8。

表 3 岩石单轴压缩试验数据表
Table 3 Uniaxial compression test data

岩样	应变率 / s^{-1}	峰值强度 /MPa	峰值应变 /%
砂岩 ^[23]	$2.43 \times 10^{-6} \sim 4.38 \times 10^{-3}$	26.42~31.50	1.35~1.54
石灰岩 ^[24]	$5.00 \times 10^{-6} \sim 5.00 \times 10^{-5}$	86.96~116.88	0.26~0.28

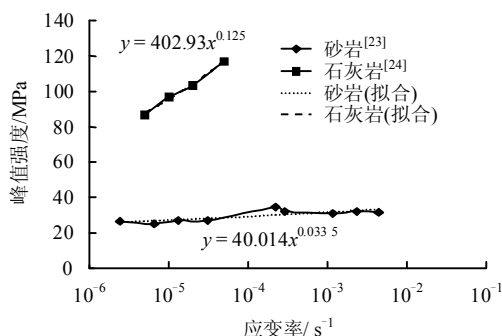


图 24 砂岩和石灰岩峰值强度-应变率关系
Fig.24 Relations of peak strength versus strain rate for sandstone and limestone

7 结 论

(1) 时间相关蠕变模型不适于描述复杂加、卸载条件下岩石蠕变行为,但采用不可恢复应变作为内变量的蠕变模型适用于描述复杂条件下岩石蠕变行为。

(2) 砂岩、页岩和辉绿岩蠕变试验结果表明,内变量蠕变模型能较好地反映 3 种岩石的蠕变行为。

(3) 由于测量系统存在误差,蠕变速率计算中时间增量的选择需通过误差分析来选择。

(4) 本文提出的内变量蠕变模型反映了岩石的应力-应变-应变率的一般关系,可用于描述岩石的率相关特性。

岩石的蠕变性质与岩石的岩性、应力、应变状态和加载速率等因素均有密切关系。到目前为止, 本文模型只是在中、低围压三轴蠕变试验中得到了验证。因此, 该模型是否适用于其他情况则有待于进一步验证。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [3] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081—1106.
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1081—1106.
- [4] GRIGGS D. Creep of rocks[J]. **Journal of Geology**, 1939, 47(3): 225—251.
- [5] ITO H, SSSAJIMA S. A ten year creep experiment on small rock specimens[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1987, 24(2): 113—121.
- [6] OKUBO S, NISHIMATSU Y, FUKUI K. Complete creep curves under uniaxial compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1991, 28(1): 77—82.
- [7] FUJII Y, KIYAMA T, ISHIJIMA Y, et al Circumferential strain behavior during creep tests of brittle rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(3): 323—337.
- [8] TSAI L S, HSIEH Y M, WENG M C, et al. Time-dependent deformation behavior of weak sandstones[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(2): 144—154.
- [9] 陈宗基, 康文法. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(4): 299—312.
TAN Tjong-kie, KANG Wen-fa. On the locked in stress, creep and dilatation of rocks, and the constitutive equations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1991, 10(4): 299—312.
- [10] 徐卫亚, 杨圣奇, 褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 433—447.
XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, CHU Wei-jiang. Nonlinear viscoelasto-plastic rheological model (Hohai model) of rock and its engineering application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(3): 433—447.
- [11] 杨春和, 李银平, 陈峰. 层状盐岩力学理论与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] 陈卫忠, 王者超, 伍国军, 等. 盐岩非线性蠕变本构模型及其工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 467—472.
CHEN Wei-zhong, WANG Zhe-chao, WU Guo-jun, et al. Nonlinear creep damage constitutive model of rock salt and its application to engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(3): 467—472.
- [13] RICE J R. Inelastic constitutive relations for solids: an internal-variable theory and its application to metal plasticity[J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 1971, 19(6): 433—455.
- [14] COLLINS I F, HOULSBY G T. Application of thermo-mechanical principles to the modelling of geotechnical materials[J]. **Proceedings of Royal Society of London, Series A**, 1997, 453: 1975—2001.
- [15] 黄茂松, 钟辉虹, 李永盛. 天然状态结构性软黏土的界面弹塑性模型[J]. 水利学报, 2003, 34(12): 47—52.
HUANG Mao-song, ZHONG Hui-hong, LI Yong-sheng. Elastoplastic boundary surface model for natural soft clay with structural damage[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, 34(12): 47—52.
- [16] 陈敬虞, 龚晓南, 邓亚虹. 基于内变量理论的岩土材料本构关系研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2008, 35(3): 355—360.
CHEN Jing-yu, GONG Xiao-nan, DENG Ya-hong. Research on the constitutive relation of geomaterials based on the theory of internal variable[J]. **Journal of Zhejiang University (Science Edition)**, 2008, 35(3): 335—360.