

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.04.027

炭质板岩三轴压缩蠕变特性及其本构模型

王永刚^{1,2,3}, 丁文其^{1,2}, 王者超⁴, 宗智⁴

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030; 4. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要: 采集兰渝铁路木寨岭隧道炭质板岩制备试样,开展了三轴蠕变试验,研究了不同层理面与轴向荷载夹角下的试样蠕变特性. 根据试验结果提出了岩石横观各向同性蠕变本构模型,由于炭质板岩性质的方向性,其蠕变势函数与常规势函数相比需要更多的参数. 此外,结合试验数据开展了蠕变参数反分析研究,可以减少蠕变试验数目,在工程应用中具有一定优势. 研究结果为了解岩石横观各向同性和制定相关地层支护方案提供了科学依据.

关 键 词: 炭质板岩;横观各向同性;蠕变性质;蠕变模型;参数反分析;层理面

中图分类号: TU 45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)04-0586-05

Creep Characteristic of Carbonaceous Slate and Its Constitutive Model Under Triaxial Compression

WANG Yong-gang^{1,2,3}, DING Wen-qi^{1,2}, WANG Zhe-chao⁴, ZONG Zhi⁴

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co. Ltd., Lanzhou 730030, China; 4. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China. Corresponding author: WANG Zhe-chao, E-mail: wanz@sdu.edu.cn)

Abstract: Triaxial compression creep tests were performed on carbonaceous slate samples obtained from Muzhailing tunnel of Lanzhou-Chongqing railway in order to understand the creep characteristics of carbonaceous slate with different angle between bedding planes and axial load. Based on the test results, a creep model was proposed to describe the transversely isotropic creep behavior of the carbonaceous slate, which needs more parameters in the creep potential function to describe the transversely isotropic creep behavior than in the conventional potential function. A method for the determination of creep parameters was developed using back analysis, which is helpful in reducing the number of creep tests needed to determine the creep parameters and is applicable in practice. This study contributes to the understanding of the transversely isotropic behavior of rocks and to the design of the lining system in the transversely isotropic stratum.

Key words: carbonaceous slate; transverse isotropy; creep behavior; creep model; back analysis; bedding plane

炭质板岩作为一种典型的软岩,其结构呈层、片状,胶结差、强度低,遇水易软化,流变属性明显,且流变下限应力值较低. 在高(极高)应力条件下,地下工程开挖和初期支护形成的低围压、高应力差环境使围岩及支护结构的稳定性极差,突

出表现为挤压流变破坏,使得二次衬砌的长期稳定性及耐久性不断劣化,直接影响其服役性能^[1-5]. 因此,研究炭质板岩的横观各向同性蠕变特性及破坏机制,对工程设计、施工及运营维护具有重要的现实意义.

收稿日期: 2015-12-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2012AA112502); 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB046905); 国家自然科学基金青年基金资助项目(41202205, 51309145).

作者简介: 王永刚(1979-),男,山东诸城人,同济大学博士研究生; 丁文其(1969-),男,江苏苏州人,同济大学教授,博士生导师.

岩石蠕变性质研究成果丰富.孙钧院士^[6]系统地综述了国内外岩土材料蠕变性质的研究成果.Wang等^[7]通过三轴压缩试验提出了应力和应变蠕变模型.岩石蠕变本构模型是岩石蠕变特性研究的核心内容.目前常用的蠕变模型可分为:经验模型^[8]、元件模型^[9]和屈服面模型.屈服面流变模型研究弹塑性理论的三要素随时间的变化规律,该类模型结合流变机制的研究,通过寻求和建立与经典弹塑性理论之间的联系解释流变规律,是真正意义上的三维流变本构模型^[10-13].

因为炭质板岩、炭质页岩等层片状软岩层理发育,研究表明岩体层理面使岩体在力学特性及变形特征等方面表现出各向异性,层理面对层状岩体的力学特性有显著影响^[14],而目前针对不同层理面方向炭质板岩的蠕变特性及其本构模型研究成果较少,因此,研究层理岩体的横观各向同性蠕变特性及其本构模型具有重要的理论和应用价值,可为解决工程实际问题提供参考.

1 试验方法

1.1 试验设备及试样制备

本文三轴常规压缩和三轴蠕变试验采用RLW-500型微机控制三轴蠕变试验机.采集兰渝铁路木寨岭隧道的炭质板岩岩样制作试件.制备后的试件如图1所示.



图1 炭质板岩试样
Fig. 1 Specimens of carbonaceous slate

1.2 试验方案

三轴蠕变试验按轴向荷载与层理方向之间的夹角分为垂直与平行两种,如图2所示.

本研究中三轴常规压缩试验与三轴压缩蠕变试验均分为两组,试件尺寸为5.21 cm×10.34 cm,试验分组情况见表1.

2 试验结果及分析

2.1 常规三轴试验结果

图3为围压5 MPa时H试样与V试样的常

规三轴试验结果曲线.可知:H试样与V试样均表现出显著的应变软化现象;试验过程中,试样体积先压缩(体应变为正值)后剪胀(体应变为负值),H试样与V试样在轴向应变分别为 7×10^{-3} 、 6×10^{-3} 时开始出现剪胀现象.

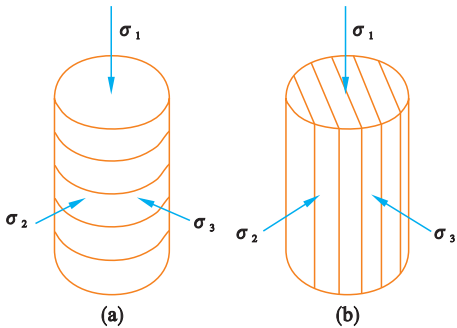


图2 荷载与层理之间的关系
Fig. 2 Relation between loading and bedding planes
(a)—垂直(H试样);(b)—平行(V试样).

表1 三轴压缩及蠕变试验分组
Table 1 Grouping of triaxial compression test and creeping test

试件编号	加载方向	试验内容	偏应力/MPa	围压/MPa
H	垂直	三轴压缩	均匀加载	5
H10		三轴蠕变	40,70,100	10
V	平行	三轴压缩	均匀加载	5
V5		三轴蠕变	40,70,100	5

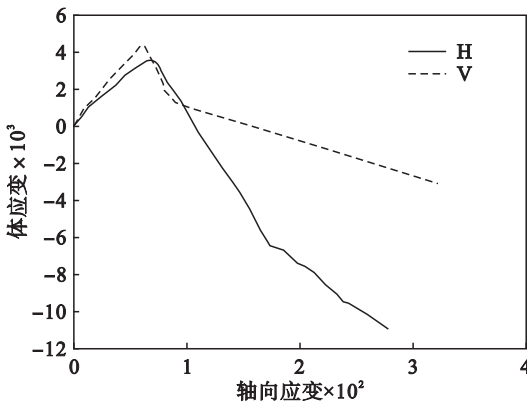
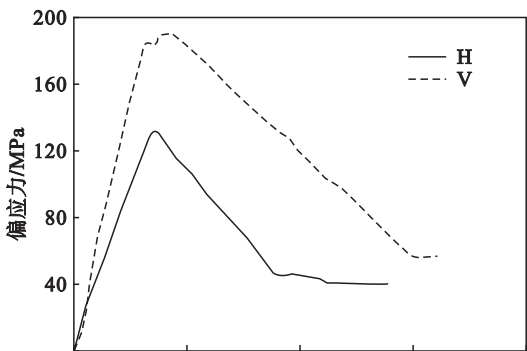


图3 偏应力和体应变与轴向应变关系图
Fig. 3 Change of deviatoric stress and volumetric strain with axial strain

从试验数据分析可知:V 试样峰值强度和残余强度比 H 试样高,与文献[10]的结论一致;H 试样比 V 试样更早进入应变软化过程与残余应力稳定过程,即更早进入流变阶段;V 试样比 H 试样更早开始剪胀,即横向扩容更早,但是 H 试样进入剪胀后,其体应变增长更迅速,且量值更大,意味着 H 试样破坏时扩容量更大。

2.2 层理面垂直于最大主应力方向的蠕变性质

在围压 10 MPa 下,H10 试样蠕变曲线如图 4 所示。可知,在本文条件下,轴向和径向蠕变应变随应力增大而增大;蠕变曲线由减速蠕变和稳态蠕变组成,未出现加速蠕变;减速蠕变阶段大约经历了 20 h,然后是稳态蠕变阶段;较低偏应力水平下,蠕变现象不明显,应变与初值相差较小。

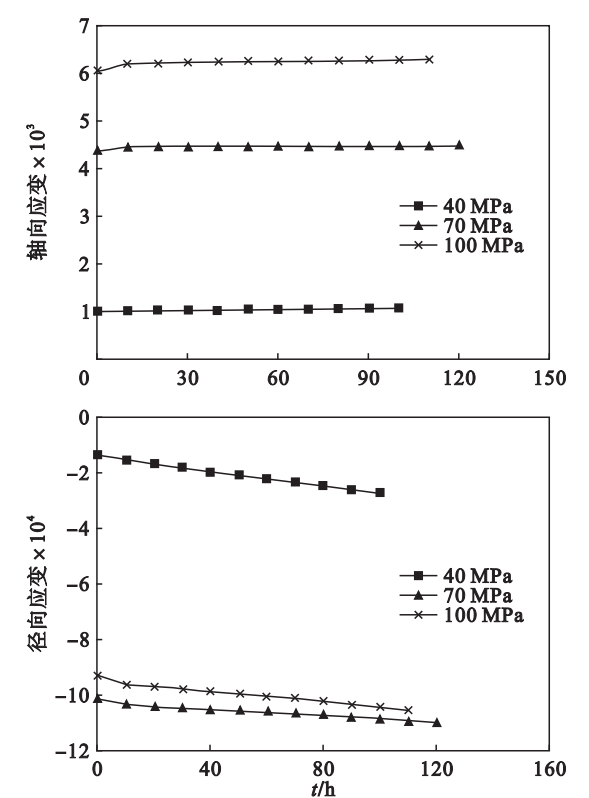


图 4 H10 试样蠕变曲线
Fig. 4 Creep curves of H10 specimen

2.3 层理面平行于最大主应力方向的蠕变性质

围压 5 MPa 下,V5 试样蠕变曲线如图 5 所示。可知,在本文条件下,V5 试样轴向、径向蠕变曲线未出现加速蠕变,轴向、径向应变随应力增大而增大。轴向蠕变速率随时间推移逐渐减小并趋近于 0,而径向蠕变速率的渐进值不等于 0。

2.4 炭质板岩横观各向同性蠕变特征

由图 6 知,相同应力下当最大主应力与层理面夹角不同时,试件的径向应变与轴向应变的比值不同,蠕变过程中 V5 试样径向与轴向应变之

比大于 H10 试样的比值,反映了炭质板岩蠕变性质的各向异性。

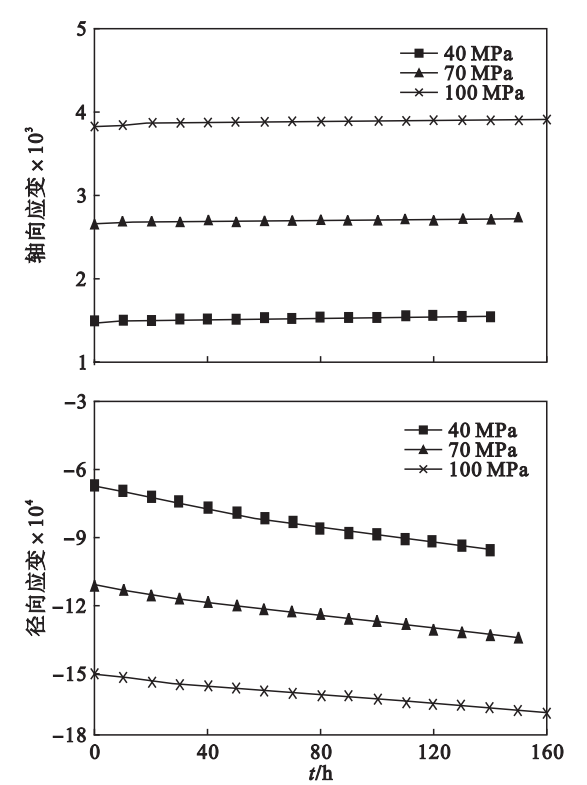


图 5 V5 试样蠕变曲线
Fig. 5 Creep curves of V5 specimen

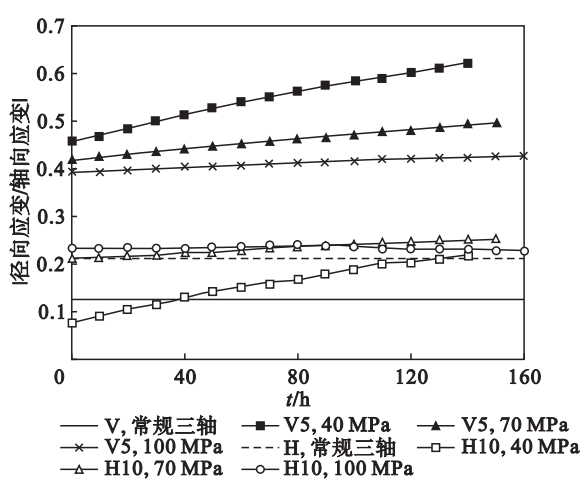


图 6 径向应变与轴向应变比值的绝对值随时间的变化曲线
Fig. 6 Change of absolute value of ratios of radial strain and axial strain with time

3 横观各向同性蠕变模型

横观各向同性蠕变模型由三部分组成:势函数、流动法则和硬化模型。其中势函数用来反映蠕变流动方向,而流动法则用来求解蠕变应变,硬化模型用来指定蠕变应变与时间关系。

1) 蠕变势函数。以广义剪应力表示的各向同

性材料蠕变势函数见式(1). 在静水压力条件下此势函数对各应力分量求导数将保持不变, 因此各方向应变增量是相同的. 但对于横观各向同性的炭质板岩等材料而言, 沿层理面和垂直于层理

面方向的应变增量不同. 因此, 为反映炭质板岩等横观各向同性材料蠕变性质的方向性, 将势函数由式(1)扩展为式(2), 使得势函数能够反映材料蠕变性质的方向性.

$$\bar{q}(\sigma) = \sqrt{(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2\sigma_{23}^2 + 2\sigma_{31}^2 + 2\sigma_{12}^2} = 0, \quad (1)$$

$$\bar{q}(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} = 0. \quad (2)$$

式中: F, G, H, L, M, N 为模型参数, 分别为

$$F = \frac{(\bar{q})^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^2} - \frac{1}{\sigma_{11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right); \quad (3)$$

$$G = \frac{(\bar{q})^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{33}^2} + \frac{1}{\sigma_{11}^2} - \frac{1}{\sigma_{22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right); \quad (4)$$

$$H = \frac{(\bar{q})^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{11}^2} + \frac{1}{\sigma_{22}^2} - \frac{1}{\sigma_{33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right); \quad (5)$$

$$L = \frac{3}{2} \left(\frac{\bar{q}/\sqrt{3}}{\sigma_{23}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{23}^2}; \quad (6)$$

$$M = \frac{3}{2} \left(\frac{\bar{q}/\sqrt{3}}{\sigma_{13}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2}; \quad (7)$$

$$N = \frac{3}{2} \left(\frac{\bar{q}/\sqrt{3}}{\sigma_{12}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{12}^2}. \quad (8)$$

其中: $\bar{\sigma}_{ij}$ 为当只有 σ_{ij} 为非零应力时材料的屈服强度; $\bar{q}(\sigma)$ 为单轴等效偏应力; 应力系数分别为

$$R_{11} = \frac{\bar{\sigma}_{11}}{\bar{q}}, R_{22} = \frac{\bar{\sigma}_{22}}{\bar{q}}, R_{33} = \frac{\bar{\sigma}_{33}}{\bar{q}}, R_{12} = \frac{\bar{\sigma}_{12}}{\bar{q}/\sqrt{3}},$$

$$R_{13} = \frac{\bar{\sigma}_{13}}{\bar{q}/\sqrt{3}}, R_{23} = \frac{\bar{\sigma}_{23}}{\bar{q}/\sqrt{3}}.$$

因此, 横观各向同性蠕变势函数参数可采用 F, G, H, L, M, N 或 $R_{11}, R_{22}, R_{33}, R_{12}, R_{13}, R_{23}$. 在选定层理面方位后, 根据对称性, 上述 6 个参数可减少至 4 个.

2) 蠕变流动法则. 蠕变流动法则为

$$d\epsilon^{\text{cr}} = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} = \frac{d\lambda}{g} \mathbf{c}. \quad (9)$$

$$\text{式中: } \mathbf{c} = \begin{bmatrix} -G(\sigma_{33} - \sigma_{11}) + H(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \\ F(\sigma_{22} - \sigma_{33}) - H(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \\ -F(\sigma_{22} - \sigma_{33}) + G(\sigma_{33} - \sigma_{11}) \\ 2N\sigma_{12} \\ 2M\sigma_{31} \\ 2L\sigma_{23} \end{bmatrix}.$$

比例系数 $d\lambda$ 通过指定蠕变方程确定, 在本

研究中, 蠕变方程为

$$\dot{\epsilon}^{\text{cr}} = A\bar{q}^n t^m. \quad (10)$$

其中: $\bar{q} = \frac{q - p \tan \beta}{1 - \frac{1}{3} \tan \beta}$; $\dot{\epsilon}^{\text{cr}}$ 为单轴等效蠕变速率; t

为蠕变时间; A, n, m 为蠕变参数; p, q 分别为平均主应力和偏应力; β 为摩擦角.

4 炭质板岩蠕变模型参数反分析

4.1 反分析方法

炭质板岩蠕变模型参数反分析采用的试样直径为 50 mm, 高度为 100 mm, 试验围压为 5 MPa, 试样层理面水平, 两组试验分别在偏应力达到 65 MPa 和 97 MPa 后保持围压和轴向荷载不变, 进行 160 h 的蠕变数值试验. 在此过程中测量并记录试样的轴向与径向变形, 得到试验的三轴压缩蠕变曲线. 反分析数值模型如图 7 所示.

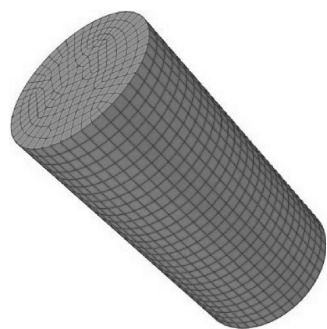


图7 参数反分析网格模型

Fig. 7 Finite element mesh for back analysis model

4.2 反分析结果

在本模型中, A, n, m 可通过拟合试验数据直接获得, 而 $R_{11}, R_{33}, R_{12}, R_{23}$ 则是通过参数反分析获得. 经过反复试算, 各参数取值如表 2 所示. 试验数据与参数拟合结果对比如图 8 所示.

炭质板岩试样三轴蠕变试验变形曲线与反演计算曲线对比图表明: 图 8a 中模型预测与试验数据较为吻合, 而图 8b 中误差较大. 由于试样中层理面发育的不规则性和不均匀性, 使得试样性质从横观各向异性向正交各向异性变化, 因此导致

了试验数据与模型预测的不一致。

表 2 反分析所得炭质板岩的蠕变参数
Table 2 Creep parameters of carbonaceous slate from back analysis

A	n	m	R_{11}	R_{22}	R_{33}	R_{12}	R_{13}	R_{23}
1.54×10^{-13}	1.0	-0.91	1	1	0.899	0.721	0.778	0.778

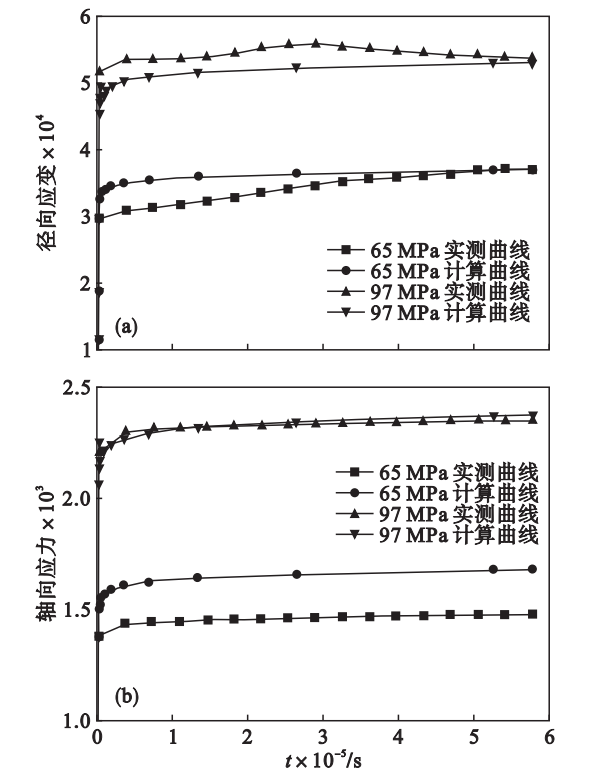


图 8 炭质板岩试验数据与模型预测结果对比
Fig. 8 Comparison of test data with prediction data of modeling

5 结 论

- 1) 常规三轴试验条件下,层理面与轴向荷载夹角为 0° 的试样强度比夹角为 90° 的试样高;夹角为 0° 的试样横向扩容更早,但是夹角为 90° 的试样体应变增长更迅速,破坏时的扩容量更大。
- 2) 由于层理面的存在,炭质板岩蠕变特性具有横观各向同性特征。蠕变过程中竖直试样径向与轴向应变之比大于水平试样的比值,反映了炭质板岩蠕变性质的各向异性。
- 3) 由于炭质板岩性质的方向性,其蠕变势函数与常规势函数相比,需要更多的参数。
- 4) 横观各向同性蠕变模型参数较多,结合试验数据开展参数反分析可以减少蠕变试验数目,在工程应用中具有一定优势。

参考文献:

[1] Cantieni L, Anagnostou G. The effect of the stress path on squeezing behavior in tunneling [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, 42(2): 289 – 318.

[2] Barla G, Bonini M, Semeraro M. Analysis of the behaviour of a yield-control support system in squeezing rock [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(1): 146 – 154.

[3] Barla G, Debernardi D, Sterpi D. Time dependent modeling of tunnels in squeezing conditions [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2012, 12(6): 697 – 710.

[4] Bonini M, Lancellotta G, Barla G. State of stress in tunnel lining in squeezing rock conditions [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(2): 405 – 411.

[5] Vu T M, Sulem J, Subrin D, et al. Anisotropic closure in squeezing rocks: the example of Saint-Martin-la-Porte access gallery [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(2): 231 – 246.

[6] 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. Rheology of geomaterials and its engineering application [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.)

[7] Wang Z C, Wong R C K. Strain-dependent and stress-dependent creep model for a till subject to triaxial compression [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2016, 16(3): 04015084.

[8] Chang C, Zoback M D. Viscous creep in room-dried unconsolidated Gulf of Mexico shale (I): experimental results [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, 69(3/4): 239 – 246.

[9] 徐卫亚, 杨圣奇, 褚卫红. 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-hong. Nonlinear viscoelasto-plastic rheological model (Hehai model) of rock and its engineering application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 433 – 447.)

[10] Zhao Y, Cao P, Wang W, et al. Viscoelasto-plastic rheological experiment under circular increment step load and unload and nonlinear creep model of soft rocks [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, 16(3): 488 – 494.

[11] Guan Z C, Jiang Y J, Tanabashi Y, et al. A new rheological model and its application in mountain tunneling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(3): 292 – 299.

[12] Malan D F. Manuel rocha medal recipient simulating the time-dependent behaviour of excavations in hard rock [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, 35(4): 225 – 254.

[13] 乔丽苹, 王者超, 李术才, 等. 岩石内变量蠕变模型研究 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(12): 3529 – 3538.

(Qiao Li-ping, Wang Zhe-chao, Li Shu-cai, et al. An internal-variable creep model for rocks [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(12): 3529 – 3538.)

[14] 王永刚. 炭质板岩横观各向同性蠕变模型与应用研究 [D]. 同济大学, 2015.

(Wang Yong-gang. Transversely isotropic creep model of carbonaceous slate and application research [D]. Shanghai: Tongji University, 2015.)