

木寨岭隧道炭质板岩流变力学特性研究

李建伟¹, 雷胜友², 李振³, 高攀³

(1. 中铁隧道集团有限公司, 河南 洛阳 471009; 2. 长安大学, 西安 710064;
3. 中铁隧道集团有限公司技术中心, 河南 洛阳 471009)

摘要: 为深入探究木寨岭隧道工程中炭质板岩的流变力学特性, 在不同条件下, 对现场取得的岩样进行单轴和三轴压缩蠕变试验, 并对炭质板岩的蠕变特性进行分析, 描述了炭质板岩的流变特性, 得出了瞬时应变占总应变的比例为 80% ~ 90%, 以及高围压下的流变多为等速流变等结论; 采用 Burgers 流变本构模型, 对试验数据进行参数拟合分析, 得出了 3 组不同围压下炭质板岩流变本构方程的弹性模量、黏性模量、黏滞系数等主要参数。

关键词: 木寨岭隧道; 炭质板岩; 蠕变试验; 参数拟合; 流变模型

DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2012.01.007

中图分类号: U 451+2

文献标志码: A

文章编号: 1672-741X(2012)01-0036-05

Investigation on Rheologic Properties of Carbonaceous Slate in Muzhailing Tunnel

LI Jianwei¹, LEI Shengyou², LI Zhen³, GAO Pan³

(1. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Luoyang 471009, Henan, China; 2. Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Technology Center of China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Luoyang 471009, Henan, China)

Abstract: Uniaxial compressing creep tests and triaxial compressing creep tests are made on the rock samples taken from the site of Muzhailing tunnel, and the creep properties of the carbonaceous slate are analyzed and described, so as to study the rheologic and mechanic properties of the carbonaceous slate. Conclusion is drawn that the instantaneous strain takes 80% to 90% of the total and that most part of the rheology under high confining pressure is uniform rheology. The major parameters of the carbonaceous slate, such as the elastic modulus, viscous modulus and viscosity coefficient, are obtained by means of fitting analysis on the test data using Burgers rheologic constitutive model.

Key words: Muzhailing tunnel; carbonaceous slate; creep test; parameter fitting; rheologic model

0 引言

在隧道开挖过程中, 岩体的应力场、物理力学性质、变形破坏特征等均随着时间的变化而不断发生变化, 即具有显著的时间效应^[1]。隧道岩体的变形不仅表现出弹性和塑性, 而且还有显著的流变特性, 在软弱围岩上表现得更为显著。在隧道工程中, 研究这些现象的原因及其力学机制, 对于指导工程设计、现场施工、长期运营及构筑物的稳定性具有十分重要的意义。

关于岩石的流变, 前人已开展了许多相关的试验与研究, 并取得了丰硕的成果。范庆忠等^[2]以红砂岩为例, 采用重力加载式流变仪, 在分级加载条件下对岩石的蠕变特性进行单轴压缩蠕变试验研究, 重点观察和分析了蠕变条件下岩石的弹性模量和泊松比的变形效应, 同时对其他时效变形特点进行了分析。赵永辉等^[3]针对北锚基础区域的弱-微风化花岗斑岩岩样,

采用岩石双轴流变试验机进行了单轴压缩蠕变试验, 并选用广义的 Kelvin 模型进行了参数拟合分析, 掌握了岩石蠕变的基本规律, 并获得了黏滞系数等相关的流变力学参数。蒋昱州等^[4]采用黏弹塑性流变本构模型, 采用 FLAC3D 软件模拟了非贯通连续软弱夹层的不同间距、不同长度及倾角等因素条件下岩石的弹塑性变形与流变变形情况, 研究分析了各种因素对岩体弹塑性变形与流变变形的影响以及各影响因素之间的多重相关性, 结果表明: 夹层长度、夹层厚度与夹层间距两两之间都有着较强的相关性; 岩桥倾角和夹层倾角与其他影响因素的相关性较弱。王伟等^[5]基于热力学框架下的 Perzyna 黏塑理论, 推导了适用于岩石的流变黏弹塑性本构模型, 结合砂岩的三轴蠕变试验数据, 对推导的本构模型的合理性与正确性进行了验证, 结果表明: 基于黏塑理论的流变本构模型

收稿日期: 2011-08-16; 修回日期: 2012-01-10

作者简介: 李建伟(1967-), 男, 河南郑县人, 2004年毕业于石家庄铁道学院交通土建工程专业, 专科, 高级工程师, 现从事项目管理工作。

可以较好地反映岩石的流变力学特性,对室内试验结果拟合得到的相关力学参数可以作为现场岩体流变力学特性评价的参考依据。陶振宇等^[6]对几种白云岩进行了一系列的单轴和三轴流变试验,对岩石的蠕变破坏机制进行了研究。然而,诸多流变试验中对典型的深埋高应力条件下炭质板岩的研究^[7]却较少,目前针对炭质板岩的研究多集中在该地层下的施工技术方面,如文献[8-10]结合兰渝铁路木寨岭隧道施工问题展开的研究。本文结合木寨岭隧道工程的隧道围岩变形情况特点,认为研究该地层条件下炭质板岩的流变特性,从流变的角度去揭示隧道围岩的变形机制,对隧道施工有较强的指导性意义。

1 试验概况

1.1 试验设备

岩石单轴和三轴流变试验是在 RLW-1000 微机控制岩石三轴流变仪上进行的。该试验机主要由主机(轴向加载框架)、压力室、轴向力加载装置、围压加载装置、水压加压系统、充液油源、气泵和计算机测控系统等组成。系统能施加的轴向最大力为 1000 kN,围压的施压范围为 0~50 MPa。可实行全计算机控制与分析、操作全自动化,保证安全、实时、精确地分析流变全过程,自动采集的数据可与计算机交换,实现流变全过程数字化成图。

1.2 岩样制备

依据岩石力学试验标准,板岩试样由钻孔岩芯加工而成。岩样加工成高约 100 mm、直径 50 mm 的柱形试件。试件加工完成后,先剔除表观上有缺陷的,再对剩余试件进行声波测试,筛选出一致性好的试件 8 个,任取其中 4 个试件,测得其物理和力学性质。

1.3 试验方案设计

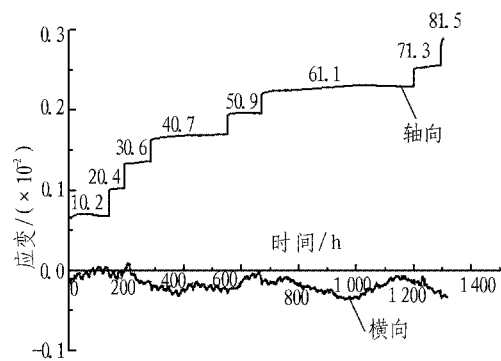
采用单体分级加载试验方法,单轴流变试验按照围压为 0 MPa 的方法处理,轴向加载应力水平取 5~8 级。试验前对板岩进行常规单轴和三轴压缩试验,获得板岩单轴和三轴压缩瞬时强度,再根据该瞬时强度,确定出每级围压下板岩三轴流变分级加载试验的应力水平。流变试验在具有恒温 and 恒湿条件的流变专用实验室进行,室内温度始终控制在 $(20 \pm 0.3)^\circ\text{C}$ 。采用在岩样表面安装高灵敏度的位移传感器来测量岩石轴向变形和侧向变形。

流变试验程序为:1)将准备好的岩样用橡胶薄膜包裹好,放入岩石流变伺服仪的三轴压力室中,并调整好中心位置;2)按预定加载速率,通过油液系统给岩样施加至预定的围压值,当达到设定的围压且变形稳定后,按同样的速率施加轴向偏应力。当岩样加载至设定的第 1 级应力水平时,保持岩样轴向偏应力不变,测试岩样轴向应变、侧向应变与时间的关系;3)在第 1 级应力水平下的流变加载完成后,改加设定的第 2

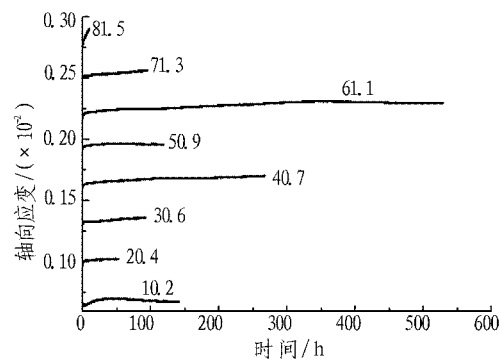
级应力水平,并维持这一应力水平恒定的条件下,测试岩样轴向应变、侧向应变与时间关系;4)在第 3 级或更高级应力水平下,重复上述操作步骤,在设定的最后一级应力水平时使岩样发生流变破坏,此时取出岩样,描述岩样破裂形式;5)根据围压一定时,应变片测得的不同应力水平下轴向应变、侧向应变与时间以及应力的试验数据进行整理分析,就可以得到不同围压下各级应力水平对应的岩石流变变形与时间的关系,从而归纳和总结出岩石流变力学特性的规律。

2 流变试验结果分析

流变试验共计 4 个试样,围压分别为 0.0,3.0,5.0,10.0 MPa,每一围压下进行 1 个试件的试验。图 1—4 为炭质板岩试件的流变曲线,流变阶段上的数值代表偏差应力大小。图 5 为不同围压下板岩流变破裂形式。



(a) 轴向和横向流变曲线



(b) 在不同轴向应力下的流变曲线

图 1 $\sigma_3 = 0.0 \text{ MPa}$ 时单轴压缩流变曲线(单位: MPa)

Fig. 1 Rheologic curves under uniaxial compressing condition(MPa)

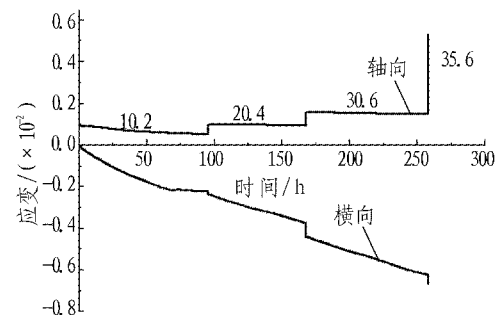


图 2 $\sigma_3 = 3.0 \text{ MPa}$ 时轴向和横向流变曲线(单位: MPa)

Fig. 2 Axial and transverse rheologic curves when $\sigma_3 = 3.0 \text{ MPa}$ (MPa)

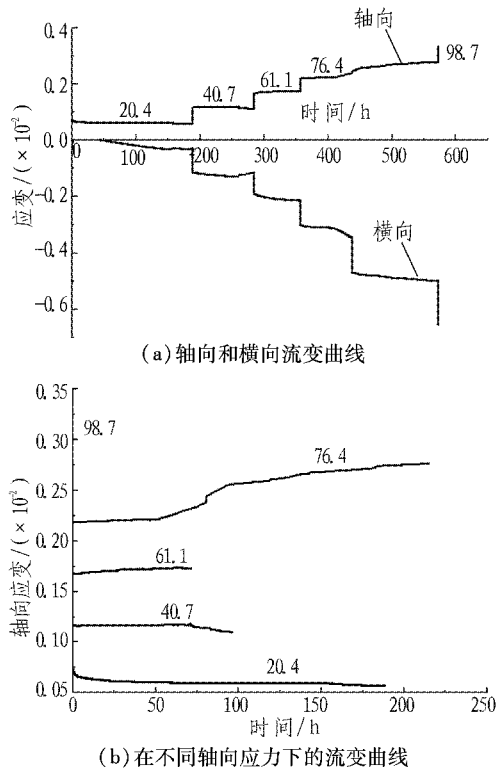


图3 $\sigma_3 = 5.0$ MPa 时轴向和横向流变曲线(单位: MPa)
 Fig. 3 Axial and transverse rheologic curves when $\sigma_3 = 5.0$ MPa (MPa)

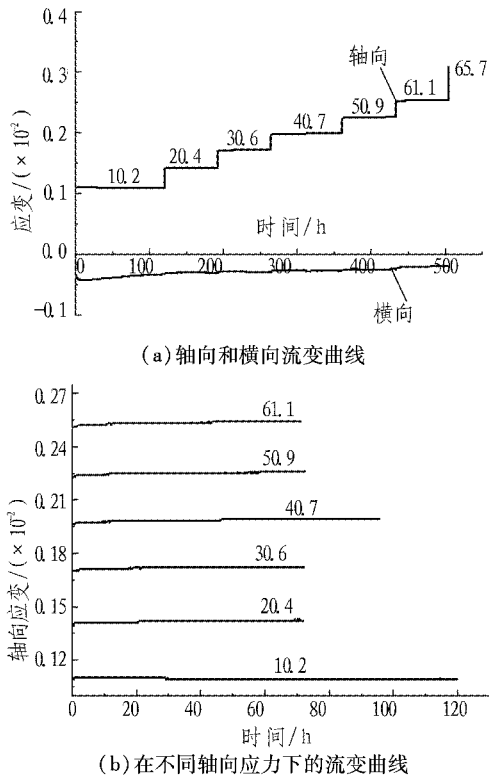


图4 $\sigma_3 = 10.0$ MPa 时轴向和横向流变曲线(单位: MPa)
 Fig. 4 Axial and transverse rheologic curves when $\sigma_3 = 10.0$ MPa (MPa)

2.1 炭质板岩变形规律与时效特征

1) 每一级应力加载瞬间,都产生瞬时应变。在绝

大多数应力水平下,瞬时应变在总变形中占主要部分,占总变形量的80%~90%。

2) 岩石的横向应变随时间无明显变化规律。在同一围压下,增大轴向应力时横向应变往往有所减小,与一般应力应变规律不相符合。

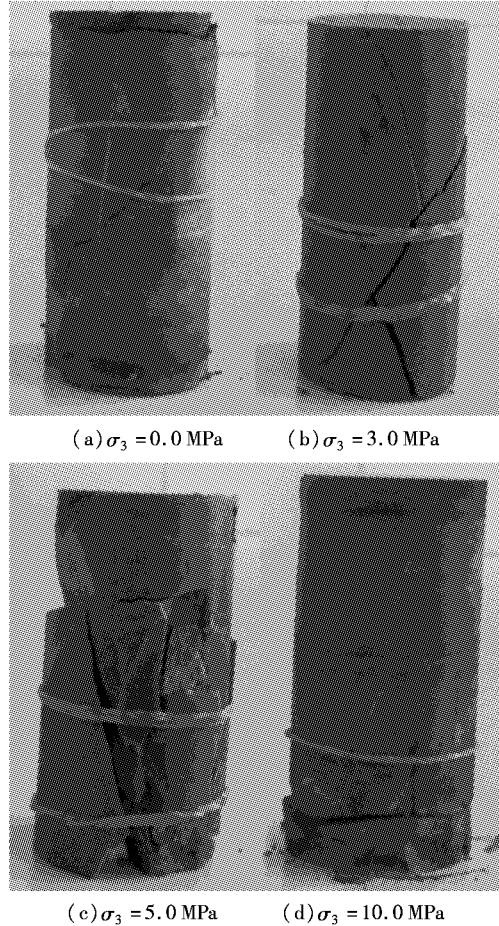


图5 不同围压下板岩流变破坏形式

Fig. 5 Types of rheologic failure of carbonaceous slate under different confining pressures

3) 在多数应力水平下,岩石均呈现出衰减流变的特征,其变形速率随时间而减小,最后变形趋于收敛,在较高应力水平下呈现出等速流变的特征。

4) 当应力水平较高时,变形急剧增长,试件通常很快就发生破坏,一般不出现从流变的第2阶段(等速流变)进入到第3阶段(加速流变)的情形,从试件变形加速到溃屈,历时很短。肉眼可见岩石外侧出现裂纹并迅速扩展、张开以及边角脱落等现象。岩块大多沿原生裂隙、层理破坏。

5) 板岩的流变破坏呈现出脆性破坏特征,破坏后有明显的宏观断裂面,且多数情况下会碎裂成块。

2.2 岩石本身对流变曲线的影响

1) 单轴压缩流变试验中,当 $\sigma_3 = 0$ MPa,轴向应力为10.2 MPa 时会出现较大的流变变形,甚至流变曲线出现了较短的下降段;而当轴向应力为40.7 MPa 和

50.9 MPa 时却只出现较微弱的流变变形,因而可以认为起始流变的应力阈值为 10.2 MPa。由于岩石是一种天然地质材料,受地质构造的影响,岩石的组织结构极不均匀,孔隙、裂隙、夹杂、节理、断层等大量缺陷充斥其中。可以认为,轴向应力为 10.2 MPa 时的流变变形是应力解除后的弹性恢复以及岩石本身具有裂隙和初始损伤造成的。

2) 三轴压缩流变试验中,当围压为 5.0 MPa 的板岩受到 76.4 MPa 应力时。轴向和横向应变突然增大。造成应变发生突变的原因,是由于流变试验过程中材料结构的非均质性引起岩样局部破裂所致。由于岩样受到 76.4 MPa 恒定应力的长期连续作用,随着时间的增长,材料内部逐步发生损伤。尽管这种损伤微不足道,但长时间积累,岩石材料中强度较低的地方由于无法承受这种微缺陷长期累积效应所引起的损伤,局部出现非均匀变形破坏,从而使得岩石变形出现突变现象。然而,在这种非均匀局部化破坏经历了一个短暂的调整过程之后,仍能恢复到稳定状态,这表明,岩样局部出现的非均匀变形破坏并没有对整体流变变形构成明显损伤。

3 岩石流变方程的建立

根据流变试验曲线的上述特点,板岩流变中包括瞬时弹性变形、减速流变和等速流变,采用 Burgers 流变模型构建板岩流变理论模型。Burgers 流变模型如图 6 所示。

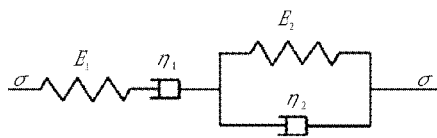


图 6 Burgers 流变力学模型

Fig. 6 Burgers rheologic constitutive model

Burgers 模型的一维本构方程和流变方程为:

$$\sigma + \left(\frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_2} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\varepsilon}$$

$$\varepsilon = \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_2} \right) \right] \right\} \sigma$$

式中: E_1, E_2 分别为瞬时弹性模量和黏性模量; $\sigma, \dot{\sigma}$ 分别为应力对时间的一次求导和二次求导; $\varepsilon, \dot{\varepsilon}$ 分别为应变对时间的一次求导和二次求导; η_1 和 η_2 为黏滞系数。

3.1 岩石流变的起始强度

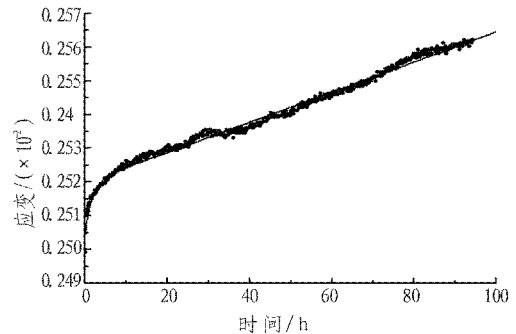
从以上试验结果来看,在每一个围压下都有一个起始流变强度,作用力小于此强度时岩样基本不发生流变,当作用力大于此强度时,岩样才产生较为明显的流变现象。当 $\sigma_3 = 0.0$ MPa 时,起始流变强度为 10.2 MPa;

$\sigma_3 = 3.0$ MPa 时,起始流变强度为 10.2 MPa; $\sigma_3 = 5.0$ MPa 时,起始流变强度为 20.4 MPa; $\sigma_3 = 10.0$ MPa 时,起始流变强度为 10.2 MPa,可见围岩流变的起始流变强度并不是随着围压的增大而增大。

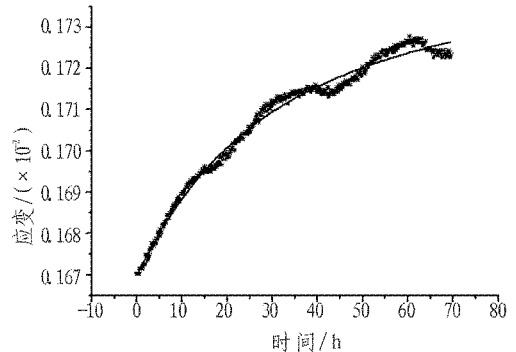
3.2 岩石流变方程的建立

从图 2 可知,试样在围压 $\sigma_3 = 3.0$ MPa 时,其流变曲线中出现了变形随时间减少的情况,试验结果与真实情况不符,因此该组数据不进行拟合。从围压分别为 0.0, 5.0, 10.0 MPa 的试验中选取流变特征明显的应力阶段进行拟合,建立岩石的流变方程。

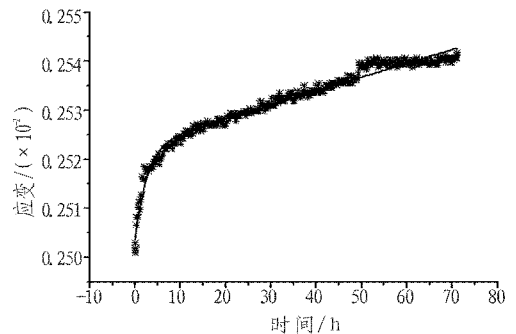
图 7 为围压分别为 0.0, 5.0, 10.0 MPa, 轴向应力分别为 71.3, 61.1, 61.1 MPa 时的流变曲线。运用 Burgers 模型研究板岩流变理论模型,根据流变曲线及试验数据,利用最小二乘法拟合参数的 Origin 科技绘图及数据分析软件,拟合出了相关的参数,见表 1。



(a) $\sigma_3 = 0$ MPa, $\sigma_1 = 71.3$ MPa



(b) $\sigma_3 = 5$ MPa, $\sigma_1 = 61.1$ MPa



(c) $\sigma_3 = 10$ MPa, $\sigma_1 = 61.1$ MPa

— 试验数据; — 拟合曲线。

图 7 拟合曲线与流变试验曲线比较

Fig. 7 Fitting curves and rheologic test curves

表1 炭质板岩流变参数(Burgers流变模型)

Table 1 Rheologic parameters of carbonaceous slate (Burgers rheologic model)

围压/ MPa	破坏应力/ MPa	起始流变/ MPa	弹性模量 E_1 / GPa	黏性模量 E_2 / GPa	黏滞系数 η_1 / (GPa·h)	黏滞系数 η_2 / (GPa·h)
0	81.5	10.2	28.46	4 990	87.2	1 593
5.0	98.7	20.4	36.59	1 321.6	34.2	2 933.4
10.0	65.7	10.2	24.4	3 222	21.6	8 402

4 结论与建议

1) 通过岩石流变试验,得出木寨岭隧道炭质板岩的变形规律与时效特征以及岩石本身对流变性质的影响。试验表明,炭质板岩在高应力水平下流变特性比较明显,在工程设计、施工中应对流变引起的隧道变形引起重视。

2) 用 Burgers 流变模型可以很好地模拟炭质板岩的单轴流变曲线,通过对试验数据的拟合可以得到炭质板岩蠕变参数 E_1 , E_2 , η_1 和 η_2 , 该参数可为工程设计或数值计算提供参考。

3) 可将一维 Burgers 流变本构模型扩展至三维应力空间,编写本构代码,将其嵌入相应的数值计算软件中,采用数值方法对试件进行试验^[11-12],以期与室内试验结果进行比对,从而更好地确定蠕变参数。

通过对多组炭质板岩不同围压下流变试验进行探讨,得出该类围岩的流变特性,并拟合得出其流变方程。由于炭质板岩的成岩过程复杂,且成岩后长期受地质构造运动影响,造成该类岩石内部裂隙较多,不仅给取样和制样带来很大难度,也在其流变曲线中反映出了变形不规律的特性,如随应力增大横向应变反而减小,轴向应变常无等速流变和加速流变阶段等。因此,这些现象并不能完全用“内部裂隙较多”来解释,其中的具体原因还有待进一步的研究与探讨。

参考文献(References):

- [1] 孙钧. 岩土材料流变及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [2] 范庆忠, 高延法. 分级加载条件下岩石流变特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1273-1276. (FAN Qingzhong, GAO Yanfa. Experimental study on creep properties of rocks under stepwise loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1273-1276. (in Chinese))
- [3] 赵永辉, 何之民, 沈明荣. 润扬大桥北锚碇岩石流变特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 583-586. (ZHAO Yonghui, HE Zhimin, SHEN Mingrong. Testing study on rock rheological characteristic of north anchor block of Runyang bridge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 583-586. (in Chinese))
- [4] 蒋昱州, 徐卫亚, 朱杰兵, 等. 含断续软弱夹层岩石流变力学特性研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(12): 71-75. (JIANG Yuzhou, XU Weiya, ZHU Jiebing, et al. Rheology characteristics of rock with discontinuously weak interca-

- lations[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(12): 71-75. (in Chinese))
- [5] 王伟, 周先齐, 刘桃根, 等. 基于黏塑理论的岩石流变本构模型研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2010, 32(6): 51-54. (WANG Wei, ZHOU Xianqi, LIU Taogen, et al. Investigation of rheological constitutive model of rocks based on viscoplastic theory[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2010, 32(6): 51-54. (in Chinese))
- [6] 陶振宇, 林文华. 鲁布革水电站岩石流变试验研究[J]. 四川水力发电, 1985(2): 34-39.
- [7] 肖尧, 付小敏. 炭质板岩力学性质研究[J]. 地质灾害与环境, 2011, 22(1): 84-86. (XIAO Yao, FU Xiaomin. Mechanical properties of carbonaceous slate[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2011, 22(1): 84-86. (in Chinese))
- [8] 王维富. 炭质板岩地层隧道施工要点及大变形防治措施[J]. 隧道建设, 2010, 30(6): 697-700. (WANG Weifu. Key points and large deformation control in construction of tunnel in carbonaceous slate[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(6): 697-700. (in Chinese))
- [9] 张献伟. 木寨岭隧道炭质板岩段大变形控制技术[J]. 隧道建设, 2010, 30(6): 683-686. (ZHANG Xianwei. Technology for control of large deformation in carbonaceous slate section of Muzhailing tunnel[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(6): 683-686. (in Chinese))
- [10] 邹翀, 王超朋, 张文新, 等. 兰渝铁路木寨岭隧道炭质板岩段应力控制试验研究[J]. 隧道建设, 2010, 30(2): 120-124. (ZOU Chong, WANG Chaopeng, ZHANG Wenxin, et al. Experimental study on stress control in carbonaceous slate section of Muzhailing tunnel on Lanzhou-Chongqing railway[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(2): 120-124. (in Chinese))
- [11] 徐平, 李云鹏, 丁秀丽, 等. FLAC3D 黏弹性模型的二次开发及其应用[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(2): 10-13. (XU Ping, LI Yunpeng, DING Xiuli, et al. Secondary development and application of visco-elastic constitutive model in FLAC3D software[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004, 21(2): 10-13. (in Chinese))
- [12] 褚卫江, 徐卫亚, 杨圣奇, 等. 基于 FLAC3D 岩石黏弹塑性流变模型的二次开发研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2005-2010. (CHU Weijiang, XU Weiya, YANG Shengqi, et al. Secondary development of a viscoelastoplastic rheological constitutive model of rock based on FLAC3D[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2005-2010. (in Chinese))