

近距离交叉隧道软岩蠕变特性研究

赵栋琪¹, 邓 琴², 宋政群³, 武 松^{2, 4}

(1. 云南省公路开发投资有限责任公司, 昆明 650200; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 3. 云南上鹤高速公路建设指挥部, 云南 大理 671000; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为研究云南某公路隧道上穿既有铁路隧道交叉段粉砂岩蠕变特性, 利用 TLW - 2000 三轴流变仪对现场试样进行了不同围压条件下的分级加载三轴蠕变试验。结果表明: 在相同的偏应力条件下, 围压越大, 蠕变变形和瞬时变形越小; 蠕变变形量随着荷载级数的增加呈现先减小, 然后稳定, 最后急剧增大的规律。另外, 粉砂岩的起始蠕变速率随着围压的增大而减小。通过分析粉砂岩蠕变曲线的变化趋势, 并考虑到蠕变过程中的损伤和硬化效应, 采用非线性蠕变模型拟合实验数据。拟合结果表明非线性蠕变模型能够描述粉砂岩的蠕变特性。

关键词: 岩石; 三轴蠕变试验; 分级加载; 非线性模型

中图分类号: TU45

文献标志码: A

0 引 言

蠕变作为岩石的一种重要的力学特性, 通常是指岩石在应力状态保持不变时, 变形却随着时间增加的力学现象。在实际工程应用当中, 岩体的蠕变与边坡工程、隧道工程等工程的设计施工密切相关^[1]。在隧道的开挖过程中, 随着施工的进展, 岩体所受的荷载逐步(级)地增加。因此, 要分析在实际施工过程中隧道围岩的变形特征, 就需要对分级加载条件下岩石的蠕变特性及机理进行分析。

近年来, 为掌握岩石在分级加载作用下的蠕变特性, 科研人员对此进行了深入的研究: 张中亭等^[2]采用统一蠕变模型及其相应的蠕变方程, 推导出分级加载条件下的蠕变方程, 同时利用测得的大理岩分级加载蠕变实验数据对蠕变参数进行拟合; 苏承东等^[3-4]研究了单轴压缩分级加载和松弛作用下煤样的变形与强度特征, 认为常规单轴压缩得到的力学参数明显高于松弛试验值, 煤样的力学参数具有时效特征; 邹建超等^[5]研究

了红砂岩试样在分级加载蠕变中硬化和损伤机制的演化机理, 提出了能够反映分级加载蠕变全过程硬化 - 损伤机制的修正广义 Kelvin 模型; 谌文武等^[6]在单轴压缩条件下, 对软岩试样进行大量的蠕变试验, 并利用 Burgers 模型对红层软岩的蠕变特性进行描述; 肖伟晶等^[7]分析了不同埋深的灰岩在各分级应力荷载下的蠕变特性, 并评估发生蠕变破坏所需的应力水平; 范庆忠等^[8]对红砂岩进行单轴分级加载试验, 没有观测到明显的加速蠕变, 而且加速蠕变一旦出现, 试样就立即发生宏观破坏; 辛亚军等^[9]研究了分级加载条件下二叠系煤层顶板的细粒砂岩和砂质泥岩蠕变的能量转换与变形机制, 结果表明岩石的变形模量随着加载次数的增加, 其增大速度降低, 最终趋于平稳。但是, 需要指出的是, 在他们的试验中, 应力路径并不是完全意义上的分级加载, 而应归为分级增量循环加卸载。此外还有其他大量的分级加载单轴蠕变试验^[10-17]。然而, 围岩一般处于三向荷载作用下, 单轴试验并不能准确反映围岩的真实蠕变特性, 而对岩石分级加载三轴蠕变试验

收稿日期: 2017 - 04 - 17

基金项目: 云南省交通科技项目 [云交科教 (2016) 140 (A)]

作者简介: 赵栋琪 (1968—), 男, 研究方向: 公路建设和管理, 454290417@qq.com。

引文格式: 赵栋琪, 邓琴, 宋政群, 等. 近距离交叉隧道软岩蠕变特性研究[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 541 - 546.

的报道却并不多见。余宏明等^[18]对泥岩的分级加载三轴蠕变特性进行了研究,但是并没有研究围压对蠕变造成的影响;张向东等^[19]分析了分级加载条件下泥岩的三轴蠕变特性,并用H/M模型描述其蠕变曲线,但是没有从损伤和硬化的角度研究蠕变机理;胡波等^[20]研究了恒定围压分级增轴压条件下的泥质粉砂岩蠕变特性,为煤矿石门围压的长期稳定性分析提供了试验数据。可以看到,以往的研究中,许多分级加载蠕变试验属于单轴加载,少量的分级加载三轴蠕变试验对于蠕变特性的分析也仅仅局限于使用既有模型拟合试验曲线,没有从损伤和硬化的角度分析蠕变机理。大量研究表明,岩石蠕变过程中,损伤和硬化相互竞争、共同作用^[21-22],因此,分析岩石蠕变特性时应当考虑损伤和硬化的作用。

笔者对云南某公路隧道上穿既有铁路隧道交叉段的灰绿色粉砂岩进行分级加载条件下的三轴蠕变试验,分析了粉砂岩在不同围压条件下的蠕变特性。在此基础上,建立包含损伤和硬化效应的粉砂岩非线性蠕变损伤模型,并确定了蠕变损伤函数,为交叉段隧道围岩的变形演化和稳定性分析提供一定的借鉴和参考。

1 试验设备及试验方法

本试验采用分级加载方式。分级加载是指在同一试件上逐级施加不同的应力,即在某一应力水平下让岩样蠕变经历给定的时间或达到稳定后,再将应力水平提高到下一级,直到试验结束为止。

1.1 试验装置

流变试验要求试验设备能够在较长一段时间

内保持应力或者应变恒定,因此对围压系统和控制系统的要求较高。本次试验采用中科院武汉岩土力学研究所岩石力学与工程国家重点试验室的岩石三轴流变仪(型号:TLW-2000),如图1所示。

TLW-2000流变仪由轴向加载系统、围压加载系统、伺服控制系统、计算机测控系统、数据采集和自动绘图系统组成。其具有稳定性好、自动化程度高、加载分辨率高、测量精度高等优点,当采用力控制时,能够满足三轴蠕变试验的要求。

TLW-2000流变仪对轴向及环向变形采用引伸计量测,适用的试样尺寸有3种:Φ50 mm×100 mm、Φ75 mm×150 mm和Φ100 mm×200 mm。轴向及径向引伸计位置如图2所示。

1.2 试样制备

本次试验的岩石试样为云南某公路隧道上穿铁路隧道交叉段的灰绿色粉砂岩,该种岩石质软、易风化。岩块开采后进行钻心取样,制成尺寸为Φ50 mm×100 mm的圆柱形岩样。严格按照ISRM试验规定对岩样进行精加工,对试样的端面进行打磨,使端面平整度控制在0.003 mm之内,满足蠕变试验的要求,如图3所示。

1.3 试验方案

试样的安装细节如图4所示。设计3种围压情况下的三轴蠕变试验。一共选取9个试样,相同围压下进行3组重复性试验。先将试样置于105℃烘干机内24 h。以0.1 MPa/s的加载速率增大围压至预设值,之后保持围压不变。在围压达到预定值24 h后,将轴向变形和径向变形清零,然后增大偏应力,偏应力的加载速率控制在0.05 MPa/s。在轴向的蠕变趋于稳定后,施加第二级荷载,之后逐级重复以上的过程。

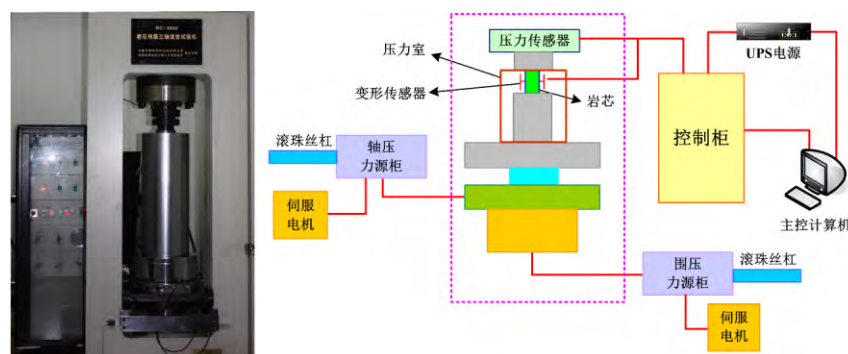


图1 TLW-2000三轴流变仪及其工作原理

Fig. 1 TLW-2000 rheometer and its operating principle

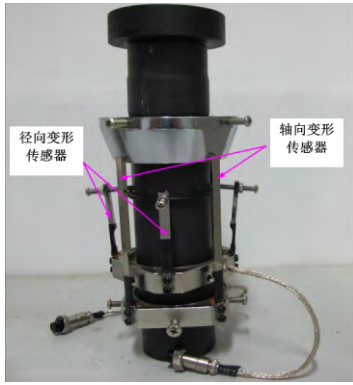


图 2 轴向及径向引伸计
Fig. 2 Axial and radial extensometer



图 3 粉砂岩试样
Fig. 3 Specimens of siltstone

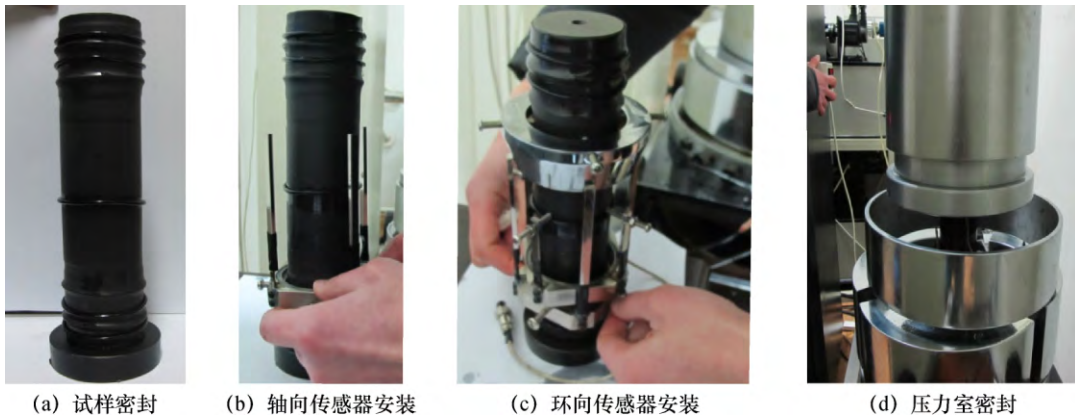


图 4 试样安装步骤
Fig. 4 Procedures for installation of samples: (a) seal of sample; (b) installation of axial transducer; (c) installation of circumference transducer; (d) seal of chamber

2 试验结果

分级加载三轴蠕变试验曲线如图 5 所示, 可以看出:

(1) 对于所有围压情况, 荷载施加后, 粉砂岩试样都会先经历一个瞬时变形阶段, 随后再进入蠕变变形阶段, 瞬时变形明显大于蠕变变形。

(2) 在相同的偏应力条件下, 围压越大, 蠕变变形和瞬时变形越小。这表明增大围压可以改变岩石的受力变形特性, 与实际工程应用相符。

(3) 随着偏应力的增大, 衰减蠕变的持续时间增大。例如, 围压为 3 和 4 MPa 的试样, 其衰减蠕变时间逐级增大。这种衰减蠕变持续时间的增大是由于蠕变机制发生变化。当偏应力较低时, 蠕变主要以孔隙裂隙的压密为主, 该过程持续时间相对较短; 随着偏应力增大, 孔隙裂隙逐渐密

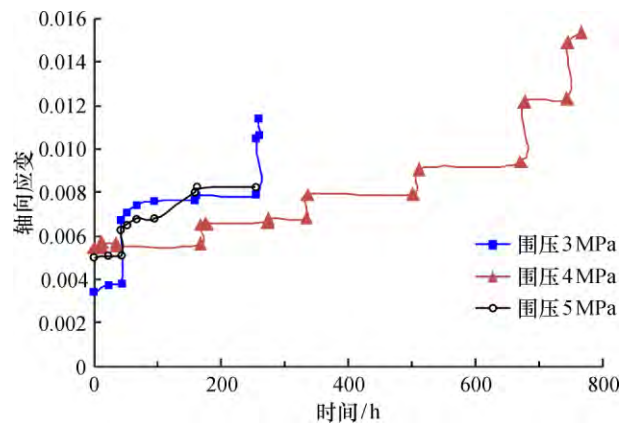


图 5 粉砂岩试样三轴分级加载蠕变试验曲线
Fig. 5 Curves of tri-axial creep test on siltstone samples under step loading

实, 使得衰减蠕变时间增大; 当偏应力进一步增大时, 孔隙裂隙在压密之后就相互贯通, 蠕变过程则以裂隙裂纹的扩展为主, 当偏应力低于

临界应力时, 裂纹的生长会衰减, 最终停止, 这与衰减蠕变的性质相对应。要使裂纹进一步扩展, 就必须继续增大偏应力^[23]。

(4) 随着围压的增大, 起始蠕变速率减小。从图中可以明显看出, 相同载荷作用下, 应变-时间曲线在蠕变起始点的斜率随着围压的增大而减小。分析认为, 围压较低时, 岩石中原本存在的孔隙裂隙没有被压密, 蠕变产生时, 主要以这些孔隙的压密压实为主, 所以孔隙裂隙越多, 起始蠕变速率就越大; 当围压增大时, 孔隙裂隙明显压密, 密实度明显增大, 剩余的孔隙减少, 此时, 起始蠕变速率就会随之降低。

(5) 在蠕变过程中, 随着载荷的增大, 各级蠕变应变增量呈现先减小后增大的趋势, 而且后期蠕变应变增量的增大趋势更加明显, 最终造成试样的破坏。例如, 对于围压为 5 MPa 条件下的试验曲线, 在前两级载荷作用过程中, 随着载荷级数增大, 各级蠕变变形增量逐渐减小; 从第三级载荷开始, 随着载荷级数增加, 各级蠕变变形增量逐渐增大。该现象与灰岩的蠕变特性类似^[7]。分析认为, 在前三级载荷作用下, 硬化效应明显, 各级蠕变变形增量因此减小; 在后续的载荷作用下, 损伤效应逐渐扩大, 使得蠕变变形增量增大, 最终造成试样的宏观破坏。

3 蠕变模型分析及参数拟合

3.1 非线性蠕变模型

根据之前对粉砂岩试样三轴分级加载蠕变试验得到的数据, 尝试使用不同流变模型来拟合流变试验曲线, 发现目前常用的幂函数模型能较好地反映其流变变形特征。

Vyalov^[24] 在研究蠕变时, 采用两个函数来分别代表应力、应变、时间三者中应力、时间对应变的贡献或应变、时间对应力的贡献, 然后通过两者的组合得到蠕变方程。Vyalov 总结了大量的函数形式, 认为普遍是对数型、幂函数型和指数型的蠕变方程, 在这三者当中幂函数模型的应用最为普遍。单轴流蠕变情况下, 幂函数模型的基本形式为

$$\bar{\varepsilon}^{\text{cr}} = A(\bar{\sigma}^{\text{cr}})^n t^m, \quad (1)$$

式中: A 、 m 、 n 为材料常数; $\bar{\varepsilon}^{\text{cr}}$ 为等效蠕变应变, $\bar{\varepsilon}^{\text{cr}} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_{ij}; \varepsilon_{ij})}$, $\bar{\sigma}^{\text{cr}}$ 为等效蠕变应力, 一般取偏应力 $\bar{\sigma}^{\text{cr}} = \sigma_1 - \sigma_3$ 。

幂函数模型考虑了硬化效应, 只能反映衰减蠕变和稳定蠕变, 不能反映加速蠕变。此外, 且在蠕变过程中, 硬化和损伤相互竞争、共同作用, 决定蠕变的发展和演化。为此, 将蠕变损伤因子引入到幂函数模型中, 得到能够反映加速蠕变的非线性蠕变损伤模型^[25]

$$\bar{\varepsilon}^{\text{cr}} = \frac{A(\bar{\sigma}^{\text{cr}})^n t^m}{1 - D_c}. \quad (2)$$

三维情况下, 蠕变应变张量可以表示为

$$\varepsilon^{\text{cr}} = \bar{\varepsilon}^{\text{cr}}(\bar{\sigma}^{\text{cr}}) \frac{\partial G^{\text{cr}}}{\partial \sigma}, \quad (3)$$

其中, 蠕变应变的方向由蠕变势函数 G^{cr} 确定, 蠕变应变的大小由 $\bar{\varepsilon}^{\text{cr}}$ 确定。将式(3)代入式(2)就能够得到反映非线性蠕变的模型, 则总的蠕变方程式为

$$\begin{cases} \varepsilon_c = \frac{Aq^n t^{m+1}}{(1 - D_c)(m + 1)}; \\ D_c = 1 - \exp(-\alpha \varepsilon_d). \end{cases} \quad (4)$$

式中: ε_c 为蠕变应变, ε_d 为蠕变损伤; q 为等效应力; t 为时间; A 、 m 、 n 、 α 为材料常数, 其值根据蠕变试验通过拟合得到。

3.2 模型参数拟合

根据上述非线性蠕变模型, 对不同围压条件下的粉砂岩应变-时间曲线进行拟合。拟合方法采用最小二乘法中的阻尼最小二乘法(Marquardt法)逐次线性化的间接方法。

拟合的结果如图6所示, 相应的拟合参数如表1所示。显然, 幂函数非线性模型能够较好地描述该公路隧道上穿既有铁路隧道交叉段粉砂岩的蠕变特性。

另外, 需要说明的是, 在相同围压条件下得到的蠕变曲线存在差异, 因此通过拟合求得的流变模型参数也存在差异。考虑到实际情况, 通过拟合得到粉砂岩幂函数模型的函数形式表达式, 与试验得到的流变模型规律和现场三轴流变试验的规律相似, 因此拟合结果能够用于建立蠕变模型。拟合参数呈现出一定的离散性, 可能是试验的环境变化(如温度、湿度等)造成的。

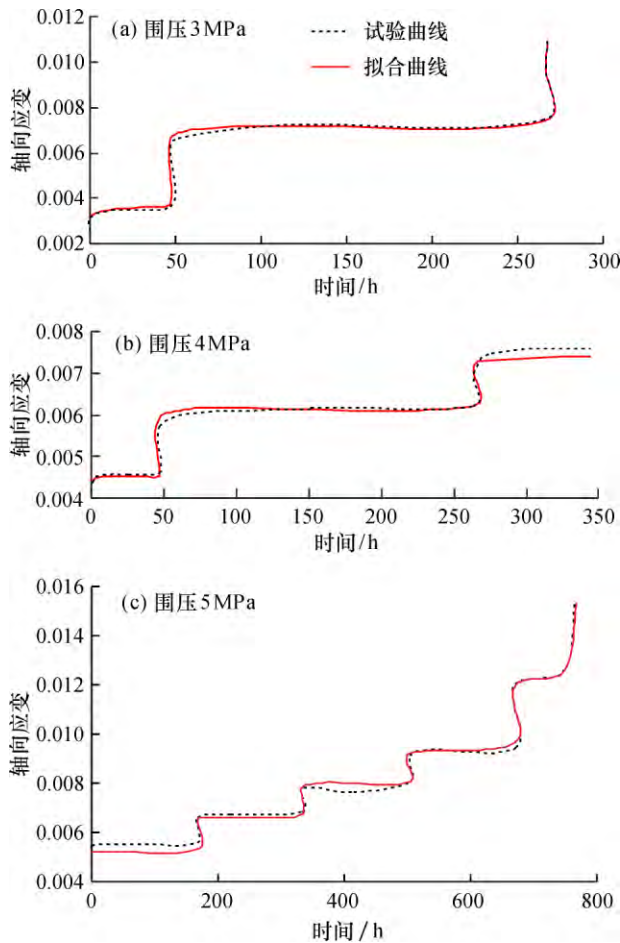


图 6 蠕变试验曲线和拟合曲线

Fig. 6 Test curves and fitting curves of creep test

表 1 粉砂岩流变模型拟合结果

Table 1 Fitting results of the rheology model for siltstone

围岩种类	围压/MPa	拟合流变公式
粉砂岩	3	$\varepsilon = 1.75e^{-7} \times \sigma^{2.00} \times t^{1.20}$
粉砂岩	4	$\varepsilon = 4.21e^{-7} \times \sigma^{1.82} \times t^{1.33}$
粉砂岩	5	$\varepsilon = 9.20e^{-7} \times \sigma^{1.80} \times t^{1.42}$

4 结 论

通过对云南某公路隧道上穿既有铁路隧道交叉段粉砂岩进行分级加载条件下的三轴蠕变试验, 得到结论如下:

(1) 该公路隧道上穿既有铁路隧道交叉段粉砂岩具有显著的瞬时变形, 蠕变变形量相对很小。

(2) 围压状况影响粉砂岩的蠕变特性。在相同的偏应力条件下, 围压越大, 粉砂岩试样的蠕变变形量和瞬时变形越小, 起始蠕变速率也越小。增大围压能够改变试样的受力状态, 从而增大其

强度。

(3) 随着偏应力的增大, 衰减蠕变的持续时间增大, 蠕变模式发生转变, 由一开始的孔隙裂隙压密阶段逐步进入试样内部裂隙裂纹的扩展、贯通阶段。当偏应力未超过临界应力时, 裂纹的扩展最终会终止, 如果要使裂纹继续扩展, 就必须增大偏应力。

(4) 在考虑损伤和硬化效应的条件下, 采用非线性蠕变模型能够对粉砂岩的蠕变特性进行准确描述, 本文的工作能够为该交叉段隧道围岩变形和稳定性分析提供相应的参数和依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张忠亭, 罗居剑. 分级加载下岩石蠕变特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (2): 218 - 222.
- [3] 苏承东, 陈晓祥, 袁瑞甫. 单轴压缩分级松弛作用下煤样变形与强度特征分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (6): 1135 - 1141.
- [4] 苏承东, 熊祖强, 刘少伟, 等. 煤样单轴压缩时滞性变形破坏的试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (3): 665 - 671.
- [5] 邹建超, 赵同彬, 房凯, 等. 分级加载蠕变全过程岩石硬化及损伤机制 [J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2015, 34 (6): 58 - 67.
- [6] 谏文武, 原鹏博, 刘小伟. 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (S1): 3076 - 3081.
- [7] 肖伟晶, 王晓军, 陈辰, 等. 分级加载条件下深部灰岩蠕变特性研究 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34 (8): 135 - 138.
- [8] 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.
- [9] 辛亚军, 李梦远. 岩石分级加载蠕变的能量耗散与变形机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (S1): 2883 - 2897.
- [10] 袁海平, 曹平, 万文, 等. 分级加卸载条件下软弱复杂矿岩蠕变规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (8): 1575 - 1581.
- [11] 李娜, 曹平, 衣永亮, 等. 分级加卸载下深部岩石流变实验及模型 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2011, 42 (11): 3465 - 3471.
- [12] 曹平, 郑欣平, 李娜, 等. 深部斜长角闪岩流变试验及模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (S1): 3015 - 3021.
- [13] 赖荣辉, 陈亚南, 陈自海. 分级加卸载下红砂岩蠕变破坏能量耗散特征研究 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44 (6): 200 - 204.

- [14] 石振明, 张力. 锦屏绿片岩分级加载流变试验研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2011, 39 (3): 320 - 326.
- [15] 赵延林, 曹平, 陈沅江, 等. 分级加卸载下节理软岩流变试验及模型 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (7): 748 - 753.
- [16] 张耀平, 曹平, 赵延林. 软岩黏弹塑性流变特性及非线性蠕变模型 [J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38 (1): 34 - 40.
- [17] 宋勇军, 雷胜友, 邹翀, 等. 分级加载下炭质板岩蠕变特性的试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2013, 30 (9): 47 - 52.
- [18] 余宏明, 于怀昌, 陈银生. 分级加载条件下紫红色泥岩蠕变特性试验研究 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2010 (9): 67 - 70.
- [19] 张向东, 尹晓文, 傅强. 分级加载条件下紫色泥岩三轴蠕变特性研究 [J]. 实验力学, 2011, 26 (1): 61 - 66.
- [20] 胡波, 王宗林, 梁冰, 等. 岩石蠕变特性试验研究 [J]. 实验力学, 2015, 30 (4): 438 - 446.
- [21] 范庆忠, 高延法. 软岩蠕变特性及非线性模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (2): 391 - 396.
- [22] 范庆忠, 高延法, 崔希海, 等. 软岩非线性蠕变模型研究 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29 (4): 505 - 509.
- [23] Brace W F, Bombolakis E G. A note on brittle crack growth in compression [J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68 (12): 3709 - 3713.
- [24] Vyalov S S, Pekarskaya N K. Long-term strength of soils [J]. Developments in Geotechnical Engineering, 1986, 5 (3): 147 - 150.
- [25] 田洪铭, 陈卫忠, 田田, 等. 软岩蠕变损伤特性的试验与理论研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (3): 610 - 617.

Study on creep properties of soft rock in adjacent cross tunnel

ZHAO Dong-qi¹, DENG Qin², SONG Zheng-qun³, WU Song^{2,4}

(1. Yunnan Highway Development & Investment Co., Ltd., Kunming 650020, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Yunnan Shanghe Highway Construction Headquarters, Dali 671000, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China)

Abstract: To investigate the creep properties of siltstone in the segment from an expressway tunnel in Yunnan and on top of an existing rail tunnel, a series of tri-axial step loading creep tests were conducted on samples using TLW-2000 rock tri-axial rheometer. Results of tests indicate that the creep deformation and transient deformation decrease with the increase of confining pressure, when subjected to the identical deviatoric stress and as the steps of loading cumulates, the creep strain exhibits a trend that the creep strain increases first, stabilizes then and increases dramatically in the end. Moreover, the initial creep velocity decreases with the increase of confining pressure. Considering the damage and hardening effect during creep, a nonlinear creep constitutive model is utilized to depict the creep properties of siltstone. The fitting results show that the nonlinear creep constitutive model is competent.

Key words: rock; tri-axial creep test; step loading; nonlinear model