

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 2-0556-06

超大断面炭质千枚岩隧道新型 支护结构长期稳定性研究

原小帅, 张庆松, 李术才, 李利平, 刘 钦

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘 要: 针对兰渝铁路两水隧道岩质软、跨度大的特点, 采用加厚初喷、二衬和双层型钢拱架的新型支护方式。通过对现场岩样的室内三轴蠕变试验, 研究炭质千枚岩蠕变特性。试验结果表明, 伯格斯蠕变模型能比较准确地描述其长期流变行为。运用大型岩土工程分析软件 FLAC^{3D}, 结合现场新型支护方式, 模拟隧道建成后 DK357+976 处围岩的流变力学行为, 分析隧道在运营过程中围岩的变形和支护结构的受力情况。结果表明: 在隧道 100 a 的使用期限内, 二次衬砌能有效地减小围岩蠕变变形, 支护结构中仅拱顶初喷在后期产生破坏, 现场支护方式可以保证隧道的长期稳定性。

关 键 词: 超大断面; 炭质千枚岩; 三轴蠕变试验; 长期稳定性

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Study of long-term stability of new support structure in carbonaceous phyllite tunnels with ultra-large sections

YUAN Xiao-shuai, ZHANG Qing-song, LI Shu-cai, LI Li-ping, LIU Qin

(Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In connection with Lan-Yu railway Liangshui Tunnel's characteristics of soft rock and large span, a kind of new type support structure including thickening shotcrete and secondary liner and double deck is adopted. A laboratory triaxial creep test to on-site specimens is carried out to study the creep properties of the carbonaceous phyllite. According to the test results, Burgers creep model is adopted to describe the long-term rheological behaviour of carbonaceous phyllite. Combined with on-site practical support ways; the fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimension (FLAC^{3D}) is used to simulate surrounding rock's rheological mechanical behaviour in DK357+976 after the completion of this tunnel. Surrounding rock's deformation and supporting structure's mechanical behaviour during operation are analyzed. The research results show that secondary liner can effectively reduce surrounding rock's creep deformation; and only part of vault shotcrete will yield 100a later. The on-site new support ways can ensure long-term stability of the tunnel.

Key words: ultra-large sections; carbonaceous phyllite; triaxial creep test; long-term stability

1 引 言

近年来, 国家加大了交通基础设施建设, 特别是客运专线和高速铁路的建设都进入了前所未有的高峰期。高速铁路一般设计列车时速为 200~250 km/h, 为了克服高速列车在隧道内运行所引起的空气动力学问题, 新建的高速铁路隧道基本采用双线隧道, 这些隧道的开挖面积普遍在 150 m² 以上。特别是对于软岩, 其流变性是隧道工程围岩

变形失稳的最重要原因之一^[1]。围岩的流变作用会引起围岩应力调整, 大幅增加支护上的荷载, 引起衬砌结构的变形甚至开裂, 从而影响工程的稳定性^[2-5]。

在这种情况下, 原有的支护形式往往不能适应超大断面软岩隧道, 加强的新型支护结构就应运而生, 这些新型的支护结构往往是根据工程经验类比法进行设计和施工, 其施工期的支护效果在现场已得到证明, 但目前国内外对于新型支护结构在超大

收稿日期: 2011-03-31

基金项目: 铁道部科技研究开发计划课题(No.2009G005-C); 国家自然科学基金面上项目(No.50874068); 国家自然科学基金资助项目(No.51009085)。

第一作者简介: 原小帅, 男, 1981 年生, 硕士研究生, 主要从事隧道施工优化方面的研究工作。E-mail: yuan1981@sina.com

断面软岩隧道中的长期稳定性研究较少,开展隧道运营期围岩流变作用对支护结构稳定性的影响具有十分重要的现实意义^[6-9]。

为了保证工程安全,验证和优化兰渝铁路两水隧道的新型支护方案,保证优化设计的合理性,本文通过对现场岩样的三轴蠕变特性测试,采用伯格蠕变模型描述炭质千枚岩的长期塑性流动行为^[10-13],并结合现场支护方案,运用 FLAC^{3D} 软件对两水隧道进口 DK357+976 处围岩及支护结构长期稳定性分析进行了数值计算,主要分析在设计基准周期 100 a 以内围岩变形、支护结构受力随时间变化的规律,以钢结构和混凝土结构的强度控制标准为稳定性判据,对隧道及新型支护结构的安全性进行评价,研究成果为软岩大跨隧道设计和施工提供一些建议以供参考。

2 工程概况

2.1 工程概况

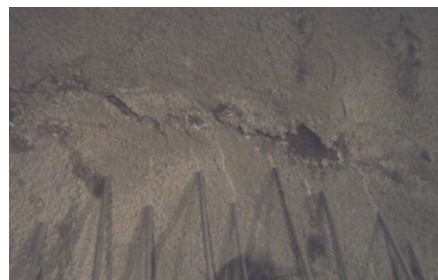
兰渝铁路两水隧道位于甘肃省武都区白龙江左岸中山区,地形较为陡峻,隧道起讫里程 DK357+162~DK362+084,全长 4 922 m,设计为一座双线隧道,隧道最大埋深为 346 m。隧址区涉及地层主要为志留系中、上统千枚岩夹板岩、炭质千枚岩、灰岩等,岩质较软,受构造影响,揉皱、褶皱发育,隧道围岩除 DK360+744~DK361+984 段为 IV 级外,其余均为 V 级。隧道开挖过程中易产生软岩大变形,隧道建成后软岩的流变效应对工程的长期稳定性也有一定影响。

水文地质方面,隧址区基岩裸露,降水量较小,地下水补给来源不足。根据现场调查,虽然洞身基岩节理裂隙较发育,岩体破碎,除个别沟谷有零星季节性泉水出露外,隧道所在区域支沟均无水。结合区域资料综合分析,围岩的富水程度为弱富水区。隧道可能出现突水地段主要位于浅埋的支沟谷底,岩性接触带及延伸长大的节理、裂隙密集带。炭质千枚岩属泥质成分软岩,其遇水软化的性质也不容忽视。

2.2 现场支护方式

隧道按照原设计开挖支护至 DK357+430 附近时,由于岩性变差、埋深的增加、层间裂隙水致围岩软化等不利因素的影响。初期支护完成后,围岩仍产生较大变形,致使隧道初期支护大面开裂脱落,如图 1(a)中所示;原 I20b 型钢拱架部分压扭变形严重,初期支护侵限达 60 cm 之多,不得不进行换拱处理,如图 1(b)所示,严重影响了施工进度。

针对此类大变形,修正后的支护参数如下:28+20 cm 厚 C25 喷射混凝土, $L=6$ m 系统锚杆,1 m×0.8 m (环×纵向间距)布置 H175 (高度为 175 mm,宽度为 90 mm,翼缘板厚度为 8 mm,肋板厚度为 5 mm)+I16 型钢加强双层拱架支护,间距为 0.5 m,C35 二次衬砌厚度为 60 cm,开挖方式不变,仍采用 3 台阶预留核心土法,并采取及时封闭掌子面的加固措施。修正后的支护由于加大了衬砌厚度,开挖面积达 156 m²。



(a) 边墙初支开裂



(b) 初支侵限后的换拱处理

图 1 隧道衬砌破坏情况

Fig.1 Photos of the tunnel liner's damage

新型的支护结构虽然可以保证施工期隧道的安全,但软岩的流变效应对支护结构的长期作用仍值得探讨。本文拟采用此种新型支护参数,选取接近于隧道最大埋深的 DK357+976 处(埋深为 332 m),以室内三轴蠕变试验结合现场支护方式的手段,研究支护结构和隧道的长期稳定性。

3 炭质千枚岩三轴蠕变试验

本次试验选取的炭质千枚岩试样取自两水隧道进口 DK357+976 处,运回山东大学岩土中心加工成 $\phi 50$ mm×100 mm 的圆柱形标准试件。三轴压缩蠕变试验在山东大学与长春朝阳试验机厂联合研制的微机控制岩石三轴流变仪上进行,该试验机可以完成超长时间(约 10 000 h 以上)的岩石三轴试验,可以在超长时间的流变试验中保持稳定的垂直压力和围压,并且在试验过程中可以直接量测试样产生的轴向和径向变形并实时记录。

隧道埋深为 332 m, 依据勘测资料 $\mu=0.42$, 按照 $\mu/(1-\mu)$, 侧压力系数取 0.75, 计算出的水平地应力约为 5 MPa。因此本次试验进行 1 组 (每组 3 个试件) 饱和试样的三轴蠕变试验, 围压取 $\sigma_2 = \sigma_3 = 5$ MPa, 与水平地应力相同。结合隧道围岩的应力水平, 蠕变试验采用分级加载, 每级荷载为 8~10 kN, 分 5~8 级加载, 每级荷载稳定 3~5 d, 或者试样的轴向、径向变形均低于 $1 \mu\text{m}/\text{h}$ 时, 施加下一级荷载, 直至试件破坏。

蠕变试验应力-应变曲线表明, 每级荷载下都有瞬时变形和蠕变变形, 随着荷载的增大, 同等荷载产生的瞬时变形逐渐减小, 而产生的蠕变变形逐渐增大, 如图 2 所示。曲线上出现的水平台阶即为蠕变产生的轴向应变, 后期的蠕变台阶长度不断变大, 反映了岩石破坏前的加速蠕变过程。

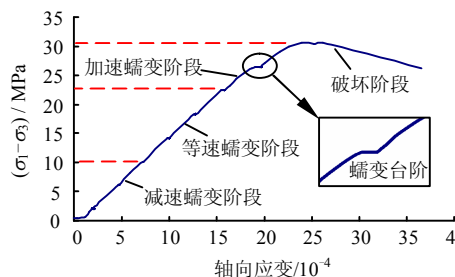


图 2 炭质千枚岩应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of carbonaceous phyllite

Burgers 蠕变模型由 Maxwell 模型和 Kelvin 模型串联而成, Maxwell 模型可以反映炭质千枚岩的瞬时变形和等速蠕变, Kelvin 模型可以反映其减速蠕变阶段。图 3 给出了多级荷载作用下饱和炭质千枚岩三轴蠕变试验曲线及采用 Burgers 蠕变模型所得出的曲线, 两曲线较为吻合, 因而在数值分析中拟采用 FLAC^{3D} 软件自带的 Burgers 蠕变模型进行流变模拟。关于 Burgers 蠕变模型参数的辨识, 在另一文中有详细介绍。

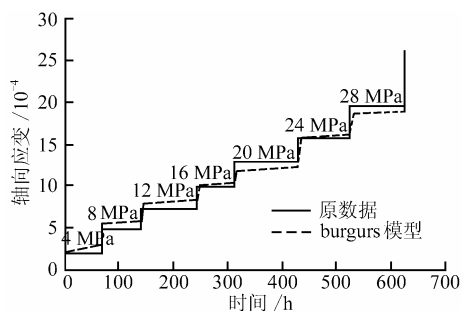


图 3 炭质千枚岩三轴蠕变试验曲线
Fig.3 Strain-time relationship curves of triaxial creep test of carbonaceous phyllite

4 数值分析

4.1 计算模型及参数

隧道模拟段前后较长范围内, 围岩岩性单一, 因此将此问题简化为平面应变问题, 建立平面模型。数值计算模型如图 4 所示。整个模型共 11 589 个单元, 23 566 个节点。模型尺寸为 130 m×120 m, 通过施加等效自重应力来模拟 332 m 的隧道埋深, 水平地应力按照竖向地应力的 0.75 倍取值。采用 beam 单元模拟钢拱架, cable 单元模拟锚杆, 初喷、二衬和仰拱均采用恢复实体单元并赋予相应参数的方式模拟。

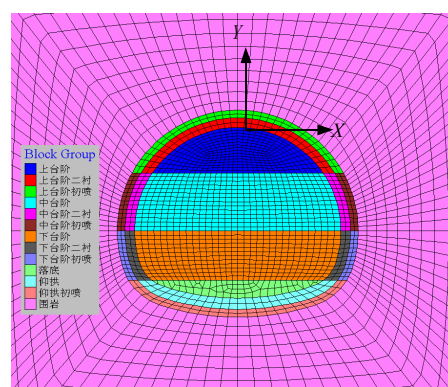


图 4 FLAC^{3D} 计算模型(局部)
Fig.4 Sketch of FLAC^{3D} numerical model (partial)

围岩基本参数按 V 级计算, 见表 1。锚杆与水泥浆组合共同受力, 按等效原则考虑, 参数见表 2。双层钢支撑按照叠加原理, 综合考虑其横截面积、惯性矩等参数, 见表 3。初喷和二衬参数见表 4。

表 1 岩体基本参数值

Table 1 Basic parameters of rock mass					
重度 /(kN/m ³)	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
24	1.0	0.4	0.3	27	0.15

表 2 锚杆基本参数值

Table 2 Basic parameters of anchor bolt					
直径 /mm	等效弹模 /GPa	长度 /m	拉压屈服 /kN	水泥浆 弹模/GPa	水泥浆黏聚力 /MPa
22	52.5	6	114	3.0	0.27

表 3 双层钢支撑基本参数值

Table 3 Basic parameters of steel beam with double deck					
弹性模量 /GPa	泊松比	横截面积 /cm ²	惯性矩 I _y /cm ⁴	惯性矩 I _z /cm ⁴	抗压强度 /MPa
1.0	0.3	48.4	5438	136	981
					抗拉强度 /MPa
					400

表 4 混凝土衬砌基本参数值

Table 4 Basic parameters of concrete liner					
衬砌 名称	混凝土 标号	重度 /(kN/m ³)	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa
初喷	C25	25	28	0.17	4.95
二衬	C35	25	40	0.20	8.45
					内摩擦角/(°)
					48
					56

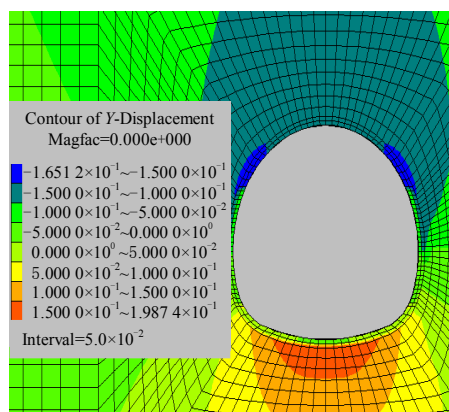
4.2 计算步骤

为模拟隧道开挖、支护、围岩蠕变等全过程, 计算共分为 4 步: ①地应力平衡, 根据埋深和侧压力系数计算初始地应力; ②三台阶法开挖隧道, 施作双层型钢拱架和锚喷支护, 用摩尔-库仑准则求解平衡; ③施作二次衬砌; ④基于 Burgers 蠕变模型模拟隧道围岩长期蠕变 (100 a)。

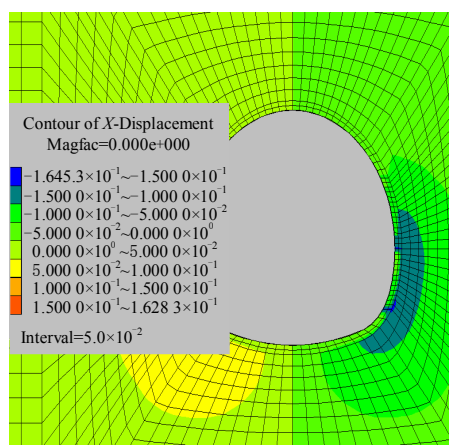
4.3 计算结果分析

4.3.1 围岩位移

由图 5 可知, 隧道开挖支护完毕后, 隧道最大竖向位移发生在两拱肩处, 而最大水平位移发生在拱腰和拱角处, 既每台阶的最低处, 竖向和水平的最大位移分别为 16.5 cm 和 16.4 cm。



(a) 竖向位移



(b) 水平位移

图 5 初支完成后隧道围岩位移云图(单位: m)
Fig.5 Nephograms of displacements of tunnel's surrounding rock after preliminary bracing(unit:m)

如图 6 所示, 施作二衬后, 围岩在蠕变效应作用下变形逐步发展, 前 3 a 时间段内, 蠕变效应最为明显, 拱顶在这段时间内产生的位移为 1.2 cm; 之后 2 a 拱顶下沉值略有波动, 然后缓慢增长; 至

100 a 时, 总的位移增量为 1.7 cm。由图 6 的分析可知, 二次衬砌在软岩隧道中对围岩长期变形控制起到了一定的作用, 因而分析二衬结构的受力情况对研究软岩隧道的长期稳定性有重要意义。图 6 同时给出了不施作二衬隧道围岩的蠕变情况, 其整体规律同施作二衬时基本相同, 但因蠕变产生的位移约为前者的 2 倍。洞周其余关键点蠕变规律与此基本相同, 在此不再赘述。

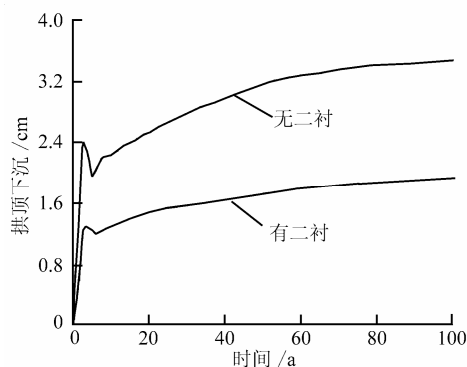


图 6 蠕变期间拱顶下沉量
Fig.6 Curves of vault subsidence during creep

4.3.2 初期支护受力分析

初期支护包括锚杆、双层型钢拱架和喷射混凝土。图 7 为 100 a 时初喷的最大、最小主应力分布图, 初喷的最大主应力为 -2 MPa, 最小主应力为 -80 MPa, 均为压应力, 出现在拱顶喷层上部, 已达到屈服极限, 但区域较小且靠近围岩, 因而不会对影响隧道正常使用。

整个蠕变过程中锚杆受力基本不变, 最大轴力约为 200 kN, 发生在拱腰处, 拱顶区锚杆受拉力最小。钢支撑在蠕变过程中, 发生在拱肩处的最大弯矩值略有减小, 从 46 kN·m 减小到 44 kN·m, 而底板和拱角处的弯矩 5 kN·m 增大到 30 kN·m, 由弯矩产生的拉、压应力均远未达到钢材的屈服强度。

4.3.3 二衬受力分析

图 8 为蠕变 100 a 后二衬的最大、最小主应力分布云图。

二衬施作完成后的蠕变过程中, 其最大主应力中的拉应力出现在二衬内侧, 蠕变 1、3、10、50、100 a 后, 二衬的最大拉应力分别为 0.1、0.15、0.3、0.42、0.55 MPa。

二衬内的最小主应力在整个蠕变过程中, 均为压应力, 蠕变 1、3、10、50、100 a 后, 二衬内最大压应力分别为 12、19、20、23、30 MPa, 发生处由二衬拱肩外侧逐渐转移到拱角内侧。

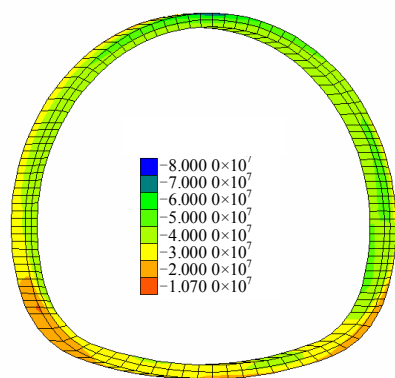
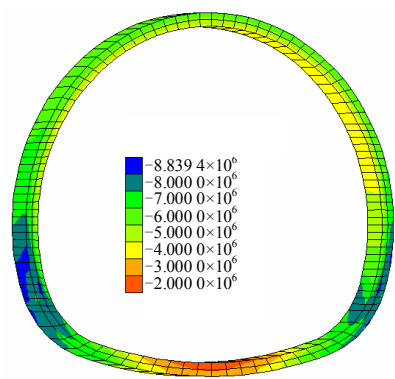
(a) $\sigma_{\min}$ 分布云图(b) $\sigma_{\max}$ 分布云图

图7 100 a 后初喷主应力分布云图 (单位: Pa)
Fig.7 Nephograms of principal stress distribution of shotcrete layer after 100 a (unit:Pa)

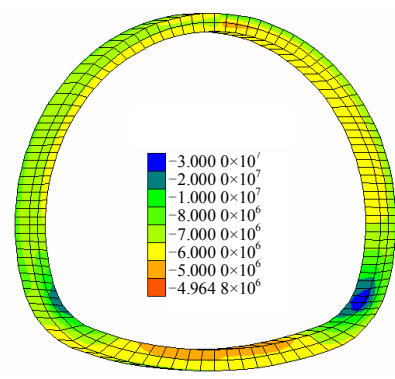
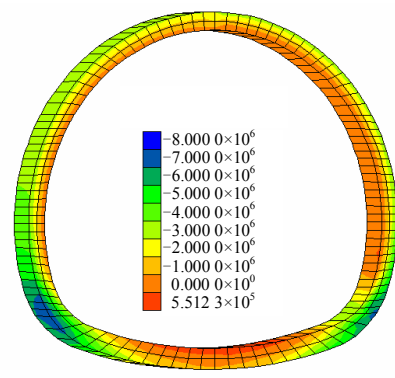
(a) $\sigma_{\min}$ 分布云图(b) $\sigma_{\max}$ 分布云图

图8 100 a 后二衬主应力分布云图 (单位: Pa)
Fig.8 Nephograms of principal stress distribution of secondary liner after 100 a (unit:Pa)

由二衬的内力分析可知,在 100 a 的整个蠕变过程中二衬的应力在不断增大,主应力值与蠕变时间基本呈线性关系。拉应力较小,压应力后期较高,已接近混凝土的破坏强度。

5 结 论

(1) 超大断面软岩隧道施工过程中极易产生大变形,采用加厚初喷、二衬和双层钢拱架的新型支护方式,可以在施工期有效抑制隧道变形。

(2) 通过对现场岩样的室内三轴流变试验,确定了炭质千枚岩的蠕变模型——Burgers 蠕变模型,以此分析兰渝铁路两水隧道的新型支护结构的长期稳定性,为类似工程设计、施工提供一定经验。

(3) 计算分析结果表明:炭质千枚岩流变效应明显;隧道围岩在 3 a 内的蠕变变形占总变形量的 70% 以上;二次衬砌能有效减小隧道围岩因蠕变产生的变形;初期支护中的锚杆和钢拱架在 100 a 内不会达到钢材的屈服强度,拱顶处的喷射混凝土层在后期会产生破坏,但不会影响隧道使用;受围岩蠕变影响,二次衬砌应力随时间不断增大,基本呈线性关系,拉应力较小,压应力后期较高,虽已接近混凝土的破坏强度,新型支护结构的设计在 100 a 内仍是安全的,满足隧道长期运行安全要求。

(4) 本文仅考虑围岩蠕变对支护结构的影响,即二次衬砌仅承担由于围岩蠕变产生的附加荷载。对于支护施作时机及混凝土自身蠕变与围岩蠕变的综合效应研究,需进一步分析。随着使用年限的增加,隧道支护结构受地下水、运营环境等的影响也需进一步研究。

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.
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(6): 1081—1106.
- [2] 陈卫忠, 曹俊杰, 于红丹, 等. 特殊地质区域海底隧道长期稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2017—2026.
CHEN Wei-zhong, CAO Jun-jie, YU Hong-dan, et al. Study of long-term stability of subsea tunnel in special geological region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10): 2017—2026.
- [3] 李海燕, 刘端举, 孙庆国, 等. 千米深井软岩巷道破坏机理及支护技术研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2009,

- 39(4): 112—115.
- LI Hai-yan, LIU Duan-ju, SUN Qing-guo, et al. Study on failure mechanism and supporting technology of soft rock roadway in a kilometer deep mine[J]. **Journal of Shandong University (Engineering Science)**, 2009, 39(4): 112—115.
- [4] 陈国庆, 冯夏庭, 周辉, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞长期稳定性数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(Supp.): 417—422.
- CHEN Guoqing, FENG Xiating, ZHOU Hui, et al. Numerical analysis of the long-term stability of the seepage tunnel in Jinping II Hydropower Station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.): 417—422.
- [5] 彭守拙, 窦永强. 砾岩隧洞的长期稳定性分析[J]. 岩土力学, 1995, 16(2): 64—73.
- PENG Shou-zhuo, DOU Yong-qiang. Long-term stability analysis of the tunnel in conglomerate[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1995, 16(2): 64—73.
- [6] 万明富. 超大跨公路隧道开挖力学行为研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [7] 吴恒滨. 小净距大断面隧道施工力学特性及长期稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [8] 张尧, 熊良宵. 岩石流变力学的研究现状及其发展方向[J]. 地质力学学报, 2008, 14(3): 274—285.
- ZHANG Yao, XIONG Liang-xiao. Rock rheological mechanics: present state of research and its direction of development[J]. **Journal of Geomechanics**, 2008, 14(3): 274—285.
- [9] MARANINI E, YAMAGUCHI T. A non-associated viscoplastic model for the behaviour of granite in triaxial compression[J]. **Mechanics of Material**, 2001, 33(5): 283—293.
- [10] 杨文东, 张强勇, 张建国, 等. 基于 FLAC^{3D} 的改进 Burgers 蠕变损伤模型的二次开发研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1956—1964.
- YANG Wen-dong, ZHANG Qiang-yong, ZHANG Jian-guo, et al. Second development of improved Burgers creep damage constitutive model of rock based on FLAC^{3D}[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1956—1964.
- [11] 严竞雄. 千枚岩隧道岩性及施工期结构受力变形机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [12] 贺汇文. 秦岭变质岩区岩体结构特征及公路边坡稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [13] Itasca Consulting Group, Inc. Fast Lagrangian analysis of continua in three dimensions (version 2.1), user's manual[R]. Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc., 2003.
-
- 上接第 555 页
- Station, 2009, 25(1): 39—41.
- [2] JIANG Y J, LI B, YAMASHITA Y. Simulation of cracking near a large underground cavern in a discontinuous rock mass using the expanded distinct element method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 46(1): 97—106.
- [3] YOSHIDA H, HORII H. Micromechanics-based continuum model for a jointed rock mass and excavation analyses of a large-scale cavern[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 41(1): 119—145.
- [4] XIANG L, ZHU W S, MA Q S. Application of damage model in stability analysis of Shuangjiangkou underground caverns[C]//8th International Conference on Fracture and Strength of Solids 2010. Malaysia: Kuala Lumpur, 2011: 462—463.
- [5] 徐靖南. 压剪应力作用下多裂隙岩体的力学特性—理论分析与模型试验[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1993.
- [6] 徐靖南, 朱维申, 白世伟. 压剪应力作用下多裂隙岩体的力学特性——断裂损伤演化方程及试验验证[J]. 岩土力学, 1994, 14(2): 1—12.
- XU Jing-nan, ZHU Wei-shen, BAI Shi-wei. Design of mini multipoint extensometer in geomechanical model test of cavern group and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, 14(2): 1—12.
- [7] 马庆松. 几何初始损伤模型及其在岩土工程数值计算中的应用[硕士学位论文 D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [8] 张乾兵, 朱维申, 李勇. 洞群模型试验中微型多点位移计的设计及应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 623—628.
- ZHANG Qian-bin, ZHU Wei-shen, LI Yong. Design of mini multipoint extensometer in geomechanical model test of cavern group and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(2): 623—628.