

# 水工隧洞施工缺陷对衬砌承载性能的影响

汤 雷, 傅 翔

(南京水利科学研究院, 南京 210024)

**摘 要:**在水工隧洞建设中,混凝土衬砌裂缝和顶拱厚度不足是经常发生且十分典型的工程质量问题。具有这种质量缺陷的衬砌在不利工况下其结构性态如何,是广大技术人员十分关心的问题。该文在白山嘴输水隧洞实际衬砌结构缺陷现场检测的基础上,分析了缺陷模式和尺寸,提炼出缺陷特征,并采用 FLAC 程序进行了计算分析。计算结果表明,该缺陷对衬砌的安全稳定性有明显影响,但在进行缺陷修补加固、恢复衬砌整体力学特性以后,混凝土衬砌的性能将能够满足设计要求。

**关键词:**隧洞; 衬砌; 裂缝; 厚度

中图分类号:U451.4 文献标识码:A

文章编号:1674-4764(2009)02-0074-06

## Influence of Construction Defect on the Performance of Lining in Hydraulic Tunnels

TANG Lei, FU Xiang

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P. R. China)

**Abstract:** In the construction of hydraulic tunnel, the engineering quality problem is often caused by concrete cracks and insufficient thickness of roof lining. This problem attracted great attention of the most engineers that whether the structure performance of this kind of lining can meet the design criteria or not, especially under unfavorable conditions. Based on the on-site inspections of the lining defects in Baishanzui tunnels, the model and size of the defects are analyzed with FLAC program. The study shows that the defects have obvious adverse influence on the stability and safety of the tunnel lining, however, if a backfilling grouting is carried out and the cracks are repaired, the integrity of lining is restored, the behavior of lining will be improved and can meet the design criteria as well.

**Key words:** tunnel; lining; crack; thickness

近十年来,受许多单位委托,我们开展了水工隧洞结构的质量检测、安全评定和修补加固等工作。其中仅在新疆就有“635”工程导流洞、喀浪古尔水利枢纽引水泄洪洞、博塔玛依输水隧洞、白山嘴输水隧洞和乌鲁瓦提水电站冲沙洞等。在上述工作中我们发现衬砌贯穿性裂缝和顶拱厚度严重不足是最为常见的施工缺陷,参建各方均十分关心其对隧洞结构承载性能的影响、是否能够满足原设计要求等。该文以白山嘴输水隧洞为例,阐述了我们的分析思路、

计算方法和最终评价结果。

白山嘴隧洞是新疆引额济克工程总干渠上一座重要的输水建筑物,总长 2 099 m,其中洞身段长 1 792 m。开挖断面直径 8.2 m,衬砌后断面直径 6.9 m,为一圆形断面。隧洞地质条件较差,为Ⅳ类围岩,节理发育,稳定性差。岩层为弱胶结,力学强度较低。因此施工中采用先开挖、支护、衬砌上部,然后进行下部开挖、支护、衬砌的施工方法,由于结合面处理不当使得上下部衬砌间存在贯穿的施工反

收稿日期:2008-07-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50679045);江苏省自然科学基金项目(BK2008085)

作者简介:汤雷(1972-),男,南京水利科学研究院教授级高工,博士,主要从事水工结构研究,(E-mail)leitang@nhri.cn。

缝<sup>[1]</sup>。此外在该隧洞进口 210 m 范围内顶拱混凝土衬砌厚度不足<sup>[2]</sup>,该处衬砌的设计厚度为 0.55 m,实测最小厚度为 0.13 m,最大厚度为 0.42 m,平均厚度为 0.24 m。厚度不足也显著影响衬砌结构的承载能力及其受力状态。白山嘴隧洞同时并大量地出现了贯穿裂缝和顶拱衬砌厚度不足这两种典型缺陷,是以本文以之为例,主要分析论证此两种常见的典型缺陷对结构性能的影响。

## 1 根据检测结果分析建立计算模型

### 1.1 施工反缝

通过对岩性条件、山岩压力、隧洞结构和使用工况多种组合的分析,确定的最不利组合为运行期工况。但由于岩性软弱围岩长期不能稳定,因此在该工况下仍考虑围岩压力调整的作用,并分析运行期水的侵蚀和软化作用的影响<sup>[3-4]</sup>。荷载组合为山岩压力、衬砌和内水的自重。衬砌上的施工缝考虑两种状态:(1)贯穿性裂缝(图 1);(2)上拱和底拱胶结良好,没有施工缝。设立第 2 种状态主要为对比分析计算结果。

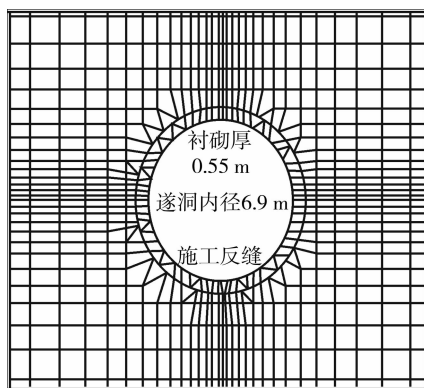


图 1 施工反缝计算单元剖分

### 1.2 顶拱厚度不足

1.2.1 回填灌浆作用的分析 根据检测结果,业主已决定回填灌浆。考虑到回灌后新老混凝土接触面的薄弱性,并且回灌的浆体在凝固和强度提高的过程中会收缩,造成新老混凝土难以成为一体、共同承载。为了准确地掌握顶拱受力状态,需要进行两种情况的计算,第 1 种:不考虑回填灌浆的作用,这是较为保守的计算(图 2);第 2 种:考虑回填灌浆的作用,并考虑弱面和收缩的影响,这是较为接近实际情况的计算<sup>[5-6]</sup>。

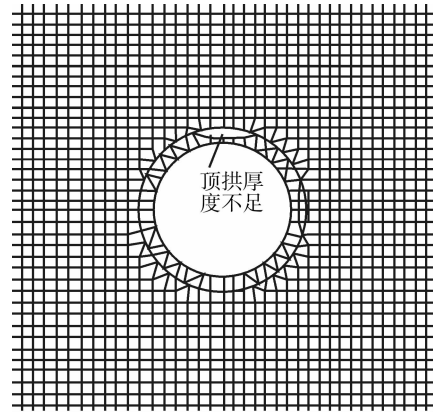


图 2 顶拱厚度不足计算单元剖分

1.2.2 计算断面顶拱衬砌厚度的确定 计算的目的是考察最危险断面的承载力和受力状态。白山嘴隧洞进口 210 m 范围内顶拱混凝土衬砌最小厚度为 0.13 m,发生在 0+088 断面,因此选取该断面为计算断面。计算采用的顶拱衬砌厚度值要符合衬砌承载的实际情况。由于在一定段长内衬砌是共同承载,相距较远处的衬砌对该断面衬砌承载力影响很小,因此计算采用的厚度值要考虑该段内衬砌共同承载的实际情况。段长的选取要与顶拱空穴宽度相匹配,根据弹塑性力学原理,选取段长为顶拱空穴宽度的  $2 \times 3$  倍,计算得段长为 13.2 m。在该段长内不同位置的衬砌对计算断面承载力的影响也是不同的,因此采用加权平均值来计算采用的顶拱衬砌厚度,权值采用线性权值。经计算该顶拱衬砌厚度值确定为 0.18 m<sup>[7-8]</sup>。

1.2.3 荷载组合 经分析并与业主沟通,最不利工况亦确定为运行期工况。考虑到岩性软弱、以及内水外渗对围岩的扰动,因此在该工况下仍考虑围岩压力及其调整的作用<sup>[9-10]</sup>。荷载组合为山岩压力、衬砌和内水的自重。考虑衬砌上的非贯穿但胶结较差的两条施工缝。计算两种情况:(1)不考虑回填灌浆的作用;(2)考虑回填灌浆的作用,并考虑新老混凝土胶结不好、灌入浆体的收缩。据此建立两个计算模型,并对比分析计算结果<sup>[11-12]</sup>。

## 2 计算基础条件和参数

据新疆水利水电勘测设计研究院提供的有关白山嘴隧洞设计和施工方面的资料确定计算条件和参数,没有提供的数据则参考规范和类似的工程资料取值。

1)围岩和混凝土衬砌力学参数<sup>[13-14]</sup>(表 1)

表 1 岩体力学参数

名称	弹性模量 /GPa	泊松比	粘聚力 /MPa	摩擦角 /°	密度 /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	剪切模量 /GPa	体积模量 /GPa
砂岩	0.27	0.36	0.02	30	1 770	0.10	0.32
泥岩	0.41	0.40	0.36	25	1 710	0.15	0.68
衬砌混凝土 C25	22.5	0.167	2.50	45	2 500	12.3	13.5

2) 荷载条件: 地应力: 隧洞顶拱以上地层厚为 22 m。考虑侧压系数, 在重力加速度的作用下自然生成地应力场; 衬砌和内水的自重; 内水压力: 0; 外水压力: 0。

3) 计算范围: 根据弹塑性力学原理, 当计算边界超过隧洞直径 3 倍时, 边界的影响可忽略不计。本计算中隧洞以上边界取至地表, 其它方向上均取为边界距隧洞几何中心 25 m。

### 3 计算方法

采用岩土工程专用数值软件 FLAC 分析该隧洞的应力场和变形场。衬砌混凝土和围岩体均采用通用的摩尔—库仑模型。根据计算基础条件和参数, 并突出主要因素的影响, 网格划分如图 1、图 2 所示。根据地质报告砂岩与泥岩成水平互层分布, 在单元网格划分图上, 砂岩为第 11 至 15 和第 31 至 38 层单元, 其余为泥岩。

隧洞圆心的坐标为(0,0), 计算域为, Y 方向 -25~25 m, X 方向 -25~26 m, 共剖分约 1 500 个单元。洞体处约 0.25 m<sup>2</sup>/单元。计算域左、右边界 X 方向位移固定, 下边界 Y 方向位移固定。

根据隧洞施工运行的实际过程, 计算分两步, 第 1 步: 地应力场形成, 在隧洞开挖前, 山岩岩体在自重作用下, 自然形成初始地应力场; 第 2 步: 在第 1 步基础上, 计算隧洞开挖、衬砌后, 衬砌和围岩的应力场和变形场<sup>[15-16]</sup>。

## 4 计算结果与分析

### 4.1 施工反缝

4.1.1 最小主应力 施工缝粘结良好, 衬砌为封闭圆环结构时, 围岩和衬砌内的最小主应力分布如图 3。衬砌的内浅表处应力为 0.17~0.18 MPa, 衬砌外表处应力为 0.25~0.31 MPa, 围岩的应力为 0.24~0.32 MPa, 应力分布的规律性明显, 并符合一般规律。当施工缝为贯穿性裂缝时, 围岩和衬砌内的最小主应力分布如图 4。衬砌的内浅表处应力为 0.13~0.17 MPa, 衬砌外表处应力为 0.16~0.23 MPa, 围岩的应力为 0.19~0.28 MPa。同图 4 的情

况相比, 由于衬砌中存在裂缝, 衬砌结构的变形刚度显著降低, 衬砌中的最小主应力也显著降低。裂缝处衬砌的最小主应力最低, 为 0.06 MPa。

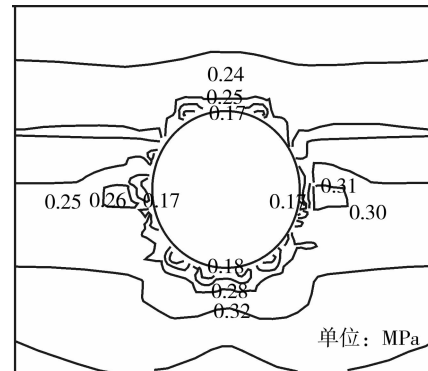


图 3 最小主应力分布图(压为正, 无缝)

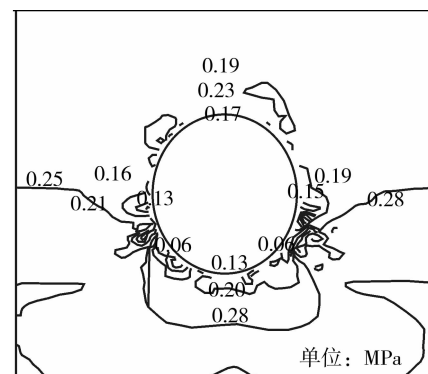


图 4 最小主应力分布图(有缝)

4.1.2 X 方向位移 施工缝粘结良好, 衬砌为封闭圆环结构时, 围岩和衬砌内的 X 方向位移分布如图 5。位移呈对称分布, 位移方向指向隧洞内, 由于衬砌为封闭的圆环结构, 位移量较小, 最大为衬砌内表处 0.4 mm, 向围岩内部方向递减。当施工缝为贯穿性裂缝时, 围岩和衬砌内的 X 方向位移分布如图 6。由于施工缝的存在, 衬砌结构的变形刚度显著降低, 变形量显著增大, 最大位移发生在上拱裂缝处, 为 1.0 mm, 下拱裂缝处为 0.4 mm, 则在裂缝处, 上拱相对于下拱向隧洞内多位移了 0.6 mm。

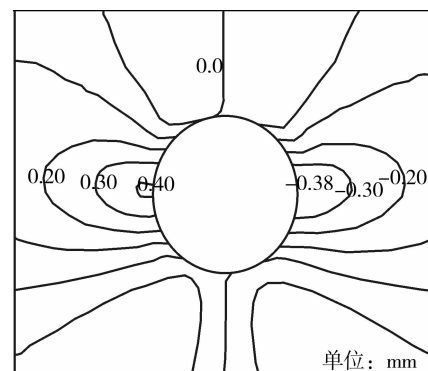


图 5 X 方向位移图(无缝)

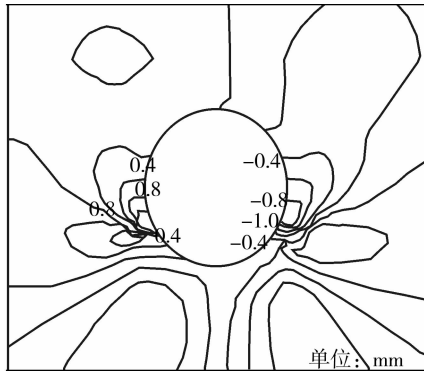


图 6 X 方向位移图(有缝)

4.1.3 Y 方向位移 施工缝粘结良好,衬砌为封闭圆环结构时。位移呈对称分布,位移方向指向隧洞内,由于岩层相对于隧洞并不对称,使得底拱鼓起量大于顶拱下沉量,鼓起量为 1.3 mm,顶拱下沉量为 0.4 mm。当施工缝为贯穿性裂缝时,以施工缝为界,缝上部分向下位移,缝下部分向上位移。在施工缝处,上拱下沉量为 1.0 mm,下拱向上位移量为 2.4~3.5 mm。

4.1.4 计算结果的特征值表(表 2)

表 2 计算结果的特征值

模型	衬 砌		围 岩		最小 压应力 /MPa	最大 压应力 /MPa
	最小 压应力 /MPa	最大 压应力 /MPa	最大 X 向 位移量 /mm	施工缝 Y 向闭合量 /mm		
有缝	0.06	1.65	1.0	3.4~4.5	0.19	0.44
无缝	0.17	2.19	0.4		0.24	0.41

4.2 顶拱衬砌厚度不足

4.2.1 不考虑灌浆作用 不考虑灌浆作用时,围岩和衬砌内的最小主应力和最大主应力的分布如图 7 和图 8 所示。衬砌和围岩内的最小主应力均为压应力,在隧洞附近,应力值均较小,均低于 0.20 MPa,其中顶拱衬砌,由于其内外均为空腔,没有约束,造成最小主应力值最小,仅为 0.067 MPa。衬砌和围岩内的最大主应力也均为压应力,在两侧拱和底拱,由于两条施工缝的卸压作用,压应力值也较小,最大为 1.35 MPa;顶拱衬砌较薄,承压面积小,压应力值较大,为 2.83 MPa。由一点的应力状态分析可知,顶拱衬砌内最大主应力较大,最小主应力较小,则必然会导致最大剪应力较大,经计算,顶拱衬砌内的最大剪应力为 1.38 MPa。

围岩和衬砌位移的情况是,左右侧拱向内的位移量约为 1.20 mm,顶拱的下沉量为 2.28 mm,底拱向上的位移量为 3.46 mm。由于衬砌结构、荷载

以及缺陷分布都是左右对称的,因此应力和位移状态也是左右对称的。

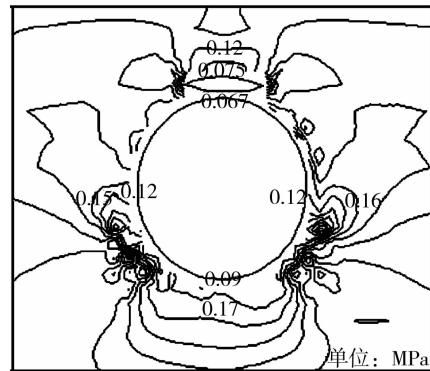


图 7 最小主应力分布图

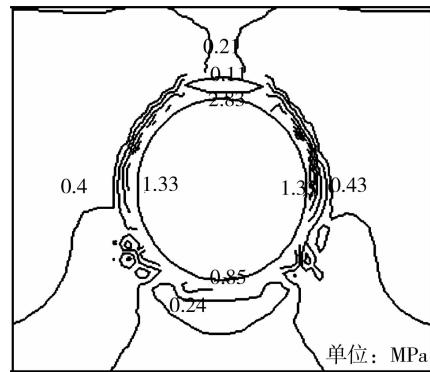


图 8 最大主应力分布图

4.2.2 考虑灌浆作用 考虑灌浆作用时,衬砌和围岩内的最小主应力和最大主应力均为压应力,顶拱衬砌内最小主应力值为 0.18 MPa,最大主应力值为 2.0 MPa。相比较,侧拱和底拱的应力值较小,原因是两条施工缝的卸荷作用。经计算,顶拱内最大剪应力值为 0.91 MPa。

围岩和衬砌位移的分布如图 9 和图 10 所示,左右侧拱向内的位移量约为 0.90 mm,顶拱的下沉量为 2.9 mm,底拱向上的位移量为 3.45 mm。

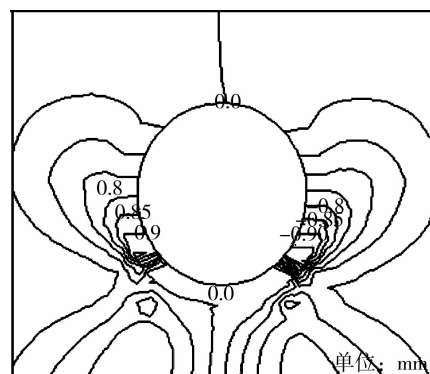


图 9 X 方向位移图

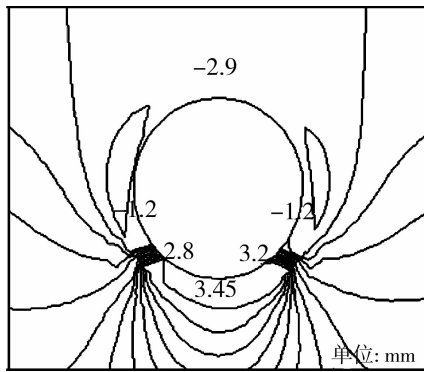


图 10 Y 方向位移图

#### 4.2.3 计算结果的特征值表

表 3 计算结果的特征值

模型	顶拱衬砌				围岩	
	最小压应力 /MPa	最大压应力 /MPa	最大剪应力 /MPa	最大下沉量 /mm	最小压应力 /MPa	最大压应力 /MPa
考虑灌浆作用	0.18	2.0	0.91	2.90	0.20	0.40
不考虑灌浆作用	0.067	2.8	1.38	2.28	0.075	0.43

4.2.4 对比分析 (1) 无论是否考虑回填灌浆的作用, 衬砌内的最大和最小主应力值均为压应力, 压应力状态有利于衬砌发挥自身的承载能力; (2) 压应力值均较小。相比较而言, 考虑灌浆作用时, 衬砌内的压应力值相对较大, 但顶拱衬砌内的最大主应力值例外; (3) 顶拱衬砌内存在剪应力, 考虑灌浆作用时, 最大剪应力值为 0.91 MPa, 不考虑灌浆作用时为 1.38 MPa, 后者与前者相比增大了 52%; (4) 在侧拱和底拱, 衬砌的位移值均相近。在顶拱, 考虑灌浆作用时, 下沉量稍大。

## 5 结 论

施工反缝:

1) 洞衬混凝土的应力状态: 衬砌混凝土完全受压, 最大压应力发生在无缝情况时的左侧拱, 为 2.19 MPa, 最小压应力发生在有缝情况时的裂缝处, 仅为 0.06 MPa。将有缝同无缝相比, 总的说来, 有缝时衬砌内的应力值显著降低, 约为无缝时应力值的 60%, 但顶拱的应力值例外, 有缝时的最大主应力值比无缝时要高出 11.5%; 衬砌内最大压应力远低于《水工混凝土结构设计规范》SL/T 191-96 规定的 C25 混凝土设计轴心抗压强度 12.5 MPa。

2) 混凝土施工缝的变化: 在围岩压力作用下, 水

平方向上, 施工缝上部的衬砌向洞内位移了 1.0 mm, 而施工缝下部的衬砌仅位移了 0.4 mm, 因此会在施工缝处形成 0.6 mm 的台阶; 在垂直方向上施工缝上部的衬砌向下位移了 1.0 mm, 其下部的衬砌向上位移了 2.4~3.5 mm, 因此若施工缝宽度小于 3.4~4.5 mm, 随着时间的发展施工缝会慢慢地闭合。

3) 围岩很软弱, 为 IV 和 V 类围岩, 由于软弱岩体的流变性, 山岩压力、衬砌的荷载和变形也将缓慢发展, 目前衬砌的变形并不是最终的变形结果。施工缝的存在会造成漏水, 由于围岩体为水理性较差的砂岩和泥岩, 并且砂岩的胶结状况较差, 遇水后, 砂岩会崩解, 泥岩会泥化, 则围岩的自承载能力将会丧失, 围岩压力将大幅度增加, 且侧压系数也会由目前的 0.56~0.67 增加到 1.0, 对不封闭的衬砌结构尤为不利。此外, 水会软化附近的边坡, 减小边坡自稳角, 大幅度削弱边坡的稳定性, 因此必须对该施工缝进行封缝止水处理。

顶拱衬砌厚度不够:

1) 无论是最大主应力还是最小主应力, 衬砌混凝土均处于受压状态。最大压应力发生在顶拱(不考虑灌浆作用时), 为 2.8 MPa, 考虑回填灌浆作用后, 压应力值降为 2.0 MPa。无论哪种情况, 衬砌内最大压应力远低于 C25 混凝土设计轴心抗压强度。

2) 顶拱混凝土衬砌中存在剪应力, 最大值分别为 1.38 MPa(不考虑回填灌浆作用) 和 0.91 MPa(考虑回填灌浆作用)。若取混凝土的抗剪强度为其抗压强度的 1/6, 则两种情况下顶拱衬砌混凝土的抗剪安全系数分别为 1.5 和 2.3。由此可见, 回填灌浆对于提高顶拱衬砌混凝土的抗剪安全性发挥了重要作用。

3) 根据以上计算内容的计算分析结果, 在较好地进行回填灌浆以后, 混凝土衬砌的性能将能够满足设计要求。回填灌浆对提高顶拱混凝土衬砌的安全稳定性具有显著作用, 因此应该注意回填灌浆的质量。

参考文献:

- [1] 汤雷, 王宏. 白山嘴隧洞顶拱衬砌厚度不足对结构性态影响研究[J]. 水利学报, 2007(S1): 106-110.  
TANG LEI, WANG HONG. The study on the influence on the behavior of insufficient thickness of

- roof lining in Baishanzui tunnel structure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(S1): 106-110.
- [2] 汤雷. 白山嘴隧洞衬砌施工反缝对结构性能影响的计算分析报告[R]. 南京水利科学研究院研究报告, 2001, 03:1-10.
- [3] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 1-25.
- [4] SUNG O, CHOI H, HEE-SOON SHIN S. Stability analysis of a tunnel excavated in a weak rock mass and the optimal supporting system design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 876-881.
- [5] 余健. 衬砌背后空洞对隧道结构承载力影响的模型试验研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(1): 104-109. SHE JIAN. Study on effect of cavities behind linings on bearing capacity of tunnel structure by model test[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(1): 104-109.
- [6] LEE K M, HOU X Y, GE X W, et al. An analytical solution for a jointed shield-driven tunnel lining[J]. Int J Numer Anal Meth Geomech, 2001, 25: 365-390.
- [7] 王贵君. 节理裂隙岩体中大断面隧洞围岩与支护结构的施工过程力学状态[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1328-1334. WANG Gui-jun. Mechanical state of jointed rock mass and support structure of large tunnel during construction process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1328-1334.
- [8] LEE K M, GE X W. The equivalence of a jointed Shield-driven tunnel lining to a continuous ring structure[J]. Can Geotech J, 2001, 38: 461-483.
- [9] 李晓红, 靳晓光, 顾义磊. 初期支护对软岩隧道围岩稳定性和位移影响分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1207-1210. LI XIAO-HONG, JIN XIAO-GUANG, GU YI-LEI. Discussion on influence of initial support to stability and deformation of surrounding rock mass in soft rock tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1207-1210.
- [10] PAN P Z, FENG X T, ZHOU H. Research on the failure process of rocks under uniaxial tension using elasto-plastic CA model[J]. Key Engineering Materials, 2007, 340/341: 1145-1150.
- [11] 何川, 封坤, 杨雄. 南京长江隧道超大断面管片衬砌结构体的相似模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2261-2269. HE CHUAN, FENG KUN, YANG XIONG. Model test on segmental lining of Nanjing Yangtze river tunnel with super-large cross-section[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2261-2269.
- [12] FENG X T, PAN P Z, ZHOU H. Simulation of the rock micro-fracturing process under uniaxial compression using an elastoplastic cellular automaton [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(7): 1091-1108.
- [13] 卢应发, 邱一平, 吴玉山. 岩石类材料实验系统的一些力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(1): 59-67. LU YING-FA, QIU YI-PING, WU YU-SHAN. Mechanical characteristics of testing system for rock material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(1): 59-67.
- [14] 陈仲先, 汤雷. 高地应力大型地下洞室的位移和锚杆应力特性[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 294-298. CHEN ZHONG-XIAN, TANG LEI. Rock displacement and load of bolts around large scale cavities with high stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 294-298.
- [15] BORJA R I, REGUEIRO R A, LAI T Y. FE modeling of strain localization in soft rock [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2000, 126(4): 335-343.
- [16] 刘志春, 李文江, 孙明磊, 等. 乌鞘岭隧道 F4 断层区段监控量测综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1502-1511. LIU ZHI-CHUN, LI WEN-JIANG, SUN MING-LEI, et al. Monitoring and comprehensive analysis in F4 section of Wushaoling tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1502-1511.

(编辑 王秀玲)