

文章编号: 1000-582X(2012)12-106-06

## 衬砌背后矩形空洞对隧道初支应力分析

周成涛<sup>1</sup>, 陈俊涛<sup>2</sup>

(1. 重庆市勘测院, 重庆 400020; 2. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074)

**摘要:** 在新奥法隧道施工过程中, 岩石隧道光面爆破效果不够理想, 衬砌背后存在空洞的现象愈加普遍。结合工程实例, 采用数值模拟手段进行三维弹塑性分析, 探讨在隧道衬砌背后存在矩形空洞时, 不同尺寸条件下初支的应力分布变化情况。通过引入有限元强度折减法计算存在空洞时隧道结构的整体安全系数并与健康隧道的安全系数进行对比, 对初期支护的拉应力、压应力与相应的安全系数进行线性回归, 综合评价隧道结构的稳定性。

**关键词:** 衬砌背后; 矩形空洞; 初支应力; 稳定性

**中图分类号:** TD45

**文献标志码:** A

### Analysis on the influence from rectangle cavity behind the lining to the primary support of tunnel

ZHOU Chengtao<sup>1</sup>, CHEN Juntao<sup>2</sup>

(1. Chongqing Survey Institute, Chongqing 400020, China;

2. College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** In process of the tunnel construction throw New Austrian Tunnelling Method, the result of smoothwall blasting to rock tunnel is not good, there are more and more cavities produced behind the lining. On the basis of engineering project, this paper makes the three-dimensional elastic-plastic analysis throw numerical simulation, discusses the stress-strain behavior of primary support when there is a different size of rectangle cavity behind the lining. In addition the safety factor of tunnel is calculated with cavity based on the strength reduction finit element method. This factor is compared with the factor of health tunnel. The stability of tunnel structure system is estimated through the linear regression analysis between stress of lining and safety factor.

**Key words:** tunnel lining; rectangle cavity; primary support; stability

中国现在处于铁路隧道高维修管理阶段、公路隧道正处于高速建设阶段的时代; 公路工程中的隧道病害也越来越严重。由于公路隧道断面尺寸变化多样、地质条件复杂, 而且不同地质条件下的施工方法更是不断得到优化。然而, 隧道设计时对地质条

件无法得到全面准确的认识; 另外随着隧道的老化、运营管理不善及不断维护施工等方面的原因, 中国公路隧道存在非常严重的病害<sup>[1-4]</sup>。新奥法施工在公路隧道领域快速发展, 但是在光面爆破时炸药量控制不好等多种原因的作用下, 导致隧道衬砌背后

**收稿日期:** 2012-06-10

**基金项目:** 重庆市科技攻关重点资助项目 (CSTC2012GG-YYJSB40006); 中国住房与城乡建设部 2012 年科学技术项目 (2012-K8-10)

**作者简介:** 周成涛 (1976-), 男, 高级工程师, 主要从事桥梁、隧道岩土工程方向研究, (Tel) 13101256551; (Email) 1398084026@qq.com。

存在大量不同样式的空洞;由此造成的衬砌结构受力不均,侧压力增大使拱顶上鼓以致衬砌结构外侧拉应力过大、内侧也压溃破坏,严重威胁着隧道结构的整体稳定性<sup>[5-9]</sup>。罗鑫<sup>[10]</sup>和司徒新丽<sup>[11]</sup>等采用平面弹塑性分析模型,运用“同济曙光 GeoFBA”有限元软件分析衬砌背后空洞对结构内力的影响。余健等<sup>[12]</sup>通过建立室内模型试验,从各方面分析该模型结构在不同位置的空洞、不同地质条件下和不同地应力场作用下结构的位移变形及应力变化规律。彭跃和李晓红等<sup>[13-14]</sup>通过运用数值分析的方法对某病害隧道进行计算,分别对衬砌结构背后空洞的不同位置等进行模拟,计算得到衬砌结构拱部的应力状态及相应的安全系数。虽然很多学者针对隧道初支应力开展了大量研究,但关于初砌背后存在矩形空洞的隧道初支力学特征研究成果鲜有报道,针对上述问题开展关于隧道初砌背部存在矩形空洞的初支受力分析,为隧道安全评估提供理论支持。采用钻爆法施工的隧道,其空洞形状千差万别,无法一一进行相应的数值模拟分析;多数空洞形状大致可以归纳为:台梯形、矩形、三角形。因此,选取具有普遍意义的矩形槽状空洞作为分析对象。

## 1 隧道有限元模型

建立 ANSYS 有限元模型,其分析范围取隧道的纵向长度为 10 m(空洞对隧道结构的最大影响纵向长度 5 m 及加上 5 m 的富余量),模型共划分为 74 556 个单元,锚杆 1 256 个单元,二次衬砌 3 000 个单元;模型整体结构图、空洞及支护结构等如图 1 及图 2 所示。采用八节点三维实体单元(solid45)模拟围岩和初支,采用三维杆单元(link8)模拟锚杆,采用三维壳单元(shell63)模拟二次衬砌结构;隧道围岩及支护结构材料按均质弹塑性考虑,采用 Drucker-Prager 屈服准则;初期支护中中刚拱架的模拟采用等效的方法予以考虑,通过将其强度整合计算到喷混凝土中综合考虑,具体计算公式<sup>[15]</sup>为

$$E = E_0 + \frac{E_g A_g}{A_c}, \quad (1)$$

式中: $E$ 为折算后的喷砼弹性模量; $E_0$ 为原喷砼弹性模量; $E_g$ 为刚拱架弹性模量; $A_g$ 为刚拱架截面积; $A_c$ 为喷砼截面积。

初期支护作为柔性支护,是为了适应围岩原始应力的释放以及应力释放过程中产生的变形,要求初期支护与围岩一起变形。在这过程中,喷射混凝土与钢拱架共同变形,不发生相对位移。因此,可以进行类比处理。另外,根据相关的模拟分析结果

表明:当模型采用公式(1)进行等效代换时,其应力应变结果与不进行等效代换的模型相近。另外,模型在初期支护与围岩界面上未对特殊处理;初期支护单元与围岩单元共用节点,界面上不发生错动位移(如表 1 所示)。

表 1 隧道围岩及结构材料基本物理力学参数

岩量	围岩	初期支护	二次衬砌	锚杆
$E/\text{MPa}$	3 800	23 000	24 000	200 000
$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	22	23	24	78.5
$C/\text{MPa}$	0.4	2	3	—
$\gamma$	35	60	60	—
$\mu$	0.33	0.3	0.25	0.3

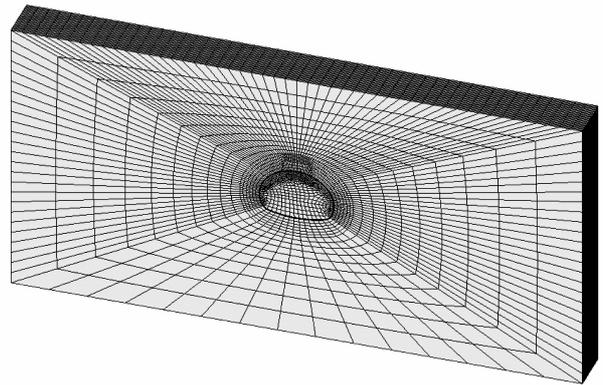


图 1 有限元分析模型

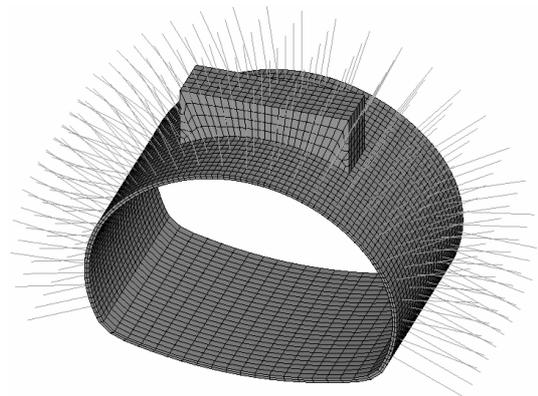


图 2 隧道支护结构及空洞模型

## 2 计算结果分析

隧道围岩开挖后,改变了之前原始的应力状态。图应力得到释放,而初期支护与围岩直接接触,承受

了大部分的围岩松散土压力。

因此,对初期支护的应力研究显得十分重要,而且更能直接的反应出不同大小的空洞对初期支护应力的影响。

### 2.1 空洞环向圆心角为 60°

如图 3 所示为围岩开挖后初期支护施做完成时,空洞下方初支拉应力分布云图。从该图中发现最大拉应力出现在该初支区域的外侧中部,最大值为 1.28 MPa;另外,从应力云图的变换规律中还可以看出,空洞对初支应力的影响很大。空洞正下方的初期支护由于外侧没有围岩的反作用力,而承受较大拉应力。图 4 所示为相同条件下,初期支护压应力等值线图。该图显示出最大压应力发生在初支与空洞相接触的边界位置及初支内侧的中部,其值为 -1.90 MPa。

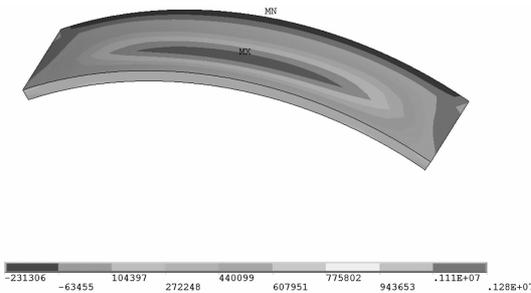


图 3 空洞处初期支护拉应力等值线图 (Pa)

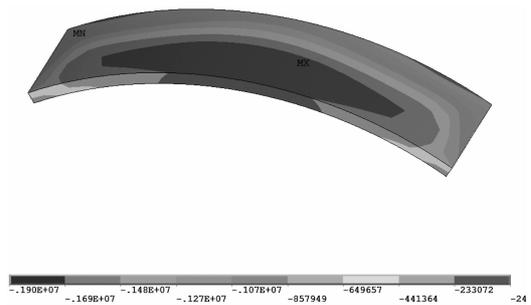


图 4 空洞处初期支护压应力等值线图 (Pa)

### 2.2 空洞环向圆心角为 45°

如图 5 所示为隧道开挖完成并施作初期支护以后空洞下方对应初支拉主应力等值线图,其最大拉应力为 1.24 MPa;图 6 所示为同一时期初期支护压应力等值线图最大压应力为 -1.50 MPa。

### 2.3 空洞环向圆心角为 30°

如图 7 所示为隧道开挖完成并施作初期支护以后空洞下方对应初支拉主应力等值线图,其最大拉应力为 1.09 MPa;图 8 所示为同一时期初期支护压

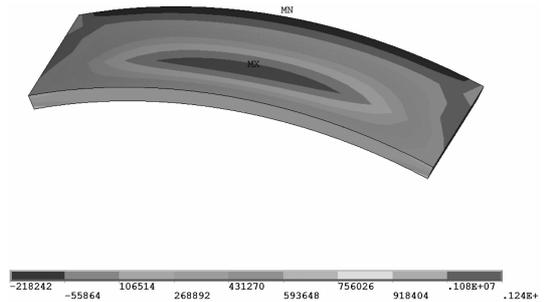


图 5 空洞处初期支护拉应力等值线图 (Pa)

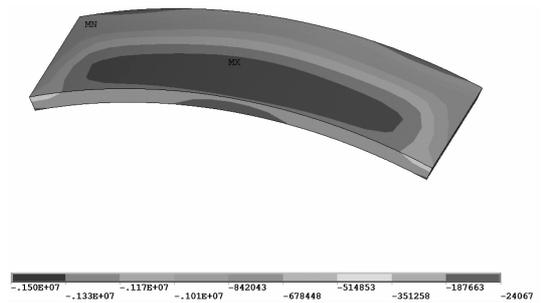


图 6 空洞处初期支护压应力等值线图 (Pa)

应力等值线图最大压应力为 -1.12 MPa。

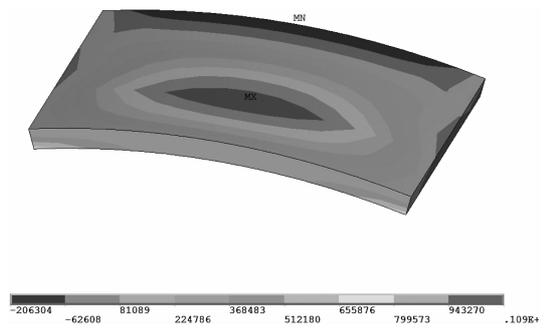


图 7 空洞处初期支护拉应力等值线图 (Pa)

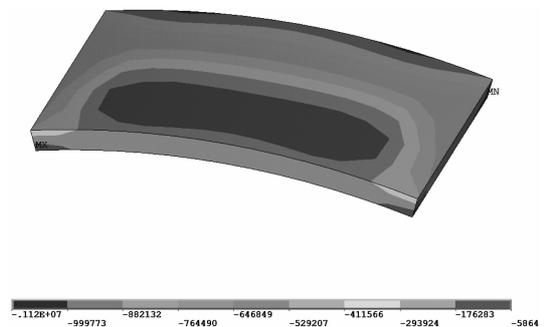


图 8 空洞处初期支护压应力等值线图 (Pa)

### 2.4 空洞环向圆心角为 15°

如图 9 所示为隧道开挖完成并施作初期支护以后空洞下方对应初支拉主应力等值线图,其最大拉应力为 0.77 MPa;图 10 所示为同一时期初期支护

压应力等值线图最大压应力为-0.93 MPa。

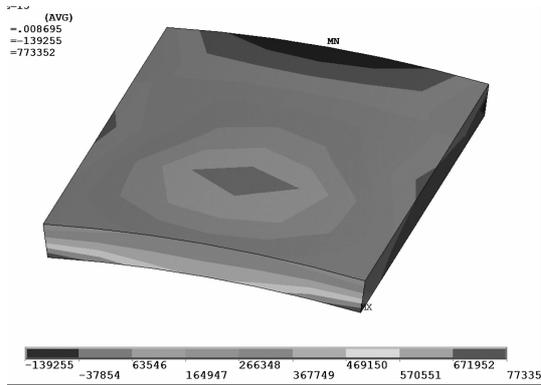


图 9 空洞处初期支护拉应力等值线图(Pa)

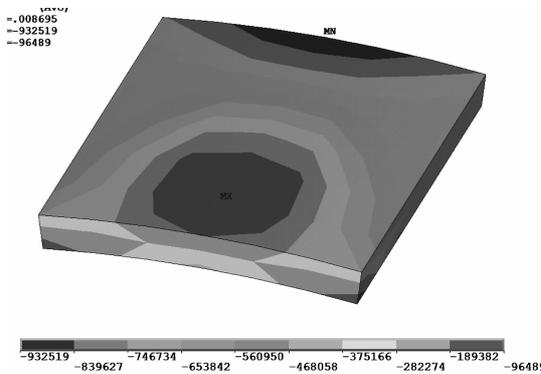


图 10 空洞处初期支护压应力等值线图(Pa)

### 2.5 空洞环向圆心角为 8°

如图 11 所示为隧道开挖完成并施作初期支护以后空洞下方对应初支拉主应力等值线图,其最大拉应力为 0.78 MPa;图 12 所示为同一时期初期支护压应力等值线图最大压应力为-0.90 MPa。

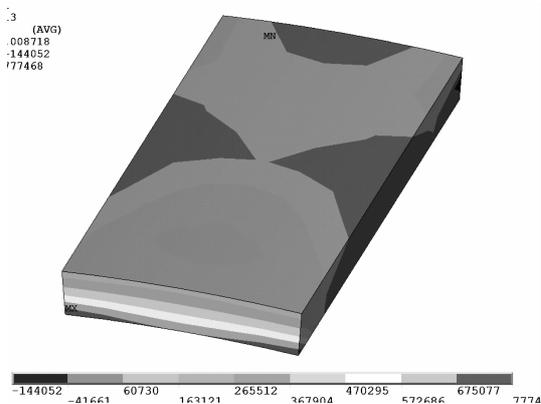


图 11 空洞处初期支护拉应力等值线图(Pa)

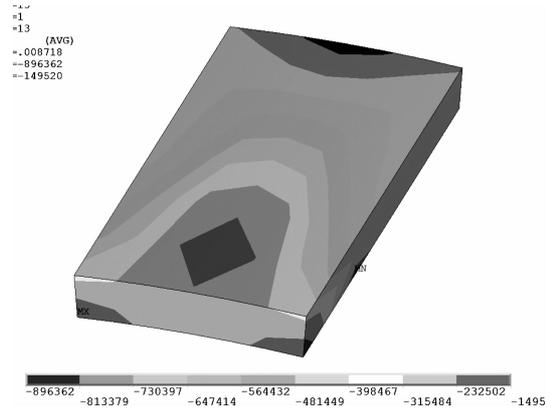


图 12 空洞处初期支护压应力等值线图(Pa)

### 2.6 强度折减法计算安全系数

隧道结构的稳定性受多方面条件的影响,而不能单纯根据初支应力的变化趋势,得出隧道结构的整体稳定性;因此特别引入强度折减法计算隧道结构的安全系数,综合评价隧道结构的稳定性。计算结果如表 2 所示。

表中数据表明,当空洞环向圆心角增大到 30°时,隧道结构的安全系数下降幅度较大,之后的降低幅度基本平稳。

表 2 空洞不同尺寸时隧道结构安全系数值

参数	空洞沿隧道横断面方向环向角度					
	60	45	30	15	8	无空洞
安全系数值	4.07	4.34	4.62	5.14	5.40	6.42
有无空洞时安全系数比值/%	63.4	67.6	72.0	80.1	84.1	—

### 2.7 安全系数与初支应力的回归趋势线分析

正常情况下的隧道初期支护受力状况为全面受压;当隧道衬砌背后存在空洞时,空洞下方初期支护由于失去上部围岩反压力而呈现为外侧受拉、内侧受压的应力状态。当初期支护承受的侧压力持续增大时,空洞处初支外侧将受拉开裂,内侧压溃破坏。

空洞对隧道围岩体的压应力影响不大,对空洞附近围岩拉应力影响分析如下:在空洞环向圆心角由 60°减至 45°时,围岩拉应力降低 4%;空洞环向圆心角由 45°减至 30°时,围岩拉应力降低 7%;而圆心角由 30°减至 8°的整个过程中,围岩拉应力基本保持不变;因此,当空洞对围岩拉应力影响不大。无法通过总结初期支护的拉、压应力变化规律总结出有效结论。

通过将强度折减法计算出的安全系数与上述计算的初支最大拉压应力进行线性回归趋势分析,推算隧道结构失稳破坏时的最大拉压应力。安全系数与最大拉应力、压应力的线性回归趋势线分别如图 13、图 14 所示。

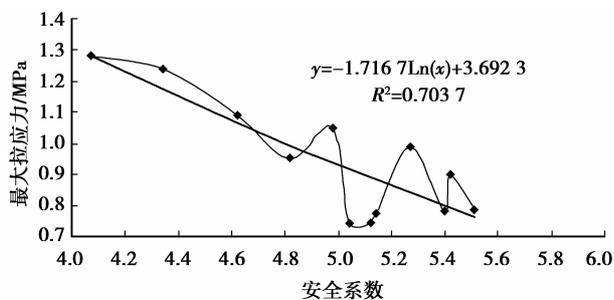


图 13 拉应力与安全系数线性回归趋势线图

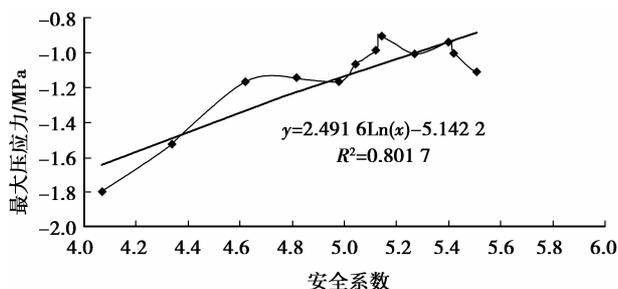


图 14 压应力与安全系数线性回归趋势线图

由于选取的空洞尺寸类型较少,无法获得大量的应力分析数据;另外,影响隧道整体安全系数的因素较多。基于上述 2 点原因:安全系数与拉压应力的回归分析在一定范围内出现了波动,曲线拟合效果不是很理想。但是,根据回归分析推算隧道结构失稳破坏时的最大拉压应力值与实际情况相近;因此,本文所示回归分析合理。

### 3 结 论

通过以上对初期支护的应力及结构安全系数的分析,可以得出以下结论:

1) 与空洞相对应的初期支护在失去外侧围岩反向压力的情况下,初支外侧受拉而内侧受压,使该部分初支外侧拉裂、内侧压溃而破坏。

2) 当空洞环向圆心角增大到  $30^\circ$  时,初支应力增大较明显,同时衬砌结构的整体安全系数下降也较大。

3) 由线性回归趋势线,通过安全系数反算得到隧道结构失稳破坏时的最大拉应力为: 3.69 MPa;

最大压应力为: -5.14 MPa。

### 参考文献:

- [1] 张传庆,周辉,冯夏庭. 基于破坏接近度的岩土工程稳定性评价[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 888-894.  
ZHANG Chuanqing, ZHOU Hui, FENG Xiating. Stability assessment of rockmass engineering based on failure approach index[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 888-894.
- [2] 李晓红,李登新,靳晓光,等. 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 Xiaohong, LI Dengxin, JIN Xiaoguang, et al. 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.
- [3] 李金锁,彭华,马秀敏,等. 大丽线铁路隧道工程地应力三维有限元数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 800-803.  
LI Jinsuo, PENG Hua, MA Xiumin, et al. Three-dimensional finite element numerical simulation of geostress in Da-Li railway tunnel of Yunnan[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 800-803.
- [4] 张俊儒,仇文革. 正削式隧道门围岩和衬砌应力计算及设计方法研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2071-2075.  
ZHANG Junru, QIU Wenge. Numeration analysis and design method research into surrounding rock and lining structural stress of up bamboo-truncating tunnel portal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2071-2075.
- [5] 余健,何川. 软弱围岩段隧道施工过程中围岩位移的三维弹塑性数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 623-629.  
SHE Jian, HE Chuan. 3d elastoplastic numerical simulation of surrounding rock displacement in soft surrounding rock section during construction process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 623-629.
- [6] 靳晓光,李晓红,杨春和,等. 深埋隧道围岩-支护结构稳定性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1473-1476.  
JIN Xiaoguang, LI Xiaohong, YANG Chunhe, et al. Stability of surrounding rock-supports structure of deep buried tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1473-1476.
- [7] 易小明,张项立,陈铁林. 厦门海底隧道地层变形监测与机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2302-2308.  
YI Xiaoming, ZHANG Dingli, CHEN Tielin. Stratum

- deformation monitoring and mechanism analysis of Xiamen subsea tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2302-2308.
- [8] 韩昌瑞,张波,白世伟,等. 深埋隧道层状岩体弹塑性本构模型研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2404-2408, 2414.  
HAN Changrui, ZHANG Bo, BAI Shiwei, et al. Research on elastoplastic constitutive model of layered surrounding rockmass of a deep buried tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2404-2408, 2414.
- [9] 李树忱,李术才,徐帮树. 隧道围岩稳定分析的最小安全系数法 [J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 549-554.  
LI Shuchen, LI Shucui, XU Bangshu. Minimum safety factor method for stability analysis of surrounding rockmass of tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 549-554.
- [10] 罗鑫,李志斌,郑佳艳. 公路隧道衬砌背后空洞的研究 [J]. 现代隧道技术, 2006(增刊): 79-82.  
LUO Xin, LI Zhibin, ZHENG Jiayan. Modern Tunnelling Technology, 2006(Sup): 79-82.
- [11] 司徒新丽,邹友泉. 衬砌背后空洞对于公路隧道的危害性研究 [J]. 山西建筑, 2007, 33(31): 301-302.  
SITU Lixin, ZOU Youquan. Research into the hazard of empty areas behind lining on highway tunnel [J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(31): 301-302.
- [12] 余健,何川,汪波,等. 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(1): 104-110.  
SHE Jian, HE Chuan, WANG Bo, et al. 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(1): 104-110.
- [13] 彭跃,王桂林,张永兴,等. 衬砌背后空洞对在役隧道结构安全性影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(6): 1102-1104.  
PENG Yue, WANG Guilin, ZHANG Yongxing, et al. Research about effect of cavity behind lining on structural safety of tunnel in active service [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(6): 1102-1104.
- [14] 李晓红,靳晓光. 西山坪隧道穿煤及采空区围岩变形特性与数值模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 667-670.  
LI Xiaohong, JIN Xiaoguang. Study on deformation character of surrounding rock masses and numerical modeling of Xishanping tunnel through coal and working out area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 667-670.
- [15] 吴波,刘维宁,高波,等. 城市浅埋隧道施工性态的时空效应分析 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 340-343.  
WU Bo, LIU Weiling, GAO Bo, et al. Analysis of space-time effect for urban shallow tunneling by excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 340-343.

(编辑 侯 湘)