# 基于有限差分法的隧道新型支护结构稳定性分析

华 渊<sup>1</sup>,朱赞成<sup>1</sup>,周太全<sup>1</sup>,连俊英<sup>1</sup>,宋卫东<sup>2</sup>

(1. 江南大学 土木工程系, 江苏 无锡 214063; 2. 北京科技大学 土木工程系, 北京 100083)

**摘要:**聚丙烯纤维混凝土具有良好的变形性能,可以很好地适应隧道施工过程中围岩应力释放而产生的围岩压力; 混凝土湿喷技术的引入可有效地改善隧道内工作环境,提高混凝土喷射质量。将湿喷聚丙烯纤维混凝土和锚杆应 用于隧道支护结构,可起到良好的经济效益和支护效果。为了确保隧道施工过程的安全性和稳定性,采用 FLAC 有限差分计算软件对该支护结构性能和隧道的稳定性进行了计算和分析。分析模型中考虑围岩材料的非线性特性, 以及围岩 - 支护结构体系位移场、塑性区和锚杆轴力的分布特征。分析结果表明:这种支护结构可有效地降低拱 顶下沉,底板上鼓,提高成洞空间;围岩和支护结构体系协同工作,极大地发挥围岩的自承载能力。 关键词:隧道工程;聚丙烯纤维混凝土;铁路隧道;支护结构;稳定性;数值分析 中图分类号:U45 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-6915(2005)15-2718-05

## NUMERICAL ANALYSIS OF STABILITY USING FINITE DIFFERENCE METHOD FOR NEW-TYPE SUPPORTING STRUCTURE TUNNEL

HUA Yuan<sup>1</sup>, ZHU Zan-cheng<sup>1</sup>, ZHOU Tai-quan<sup>1</sup>, LIAN Jun-ying<sup>1</sup>, SONG Wei-dong<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214063, China;
2. Department of Civil Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The polypropylene fiber reinforced concrete has higher flexibility and is suitable for supporting structure to adapt the rock mass pressure involved in tunnel rock mass stress relaxation during tunnel construction process. The wet sprayed technology introduced in tunnel engineering can effectively improve the working conditions in tunnel and improve the sprayed concrete quality. The wet-sprayed polypropylene fiber reinforced concrete and anchor system introduced in tunnel supporting structure can achieve good economy effect with better supporting structure compared with the dry-sprayed common concrete. For the safety and stability of tunnel construction process, the numerical analysis of the new-type supporting structure stability and the mechanical characteristics is performed using FLAC (fast Lagrangian analysis of continua). The nonlinear properties of material for rock mass is considered in detail. The distribution of displacement, plastic zone of the rock mass and supporting structure and the axial force distribution of anchor bolt are obtained using the numerical analysis. The results show that the supporting structure can effectively reduce the vault downward displacement and the bottom floor upward displacement enlarging the cavity headroom. The rock mass with the supporting structure works well with each other utilizing the utmost self-bearing capacity of the rock mass.

**Key words:** tunneling engineering; polypropylene fiber reinforced concrete; railway tunnel; lining structure; stability; numerical analysis

**收稿日期:**2004 - 05 - 08; 修回日期:2004 - 06 - 25

**作者简介:**华 渊(1960-),男,1982年毕业于湖南大学土木工程专业,现任教授,主要从事桥梁与隧道工程、岩土工程等方面的教学与研究工作。 E-mail: huayuanxinxiang@163.com。

## 1 引 言

隧道在我国,无论是硬岩还是软岩铁路隧道, 支护结构一般均由喷射混凝土、防水层和二次衬砌 混凝土组成,即传统的整体模筑混凝土衬砌和复合 式衬砌<sup>[1]</sup>。而在北欧斯堪的纳维亚半岛,当采用新 奥法理论进行设计时,硬岩隧道支护结构一般由喷 射混凝土和系统锚杆组成;当采用"挪威法"施工 时,节理发育、围岩破碎隧道支护结构由纤维增强 喷射混凝土、系统锚杆和钢质格栅或钢筋网组成, 一般不再进行二次衬砌<sup>[2~4]</sup>。

在节理裂隙发育的硬岩地层中,直接利用喷射 混凝土作为隧道支护结构,可合理地利用围岩自承 能力,防止围岩松弛,提高开挖后洞室的稳定性。 隧道围岩的稳定性直接关系着隧道支护结构的安全 性,国内多家单位对此进行了系统的研究。文[5]系 统地回顾了公路隧道围岩稳定性的研究现状,并指 出未来的发展方向;文[6]采用模型试验研究了复合 式衬砌在软弱围岩条件下的应用情况,分析了围岩 的稳定性;文[7]采用 FLAC<sup>3D</sup>分析软件分析了昆明 一公路隧道围岩的稳定性,分析结果表明隧道围岩 处于稳定状态;文[8]系统地总结了本文第一作者自 攻读博士学位起 10 多年来关于边界元法的研究,并 辟出专门章节系统地介绍了边界元法在围岩稳定性 分析中的应用。

聚丙烯纤维混凝土具有较高的变形性能,当采 用聚丙烯纤维混凝土作为支护、衬砌结构材料时, 可以减小结构厚度。且聚丙烯纤维具有良好的变形 性能,当支护结构和围岩达到初始平衡时,变形较 大,因而压力较小。进一步的变形导致支护结构的 破坏,但破坏后,由于变形增加,围岩压力也相应 减小,聚丙烯纤维混凝土仍能抵抗围岩的压力。而 且聚丙烯纤维混凝土具有较高的残余强度,即使围 岩破坏,仍能在相当长的时间内维持围岩的稳定 性,使得修复工作比较容易完成。

为验证湿喷聚丙烯纤维网混凝土和系统锚杆作 为永久支护结构的可靠性,进行了聚丙烯纤维网混 凝土锚喷支护结构的专题研究,并通过数值模拟计 算验证方案的可行性和正确性。

### 2 工程概况

某铁路单线隧道位于渭河右岸,介于吴砦乡虎

朝湾和巨寺庄之间。进口在一泥石流冲沟左侧。位 于河谷地区,出口端和东巨寺沟大桥相接,地势起 伏、陡峻,山坡自然度为30°~60°。进口端基岩裸 露,坡面稳定。隧道全长716m,最大埋深213m。 隧道穿过地段大部分为燕山期花岗岩,局部夹有片 岩捕虏体,粗粒结构,节理发育;出口端岩石稍有 片理化现象,岩质坚硬,风化颇重。根据水文地质 勘探提供的资料,全隧道围岩绝大部分为III级围 岩,其中有一长度约40m的破碎带。

### 3 模型的建立

为扩展铁路隧道支护结构形式,减少隧道施工 工序、降低工程造价,从岩石力学角度上,对该隧 道稳定性和支护效果进行验证。研究选用隧道在最 大埋深-213 m水平下,通过采用 FLAC 软件数值模 拟隧道在聚丙烯纤维混凝土锚喷支护前后对隧道稳 定性的影响。模型采用 Mohr-Coulomb 强度准则, 计算所用的岩石物理力学参数见表 1。采用比对法 计算,分析了开挖后未支护前和用聚丙烯纤维混凝 土锚喷支护后两种工况下,隧道变形、内力的分布 和变化特性。

表 1 围岩和支护结构材料物理力学参数 Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass and supporting structure materials

材料	重度γ /(kN•m <sup>-3</sup> )	变形模量 E /GPa	泊松比 <i>μ</i>	内摩擦角 <i>φ</i> /(°)	粘聚力 c /MPa
围岩	24.0	17	0.210	48	1.1
喷层	23.6	37	0.275	-	-

模型考虑隧道开挖对边界条件的影响,隧道净高 8.26 m,净宽 5.76 m,隧道两侧墙身至计算边界距离为 25 m,模型为 50 m×47 m(长×宽),网格划分为 500×470 个四边形单元。模型两侧分别限制水平位移,底板限制垂直位移。模型上部施加自地表至隧道–213 m 深的岩体自重 $\sigma_y$  = -5.02 MPa及水平应力 $\sigma_x$  = -5.52 MPa(压应力为负,拉应力为正,以下同)。湿喷聚丙烯纤维混凝土支护结构采用弹性材料模型处理<sup>[9]</sup>。

隧道支护结构及截面如图 1 所示,聚丙烯纤维 混凝土锚喷支护结构(喷层厚 10~15 cm,纤维网掺 量为 0.9~1.8 kg/m<sup>3</sup>),既作为隧道开挖后的支护, 又作为隧道的永久衬砌。混凝土加入聚丙烯纤维后, 能明显改善混凝土的微观结构,使有害孔的数量大





大减少,提高了混凝土的抗渗能力。砂浆锚杆间距为 100 cm×100 cm,长为 200 cm。考虑施工误差和 变形位移,隧道断面预留变形层 3 cm,预留补强净 空 25 cm。

## 4 数值模拟计算结果及分析

图 2~7 是根据上述条件和方法计算得到的隧 道开挖后支护前以及聚丙烯纤维混凝土锚喷支护 后,洞室主应力场、位移场、塑性区的分布效果图。 由图 2,4,6的结果可知,隧道开挖后,最小主应 力位于拱腰,离拱顶约 22°左右处,最小主应力为 0.5 MPa 的拉应力,最大主应力为–30 MPa,主要作 用在隧道的拱部,即在拱部围岩出现变弯点。在隧 道直墙外侧隅角处,出现较高的应力集中,在拱 部也形成了一个压应力集中区,压应力集中区深 达 2 m 左右。隧道开挖后由于卸载作用,围岩应力 释放,隧道周边向隧道内发生变形,支护前的最大









图 4 支护前的位移矢量场

Fig.4 Displacement before supporting



图 5 支护后的位移矢量场 Fig.5 Displacement after supporting

位移为 3.246 mm, 位于两侧直墙墙腰; 拱顶下沉为



图 6 支护前的破坏场 Fig.6 Plastic zone before supporting



图 7 支护后的破坏场 Fig.7 Plastic zone after supporting

2.587 mm; 底板上鼓为 1.7 mm。图 4 为隧道开挖未 支护状态下放大 200 倍隧道周边变形趋势。由图 6 可知,隧道除在直墙墙趾出现了共轭剪切破坏外, 在拱顶也出现了剪切破坏。这种现象与现场实地观 测到的情况相当吻合。

图 3, 5, 7 为聚丙烯纤维混凝土锚喷支护后, 洞室主应力场、位移场、塑性区的分布效果图。对 比图 6 和 7 的分析、计算结果可知,隧道开挖并采 用聚丙烯纤维增强混凝土锚喷支护后,拱顶的受拉 塑性区的分布状态得到相应的改善,σ<sub>T</sub>由未支护的 0.5 MPa 减少到 0 MPa,受拉塑性区下移至直墙的 中下部。对比图 2 和 3 的结果可知,由聚丙烯纤维 增强混凝土和系统锚杆组成的支护结构,由于充分 调动和利用了围岩的自承载能力、锚杆的抗拉能力 和抑制变形能力以及聚丙烯纤维增强混凝土自身较 高的抗拉强度和良好的变形性能,使得隧道围岩和 支护结构变形模量和变形量都有明显的改善。由表 2 可知,拱顶的位移减少到未支护状态下的 54.2%, 整个隧道断面的变形也趋于均匀。

表 2 隧道支护前后位移比较

 Table 2
 Comparison of displacement before and after supporting

相式	位移/mm		
组成	支护前	支护后	
拱顶	2.587	1.402	
拱脚	3.233	2.697	
墙腰	3.246	2.715	

提高隧道强度可抑制隧道失稳的力学机理在于 隧道周边破坏区发展得到了一定程度上的抑制。从 图 7 可以明显看出:随着隧道采用湿喷聚丙烯纤维 网混凝土作为永久衬砌和锚杆的一起作用,能延缓 和改善隧道断面出现失稳状态,剪切塑性变形区萎 缩到墙趾附近,使隧道的工作状态得到明显的改 善。

锚杆的屈服,通常表现为锚固段与浆体之间发 生剪切破坏,在图 8 中描述了锚杆在工作状态下的 屈服过程,从图中可以看出,随着应力的释放,锚 杆完好未发生屈服。



图 8 锚杆轴力图 Fig.8 Axial force diagram of bolts

## 5 结 语

对节理较发育、地下水不丰富的硬质围岩单线 铁路隧道,选择了聚丙烯纤维混凝土锚喷支护结构 厚度为15 cm,纤维网掺量为0.9 kg/m<sup>3</sup>的支护方 案,从分析计算结果可知,支护后的位移得到了有 效的控制,塑性区得到了明显的改善,从而使隧道

#### 拱顶的坍塌得到了有效的控制。

#### 参考文献(References):

- 中华人民共和国行业标准编写组. 铁路隧道设计规范(TB10003 -2001)[S]. 北京:中国铁道出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Railway Tunnel Desigh Code(TB10003 - 2001)[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.(in Chinese))
- [2] 徐干成,白洪才,郑颖人.地下工程支护结构[M].北京:中国水 利水电出版社,2002.(Xu Gancheng, Bai Hongcai, Zheng Yingren. Underground Structure Lining Structure[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.(in Chinese))
- [3] 冯卫星,徐明新. 铁路隧道新奥法施工新实践[J]. 岩石力学与工程 学报, 2001, 20(4): 524 - 526.(Feng Weixing, Xu Mingxin. New practice in railway tunnel NATM construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 524 - 526.(in Chinese))
- [4] 周书明. 挪威法大跨硬岩隧道的设计与施工模拟计算[J]. 岩石力 学与工程学报, 2001, 20(增 1): 1 055 - 1 060.(Zhou Shuming. Numerical simulation for design and construction process for long span tunnel within hard rock mass using New Norway method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.1): 1 055 - 1 060.(in Chinese))
- [5] 吴梦军,陈彰贵,许锡宾,等.公路隧道围岩稳定性研究现状与展

望[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(2): 24 - 28.(Wu Mengjun, Chen Zhanggui, Xu Xibing, et al. The present and prospect of highway tunnel surrounding rock stability[J]. Journal of Chongqing Communication University, 2003, 22(2): 24 - 28.(in Chinese))

- [6] 程 桦,孙 钧,吕 渊. 软弱围岩复合式隧道衬砌模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 162 170.(Cheng Hua, Sun Jun, Lu Yuan. Modeling experiments and studies on complex lining of tunnels in incompetent strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(2): 162 - 170.(in Chinese))
- [7] 吴传斌,施 斌,孙 字,等. 昆明白泥井 3 号隧道围岩稳定性 FLAC<sup>3D</sup> 模拟[J]. 水文地质工程地质, 2004, 6: 52 - 55.(Wu Chuanbin, Shi Bin, Sun Yu, et al. Numerical simulation analyses on stability of the No.3 tunnel of Bainijing in Kunming by FLAC<sup>3D</sup>[J]. Chinese Journal of Hydrology Geology and Engineering Geology, 2004, 6: 52 - 55.(in Chinese))
- [8] 朱合华,陈清军,杨林德.边界元法及其在岩土工程中的应用[M]. 上海:同济大学出版社,1997.(Zhu Hehua, Chen Qingjun, Yang Linde. Boundary Element Method and Its Application in Geotechnical Engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.(in Chinese))
- [9] Fakhimi A, Salehi D, Mojtabai N. Numerical back analysis for estimation of soil parameters in the Resalat Tunnel Project[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19: 57 - 67.