

2000·成都

隧道和地下工程

第 10 届科技动态报告会报告文集

铁道部建设司
铁路隧道和地下工程科技信息中心

西南交通大学出版社

第 10 届科技动态报告会报告文集

2000 年 6 月 28~30 日成都

隧道和地下工程

主编 王建宇 严金秀

铁道部建设司

铁路隧道和地下工程科技信息中心

西南交通大学出版社

• 成 都 •

内容简介

本文集收录了综述、铁路隧道、公路隧道、地下铁道、水工隧洞及地下空间以及新技术、新设备、新材料方面的文章 78 篇。这些文章较全面地介绍了国内外隧道和地下工程技术发展动态和国内在建和拟建的重大工程项目,探讨了隧道及地下工程方面的一些重点、难点问题,并提供了新技术、新设备、新材料方面的信息。本文集覆盖面广、内容丰富、信息量大,可供隧道和地下工程专业的科研、设计、施工、管理人员以及高校师生学习、参考。

隧道和地下工程

第 10 届科技动态报告会报告文集

铁道部建设司铁路隧道和地下工程科技信息中心

*

出版人 宋绍南

责任编辑 杨 怡

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码:610031 发行科电话:7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail:cbs@center2.swjtu.edu.cn

铁道部科学研究院西南分院印刷厂印刷

*

开本:850mm×1168mm1/16 印张:25.875

字数:779千字 印数:1~200册

2000年6月第1版 2000年6月第1次印刷

ISBN 7-81057-506-6/U·032

定价:100.00元

目 录

一、综 述

喷混凝土技术的应用前景	王建宇(1)
关于铁路隧道技术进步的分析与思考	蔡申夫 梁羽腾(9)
加速发展我国隧道掘进机的途径	柴永模 李 勇(17)
铁路隧道技术标准发展历程与现状	王效良(22)
瑞士隧道建设中的风险管理	肖书安(29)
地下结构抗震研究发展状况	于 翔 赵跃堂 郭志昆 李兴碧(33)
我国人工地层冻结技术的发展与应用	徐兵壮 汪崇鲜(38)
公路隧道经济设计的几个问题	曹 磊(42)
“数字地球”与隧道工程	徐宗健(45)
隧道工程建设中的 CIC 系统	周书明 肖广智(49)
地下工程与生态环境	陈德坤 傅德明(53)
公路隧道与环境保护	苏培新 孔祥金(58)

二、铁路隧道

北京地下直径线隧道工程的规划与设计	王立暖 安玉红(61)
西合线西南段隧道工程	杨国柱 张金荣 张俊国 梁文灏(68)
西康铁路秦岭特长隧道 TBM 技术总结要点	李典璜(72)
西康铁路秦岭隧道进口工区施工技术及初步认识	李际中(75)
西康铁路秦岭 I 线隧道进口段 TBM 施工技术探讨	杨书江 孙 谋(81)
西康铁路秦岭隧道 II 线(平导)坚硬岩钻爆法快速施工成果与体会	刘凯年(87)
西康铁路秦岭 II 线隧道(北口)岩爆灾害及防治措施	李关民(93)
湿喷钢纤维混凝土流动性的试验研究	王丙堤(97)
朔黄铁路长梁山隧道设计	孙志强(100)
朔黄铁路长梁山隧道帷幕注浆施工	薛继连 常艸东(105)
朔黄铁路中铁二局管段隧道施工技术与管理	林 原(109)
湿陷性黄土地段大断面隧道施工方法初探	
——记朔黄铁路三家村隧道施工	张泽山(115)
朔黄线中段 45 座隧道衬砌的质量检测	钟世航 王 荣 孙宏志(123)
内昆铁路盐津一号隧道通过密集建筑物下浅埋段的暗挖法施工技术	赵晓斌(128)

内昆铁路不同围岩条件下大跨隧道的施工方案探讨.....	刘洪伟	李建华(137)
黄土隧道施工方法探讨.....		韩贺庚(142)
达万铁路山湾隧道均衡施工技术.....	林志清	王雪松(147)
隧道施工中泥石流的预防及治理.....		闫继红(154)
岩顶隧道突泥流坍地段综合整治技术.....		蔡振楠(160)
南昆铁路米花岭隧道采用光面爆破控制超欠挖的措施与效果.....		王玉斌(164)
南昆铁路米花岭隧道施工监理.....		甄士孝(168)

三、地下铁道

上海地铁地下工程技术综述.....		葛世平(171)
上海地铁土压平衡式盾构轴线控制.....	程中行	谢益民(178)
广州地铁三号线地下段土木工程施工方法的设想.....		金 锋(183)
南京地铁南北线一期工程项目.....		余才高(192)
青岛地铁试验段工程建设概况.....	赵继增	张澎涛(195)
喷锚永久支护在青岛地铁中的应用.....	张先锋	周书明(201)
青岛地铁锚喷衬砌防排水系统的设计与施工.....	周书明	张先锋(206)
武汉长江隧道(含地铁)工程.....		高仕粹(210)
深圳地铁一期工程初步设计车站深基坑支护技术综述.....	高树东	王世清(219)
深圳地铁施工与防水的探讨.....		康 直(224)
地铁区间隧道渗漏水的治理.....		闫亚丽(229)
平拱直墙超浅埋暗挖法在北京地铁中的应用.....		侯军红(234)

四、公路隧道

秦岭终南山特长公路隧道的规划与设计.....	赵秋林	薛新功	刘培硕(237)
上海城市外环线越江沉管隧道干坞方案论证.....	李侃	杨国祥	(245)
率先以“BOT”形式建设的大型市政基础设施			
——上海延安东路隧道南线工程.....	朱良娥	郭贵岐	吴云杰(248)
大断面隧道不稳定围岩及Ⅱ类围岩开挖方法			
——渝黔公路真武山一号隧道掘进技术.....	武勤民	牛生浩	(257)
隧道穿越溶洞堆积物的设计与施工.....		张德和	(263)
华蓥山隧道工程建设的实践与思考.....	王兴平	张广洋	(269)
华蓥山隧道涌突水及整治措施.....	郑金龙	李晓红	卢义玉
	亢会明	董永康	(277)
抗腐蚀气密性混凝土在公路隧道中的应用.....	王兴平	尹杰	(280)
京珠高速公路粤境北段隧道工程剖析.....	林平	李克文	(287)
一座六车道联拱隧道的设计与施工			
——京珠高速公路五龙岭隧道设计与施工介绍.....	郭小红	朱光仪	(305)

靠椅山隧道施工通风降尘技术..... 戴尊勇 李传营 李永苏(310)

洋碰隧道右线北京端软岩浅埋段设计与施工浅析..... 林 平 李应顺 李克文(314)

京珠高速公路石门坳隧道施工初探..... 李 彪 张子新(323)

招宝山特浅埋公路隧道洞口施工技术..... 拓守盛(327)

茅荆坝隧道工程建设的前景预测与可行性分析..... 王述红 王家宝 任凤玉 张效宗(333)

富水隧道防排水施工工艺..... 李 新(338)

老界岭隧道工程治水方案研究..... 于三坤(341)

对龙门隧道施工过程出现病害的几点认识..... 黄 波(344)

五、水工隧洞及地下空间

南水北调西线工程隧洞施工的几个主要问题和处理措施研究 李庆中 曹廷立 胡建华 田华祥 刘 新(347)

昆明市掌鸠河引水供水工程输水工程简介..... 肖广智(352)

万家寨引黄入晋工程中的岔管设计..... 李 玲(355)

汕头 LPG 集散中心工程——海底储气洞库控制渗漏水技术 赵喜斌(360)

从一个工程实例述说市政人行隧道的修建特点..... 郭建标(368)

超大断面地下商场施工技术..... 郭景伟 黄修云(373)

六、新技术、新设备、新材料

矩形隧道施工技术的研究与应用..... 张冠连 傅德明 谢 彬(376)

PNJ-1 型炮泥机的研制与应用前景 高菊如 涂文轩(380)

水平旋喷预支护技术在我国隧道工程中的应用..... 朱永全 景诗庭 孙星亮 刘 勇(384)

搅拌桩在地铁车站围护结构施工中的应用..... 周俊慧(387)

膨胀橡胶在秦岭隧道的防水应用研究..... 李海燕 陈晓理(391)

三元乙丙多孔橡胶密封垫在盾构法隧道中的应用..... 孔 华 谢益民(394)

DMY 型激光隧道断面测量系统的应用 周 策 汪光宅 李长明(396)

提高收敛计测试精度的理论分析及改进措施..... 李守柱 颜景淦 张连城 龚固培(398)

BJSD-2 型激光隧道限界检测仪在南昆线隧道限界测量中的应用 林旗波(402)

CONTENT

1. Survey

Prospecting towards Improved Use of Shotcrete in Tunneling	Wang Jianyu(1)
Analysis and Consideration of Railway Tunneling Technique Development	 Cai Shenfu Liang Yuteng(9)
The Way to Speed up the Development of TBM Technology in China	Chai Yongmo Li Yong(17)
The Developing Course and Current State of Technical Standard for Railway Tunnels	 Wang Xiaoliang(22)
Risk Management in Swiss Tunnel Construction	Xiao Shuan(29)
Research of Earthquake Resistant Underground Structure	 Yu Xiang Zhao Yuetang Guo Zhikun Li Xingbi(33)
Development and Application of Artificial Ground Freezing Technique in China	 Xu Bingzhuang Wang Chongxian(38)
Some Problems in Economic Design for Highway Tunnels	Caolei(42)
Digital Earth and Tunneling	Xu Zongjian(45)
CIS System in Tunneling Construction	Zhou Shuming Xiao Guangzhi(49)
Underground Works and Ecological Environment Protection	Chen Dekun Fu Deming(53)
Highway Tunnel and Environmental Protection	Su Peixin Kong Xiangjin(58)

2. Railway Tunnel

Planning and Design of Beijing Zhijingxian Tunnel	Wang Linuan An Yuhong(61)
A Survey of Tunnel on Southwest Section of Xihe Railway	 Yang Guozhu Zhang Jinrong Zhang Junguo Liang Wenhao(68)
Summary of TBM Technology for Qinling Railway Tunnel on Xi'an-Ankang Railway	 Li Dianhuang(72)
Construction Technique for Entrance of Qinling Tunnel on Xi'an-Ankang Railway	Li Jizhong(75)
Discussion on TBM Construction in Portal Section of Qinling No. 1 Tunnel	 Yang Shujiang Sunmou(81)
Achievements and Experience in Rapid Construction by Drilling and Blasting Method under Hard Rock at the Heading of Qinling No. Ⅱ Tunnel	Liu Kainian(87)
Rock Burst Disaster and Preventive Treatment Methods for the Heading of Qinling No. Ⅱ Tunnel (North Entrance)	Li Guanmin(93)

Experimental Study on Flowability of Wet Steel-Fiber Reinforced Shotcrete	Wang Bingdi(97)
Design of Changliangshan Tunnel on Shuohuang Railway	Sun Zhiqiang(100)
Curtain Grouting in Changliangshan Tunnel	Xue Jilian Chang Shaodong(105)
Construction and Management of Tunnels on Shuohuang Railway	Lin Yuan(109)
An Elementary Discussion on Construction Methods of Large Section Tunnel under the Geological Conditions of Wet Sticky New Yellow Soil	Zhang Zeshan(115)
Quality Examination to the Lining of 45 Tunnels in Shuohuang Railway	
.....	Zhong Shihang Wan Rong Sun Hongzhi(123)
Bored Tunneling Technique for Yanjin No. 1 Tunnel Passing Dense Building Area ...	Zhao Xiaobin(128)
Discussion on the Construction Scheme for Large—Span Tunnel in Various Surrounding Rock	
.....	Liu Hongwei Li Jianhua(137)
Discussion on Loess Tunneling	Han Hegeng(142)
Balance Construction Technology in Shanwan Tunnel on Dawan Railway	
.....	Lin Zhiqing Wang Xuesong(147)
Prevention and Treatment of Mud—rock Flow in Tunneling	Yan Jihong(154)
Comprehensive Treatment for Collapse with Mud—rock Flow in Yanding Tunnel	Cai Zhennan(160)
Excavation Control and Its Effect in Mihualing Tunnel by Smooth Blasting	Wang Yubin(164)
Construction Supervision for Mihualing Tunnel	Zhen Shixiao(168)

3. Metro

Summary of Underground Works Technology in Shanghai Metro	Ge Shiping(171)
Axes Control of EPB Shield in Shanghai Metro	Cheng Zhonghang Xie Yiming(178)
Construction Methods for Underground Section of Guangzhou Metro No. 3 Line	Jin Feng(183)
Phase 1 Project of South—North Line of Nanjing Metro	Yu Caigao(192)
Summary of Qingdao Metro Test Section Construction	Zhao Jizeng Zhang Pengtao(195)
Application of Bolt and Shotcrete Permanent Support in Qingdao Metro	
.....	Zhang Xianfeng Zhou Shuming(201)
Design and Construction of the Waterproof and Drainage System of Bolt and Shotcrete Support in Qingdao Metro	Zhou Shuming Zhang Xianfeng(206)
Changjiang Tunnel (Including Metro)at Wuhan	Gao Shicui(210)
Summary of Support Technique for Station Deep Foundation Pit in Primary Design of Phase 1 Project, Shenzhen Metro	Gao Shudong Wang Shiqing(219)
Discussion on the Construction and Waterproof of Shenzhen Metro	Kang Zhi (224)
Treatment on Water Leakage in Metro Running Tunnel	Yan Yali(229)
Application of Flat—roof and Upright— wall Extra—shallow Bored Tunneling Method to Beijing Metro	
.....	Hou Junhong(234)

4. Highway Tunnel

- Planning and Design of Qinling Highway Tunnel at Zhongnanshan Zhao Qiulin Xue Xingong liu Peishuo(237)
- Demonstration of Dry Dock Scheme for Immersed Tunnel on Shanghai Out—ring Li Kuan Yang Guoxiang(245)
- South Line of Yan'an Rd. (E) Tunnel—the First Large Infrastructure Project in "BOT" Zhu Liang'e Guo Guiqi Wu Yunjie(248)
- Excavation Methods for Large Section Tunnel under Unstable and class II Surrounding Rock
—Driving Technology for Zhenwushan No. 1 Tunnel on Yuqian Highway Wu Qinmin Niu Shenghao(257)
- Design and Construction of the Tunnel Passing through Karst Accretion Zhang Dehe(263)
- Practice and Consideration to the Construction of Huayingshan Tunnel Wang Xingping Zhang Guangyang(269)
- Sudden Water Inflow to Huayingshan Tunnel and Its Countermeasures Zheng Jinlong Li Xiaohong Lu Yiyu Kang Huiming Dong Yougkang(277)
- Application of Corrosion Resistant & Gas-tight Concrete in Highway Tunnel Wang Xingping Yin Jie(280)
- Analysis of the North Section of Xiaotang-Gantang Expressway Lin Ping Li Kewen(287)
- Design and Construction of the Six-lane Multiple-arch Tunnel
—Introduction to Design and Construction of Wulongling Tunnel on Jingzhu Highway Guo Xioohong Zhuguangyi(305)
- The Technology of Dust Alleviation by Ventilation during Kaoyishan Tunnel Construction Dai Zunyong Li Chuanying Li Yongsu(310)
- An Elementary Analysis on Design and Construction of Yangpeng Tunnel Right Line under Shallow Soft Rock Lin Ping Li Yingshun Li kewen(314)
- Discussion on the Construction of Shimenao Tunnel on Jing-Zhu Expressway Li Biao Zhang Zixin(323)
- The Portal Construction of Zhaobaoshan Shallow Highway Tunnel Tuo Shousheng(327)
- Prospect Forecast and Feasibility Study on Maojingba Tunnel Construction Wang Shuhong Wang Jiabao Ren Fengyu(333)
- Waterproof and Drainage Technology for Water Rich Tunnel Li Xin(338)
- Study on Water Control Program for Laojieling Tunnel Yu Sankun(341)
- Study on Disease in Longmen Tunnel Construction Huang Bo(344)

5. Water Tunnel & Underground Space

Problems and Countermeasures for West Line Tunnels of the South-North Water Conveying Project ...
..... Li Qingzhong Cao Tingli Hu Jianhua Tian Huaxiang Liu Xin(347)

Brief Introduction to Zhangjiu River Water Tunnel in Kunming Xiao Guangzhi(352)

Design for the Manifolds of Shanxi Wanjiazhai Huanghe Diversion Project Li Ling(355)

Shantou LPG Terminal Project—Seepage Water Controlling Technology for Undersea Storage Cavern
..... Zhao Xibin(360)

Construction Characteristics of Muniapal Pedestrian Tunnel Guo Jianbiao(368)

Construction Technology of Underground Market with Super-Large Section
..... Guo Jingwei Huang Xiuyun(373)

6. New Technology , Equipment & Material

Research and Application of Construction Technique for Rectangular Tunnel
..... Zhang GuanLian Fu Deming Xie Bin(376)

Development and Prospect for Type PNJ-1 Stem Machine Gao Juru Tu Wenxuan(380)

Application of Presupport Technology with Horizontal Rotary Jetting to Tunneling
..... Zhu Yongquan Jing Shiting Sun Xingliang Liu Yong(384)

Application of Mixed Piles in Enclosing Structure of Metro Station Construction Zhou Junhui(387)

Study on Expanded Rubber for Waterproof in Qinling Tunnel Li Haiyan Chen Xiaoli(391)

Application of EPDM Rubber Gasket to Shield Tunnel Kong Hua Xie Yiming(394)

Application of Type DMY Laser Measuring Instrument for Tunnel Section
..... Zhou Ce Wang Guangzhai Li Changming(396)

Theoretical Analysis and Measures for Accuracy Improving of Convergence Gauge
..... Li Shouzhu Yan Jinggan Zhang Liancheng Gong Gupei(398)

Application of BJSD—2 Laser Detecting Instrument to Clearance Detecting of Tunnels on Nankun Railway
..... Lin Qibo(402)

喷混凝土技术的应用前景

王建宇¹

(铁路隧道及地下工程科技信息中心, 成都 610031)

摘 要 本文指出了喷混凝土技术存在的一些问题, 介绍了发展动态和科技成果, 对“新奥法”、“挪威法”以及喷混凝土的正确使用进行了论述, 着重讨论了钢纤维喷混凝土作为一种理想的支护材料在隧道工程中的适用性。

关键词 隧道工程 喷混凝土 钢纤维 新奥法 挪威法

1 引言

喷混凝土施工作业中的粉尘, 物料回弹加上混凝土品质管理和施工质量控制等三大问题一直困扰着工程师们, 大大降低了他们采用这项技术的热情。而另一方面, 大家又不得不承认喷混凝土是现代隧道工程难以割舍和取代的支护手段——不用喷混凝土又该用什么呢?

1992年, 国际隧协“喷混凝土应用”工作组的 T·Franzen 在一份工作报告中认为, 喷混凝土技术的发展趋势可以归结为:

湿式喷混凝土工艺的采用;

在喷混凝土中引入钢纤维;

用喷混凝土代替模注混凝土作永久支护。

这篇报告把论述的重点聚焦在钢纤维喷混凝土在隧道工程中的应用上。

多年来, 国内外在以上几个方面所取得的明显进展解除了人们对喷混凝土技术发展的忧虑和疑虑, 并看到了它在隧道工程中进一步应用的前景。

2 湿喷·离心式喷射机·模喷

2.1 采用湿喷工艺是保证混凝土质量的一个重要措施

人们对湿喷工艺的第一个印象是作业中产生的粉尘大大降低了。这常常成为他们迫不及待地放弃干喷, 采用湿喷的主要动机。其实, 湿喷技术的一个最大优点是喷混凝土的品质和施工质量能得以保证。众所周知, 对混凝土品质即物理力学性能有着第一位的、“致命”影响的因素是水灰比。在采用干喷工艺的情况下, 水灰比的控制, 不是通过计量而仅仅依据肉眼对物料和易性的定性判断来调节, 具有一定的随意性。因此, 混凝土物理力学性能指标的确保变得十分困难。有时候, 个别试块的强度可能较高, 但并不能从总体上保证喷混凝土结构的质量。材料均质性较差。通过足够数量试件会发现, 所得力学指标数据样本的离散性很大。而从工程设计的可靠度理论看, 力学指标的离散系数是决定工程可靠度的重要因素。而在湿喷工艺中, 除速凝剂外, 混凝土的其余组份均可以精确计量, 特别是水灰比可以严格符合设计要求。而在喷嘴处加入的速凝剂的掺量也通过计量泵加以控制。这就为喷层材料物理力学指标, 特别是其匀质性和质量稳定性的确保创造了条件。

理解了这一点, 也就能理解为什么只有当湿喷技术发展到一定程度, 用喷混凝土代替模注混凝土作永久支护的问题才能提上日程。

值得指出的是有的国外文献(特别是一些早期的文献)在谈到干湿喷比较时, 说湿喷工艺混凝土强度较低, 回弹较大。这是指采用泵式湿喷机的情况下, 物料在管道中呈“稠密流”状输运, 为了保证其可泵性, 常常把水灰比搞得较大。这就对混凝土的强度和其它物理力学性能产生负面影响, 并使回弹加大。近年来的实践表明, 在混凝土物料制备时可掺入减水剂、助泵剂及硅粉一类外掺剂, 可以把水灰比降下来, 从而使喷混凝土

1.男, 国家级专家, 教授, 博士生导师, 信息中心主任

的强度和其它物理力学性达到相当高的水平。

当然,对于物料呈稀薄流输送的“风送式”湿喷机,可泵性和水灰比大的问题当然不存在。目前国内市场中“转子活塞式”湿喷机之所以能得以推广的一个重要原因就是对于骨料级配、配合比、物料和易性和外掺剂的要求不像泵送式湿喷机那样高。这不但使得在施工中使用方便,而且有利于保证混凝土品质。

2.2 喷射方式的革新——离心式混凝土喷射机^[1]

在湿喷工艺基础上降低粉尘的进一步努力是日本“离心式喷射机”的开发。与一般的泵送式湿喷机不同,当成品混凝土物料泵送到工作面时,不是靠压缩空气来补给能量形成喷射料束,而是通过一个旋转装置靠离心力将物料甩射至受喷面。这样由于基本上杜绝了“粉尘之源”——压缩空气的使用,使作业中产生粉尘的可能进一步降低。

由日本国土开发技术研究所开发的 NATM·CERS 型离心式喷射机 1989 年通过审查,已在石原坂、立石和名立等隧道使用,主要技术特征如下:

最大喷射生产率	10 m ³ /h
重量	18 500 kg
尺寸	11 300 mm×3 175 mm×2 400 mm (长×高×宽)
粉尘浓度	2.4 mg/m ³

从试验数据看用离心式喷射机制备的喷混凝土,其抗水性、强度等性能与传统喷射工艺相差无几,唯匀质性稍差。

美国混凝土学会(ACI)对喷混凝土的定义是:Mortar or concrete pneumatically projected at high velocity onto a surface(用压缩空气高速喷射到表面上的砂浆或混凝土)。现在看来,这个定义也许得改一改了。

2.3 “模喷”工艺和随动式模板

成都顺城街地下人地通道通过第四系全新统冲积层,由砂及卵石组成,围岩松散,稳定性差。加之隧道埋置较浅,顶部覆盖层仅为 7.55 m。地表为主要交通干道,两旁重要建筑物林立(包括一座 14 层饭店)。在隧道上方,埋有污水、雨水、自来水及电缆槽等十多条地下管线。施工中既要防止坍塌,又要控制围岩变形,难度是很大的。

施工时首先用井点降水将地下水位降至隧底以下。然后从两边洞口向拱部地层打设管棚。原来设想两边的管棚在隧道中对接。由于施工的困难,未能实现。这样一来,作为初期支护的格栅喷混凝土的施作就成了保证围岩稳定的关键。不幸的是,在这类砂夹卵石的地层中,喷混凝土难以施作。喷上去的混凝土会连同围岩砂石一起掉落。

出于无奈,我们只有先架设格栅,在格栅外缘敷设简易模板(长 0.5~0.7 m,宽 0.2 m 的合成纤维板),然后按平行于岩面方向(避免正面冲击岩面,防止砂卵石坍落在模板内)往模板后喷射混凝土。由于喷混凝土的速凝、早强性能,模板可自下而上地倒用。这种借助于简易模板来施作喷混凝土的办法被称为“模喷”。

在顺城街工程中这种用“模喷”工序施作的格栅喷混凝土初期支护不但有效地防止了围岩的坍塌,而且控制住了围岩的变形。而作为二次支护的模注混凝土则是在隧道贯通后再作的。这样,我们就在没有办法施作喷混凝土的场合找到一个办法,成功地解决工程问题。

这种“不正规”的做法会遭到一些隧道工程师们的怀疑和反对是情理之中的事。因为谁都知道,往一个封闭的小空间喷射混凝土,由于骨料颗粒的跳动和反弹会影响混凝土的结构。同时,在喷射方面岩面平行的情况下,喷层同岩面之间的结合和粘结能否得以保证也是个问题。而这种结合和粘结对于喷层的支护作用是至关重要的。

因此,我们在小心翼翼地同隧道界介绍这种“模喷”工艺的同时,还提出了使用模喷工艺的几个前提条件:

- 必须采用湿喷;
- 必须同格栅联合使用;
- 建议在设计中将用模喷工艺施作的喷层作为“临时支护”或“施工支护”考虑,在计算永久支护时,不予计及。

但是,最后这一点很快就有人突破了——深圳科苑立交隧道的永久支护结构就是用“模喷”施作的。

为了对模喷工艺作出确切的评价,以利于在合适的条件下应用,实在有必要进行系统的试验研究。要知道,在采用模喷工艺的情况下,喷混凝土作业中的回弹问题能得以彻底解决,同时又能使喷混凝土层获得足够厚度和一个较为平滑的表面。这些,确实是很诱人的!

事实上,这种努力和尝试,在国外已有先例。采用同喷嘴同步移动的“随动式”模板来进行喷射作业,也可以说是一个种“模喷”。

在1995年举行的第七届“地下支护喷混凝土”国际学术会议上,德国的 Philipp Holzmann AG 介绍了他们从1985年开始研究和开发的两种类型的随动模板^[2]:

履带式随动模板(Roll-over Shutterbelt System),其“履带”可由橡胶,激光焊接的钢板或钢纤维合成材料或PVC带做成;

滑动式随动模板(Gliding formwork),与履带式不同,这类模板在喷射作业中是以滑动方式移动的。

为了保证模板的正常移动,调节喷混凝土的凝结时间以及早期强度十分重要。试验表明,混凝土物料塑性状态保持在1 min之内,凝结时间控制在2.5~3 min,是合适的,足以使300~400 mm厚的喷层在去掉模板支撑后能可靠地粘结在岩石上(包括拱顶部位)。

日本早在20世纪80年代即开始进行随动模板方面的研究和开发。他们把它称为NTL(New Tunnel Lining Method)工法。

我国铁道建筑研究院等单位也曾经研制过带拱架的喷混凝土随动模板系统,并对模喷混凝土的工艺和材料性能进行过试验。试验结果,模喷混凝土28天抗压强度可达到24.4 MPa,与常规喷混凝土相近。

3 钢纤维喷混凝土是一种理想的隧道支护材料

3.1 对“新奥法”原理的争论

瑞士一位在岩土工程界很有名气的学者,K·Kovari教授1993年在萨尔茨堡举行的大地力学讲座会上发表了一篇文章,题为“新奥法是否存在?”^[3]

奥地利国家地下空间委员会1980年曾提出新奥法的正式定义:“新奥地利隧道修建方法(简称新奥法)遵循这样一个原理,即通过发挥围岩承载环的主动作用使隧道围岩(岩土体)成为承载结构”。

Kovari教授对此的质疑集中在以下两点:

- 围岩可以成为承载结构,具有自承能力,这一认识早已存在,并不是新奥法创始者的贡献。这种认识历来就已经反映在隧道的设计和施工中;

- 作为新奥法基础的围岩特征曲线(Pacher曲线)的向上分岔难以从理论上和经验上阐明和肯定。因此,不能成为支护强度、变形特性以及施作时间的最佳选择的准则。

其实,通过对以上的两点深入讨论倒是恰恰可以使我们更深刻地理解和掌握新奥法的精髓。

围岩“可以”成为承载结构,具有自承能力。这一认识并不是新奥法创始者的贡献,这一点Kovari教授是说得对的。问题在于怎么使围岩成为承载“结构”。

早在1879年Ritter就断定,从一个确定的隧道深度起,覆盖层厚度对围岩压力只有微乎其微的影响,甚至没有什么影响。

1882年Engesser提出了“拱效应”。中国工程师熟悉的普洛托季亚可诺夫则描绘了可以自承的天然拱的形状,并给出了自承拱以下可能坍落岩土体高度的计算公式,认为支护结构只要能承受这部份岩土体的重量就行了。围岩的其余部份则已成为天然的自身承载结构。

“天然拱”理论的实质是认为围岩的自承是通过隧道开挖后岩土坍塌来实现的。支护措施并不能对围岩的自承能力的形成和大小有所影响。至今仍在采用的传统隧道设计方法(例如现行隧规)在按所谓bedded ring模型计算支护结构时,荷载的确定同支护系统强度、刚度和施作时间等全然无关。这显然是同工程实践所反映的实际情况大相径庭。

直到1912年,Wiesmann提出:隧道开挖后会在围岩中形成一个“保护壳”。他声称“隧道施工者并没有针对覆盖层压力(指全土柱)而保护洞室的任务,保护壳本身就起到这种作用,他只需要关注维持保护壳而已!”

这里提出了“维持保护壳”,已经不再是“任其坍塌”了。具体怎么维持?1923年Maillart提出:如果我们

设置坑道支护,它能抵抗外部压力,那么也就提高了围岩的抗压强度,这样即能自我承载。直到1956年,即提出新奥法前6年,Mohr在所作的报告中讲道:“如果围岩允许有限制的变形,那么作用于衬砌上的压力将有所减小”。

以上历史资料大部份都是在 Kovari 教授的报告中引用的。他引用这些材料的本意是想说明新奥法并没有什么“新”。可是事实上正是这些例子,说明了人们对围岩自承能力的认识和利用是如何一步一步地向“新奥法”靠拢的。

再回到新奥法的定义。这次,我们来看看它的英文表述:
The New Austrian Tunneling Method (NATM) is based on a concept whereby the ground (rock or soil) surrounding an underground opening becomes a load bearing structural component through activation of a ring-like body of supporting ground.

“通过发挥围岩承载环的主动作用使隧道围岩成为承载结构”。在此定义中“发挥”(activation)一词有“主动”的意思,也可译为“激发”、“调动”。

这就明确地表明了它在利用围岩承载能力方面同传统观点的不同。新奥法对围岩承载能力的这种“调动”是通过支护系统在同围岩的共同变形的过程对围岩变形的控制来实现的,是“主动”的,不是被动地等待坍塌后出现的天然拱。相反地,对围岩变形进行控制不仅是指允许围岩变形有一定程度的释放,而且是指要将这种变形限制在围岩能保持自承而不坍塌的限度之内。因此用新奥法修建隧道时,人们关心的不再是可以坍塌下来的岩土体的最大重量,而是围岩和支护系统共同变形的情况(常常要进行监测)。支护系统设计的原则也就从对围岩的拦挡和支撑转变为保护和控制。

所谓 Fenner-Pacher 曲线则形象而科学地对这种共同变形作出了说明。大家知道,该曲线的前半部份是可以从理论上根据岩土的本构关系数值化地加以确定的。后半段描述当围岩变形超过临界状态后引起的坍塌和支护系统静力工作状态的恶化。尽管数值化地将其确定尚有困难,但是从概念上和事实上说,临界点 A 和向上翘的后半段曲线确实是存在的(图1)。

不言而喻,对围岩变形的这种“主动”和有效地控制,只有采用锚杆,喷混凝土一类施作及时并同周围紧密结合在一起的新型支护才有可能。

用 Fenner-Pacher 曲线可以很好地说明,在支护设计中不仅要有足够的强度,而且还要考虑其变形性能即合理的刚度。

用混凝土材料做的衬砌强度大,往往刚度也大(曲线 I),若要求衬砌有一定的柔性,则强度不足(曲线 II)。而混凝土又是脆性材料,当材料受力达到强度极限后即产生破坏,完全丧失承载能力。这就可以说明为什么在一些围岩变形较大的隧道工程中,素喷混凝土往往不能取得很好的支护效果,而不得不主要借助于锚杆或在喷层中敷设钢筋网。

其实,钢纤维喷混凝土倒是一种理想的支护材料。

同素混凝土不同,钢纤维混凝土具有较好的韧性(Toughness),当材料受力达到强度极限后随着变形的发展仍将保持一定的承载能力。掺加了钢纤维的柔性喷混凝土层对于围岩的变形具有良好的吸收能力,有利于在同围岩共同变形中建立起新的平衡(曲线 III)。

过去说,喷混凝土之所以成为新奥法的一种重要技术基础是因为喷混凝土具有三大特点:

- 施工及时;
- 与围岩密贴;
- 柔性。

现在看来,要用以在同围岩共同变形中控制围岩的变形,仅仅以上三点尚不足以成为一种理想的支护材料,还要加上一点:

- 材料要有一定的韧性。

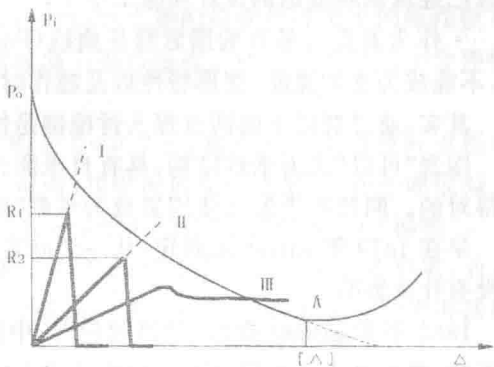


图1 Fenner-Pacher 曲线

因此,钢纤维喷混凝土是一种理想的隧道围岩支护材料。它特别适合用于大变形的软弱围岩或具有膨胀压力的场合。

3.2 钢纤维喷混凝土的性能

掺入钢纤维后,可以提高喷混凝土的强度,特别是早期强度。但这并不是钢纤维的主要优点,当掺量不大时这种提高并不显著。与普通喷混凝土相比,钢纤维喷混凝土的主要优点在于:

- 抗冲击能力、抗震能力强;
- 抗裂性能好,特别是可以控制裂纹的扩张;
- 材料韧性好,吸收变形的能力强。

试验表明,使钢纤维喷混凝土材料达到完全破坏时所需的能量为普通喷混凝土的 10~50 倍。1979 年 Morgan 和 Nowatt 用大板加载试验对普通喷混凝土、钢筋网喷混凝土及钢纤维喷混凝土吸收变形的能力作了试验。试验结果显示了钢纤维喷混凝土的韧性优于钢筋网喷混凝土。

钢纤维喷混凝土早在 1971 年已开始使用,从国际上看已经是比较成熟,应用比较广泛的一项技术。以挪威为例,钢纤维混凝土从 20 世纪 80 年代初就开始采用,目前已用于大部份隧道工程。钢纤维掺量一般为混凝土体积为 0.5 %~1 %,即 40~80 kg/m³。日本土木工程学会规定:钢纤维的抗拉强度应在 600 N/mm² 以上,用于喷混凝土的钢纤维其长度在 30 mm 以上。钢纤维的长度和直径的比一般为 50~60,大部份喷混凝土采用长度为 30 或 40 mm,直径为 0.5 mm 的钢纤维。

钢纤维喷混凝土一般均需要用湿喷工艺来实施。喷射作业时,钢纤维的聚集和结团曾经是一个很伤脑筋的问题,近年来,已从钢纤维产品,喷射机具及工艺等角度加以解决。

除了钢纤维外,近来,玻璃纤维和合成纤维的使用也引起了人们的注意,但最常用的还是钢纤维。

3.3 韧度指标的测定^[4]

对于普通的混凝土材料,在实际工程中要测定的性质指标主要是抗压强度,其余性质大体与之相关。钢纤维喷混凝土则不同,除强度外,韧度是一个重要指标。对于钢纤维喷混凝土韧度测定方法,在国际上并不统一,但都用弯曲韧度指标来反映材料的韧性。

3.3.1 北美 AC1544 标准 ASTM C1018

采用长度为 600 mm,跨度为 450 mm,截面为 150×150 mm² 的试梁作三分点加载试验。

从荷载—挠度图中找出初裂点 A,得到初裂挠度 δ。用同初裂点相应挠度所反映的应变能 Ω 作为计算韧度的基准。然后在曲线上找出同挠度 3δ、5.5δ 及 15.5δ 相应的 Ω_{3δ}, Ω_{5.5δ}, Ω_{15.5δ},韧度指数

$$I_5 = \frac{\Omega_{3\delta}}{\Omega} \quad I_{10} = \frac{\Omega_{5.5\delta}}{\Omega} \quad I_{30} = \frac{\Omega_{15.5\delta}}{\Omega}$$

定义 $R=5(I_{30}-I_{10})$ 为评价材料韧度的综合指标。

各种材料的韧度指标如下表所示:

	I_{10}	I_{30}	$R(\%)$
理想塑性材料	10	30	100
理想脆性材料	1	1	0
临 界	<4	<12	<40
中 等	4	12	40
良 好	6	18	60
优 秀	8	24	80

用该法测得的韧度指标系无量纲量,因此同试件的尺寸关系不大,只需试件的宽、高、跨度比例不变。因此,亦可采用长度为 350 mm,截面为 10 m×10 m,跨度为 300 mm 的试件。

该法主要的缺点是作为计算基准的初裂点常常难以确定(初裂点的定义是曲率急剧增大,曲线坡度改变的点)。此外,当钢纤维掺量较少而试验机刚性不足时,曲线不稳定,难以计算韧度指标。

3.3.2 日本标准 JSCE-SF4

所提出的试验方法弥补了 ASTM C1018 的缺点。该标准不用初裂点相应的挠度作为计算基准,而将挠度 $\delta_b = \frac{l}{150}$ 时的应变能 T_b 定义为“韧度”(Toughness),式中 l 为跨度。

当采用跨度为 450 mm 的试件时 $\delta_b=3$ mm;对跨度为 300 mm 试件 $\delta_b=2$ mm。同初裂点相比较,相应于挠度为 δ_b 的特征点的位置是比较容易确定的。曲线不稳定对应变能 T_b 的量值也不会有重大影响。值得注意的是此处作为“韧度”的 T_b 是具有能量量纲的物理量,其大小同试件尺寸有关。

为了消除试件尺寸的影响,定义

$$f_e = \frac{T_0 l}{bh^2 \delta_{0.6}}$$

为“韧度指数”,具有应力量纲,也可理解为“等效抗弯强度”。式中 b, h 分别为试件截面宽和高。

用经验公式 $f_0 = 0.4 \sqrt[3]{P}$ 来计算不掺钢纤维的喷混凝土的抗弯强度,则得到一个无量纲数

$$R_e = \frac{f_e}{f_0}$$

称为“韧度比”(Toughness quotient)。

3.3.3 法国 SNCF 平板加载试验

由法国铁路等单位提出的韧度试验采用的试件尺寸为 $60 \times 60 \times 100$ cm 四边支承板。在板的中间加载,加载传力接触面为 10×10 cm²,根据测点加载时板中心点挠度变化图可以得出试件吸收的应变能同挠度之间的关系,借以对钢纤维喷混凝土的韧性作出评价。法铁规定,用于隧道裂损衬砌修复的钢纤维混凝土相应于挠度为 25 mm 的应变能积聚应为 500 J。

显然,同小梁试件相比,采用四周支承板加载更符合隧道衬砌的实际情况,而且在试验中沿长、宽两个方向的钢纤维的作用均能得到反映。此外,采用平板试验,便于同钢筋网喷混凝土试件相比较。该平板试验已编入 1992 年出版的法国喷混凝土指南。

4 硬岩隧道合理的支护形式

4.1 复合式衬砌使用中存在的问题

以喷混凝土为初期支护,敷设卷材防水层,然后再施作模注混凝土衬砌的“复合式衬砌”在我国隧道工程中已经作为一种主要的支护形式被广泛地使用,积累了很多经验,也存在着亟待解决的问题。

所存在的问题主要是在一些硬岩隧道中,这种“三层衬砌”同围岩以及它们相互之间并不能很好地彼此贴合,成了“三张皮”。因而,难以保证共同作用,而且会在衬砌背后形成空隙,致使围岩松动、坍塌造成衬砌裂损。还会造成地下水的渗漏。本文作者曾对许多衬砌裂损和漏水的铁路、公路和地铁隧道进行过调查,发现复合式衬砌所存在的这个问题已成为隧道病害的主要原因。

与软岩或土层相比,硬岩隧道工程的特点是:

隧道开挖后,初始地应力重分布所引起的围岩的变形在较短的时间内就释放完毕。围岩稳定性特征主要是由岩体中节理裂隙发育的程度所决定的。支护的作用在于防止出露在围岩临空面上的不稳定块体的掉落,从而维持岩块镶嵌自锁所形成的自稳,并不像在软岩或土层中那样承受显著的形变压力。此外,对于节理裂隙发育的硬岩在采用凿岩爆破法开挖时,由于岩块沿节理面掉落,开挖轮廓难以平整。这就会给支护作业带来困难。当作为初期支护的喷混凝土紧贴岩面施作后,在凹凸不平的喷层上敷设的防水板往往很难做到同喷层密贴。在施作模注的二次衬砌时则要耗费大量的混凝土去填平凹凸不平的表面。

在支护中设置的钢拱和格栅拱也难以同围岩紧贴,因此也就难以及时地起到支护作用。在很多情况下,钢拱成了只能给人以“安全感”的装饰品。相反地,由于钢拱的阻挡,使喷混凝土作业时形成“阴影区”,影响初期支护的施工质量。

我们发现,有不少工地,在施工中普遍采用碎石回填的办法来解决硬岩开挖后表面凹凸不平的问题,往钢筋网背后填充碎石,喷层只是像浆糊那样地在碎石表面刷了一层。

在这种情况下,还有什么“及时支护,紧密结合”可言呢?这种做法不但不能支护围岩而且为围岩的进一步松散和坍塌创造了条件。同时,会在衬砌背后人为地造成一个存水空间,留下后患。

在软岩或土层中,采用人工开挖或臂式掘进机一类机械,可以使轮廓开挖得较为平顺,接近隧道设计轮廓。这样,复合衬砌就能同围岩紧密贴合,共同作用。钢拱、格栅一类的构件的使用也能取得较好的效果。而且,初期支护和二次支护施作之间的时间间隔有利于释放和控制围岩的变形,减小传递到模注衬砌上的形变压力。提高整个支护系统的可靠性。诚如第 3 节所说,对于一些大变形围岩,若使用钢纤维喷混凝土则效果更好。

因此,可以说,复合式衬砌主要适合于软岩和土层中的隧道工程。对于节理裂隙发育的硬岩隧道并不是一种理想的支护形式。

4.2 单层衬砌和“挪威法”

复合式衬砌使用中所存在问题使用我们认识到,在硬岩中为什么不将支护形式简化,直接将单层的喷混凝土同锚杆相配合作为隧道的永久支护呢?

早在20世纪60年代修建成昆铁路时,就进行过用喷混凝土作永久支护的尝试。主要用于 $f=4$ 以上的围岩。由于当时在喷混凝土品质管理方面缺乏经验,喷混凝土工艺也不够成熟,使得有的喷混凝土衬砌在几年以后收缩开裂,影响使用。

湿喷技术的推广,特别是钢纤维喷混凝土的采用,已经成功地解决了喷混凝土的防裂和耐久性问题。这就为采用单层衬砌创造了条件。在采用单层衬砌的情况下,爆破开挖产生的岩面不平整和轮廓不规则就不会再成为影响衬砌质量的一个难题了。钢纤维喷混凝土施作后形成的隧道轮廓可能并不完全符合设计的衬砌内轮廓理论曲线,但可以做到基本圆顺,避免局部应力集中,确保支护系统和围岩的稳定性。对于公路隧道等对衬砌表面的外观及粗糙度有一定要求(通风),防水等级较高的场合可以用玻璃钢、PVC等材料或预制混凝土构件做离壁式衬套。挪威一隧道曾采用一种复合材料衬套。这种衬套由厚度为1mm的掺入玻璃纤维的聚苯乙烯做外壳,中间注入聚胺酯泡沫,称为Sandwich板。目的是为了防止冻害。

针对硬岩隧道提出的所谓“挪威法”,其主要内容之一就是采用同锚杆相配合的钢纤维混凝土单层衬砌作永久支护。

不少欧洲文献都鼓吹在节理裂隙发育的硬岩中宜用“挪威法”来取代新奥法。认为“挪威法”在现代隧道修建技术中是新奥法的一个重要补充。

在单层衬砌支护系统中,湿喷钢纤维混凝土和锚杆是关键组成部份。一般不采用钢拱或格栅拱,必要时用局部钢筋喷混凝土拱肋来加强支护系统。

所谓“挪威法”的另一个重要内涵是根据挪威学者Barton提出的岩石质量指标 Q 来对岩石进行分类。根据分类,经验地确定支护形式和支护参数,即

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

式中, RQD ——反映岩体破碎程度的一个指数,根据钻探记录获得,类似于岩芯采取率;

J_n ——节理组数;

J_r ——节理蚀变或填充情况;

J_w ——地下水压力或渗漏量;

SRF ——原岩应力状态。

从表达式可以看出,按 Q 值确定支护形式和支护参数的实质是认为围岩稳定程度主要是由于岩体的节理发育程度即岩体破碎程度所决定的。因此可以认为,这是一种适用于硬岩隧道的有针对性的围岩分类方法。

为了估算 Q 值,Barton给出了按地质描述确定 Q 值表达式中诸参数的表格,以及地震波波速与 Q 值之间的关系,即

$$V_p \approx 3.5 + \log_{10} Q_c$$

式中, $Q_c = Q \frac{\sigma_c}{100}$,其中

σ_c 为岩石强度。

当 Q 值确定后,再根据隧道的跨度按图表确定支护形式和支护参数。

4.3 喷混凝土的耐久性

单层衬砌之所以可以作为隧道的永久支护是基于对喷混凝土材料耐久性的认同。事实上,早在1978~1979年在巴西Eliana隧道就进行了用喷混凝土作永久支护的试验,并于1982年在圣保罗地铁北延线正式采用。

在斯堪的那维亚,采用钢纤维喷混凝土作为永久支护也较早。德国、奥地利则进行了广泛的室内和现场试验,对单层喷混凝土衬砌进行研究、测定和评估。法国大约在1985年就开始使用钢纤维喷混凝土。1990年同意将钢纤维喷混凝土作为公路隧道的永久衬砌。一系列的研究表明,喷混凝土的耐久性除了周围环境存在