

铁路基建施工技术丛书

锚喷支护施工

张家识 彭吉中 编

中国铁道出版社

前 言

在隧道工程中，锚喷支护是新奥法施工的重要组成部分。新奥法起源于欧洲，七十年代末，我国铁路在修建普济隧道（1977年）、腰岷河隧道（1978年）、下坑隧道（1979年）时已开始应用，并在双线隧道的软弱围岩地段进行了试验。此后，修建了金家崖隧道（1981年）和南岭隧道（1982年），为长大隧道用新奥法指导设计和施工——大断面控制爆破开挖，随即进行锚喷支护，通过仪表监测围岩稳定状况，安排后续工序，提供了经验。

随着新奥法施工的推广，以及改建和加固工程的需要，锚喷支护将越来越得到普遍的应用。为了交流经验，给担负隧道施工任务的基层干部和工人提供学习材料，我们编写了本书。希望通过介绍新奥法基本概念，喷射混凝土和锚杆的类型、材料及其各种施工机具，施工工艺，质量管理方法及测试技术，对新奥法锚喷支护的应用能有所帮助。

本书经铁道部专业设计院姚佐周副院长、秦淦君副总工程师审阅，标准处彭蕴山、罗镇球高级工程师和梁国材、姚源道、王贵庭、孙集灼工程师作了阅校，贾其英绘图。书稿还得到第四工程局六处陈扬、郑州铁路局武汉科研所师乃夫工程师的协助，特此致谢！

作者

1983年10月

内 容 介 绍

本书从解释新奥法基本原理入手,系统而详细地介绍了作为新奥法重要组成部分的锚杆与喷混凝土的材料、施工机具、施工工艺、性能、质量管理方法以及测试技术,并通过典型实例,说明在施工过程中可能遇到若干问题的解决方法。

读者对象:铁路隧道及其他地下工程的技术人员和工人。中等专业学校地下结构专业师生。

铁路基建施工技术丛书

锚喷支护施工

张家识 彭吉中 编

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 刘曼华 封面设计 赵敬宇

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张: 9.275 字数: 283 千

1984年7月 第1版

1984年7月 第1次印刷

印数: 0001—3,000 册 定价: 1.05 元

目 录

第1章 新奥法与锚喷支护	1
1—1 锚喷技术历史和新奥法起源	1
1—2 新奥法概说	2
1—3 支护衬砌的设计	5
1—4 支护衬砌的施工	12
第2章 喷射混凝土材料及施工机具	15
2—1 喷射混凝土的方法	15
2—2 喷射混凝土材料	17
2—3 混凝土喷射机	30
2—4 喷射混凝土机械手	55
2—5 搅拌、上料机	64
2—6 运料车	69
2—7 喷射混凝土机组	72
第3章 喷射混凝土施工工艺	76
3—1 概 述	76
3—2 施工组织	77
3—3 施工准备	83
3—4 喷射作业	88
3—5 喷射混凝土的养护	97
3—6 钢纤维喷射混凝土	97
3—7 降尘措施和劳动保护	99
3—8 喷射混凝土构筑物的防排水工程	112
第4章 喷射混凝土性能	117

4—1	喷射混凝土强度	117
4—2	喷射混凝土28天以前的 强度增长规律	123
4—3	喷射混凝土28天至120天的 强度增长规律	137
4—4	喷射混凝土的变形	142
4—5	喷射混凝土的抗渗性、抗冻性	148
4—6	喷射混凝土的耐腐蚀性、 碱-骨料反应	156
第5章	锚杆材料及施工机具	161
5—1	锚杆种类	161
5—2	锚杆材料	165
5—3	锚杆凿眼及灌浆机具	172
5—4	锚杆张拉机具	186
第6章	锚杆构造及施工工艺	189
6—1	概 述	189
6—2	机械式锚杆	189
6—3	钢筋砂浆锚杆	192
6—4	树脂锚杆	197
6—5	预应力锚杆	201
6—6	高预应力锚杆	205
第7章	锚喷支护质量管理及经济分析	209
7—1	全面质量管理概述	209
7—2	质量管理中的统计方法	212
7—3	统计检验	224
7—4	质量控制标准和质量控制图	230
7—5	锚喷支护的质量检验	235
7—6	锚喷支护的经济分析	246

附录 1 新奥法实例及应用中的几个问题	253
附 1—1 Tauern(陶恩)隧道	253
附 1—2 Arlberg(阿尔贝格)隧道	261
附 1—3 新字佐美隧道	268
附 1—4 下坑隧道	277
附 1—5 新奥法应用中的几个问题	288
附录 2 新奥法的测试技术	293
附 2—1 概 述	293
附 2—2 位移量测	294
附 2—3 应力量测	298
附 2—4 测站的设置	300
主要参考文献	303

第1章 新奥法与锚喷支护

“新奥法”是奥地利新的隧道修筑法的简称，原文是 New Austrian Tunnelling Method，简写为 NATM。

对于新奥法和锚喷支护，有人认为二者是一回事，只不过说法不同而已；也有人认为它们是既有联系又有区别的。但是，不管怎么说，锚喷支护与新奥法之间存在着密切的联系。因此，在论述锚喷支护施工时，不能不涉及新奥法。

1—1 锚喷技术历史和新奥法起源

喷射混凝土技术的发展，是从喷浆开始的。20世纪初，已出现借助于压缩空气喷射水泥砂浆，作为建筑物的保护层，使用的工具是“水泥喷枪”（Cement gun & Grunite）。由于水泥喷枪只能喷射粒径5mm以下的物料，凝结慢、回弹多，因而喷层很薄，成本昂贵。在地下工程中虽能用作防止围岩风化的保护层，也会有一定的支护作用，但毕竟有限，没有得到推广。事实上，奥地利甘恩工学院 L·V·Rabewicz（拉勃希维兹）教授，早在1934年就在一座铁路隧道施工时，提出过在脆弱的石灰岩面喷敷薄层砂浆，因经济原因而未实现。1942~1945年，在劳普隧道施工时，使用了喷射混凝土。其方法是在爆破开挖后即喷一层薄的混凝土内衬，抑制围岩变形，起支护作用，在围岩达到新的平衡后，再喷一层混凝土外衬，以保安全。

喷射混凝土技术大的发展，是在二次世界大战以后。北欧、西欧国家吸取战争对地面建筑大规模破坏的教训，开始

重视兴建地下建筑。随着地下工程的增多，如何降低占其造价30~40%的支护衬砌费用，成为研究的课题之一，于是，喷射技术又引起人们的重视。取得进展的关键是施喷机具。40年代中期，瑞士Aliva公司、西德BSM公司首先研制成功可喷射粒径达30mm粗骨料的混凝土喷射机。此后随着速凝剂的采用，人们把喷射混凝土当作地下工程的一种支护手段而逐步推广应用。

新奥法是L·V·Rabewicz教授在1948年提出的，在与L·Müller（缪勒）、F·Pacher（帕切）、F·Fecker（费克）及J·Golser（戈塞）等人的合作下，经过十几年的研究和实践，于1963年正式命名并取得专利。他们并不认为新奥法就是锚喷技术，而是修建地下工程的一系列指导原则。新奥法不单纯是一种施工方法，因此没有必要规定开挖方式和支护材料。遵循新奥法施工，支护衬砌可单独或联合使用锚杆、喷射混凝土、模注混凝土、预制混凝土及钢拱架等。在现阶段，采用锚喷支护、尤其是在软弱围岩条件下的初期支护，更能符合新奥法的基本原则，并且易于与其他支护衬砌形式相配合。因此，采用新奥法修筑隧道时，锚杆与喷射混凝土常被优先考虑。L·V·Rabewicz等人就是最早将锚喷技术应用于地下工程建设的。也正是在锚喷技术发展过程中，新奥法逐渐成熟；新奥法的大量应用，又促进了锚喷技术的提高。

1—2 新奥法概说

按奥地利土木学会地下空间委员会的定义，新奥法是一种希望能够在修建于岩石或砂土中的地下洞室周围岩体内形成一个环状支护结构的方法。在对新奥法的解释中，虽说法不同，见解多样，但在应着重观测隧道开挖后围岩的变形，

充分地利用围岩自身承载能力方面，看法是一致的。为有助于对新奥法的理解，需简要叙述一下支护衬砌的设计和围岩稳定问题的研究状况。

以往对隧道力学的研究，大体上是从两个方面来进行的：其一是确定作用于支撑或衬砌上的荷载，谓之土压理论；其二是用解析方法研究在隧道周围岩体中产生什么样的应力状态的弹性或塑性理论。

前者以Bierbaumer（皮保麦）等较为简单的松散压力概念为基础，М·М·Протоальяконова（普洛托季雅可诺夫）提出了一套岩体分类及其相应的荷载确定方法，这是我国50~60年代隧道衬砌标准设计的依据之一。近来Barton（巴顿）等提出了把地质条件、岩质、节理间距等作为岩性的指标，找出荷载大小与支护结构类型之间的关系。

后者研究的主体不是支护衬砌而是隧道周围的岩体，即研究隧道开挖后，在周围岩体中出现的应力重分布问题。起初着重于应用弹性理论，由于计算上的困难，只用于单纯的应力场中开挖圆形、矩形等简单形状断面的场合；对于从弹性问题到包括塑性领域的问题，Fenner（芬纳）、Kastner（卡斯特耐）等进行了研究。近来，由于电子计算机的发展，对隧道形状、围岩应力场及岩体特征等复杂的问题也能进行解析了。

根据现场观测，从经验出发解决问题或用理论分析手段解决问题，是两种不同的方法。这两种方法本应互相补充并统一起来，但要做到却并不容易。

前已述及，新奥法区别于传统方法的显著特点，是充分利用围岩的自身承载能力。隧道开挖后，作用在支护衬砌上的荷载，是围岩松散坍塌的结果。围岩的坍塌是变形积累的结果，因而并不是必然产生的。从控制围岩的变形入手，让

围岩发挥自承能力，会得到隧道工程的最大安全度和经济效益。

新奥法是把围岩作为支护衬砌共同的承载部分，人工施作的建筑物既要适应围岩变形，又要防止围岩松散，才能实现充分发挥围岩自承能力的目的。为此，在设计施工中要遵循一定的原则。要点是在围岩松动破坏之前，及时敷设一层柔性薄壁的支护，必要时装设锚杆，作为初期支护，以适应围岩应力重分布，使其自行调整取得平衡；在围岩变形趋于稳定之后，施作二次衬砌，以增加总的安全度；施工中需设置量测系统，量测围岩和支护的变形，监视其状态，据以变更初期支护参数并决定二次衬砌的施作时间。

新奥法的创始者们将上述基本原理具体化为一套施工准则，据Müller说共22条，而Golser则列出了18条，择其要点，概括起来是：

1. 围岩是隧道稳定的基本部分。支护衬砌的目的是为了与围岩共同形成能自身稳定的“承载圈”。因此，应尽量维护岩体的强度性能：采用大断面或全断面掘进；采用控制爆破开挖。

2. 支护衬砌要薄而具有柔性，使产生弯矩的可能和由此而引起的破坏达到最小。当需要增加支护衬砌强度时，宜采用锚杆、钢筋网以至钢拱架等加固；而不宜大幅度加厚喷层。

3. 施工中要正确地估计围岩特性及其随时间的变化。为此，需进行必要的试验并观测位移，以确定围岩分类、自稳时间和变形速率等参数。

上述各点并不是新奥法的施工方案或作业程序，而是新奥法的思路的综合和系统化。这是一系列性质一致而又互相关联的设计原则，是新奥法的创立者们多年来研究岩石力学

的结果。这些原则之所以“新颖”，不在于所用的施工技术，也不在于使用了特殊的计算，而在于对待和处理围岩的方法，是在很大程度上考虑了围岩的强度。

1—3 支护衬砌的设计

新奥法中，施工之前支护衬砌如何设计，目前还没有统一的或标准的方法，除用有限元法解析外，还有按工程类比和简单计算两种方法流行。

1—3—1 支护衬砌的简单计算

这是新奥法的创始人L·V·Rabcwicz教授探讨性地提出的。设计计算的前提，前已述及，即：隧道支护最根本的是依靠围岩；隧道开挖后，及时施作初期支护来稳定围岩；在围岩基本稳定后，施作二次衬砌以提高安全度。

设计时首先考虑围岩承载圈的问题（图1—1）。承载圈的承载力由 $\sigma_r - \Delta r$ 曲线给出（图1—2），其大小取决于围岩性质及原岩应力状态。

由 $\sigma_r - \Delta r$ 曲线，与外荷载相平衡所需的承载圈径向抗力 P_0^* ，若超过隧道周边岩体的屈服极限，则 P_0^* 值就会随着其塑性区的扩大而下降。 P_0^* 值的下降速度取决于原岩应力 σ_0 和岩体内摩擦角 φ ，通常是急剧下降的。锚喷支护的特点，体现在曲线的下降部分，即使支护遭到局部破坏，也会在曲线的更低点上（必须不小于 P_{min} 值）达到新的平衡，而无需补强。从 P_{min} 点起，随着变形的进一步增大，围岩开始出现有害的松动， σ_r 曲线上升，在此情况下，必须对支护加以补强。判断变形是否有害，要根据围岩中所发生的裂隙，看其是否能够承受剪应力及压应力。

绘制 $\sigma_r - \Delta r$ 曲线时，必须确定围岩的下列系数：

考虑到主应力方向的原岩应力状态 σ_0 ；

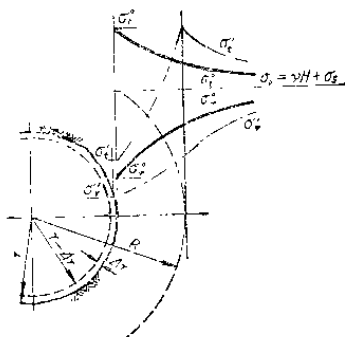


图 1-1 隧道围岩的应力状态

r ——隧道半径； R ——塑性区半径； Δr ——径向变形； σ_g ——原岩应力； σ_g ——围岩的构造应力；

σ_r^0 、 σ_θ^0 —— Δr 为零时的径向应力与切向应力；

σ_r' 、 σ_θ' —— Δr 情况下的径向应力与切向应力。

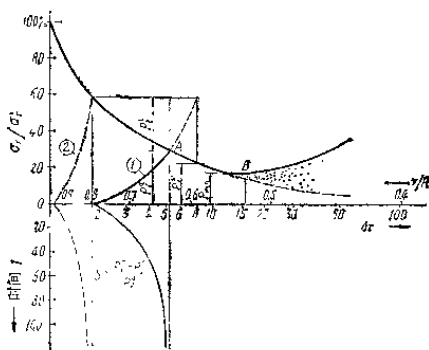


图 1-2 $\sigma_r - \Delta r$ 曲线

σ_r^0 —— $r/R=1$ 时的径向应力； σ_r ——以 Δr 、 P_1 和 P_2 （支护、衬砌抗力）为函数的径向应力； S ——安全系数。

内摩擦角 φ ;

单轴抗压强度 σ_{gd} (考虑与岩层平行及垂直方向);

变形模量及弹性模量。

图中的 $\sigma_r-\Delta r$ 曲线,是根据 σ_r 、 Δr 、 r/R 、 T 以及支护衬砌的不同变形特性曲线①和②,与支护衬砌施作时间的关系求得的。

围岩的系数最好由现场实验来确定, $\sigma_r-\Delta r$ 曲线可以用有限单元法求得。

根据Kastner (卡斯特耐) 的理论, σ_r^0 可按式确定:

$$\sigma_r^0 = \frac{2\sigma_0 - \sigma_{gd}}{\xi + 1} \quad (1-1)$$

$$\xi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (1-2)$$

$$\sigma_{gd} = \frac{2c}{\operatorname{tg}(45^\circ - \varphi/2)} \quad (1-3)$$

式中 c —— 粘结力;

φ —— 内摩擦角。

因此, σ_r 的影响因素是 σ_r^0 的大小和地质条件。

应当选择经济合理的承载圈径向抗力 P_i^0 ,同时要考虑一定的安全系数。为使支护衬砌尽可能地安全, P_i^0 值应当接近 P_{min} 。在任何情况下,绝对没有必要把总的抗力 $P_i^0 + P_i$ 设计得与 σ_r^0 一样大小。

支护衬砌可参照图 1—3,按下列公式进行计算:

支护衬砌中混凝土的抗力 (包括喷射混凝土、模注混凝土等):

$$P_i^0 = \frac{d\tau^0}{\sin \alpha^0 (b/2)} \quad (1-4)$$

支护衬砌中加固钢筋的抗力 (包括钢拱、钢筋网等):

围岩引起剪切破坏，向隧道内滑移时，锚杆的抗力：

$$P_i^A = \frac{a f^{*'} \sigma_p^{*'} \cos \beta}{e t} \quad (1-10)$$

因此，包括承载圈岩石拱在内的总的承载能力为：

$$P_i^W = P_i^I + P_i^R + P_i^A \geq P_{\text{min}} \quad (1-11)$$

图中及式中：

P_i^I 、 $P_i^{I'}$ 、 P_i^R 、 P_i^A ——分别为混凝土、加固钢筋、岩石拱和锚杆的抗力 (tf/m²)；

P_i^W ——总的承载力 (tf/m²)；

b ——剪切区高度 (m)；

d ——支护、衬砌厚度 (m)；

e 、 t ——锚杆的纵横向间距 (m)；

S ——剪切长度 (m)；

W ——支承环岩石拱的宽度 (m)；

σ_{ss} ——岩石单轴抗压强度 (tf/m²)；

c ——岩石粘结力 (tf/m²)；

φ ——内摩擦角 (度)；

τ^* ——混凝土的抗剪力 (tf/m²)；

$\tau^{*'}$ ——加固钢筋的抗剪力 (tf/m²)；

$E^{*'}$ 、 E^* ——分别为加固钢筋、混凝土的弹性模量 (tf/m²)；

α^* ——混凝土剪切角 (度)；

$F^{*'}$ ——隧道每延米加固钢筋截面积 (cm²)；

$f^{*'}$ ——锚杆体截面积 (cm²)；

$\sigma_p^{*'}$ ——锚杆体的弹性极限强度 (tf/cm²)；

注：在工程中应用时，换算成国际单位 (SI制) 可按 1 kgf (公斤力) $\approx$ 10N (牛顿)，1 tf (吨力) $\approx$ 10kN (千牛)，1 kgf/cm² (公斤力每平方厘米) $\approx$ 0.1MPa (兆帕斯卡) = 0.1 $\times$ 10⁶ Pa (帕斯卡)
1 tf/m² (吨力每平方米) $\approx$ 1 $\times$ 10⁵ Pa (帕斯卡)。

τ ——岩石抗剪强度 (tf/m^2) ;

σ_n^R ——作用在剪切面上的正应力 (tf/m^2) ;

α ——岩石剪切角 (度) ;

φ ——剪切面平均倾角;

β ——锚杆倾角 (对水平线面言) (度) 。

从以上介绍的支护衬砌的简单计算可以看出, 计算中需要引用大量的围岩及支护衬砌的物理力学性能特征数据。原始数据可靠, 计算结果会提供正确的设计参数; 反之, 原始数据不准确, 计算结果将是谬误的。而要获得准确可靠的原始数据, 是很不容易的。这就是为什么在电子计算机应用如此广泛, 有关的有限单元法计算程序已经为数不少的今天, 一般的铁路隧道和地下工程仍然很少直接应用计算结果的原因。

由于实际的围岩状态是各式各样的, 隧道围岩的应力分布也非常复杂, 所以固定某种通用的支护衬砌型式是困难的也是不合理的。适宜的设计方法是: 施工前, 根据地质勘探, 用工程类比的经验方法设计支护类型和参数; 施工期间, 进行位移和应力测试, 用量测结果作监视和核对, 必要时修改设计, 指导以后的施工。这是最经济的方法。

1—3—2 支护衬砌的工程类比设计

一般情况下, 新奥法的支护衬砌可采用预先作经验设计, 实施中依据量测信息加以修改和验证的方法进行。附录中将介绍Tauern (陶恩)、下坑等四座隧道的设计施工情况。总结实施的经验, 可得出新奥法支护衬砌经验设计的要点:

(1) 首先, 隧道围岩要作一个分类。这些分类大都是根据地质调查的结果, 具体隧道单独编制; 也有采用通用分类的, 如欧洲流行的Luffer (劳弗尔) 分类、我国《铁路工

程技术规范》规定的围岩分类等。但不论是哪种分类，大体上都是把隧道围岩分为四个基本类型：

完整、稳定岩体；

易破碎、剥离的块状岩体；

有地压作用的破碎岩体；

强烈挤压性岩体或有强大地压的岩体。

(2) 在各类围岩中，跨度约11m、横断面约100m²的双线铁路或公路隧道，支护衬砌的参数大体为：

1) 完整、稳定岩体

锚杆长 $<1.5\text{m}$ ，周边 $n=4$ 根左右，从力学上看是不需要锚杆的，围岩本身强度就可以支护隧道，但因有局部裂隙或岩爆等，用它予以控制。

喷射混凝土用于填平补齐，为确保洞内安全作业应设金属网以防落石。

二次衬砌用能灌注的最小混凝土厚度，约30cm。

2) 易破碎、剥离的块状岩体

锚杆长 $1.5\sim 3.5\text{m}$ ， $n=10$ 左右，多数情况是长、短锚杆配合使用，短锚杆用胀壳式，长锚杆用全长粘结式。

喷层厚 $0\sim 10\text{cm}$ ，稳定性好些的用来填平找齐，也可只喷护拱部，开挖正面勿需喷护；金属网与1)同；特殊情况要采用可压缩钢拱架。

二次衬砌厚约 $30\sim 40\text{cm}$ ，包括喷层在内，40cm就够了。

3) 有地压作用的破碎岩体

锚杆长 $3\sim 4\text{m}$ ，有时用6m的，全长粘结式， $n=10$ 左右，这种围岩根据单轴抗压强度与埋深压力的比值，预计有塑性区发生时，从控制它的发展看，必须与喷射混凝土联合使用。