

• 土木工程学术前沿丛书 •

学术前沿

SUIDAO DANCENG CHENQI JISHU
LILUN SHEJI YU SHIGONG

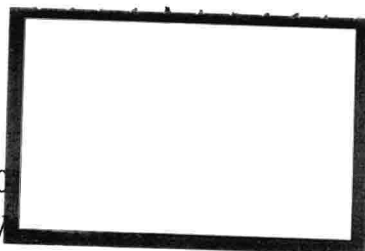
隧道单层衬砌技术 ——理论、设计与施工

仇文革 龚彦峰 殷怀连 张俊儒 著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

铁道部科技研究开发计划项目基金资助 (200
中央高校基本科研业务费专项基金资助 (SW
教育部创新团队发展计划资助 (IRT0955)



隧道单层衬砌技术

——理论、设计与施工

仇文革 龚彦峰 殷怀连 张俊儒 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

隧道单层衬砌技术: 理论、设计与施工 / 仇文革等著.
—成都: 西南交通大学出版社, 2011.4
ISBN 978-7-5643-1155-1

I. ①隧… II. ①仇… ②龚… ③殷… III. ①隧道工
程—衬砌工艺 IV. ①U451

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 068754 号

隧道单层衬砌技术

——理论、设计与施工

仇文革 龚彦峰 殷怀连 张俊儒 著

责任编辑	张 波
封面设计	本格设计
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	20.25
字 数	362 千字
版 次	2011 年 4 月第 1 版
印 次	2011 年 4 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-1155-1
定 价	45.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

单层衬砌是隧道衬砌结构的一种重要形式。单层衬砌技术提出 30 多年以来,因其具有结构简单、经济、施工方便且快速等优点,在国外得到了广泛应用,特别是北欧国家。最新的应用实例是由德国公司设计、中国公司施工的以色列海法市的四座城市道路隧道。长期以来,单层衬砌的设计方法主要以 Q 系统围岩评价法为主,其涉及 6 个参数,这些参数测试较困难;同时,单层衬砌技术缺乏相应的理论支撑,国内尚没有单层衬砌设计与施工指南,阻碍了单层衬砌技术在我国推广应用。在此背景下撰写本著作,希望能给国内同行提供参考。

本书从研究隧道围岩稳定性入手,以数值模拟计算和现场测试为主要研究手段,对单层衬砌在工作过程中锚杆、喷射混凝土以及其与围岩相互作用的力学原理进行了系统的阐述,并通过室内试验研究初步提出了用作单层衬砌的喷射混凝土力学性能控制指标,在此基础上提出了完整的隧道单层衬砌设计原则和具体的设计流程,最终应用于工程实践,初步形成了一套具有理论支撑的单层衬砌设计与施工方法。本书共分 7 章,第 1 章为绪论,第 2 章为围岩稳定性评价方法,第 3 章为单层衬砌支护机理,第 4 章为用作单层衬砌的喷射混凝土性能,第 5 章为单层衬砌设计方法,第 6 章为单层衬砌施工技术,第 7 章为工程应用实例。

本书写作分工如下:第 1 章绪论由仇文革、龚彦峰编写;第 2 章、第 3 章由仇文革、张俊儒编写;第 4 章由仇文革、殷怀连编写;第 5 章由龚彦峰、殷怀连、陈立保编写;第 6 章由仇文革、龚彦峰、阮清林编写;第 7 章由龚彦峰、殷怀连编写。全书由仇文革整理、修改、统编和校核。

书中引用了部分国内外已有专著、文章、规范等的成果,在此向其作者及相关人士表示感谢;特别感谢中铁第四勘察设计院集团有限公司、中铁隧道集团有限公司等单位对本书内容所涉及研究项目的支持与协助。

鉴于作者的学识水平有限,疏漏不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2011 年 3 月于西南交通大学

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 单层衬砌概述	1
1.2 单层衬砌技术现状	3
1.3 单层衬砌的发展趋势	18
第 2 章 围岩稳定性评价方法	20
2.1 围岩分级评价方法现状	20
2.2 毛洞稳定性影响因素	35
2.3 洞室围岩稳定性分析方法	44
第 3 章 单层衬砌支护机理	84
3.1 单层衬砌的支护对象	84
3.2 单层衬砌的力学传递机理	89
3.3 单层喷射混凝土衬砌的支护机理	90
3.4 多层混凝土构成的单层衬砌支护机理数值分析	110
3.5 单层衬砌结构受力特征现场测试	127
第 4 章 用作单层衬砌的喷射混凝土性能	141
4.1 喷射混凝土性能研究现状	141
4.2 配合比设计及基准抗压强度	150
4.3 喷射混凝土力学性能及抗渗性能	156
4.4 用作单层衬砌喷射混凝土性能控制指标	172
第 5 章 单层衬砌设计方法	174
5.1 单层衬砌围岩稳定性分级	174
5.2 设计理念及设计流程	176
5.3 支护形式及耐久性要求	179
5.4 防排水设计	181

5.5 主要建筑材料	196
5.6 辅助施工措施	225
5.7 施工方法	232
5.8 监控量测及超前地质预报	233
第 6 章 单层衬砌施工技术	245
6.1 施工工艺及流程	245
6.2 质量控制技术	269
6.3 施工机具配套技术	282
第 7 章 工程应用实例	292
7.1 工程概况	292
7.2 单层衬砌支护预设计	294
7.3 围岩松动圈测试及预设计修正	297
7.4 施工工艺和方法	300
7.5 技术经济和社会效益	302
参考文献	311

第1章 绪论

1.1 单层衬砌概述

单层衬砌 (single shell lining), 是 20 世纪 70 年代发展起来的一种隧道支护体系。最近几十年, 随着喷射混凝土施工工艺水平、质量和性能的提高, 单层衬砌技术得到了迅速的发展。位于斯堪的纳维亚半岛的挪威和瑞典, 是较早使用单层衬砌的国家。在挪威, 约 460 km 的干线公路隧道中共有 160 km (其中部分是海底隧道) 采用喷射混凝土或钢纤维喷射混凝土作为永久衬砌^[1]; 在瑞典的斯德哥尔摩地铁中也大量使用单层衬砌技术。最早的单层衬砌结构形式主要是单层衬砌混凝土加锚杆构成的支护体系, 后来逐渐发展出现了两层或多层的喷射混凝土构造。

对于单层衬砌的概念, 一些文献是这样定义的: “由单层或多层混凝土构成的, 支护层与衬砌层是一体的, 各层间能够充分传递剪力的支护体系, 称为单层衬砌。” 还有一种说法叫 “单层衬砌施工法”, 即开挖后立即施作喷射混凝土层以支护开挖洞室, 并根据围岩级别设置必要的支护构件, 如钢筋、锚杆和钢拱架等, 过一段时间之后再喷上起衬砌作用的喷射混凝土层^[2]。

作者在总结前人研究成果的基础上, 并结合自己的研究成果对单层衬砌作如下定义: 在取消防水板的前提下, 洞室开挖后立即喷射一层具有一定防水性能的混凝土, 并根据围岩级别设置必要的支护构件, 如锚杆、钢拱架等, 然后根据耐久性平整度的要求, 再施作 (喷射或模筑) 一层或多层混凝土, 构成层间具有很强黏结力并可充分传递剪力的支护体系^[3]。其基本构造示于图 1.1。

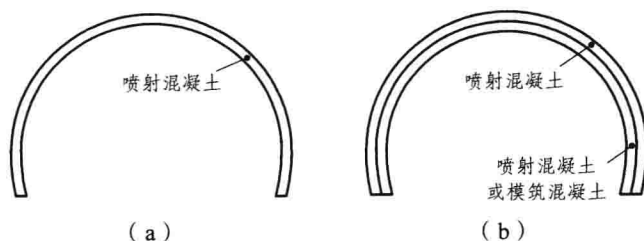


图 1.1 单层衬砌概念图

为了达到后施作的混凝土层同第一层喷射混凝土共同作用的目的，通过使之黏结成可产生共同作用的支承拱，在施作后续混凝土层之前，对暴露很久已被污染的喷射混凝土表面必须采取相应措施（高压水束或砂束）进行处理。这样一方面可减少水化热的产生，另一方面收缩变形也发生在各层之间，避免支护结构的开裂。

单层衬砌与复合式衬砌本质的区别就是支护层间不设置防水板，其承载机理是：通过各混凝土层间径向和环向上的抗滑移性，使得各混凝土层形成共同承载体系。近似地，可以把单层衬砌结构看作“组合梁”来分析其力学特性；相反地，在复合式衬砌中，由于防水板的存在，在初期支护和二次衬砌之间不传递剪力，其结构类似于“叠合梁”的力学行为，如图 1.2 所示。

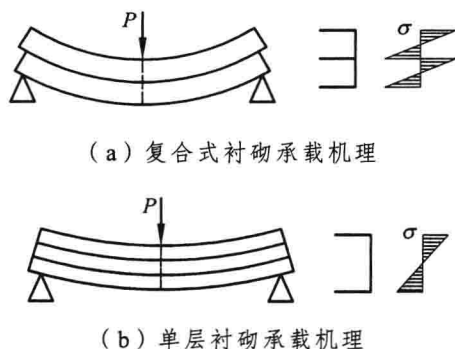


图 1.2 复合式衬砌和单层衬砌的承载机理

这样，在同等荷载条件下，单层衬砌比等厚度的复合式衬砌产生的应力要小，所以可适当减薄衬砌厚度，同时也减少了开挖量和衬砌圬工量，节约投资。而且取消了防水板，取而代之的是耐水性很好的防水混凝土喷层，施工操作方便，可保证一般防水质量，有利于缩短工期。

1.2 单层衬砌技术现状

1.2.1 结构形式

在国外,德国和挪威规定了单层衬砌的结构形式。表 1.1 为德国建议的单层衬砌结构形式^[4],表 1.2 为挪威法中根据 Q 系统设计的单层衬砌结构形式^[5]。在瑞士费尔艾那隧道的第二工区,还采用了三层喷射混凝土的合成构造,其支护形式见表 1.3。国内的汕头石油液化气储库工程、昆石高速公路小团山隧道行车横洞等都是根据挪威法设计的。

表 1.1 德国建议的单层衬砌的构造形式

构造形式	第 1 层	第 2 层
1	钢纤维喷射混凝土	钢纤维喷射混凝土
2	钢纤维喷射混凝土	钢纤维模筑混凝土
3	钢纤维喷射混凝土	钢筋喷射混凝土
4	钢纤维喷射混凝土	钢筋混凝土
5	钢筋喷射混凝土	钢纤维喷射混凝土
6	钢筋喷射混凝土	钢纤维模筑混凝土

表 1.2 挪威法的单层衬砌类型

编号	永久支护类型
1	不支护
2	点锚支护, sb
3	系统锚杆支护, B
4	系统锚杆支护 (加喷射普通混凝土, 4~10 cm), B (+ S)
5	纤维增强喷射混凝土加锚杆支护 5~9 cm, Sfr + B
6	纤维增强喷射混凝土加锚杆支护 9~12 cm, Sfr + B
7	纤维增强喷射混凝土加锚杆支护 12~15 cm, Sfr + B
8	纤维增强喷射混凝土 >15 cm, 喷射混凝土加锚杆支护, Sfr + RRS + B
9	模筑混凝土衬砌, CCA

表 1.3 费尔艾那隧道的单层衬砌结构形式

喷混凝土	L1	L2	L3
适用范围	掌子面迅速支护	二次支护稳定围岩	后方永久支护
喷混凝土厚度/cm	2~4	4~8	8~15
工法	湿喷		
骨料	0~8 mm		
抗压强度/MPa	B40/30	B40/30	B50/40
12 h 强度/MPa	15	7	—
试验喷射的强度富余/MPa	5~8	6~8	8~10
透水性	40 mm 以下	30 mm 以下	20 mm 以下
回弹率	10% 以下		
粉尘量	4 mg/m ³ 以下		

可以看出,国内外单层衬砌的构成,多数是采用锚杆及喷射混凝土或钢纤维喷射混凝土,而且单层衬砌对喷射混凝土性能的要求是比较严格的。实际上,衬砌结构的组成形式,要根据洞室处的地质条件和水文状况所反映出的围岩稳定性,以及单层衬砌的支护机理,并结合洞室的不同使用用途来决定,所以单层衬砌的结构形式还需进一步完善。

1.2.2 衬砌材料力学性能

喷射混凝土支护适宜用作单层衬砌是它独特的工作特性决定的。概括地说,喷射混凝土支护主要的工作特性有及时性、韧性以及黏结性。因此,喷射混凝土除了满足一定的永久抗压强度外,与其工作性能相对应,必须满足一定的早期强度、弯曲韧性以及黏结强度。

国外许多国家都把提高喷混凝土的性能、技术放在了十分重要的位置,如日本土木工程学会 2005 年公布的《隧道喷射混凝土指南》中明确规定了喷射混凝土的设计基准强度、初期强度、韧度指数等具体指标;挪威隧道学会 1999 年出版的《喷射混凝土岩石支护》中对喷射混凝土的设计基准强度、初期强度、黏结强度等也有具体要求;EFNARC(《欧洲喷射混凝土标准》)的喷射混凝土规范对喷射混凝土的设计基准强度、初期强度、韧度指数等也有明确规定。

国内《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086—2001)对喷射混凝土的设计基准强度、黏结强度等有具体的规定;《客运专线铁路隧道工程施工技术指南》(TZ 214—2005)对喷射混凝土的初期强度给出了控制标准;《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38: 2004)对钢纤维喷射混凝土的韧性指标有具体的规定。

1.2.3 设计方法

1. 挪威法

国内外目前应用于单层衬砌支护设计较为成熟的方法是挪威法(简称NMT法,其英文全称是“The Norwegian Method of Tunneling”),它是由正确的围岩评价、合理的支护参数和高性能的支护材料三部分组成的一种经济而安全的隧道施工方法^[6]。在挪威法中,对围岩稳定性评价主要采用Q系统分类法,Q系统是Barton等人在1971—1974年根据249条隧道工程的实践总结,研究得出的一种将围岩分类与支护设计集于一体的方法,迄今为止已有三个版本的Q分类与支护建议的图表问世。

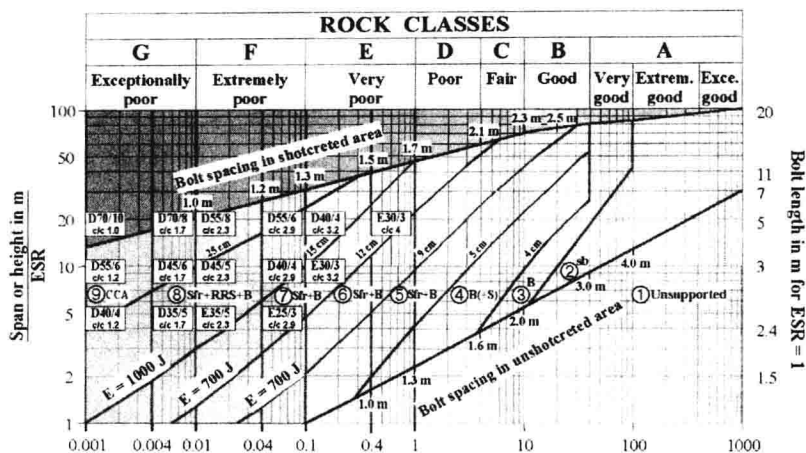
图1.3是2004年出版的《挪威隧道和地下工程2004年度报告》中给出最新的以Q系统法为基础的岩石支护设计图,它是总结世界上2000多条隧道工程实践,并以此经验将1992年版本不断完善而得到的^[7]。

在进行单层衬砌支护结构设计时,根据隧道的当量跨度或高度、岩质评定系数和一定的安全等级,可以很方便地从图1.3中得出所需的支护方式和数量。

2. 极限状态设计法

极限状态设计法是欧洲混凝土委员会在1964年开始提倡的,以后于1970年和国际预应力混凝土协会合作公布了规范,现在英国规范也采用这种方法作为基准^[8]。

一般情况下,在极限状态设计法中,通过验算两种极限状态即破坏极限状态和使用极限状态来确保结构的安全性和使用性。在采用喷射钢纤维混凝土作单层衬砌时,因其用途、构造部位、地层条件、地下水、隧道周边环境等设计条件和开挖方法、衬砌方法等施工条件不同,其衬砌功能也不同。因此,要充分研究这些条件,合理确定各项分项系数是进行极限状态法设计的关键。喷射钢纤维混凝土衬砌的设计流程如图1.4所示。



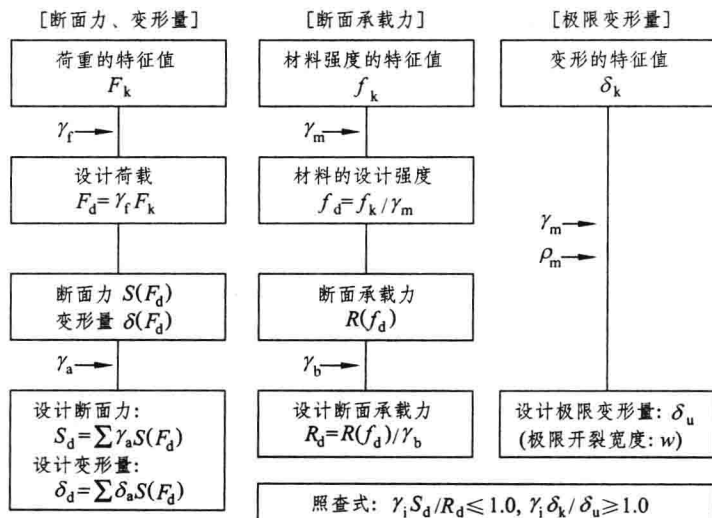
支护分类:

- ① 不支护
- ② 点锚支护, sb
- ③ 系统锚杆支护, B
- ④ 系统锚杆支护 (加喷射普通支护, Sfr + RRS + B 混凝土, 4~10 cm), B(+S)
- ⑤ 纤维增强喷射混凝土加锚杆支护 5~9 cm, Sfr + B
- ⑥ 纤维增强喷射混凝土加锚杆支护 9~12 cm, Sfr + B
- ⑦ 纤维增强喷射混凝土加锚杆支护 12~15 cm, Sfr + B
- ⑧ 纤维增强喷射混凝土 >15 cm, 喷射混凝土加锚杆
- ⑨ 模筑混凝土衬砌, CCA

E: 平板试验中纤维增强喷射混凝土的能量吸收为 25 mm 的弯曲

D45/6 中 RRS 为 6 根增强型钢筋分两层置于 45 cm 厚的加强部位, 其中心距为 1.7 m。图中每一个框符 c/c1.7 对应的 Q 值在其左边

图 1.3 Q 系统围岩分类与支护综合表



γ_f —荷载系数; γ_a —结构解析系数; γ_m —材料系数;

γ_b —构件系数; γ_i —结构物系数; ρ_m —材料修正系数

图 1.4 极限状态法的设计流程

3. 能量原理设计法^[9]

能量原理设计法是根据能量守恒原理,通过考察衬砌在极限状态下消耗的能量和围岩在开挖后重新达到自稳所需要释放的势能间的关系,来判断整体系统的稳定情况,从而完成隧道衬砌的设计。

在结构设计时,有关文献认为围岩释放的总能量由两部分组成:一部分来源于隧道喷射钢纤维混凝土完成到围岩达到稳定整个过程中释放掉的能量值 ΔE_1 ;另一部分是在隧道建成后,由于地震或其他因素导致衬砌上方塌落拱范围内的岩层彻底破坏时,可以偏于安全地假定其储存的应变能完全传递给衬砌,此能量等于毛洞开挖到达稳定状态时该范围内单元储存的应变能之和,用 E_2 表示。这样围岩释放的总能量为

$$E_r = \Delta E_1 + E_2 \quad (1.1)$$

同时,取出对应于围岩的单位长度的衬砌进行研究,将衬砌划分为单位面积的正方形平板,则平板个数就是衬砌的面积。它在破坏极限状态下吸收的能量为

$$E_c = \eta_E S_c \times 447.6 t E_b \quad (1.2)$$

式中 S_c ——单位面积平板个数,这里等于衬砌周长;

t ——衬砌厚度;

E_b ——具有一定保证率的三分梁破坏能量吸收指标;

η_E ——工作条件系数,与衬砌的破坏形态有关。

为了保证围岩在能量释放后最终可以达到稳定,衬砌破坏吸收能量的能力应该大于围岩释放的能量

$$E_c \geq E_r \quad (1.3)$$

在极限情况下,假定隧道周围一定范围内的所有开挖引起的能量的变化量都是由钢纤维混凝土衬砌塑性做功而吸收的,这样就可从能量守恒的角度建立等式

$$\Delta E_1 + E_2 = \eta_E S_c \times 447.6 t E_b \quad (1.4)$$

从而进行单层衬砌结构的设计。

1.2.4 防水性及平整度

1. 单层衬砌防水性能

与复合式衬砌相比,单层衬砌最显著的特征之一就是支护层与衬砌层之间取消了防水板,结构的防水靠衬砌材料的自防水来实现。为此,德国学者 Obering G. Ruffert 对单层衬砌施工法提出了质疑,他认为尽管单层衬砌施工法能增强各层混凝土之间的黏结作用,同时混凝土的水化热及收缩引起的强制应力较小,但存在着喷射混凝土中的裂隙引起渗漏水的严重问题,所以,单层衬砌的防水性一直是各国隧道学者关注的焦点。

目前多数国家都采用在钢纤维喷射混凝土中加入硅粉的措施来提高混凝土的耐水性:一方面可提高混凝土强度和黏聚性;另一方面可抑制碱骨料反应,防止混凝土出现泌水、离析。1994 年第 4 期瑞士期刊《瑞士工程和建筑》详细介绍了费尔艾那隧道在施作单层衬砌时,掺入硅粉后,黏着力强、密实度大、渗水最大深度仅为 13 mm 这一事实,并根据这一特点生产出适合隧道防水的“隧道水泥”,其本身就含有硅粉^[10]。

国内为了研究在混凝土加入硅粉后的耐水性能,在试验室专门进行了抗渗试验^[11]。采用 7 种水泥灰比 (0.55、0.50、0.46、0.44、0.42、0.40、0.38),每组成型 6 个抗渗试件 (圆台: $d=175\text{ mm}$, $D=185\text{ mm}$, $h=150\text{ mm}$),在试件养护 28 d 后,采用逐级加压法进行抗渗性试验。试验时,水压从 0.1 MPa 开始,每隔 8 h 增加水压 0.1 MPa,试件均未出现表面渗水,最大渗水深度为 27 mm。试验表明,微硅粉混凝土的渗透性很低,具有较高的抗腐蚀能力。

由此可见,在混凝土中加入微硅粉,对单层衬砌结构的防水起到了很乐观的效果,目前基本得到了隧道工程界学者的认可。与此同时,钢筋网喷射混凝土的防水性能受到了大家的质疑,为此,德国专门做了无筋试件和有筋试件的抗渗对比试验,如图 1.5 所示。研究结果表明,在同等水压力的作用

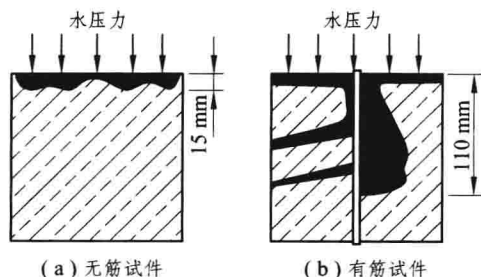


图 1.5 抗渗试验

下, 无筋试件的最大渗水深度仅为 15 mm, 而有筋试件在水压力的作用下, 水流顺着钢筋表层漫流, 渗水深度达到 110 mm。

2. 单层衬砌平整度

如果单层衬砌的内层结构采用喷射混凝土时, 那么喷层施作后形成的隧道轮廓并不完全符合设计的衬砌内轮廓理论曲线, 必然存在衬砌表面的平整度问题。对于高速铁路隧道、引水隧洞以及公路隧道等对衬砌表面的外观及粗糙度有一定要求的, 则必须对衬砌表面的平整度加以重视。目前国内外常用的措施有用玻璃钢、PVC 等材料或预制混凝土构件做离壁式衬套来装饰隧道, 取得了很好的效果^[7]。

另外, 解决单层衬砌平整度的又一项措施就是目前存在争议的“模喷”技术。一方面, 在施工时往一个封闭的小空间内喷射混凝土, 由于骨料颗粒的跳动和反弹对混凝土的结构产生一定的影响; 另一方面, 在采用“模喷”工艺的情况下, 喷射混凝土作业中的回弹问题能得以彻底解决, 同时又能使喷射混凝土层获得足够厚度和一个较为平滑的表面。所以, 对“模喷”技术的应用, 有必要进行系统的试验做进一步研究。在 1995 年举行的第 7 届“地下支护喷混凝土”国际学术会议上, 德国的 Philipp Holzmann AG 就介绍了他们从 1985 年开始研究和开发的两种类型的适用于“模喷”技术的随动模板: 履带式随动模板 (Roll-over Shutter-belt System, 图 1.6) 和滑动式随动模板 (Gliding formwork, 图 1.7)。

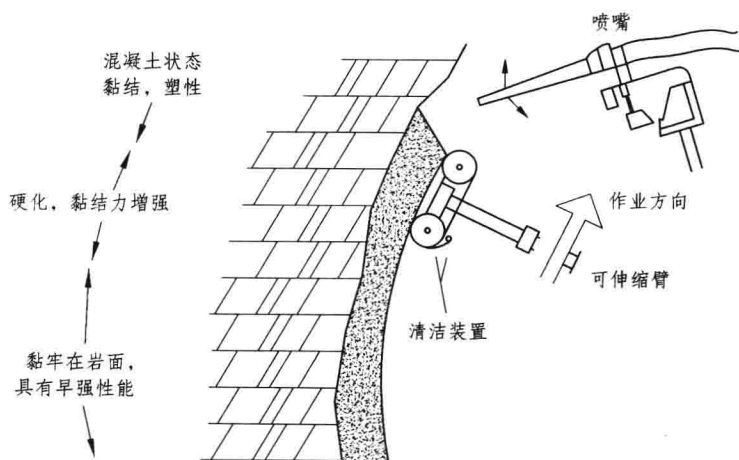


图 1.6 履带式随动模板

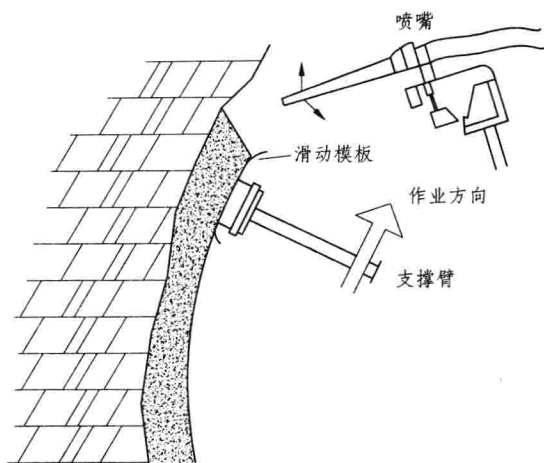


图 1.7 滑动式随动模板

可见，如果有一种方法既可保证混凝土的质量，又可满足衬砌平整度要求，真是求之不得。当支护结构层变形稳定后，再模喷一层混凝土，一方面可作为找平层满足平整度的要求，另一方面也可起到防水的作用，不失为一种好的工艺措施。

1.2.5 应用现状

在世界上许多国家单层衬砌都有了不同程度的应用，如德国、瑞士、法国、美国、巴西、加拿大、芬兰、南非、日本、比利时、西班牙以及中国等，而且一些国家还制定了相应的设计和施工规范。以下是国内外比较典型的单层衬砌应用实例。

1. 国外单层衬砌工程应用实例

(1) 以色列海法市卡迈尔公路隧道。

卡迈尔隧道为双向四车道分离式公路隧道，隧道穿越卡迈尔山，并在中间 Gibborim 峡谷分为东西两隧道，东西隧道又分为南洞和北洞，共包括 4 座隧道。东隧道北洞长 1 651.5 m，南洞长 1 642.25 m；西隧道北洞长 3 090.89 m，南洞长 3 108.58 m。

隧道采用单层衬砌，图 1.8 为正在施工及完成后的单层衬砌结构，隧道支护参数及施工方法如下：

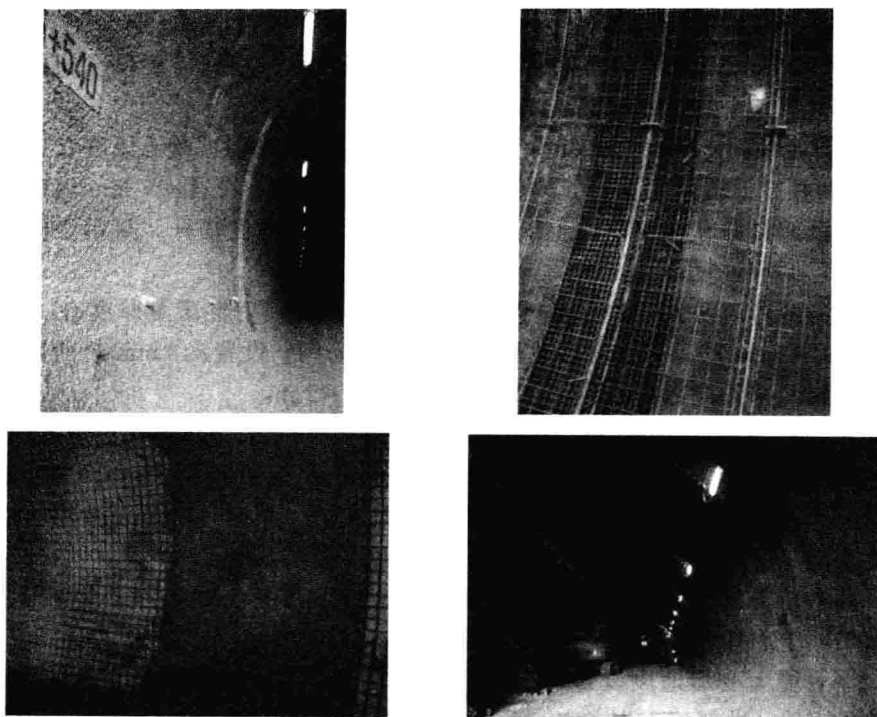


图 1.8 正在施工以及完成后的单层衬砌结构

① 东隧道。

东口:50 m,喷射钢纤维混凝土 20~30 cm、 $\phi 25$ mm 自进式锚杆、 $\phi 140$ mm 管棚、钢架间距 1 m、双层钢筋网,采用两台阶临时仰拱法施工、掌子面需临时支护,每循环进尺 1 m。

洞身:1 346.5 m,包括 10 种衬砌形式,喷射混凝土厚度有 10 cm、20 cm 和 25 cm 三种,设置砂浆锚杆,不设钢筋网,根据需要设置超前锚杆和格栅钢架,分别采用两台阶法和全断面法。

西口渐变段:296 m,喷射钢纤维混凝土 35 cm、4~6 m 砂浆锚杆、 $\phi 140$ mm 大管棚、双层钢筋网 $\phi 7.5$ mm@150 mm,采用两台阶分部法施工、每循环进尺 1~1.5 m。

② 西隧道。

东口渐变段:194 m,喷射钢纤维混凝土 35 cm、4~6 m 砂浆锚杆、 $\phi 140$ mm 大管棚、双层钢筋网 $\phi 7.5$ mm@150 mm,采用两台阶分部法施工、每循环进尺 1~2 m。