

# 公路隧道 设计与施工新法

□ 朱汉华 尚岳全 等编著



人民交通出版社

# 公路隧道设计与施工新法

朱汉华 尚岳全 等编著

人民交通出版社

## 内 容 简 介

针对目前公路隧道结构设计和施工方法中存在的一些关键问题和技术难点,作者根据近 10 年来亲身参与的隧道工程建设的实践,提出了本书介绍的公路隧道结构设计和施工方法,并在实践中得到成功应用。本书内容包括新奥法指导思想简介及新总结,公路隧道结构设计方法及其分类,公路隧道结构施工三种方法,公路隧道衬砌合理断面图,工程实例研究及公路隧道结构设计和施工方法的数值模拟等。

本书内容与现行隧道设计和施工规范有机结合,既继承了以往公路隧道结构设计和施工方面的成功理论和经验,又对这些理论和施工方法进行了创造性的总结和发展,具有极大的应用价值和理论意义,值得从事隧道结构科研、设计、施工、监理、监督及管理的技术人员和一切关注既有公路改建和高速公路建设的人们参考。

公路隧道设计与施工新法 / 朱汉华等编著. -北京: 人民交通出版社, 2002.3  
ISBN 7-114-04203-5

I. 公… II. 朱… III. ①公路隧道-隧道工程-设计②公路隧道-隧道工程-工程施工 IV. U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 011847 号

### 公路隧道设计与施工新法

Gonglusuidao Sheji Yu Shigong Xinfu

朱汉华 尚岳全 等编著

正文设计: 王静红 责任校对: 宿秀英 责任印制: 杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 6 字数: 138千

2002年4月 第1版

2002年4月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—4000册 定价: 14.00元

ISBN 7-114-04203-5

U · 03079

# 前 言

公路运输是国民经济发展的基础,是社会生产、流通、分配和消费各个环节正常运转、协调发展的先决条件。我国是一个多山的国家,为缩短交通里程和提高公路等级,山区公路建设需要修建大量隧道,因此,开发和应用山岭隧道修建的新技术、新设备、新材料等,以及研究和总结公路隧道结构设计和施工方法是生产实践的必然需求。另外,任何一种新理论和新方法必须与现实生产力水平和工艺水平相适应才能应用于生产实践并得到发展。

作者在总结南昆铁路、石长铁路、金丽温高速公路、甬台温高速公路及其他国道、省道公路建设和改造中的隧道结构设计和施工的成功经验和失败教训的基础上,以新奥法理论为指导,针对《公路隧道设计规范》(JTJ026—90)中有关 I、II、III 类稳定性较差的围岩中隧道初期支护设计指导性不足,在《公路隧道施工技术规范》(JTJ042—94)中有关开挖方案中有部分内容仅适用小型机械装运渣作业,而随着施工技术的进步,装载机配合无轨运渣作业已不适宜当前快速施工的要求等,通过对新奥法指导思想进行归纳和新的系统描述,提出了不良地质隧道围岩强支护力学原理、初期支护设计参数取值方法、适应大型机械作业的下导洞适度超前全断面施工方法、联体隧道施工方法、双车道和联体隧道衬砌合理断面图及二次衬砌混凝土非结构性裂缝防治措施等。这些新内容结合现行公路隧道设计和施工规范的要求,并在公路隧道结构设计和施工中应用,效果较好。应龙游县龙丽一级公路改建工程指挥部胡启芳指挥及三门县岭枫一级公路改建工程指挥部等的要求,特总结成文。本书中公路隧道结构设计与施工方法经浙江大学尚岳全教授和符文熹博士进行数值模拟分析计算,进一步论证了该方法的合理性和科学性。

本书作者各自贡献简述如下:

朱汉华:归纳了新奥法指导思想的基本原理和基本原则,并针对新奥法理论的缺陷对新奥法指导思想进行了新总结,提出了不良地质隧道围岩强支护原理和施工方法及联体隧道衬砌合理断面图构思,并到现场推广应用,负责本书工程实例编录和统稿工作。

尚岳全、符文熹:负责本书中有关公路隧道结构设计与施工方法的数值模拟分析计算工作,并参与全书的统稿工作。

潘明军:与朱汉华共同完成公路隧道结构设计与施工方法的相关内容的构思和写作及全书的统稿工作。

秦顺飞、陈跃军、李飞泉:与朱汉华共同完成公路隧道结构设计与施工方法和联体隧道衬砌合理断面图的构思和写作等工作。

虞颜、应国强:负责华白线十八跳隧道和龙丽一级公路沐尘隧道和溪口隧道设计工作,针对不良围岩地质隧道强支护原理提出了小管棚短台阶法设计等新手段,获得成功应用,并协助完成本书的统稿工作。

乐小明、毛华荣:负责岭枫一级公路海游联体隧道设计工作,针对联体隧道衬砌合理断面图构思,提出了中隔墙结构和防排水设计等有效手段,并完善了联体隧道衬砌合理断面图,获得成功应用。

陈荣伟、张跃胜:根据公路衬砌合理断面图构思,完善和改进了公路隧道衬砌合理断面图,并首次在 57 省道隧道设计中应用。

缪志顺、董夫钱:提出了公路隧道衬砌合理断面图构思,并首次在华白线十八跳隧道采用小管棚短台阶施工方法,完善了施工工艺,获得成功应用。

柳若龙、汪河山:根据联体隧道衬砌合理断面图,首次在岭枫一级公路海游隧道成功实施并完善了施工工艺。

黄洪波:完成书中部分插图的 CAD 制图工作。

作者能对公路隧道结构设计和施工方法的研究和应用达到上述水平,应归功于龙游县龙丽一级公路改建工程指挥部胡启芳指挥、胡炳银科长等,三门县岭枫一级公路改建工程指挥部吕继军、胡金丛等,开化县华白线改进工程指挥部方刚指挥、朱艳青科长等的开明态度和大胆采纳,使得本法得以应用和推广。

浙江省交通厅科教处,浙江省交通厅公路管理局,浙江省交通厅工程质量监督站,衢州市交通局、公管处、质监站,设计院、交通建设集团,台州市交通局、公管处、质监站、交通设计院,温州市交通设计院,浙江省交通工程建设集团,浙江省隧道工程公司,浙江省山水交通工程公司,浙江通途交通工程公司,中国路桥集团一局等单位给予了大力支持和具体指导。

在隧道合理横断面构思形成过程中得到了南昆铁路、石长铁路、金丽温和甬台温高速公路及其他国省道改造工程的有关工程技术人员的帮助和指导,特别是浙江省公路水运咨询公司王振民教授级高工,铁道部彭峰、周继望等工程师,温州市交通局及金丽温高速公路指挥部吴晓指挥及徐琳、汪江波工程师等,浙江省交通工程建设集团二公司魏水平总工,浙江省隧道工程公司黄德祥经理,及作者朋友陈作锦工程师等的热情支持和指导。

在本书编写过程中得到了王梦恕教授级高工的热情支持和指导。

在此,作者对所有支持、帮助我们的领导、朋友和同志们致以最深切的谢意!

本书内容是作者对公路隧道结构设计和施工技术的粗浅体会,肯定存在不足之处,敬请专家、同行指正。

作者:朱汉华 尚岳全等

2001 年 11 月 18 日于杭州

# 目 录

<b>1 新奥法指导思想及其发展</b> .....	1
1.1 新奥法基本原理 .....	1
1.2 新奥法的发展过程及思考 .....	2
1.3 新奥法理论的缺陷和改进建议 .....	3
<b>2 公路隧道结构设计方法</b> .....	5
2.1 概述 .....	5
2.2 普通矿山法施工的隧道围岩压力计算及支护设计方法 .....	5
2.2.1 现行隧道设计规范内容简介 .....	5
2.2.2 特殊地质隧道围岩压力计算及支护设计方法 .....	6
2.2.3 现行规范中有关结构计算方法存在的问题 .....	6
2.3 新奥法施工的隧道围岩压力计算和支护设计方法 .....	7
2.3.1 常规锚喷支护原理与应用 .....	7
2.3.2 强预支护原理与应用 .....	8
2.3.3 强预支护效果的平面有限元分析 .....	10
2.3.4 强预支护效果的三维有限元分析 .....	11
2.4 特殊地质问题的新奥法处理原则 .....	18
2.4.1 围岩变形破坏的基本形式 .....	18
2.4.2 偏压问题的处理 .....	19
2.4.3 山体稳定问题 .....	20
2.5 浅埋水下隧道或涌水量较大软岩(土)隧道的设计 .....	20
2.5.1 浅埋水下隧道或涌水量较大软岩(土)隧道的主要工程问题 .....	20
2.5.2 浅埋水下隧道或涌水量较大软岩(土)隧道的设计原则 .....	21
2.6 小结 .....	22
<b>3 公路隧道结构施工方法</b> .....	26
3.1 概述 .....	26
3.2 下导洞适度超前全断面施工方法 .....	26
3.2.1 下导洞适度超前全断面施工方法的依据 .....	26
3.2.2 下导洞适度超前全断面施工方法的适用条件 .....	27
3.2.3 下导洞适度超前全断面施工方法的说明 .....	28
3.2.4 下导洞适度超前全断面施工方法的三维有限元分析 .....	28
3.3 联体隧道结构施工方法 .....	38
3.3.1 概述 .....	38
3.3.2 联体隧道结构施工方法的三维有限元分析 .....	38
3.4 爆破冲击波对 I、II、III 类围岩的影响 .....	46

3.5	IV类和V类围岩隧道结构优化施工方法	48
3.6	应用说明	49
3.7	用新奥法的思路处理塌方	51
<b>4</b>	<b>公路隧道合理断面与衬砌方法</b>	<b>53</b>
4.1	公路隧道衬砌合理断面图	53
4.1.1	III类及以下围岩公路隧道衬砌合理断面图	53
4.1.2	IV类及以上围岩公路隧道衬砌合理断面图	53
4.1.3	联体公路隧道衬砌合理断面图	54
4.2	公路隧道二次衬砌混凝土非结构性裂缝防治措施	55
4.2.1	公路隧道二次衬砌混凝土非结构性裂缝状况调查	55
4.2.2	公路隧道二次衬砌受力分析	55
4.2.3	公路隧道二次衬砌混凝土非结构性裂缝产生原因及防治措施	56
<b>5</b>	<b>工程实例分析</b>	<b>57</b>
5.1	白花山隧道设计与施工介绍	57
5.1.1	隧道工程地质条件	57
5.1.2	隧道衬砌结构	57
5.1.3	隧道施工	58
5.2	十八跳隧道小管棚短台阶法设计与施工	59
5.2.1	隧道工程地质条件	59
5.2.2	小管棚短台阶法设计	59
5.2.3	小管棚短台阶法施工	59
5.2.4	施工中注意事项	60
5.2.5	施工工序及步骤	61
5.3	钦村联体隧道设计与施工	62
5.3.1	简介	62
5.3.2	隧道施工	62
5.4	西湾隧道设计与施工	65
5.4.1	设计简介	65
5.4.2	设计施工措施	66
5.4.3	隧道工程施工	66
5.5	莲花山大跨度联体隧道施工方法介绍	67
5.5.1	地质概况和支护结构	67
5.5.2	施工方案设计	67
5.5.3	非连续变形数值模拟分析	69
5.6	木花公路2号隧道塌方处理方案	71
5.6.1	简介	71
5.6.2	塌方处理技术措施	71
5.7	海游联体隧道结构设计与施工	72
5.7.1	国内已建成的联体隧道结构设计不足及易出现的病害	72
5.7.2	中交一院联体隧道结构优化设计的合理性及改进意见	72

5.7.3	海游联体隧道设计改进措施	73
5.7.4	施工方案及实施情况	73
5.7.5	主洞开挖及初期支护	75
5.7.6	主洞衬砌施工方案	75
5.7.7	海游联体隧道施工中出现的通病防治措施	75
5.7.8	工期控制及得失	76
5.7.9	安全	76
<b>6</b>	<b>中国隧道修建法介绍</b>	<b>78</b>
6.1	衬砌结构与施工流程	78
6.1.1	衬砌结构形式	78
6.1.2	信息化设计与施工流程	78
6.1.3	防排水设计与环境工程	78
6.2	施工方法的选定和正确理解新奥法的原理	79
6.3	辅助工法的配套施工技术	81
6.3.1	辅助工法施工	81
6.3.2	综合配套技术在隧道中的应用	81
<b>参考文献</b>		<b>83</b>



# 1 新奥法指导思想及其发展

## 1.1 新奥法基本原理

“新奥法”是“新奥地利隧道修建方法”的简称,其英文为“New Austria Tunneling Method”,常简称为“NATM”,是由奥地利土木工程师 Rabcewicz、Müller 在 20 世纪 60 年代总结隧道建造实践经验的基础上创立的。1934 年,奥地利土木工程师 Rabcewicz 提出了在隧道中应用“喷浆”的技术。1942~1945 年,该技术在奥地利阿尔卑斯山一深埋硬岩隧道结构施工中被采用。二战以后,混凝土喷射机和速凝剂的出现,使喷浆技术得到很大的发展。锚杆出现以后,Rabcewicz 以喷锚支护的实践和岩体力学理论为基础,提出了“NATM”。1963 年,该方法在一次国际土力学会议上被正式命名为“NATM”并获得专利。20 世纪 60 年代中期,Müller 把新奥法用于法兰克福、慕尼黑等城市地铁软岩(土)隧道中,Müller 强调,硬岩隧道与软岩(土)隧道用新奥法应有区别。

由于新奥法在隧道工程中的成功应用,当前已被国内外作为隧道结构设计和施工的重要方法。新奥法的理论基础是最大限度地发挥围岩的自承作用。以喷射混凝土、锚杆加固和量测技术为三大支柱的新奥法,有一套尽可能保护隧道围岩原有强度、容许围岩变形但又不致出现强烈松弛破坏、及时掌握围岩和支护变形动态的隧道开挖与支护原则,使隧道围岩变形与限制变形的结构支护抗力保持动态平衡,使施工方法具有很好的适用性和经济性。新奥法的基本原理如下:

- (1) 围岩是隧道结构的主要承载部分;
- (2) 开挖后需对围岩进行加固,以使围岩在开挖卸载后不失去原有的强度;
- (3) 隧道围岩支护过程中应尽量减少围岩卸载位移的程度;
- (4) 隧道围岩支护过程中,一方面允许围岩有一定的位移,从而产生受力环区;另一方面,又必须限制围岩位移的程度以避免围岩变形过大而产生严重松弛卸载;
- (5) 初次支护主要作用不是用来承担隧道围岩所失去的承载力,而是保持围岩的自承状态,防止严重的松弛和卸载;
- (6) 初次支护的建造应是适时的,延时一定时间使围岩在开挖后来得及变形并形成承载力保护区,以达到较好的支撑效果;
- (7) 围岩自稳时间的评定,一方面通过对围岩地质条件的初步调查,另一方面可通过在建造过程中量测隧道洞周的位移来评定;
- (8) 由于喷射混凝土具有可填平凸凹面、与围岩密贴等特点,使围岩不发生严重的应力重分布,常被用来作为初次支护,必要时还使用锚杆、钢筋网和钢拱架;
- (9) 由于喷射混凝土本身具有强度高和可变形的特点,其整体的结构效应通常可视为薄壳,具有可塑性和可收缩性的能力;
- (10) 从静力学的角度看,孔洞的受力状态视为圆管时最好,隧道开挖后需及时建造仰拱,

以形成封闭结构；

(11)初次支护只要没有被腐蚀破坏,即可视为整体承重结构的一部分；

(12)孔洞从开挖到封闭所需的时间主要取决于施工方法,围岩的变化很难定量解释,可经过施工前的地质调查资料进行估计,施工过程中通过测量来控制 and 修改；

(13)从静力学角度来看,隧道横截面为圆形时受力条件最为有利,因此,设计的横截面应尽可能接近圆形或椭圆形,严格限制超挖和欠挖；

(14)应特别注意施工过程中工程荷载对隧道受力的影响；为了尽量限制开挖后隧道围岩二次应力重分布程度和松动圈形成的范围,应尽可能减少开挖次数,或至少拱部采用一次开挖方案；

(15)为了提高隧道结构的安全度及达到密封的效果,可建造薄层内衬砌,使结构内不产生过大的弯曲应力,内层与外层相互之间只传递压力；

(16)为了增加衬砌的强度,一般不增加其厚度而增加钢筋含量(即钢拱),增大整个结构的刚度可通过增加锚杆的个数或增大锚杆的长度以形成围岩受力环区来实现；

(17)对整体结构系统的稳定性和安全度评价及设计结构需要加强的必要性以及设计结构刚度的减小,均根据建造过程中的应力及变形状态的测量结果来确定；

(18)控制外源水压和静水压力的手段是,通过在外壳(必要时也在内壳)上设置软管及足够的密封排水装置来实现。

从新奥法的基本原理中,可以看到围岩加固设计理念上的重大进步,不再把围岩简单地看作作用在支护结构上的荷载,而是认识到围岩是隧道结构的主要承载部分。努力保持围岩的原有强度,从而更有效地发挥围岩的承载能力,是新奥法的另一重要施工要求。隧道开挖过程中,应尽可能保护围岩的原有强度和变形特性,力求防止围岩松动和大范围变形,避免围岩应力出现单轴或双轴应力状态。实现这一要求的手段是通过现场量测掌握围岩的变形,并通过适时支护达到围岩变形控制的目标。一方面允许围岩产生变形而发挥围岩的自承能力,另一方面通过即时支护保障围岩不因过大变形而出现有害的严重松弛。为了最大限度地发挥围岩的自承能力,最终支护既不要太早,也不能太迟。初期支护和永久支护必须是薄壳型柔性结构,以减少衬砌受弯变形和挠曲断裂,其必要强度靠锚杆、钢筋网、钢拱架达到,而不是加厚衬砌或支护截面。

总之,新奥法的核心在于充分发挥围岩的自承作用,喷射混凝土、锚杆起加固围岩的作用。把围岩看作是支护结构的重要组成部分,并通过监控量测,实行信息化设计和施工,有控制地调节围岩的变形,以最大限度地利用围岩自承作用。

## 1.2 新奥法的发展过程及思考

Rabcewicz 最早把新奥法用于奥地利阿尔卑斯山深埋硬岩隧道建设,采用柔性支护旨在充分利用“拱效应”——地层的自承能力。施工实践证明了利用围岩自承能力是可行的,也就是说,新奥法这一概念在指导硬岩隧道结构设计和施工中是成立的。20世纪60年代中期,Müller把新奥法用于法兰克福、慕尼黑等城市地铁软岩(土)隧道,其地层大都为泥灰岩、粘土、粉砂、砂砾石,隧道直径一般为8~13m,顶部覆盖约3m,由于地表建筑物的存在,这些软岩(土)隧道的结构设计和施工对地表沉降有严格限制。因此,Müller强调硬岩隧道与软岩(土)隧道开挖用新奥法应有区别,体现在软岩(土)地层中隧道在近地表的情况下地层薄,它不可能承受应力

重分布的荷载,覆盖土的重力作用较大,如果仍沿用硬岩隧道中的柔性支护,就不可避免产生错误,增加风险,显然不合适。亦即对于处于软弱破碎围岩中的浅埋隧道,不能用硬岩隧道的新奥法原则,无法利用围岩的自承能力,不允许围岩有较大变形,也就不能使用一次柔性支护等。并且隧道的变形会很快反映到地表沉降,开挖和支护必须在短时间内完成,初期支护必须很快闭合。软岩(土)中衬砌了的隧道是以“管”的形式工作的,通常采用地层预加固和具有足够强度和刚度的预支护等方法,才能调动和利用围岩的自承能力,这就是硬岩隧道与软岩隧道应用新奥法的本质区别。

此后德国学者格拉兹尔研究在岩石条件下和土质条件下采用新奥法修建地下工程的差别时指出:“开挖具有相当当地应力的硬岩隧道,锚喷支护应采用柔性支护,以便有控制地释放部分地应力,使围岩在新的条件下达到稳定。而在不稳定的软岩(土)层条件下开挖隧道,锚喷支护应具有足够的刚度,以防止地层产生过大扰动,同时也防止地表过大沉降,且在土层中采用锚杆,其作用不如在岩石中明显。”

我国广泛地应用了新奥法,无论在硬岩隧道还是在软岩(土)隧道中,应用新奥法都有骄人的、成功的工程实例,并积累了不少经验,制定了众多的“规程”或“标准”。在软岩(土)隧道中采用新奥法,一开始就抓住了问题的关键,提出了既科学又全面的“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”的十八字诀,避免了国际隧道界围绕新奥法的激烈争论和有些国家照搬硬岩隧道新奥法经验的弯路。但是我国应用新奥法也存在发展不平衡的问题。实际上,软岩(土)中的新奥法与硬岩中的新奥法是有原则区别的,需充分了解隧道开挖过程中地层发生的变化,采取相应的加固方法和相应的支护措施,达到安全、经济的目的,这才是新奥法的精神实质。

世界各地有足够多的成功实例证明,只要针对地层采用适当的施工方法,并采取正确的监理手段和实行严格的管理和纪律,新奥法是安全的、有效的、经济的。

总之,应把 Rabcewicz 采用量测方法的新奥法与 Müller 用于软岩(土)隧道的新奥法加以严格区别,但没有必要改变新奥法的这一提法。

布朗把新奥法的核心归纳为以下 7 点:

- (1) 尽可能保持隧道围岩的原有强度和变形特性(或尽可能保持隧道围岩初始地应力作用下的原始状态);
- (2) 为了安全、充分地发挥围岩的全部强度,必须控制地层变形,过分的变形将导致强度显著降低甚至丧失;
- (3) 用岩石锚杆、土锚和薄的、半柔性的喷射混凝土支护手段来抑制围岩变形;
- (4) 及时支护并封闭初次支护混凝土环,这对控制变形、保持围岩强度具有重要意义;
- (5) 初次支护可以部分地或全部地代表支护总需求,二次衬砌的厚度取决于对初次支护、隧道周边和围岩变形的评估;
- (6) 施工期间隧道不支护的时间应尽可能短,如条件许可,隧道应在最短时间内开挖成全断面,使地层受扰动的次数最少;
- (7) 设计、监理和施工工程师必须理解和接受新奥法,共同决策解决隧道施工中发生的问题。

### 1.3 新奥法理论的缺陷和改进建议

虽然新奥法在隧道结构设计和施工实践中取得了显著的效果,但目前理论上尚存在一

些缺陷。本书系统分析了新奥法的理论缺陷并提出相应的改进建议措施。

(1)以往分析计算模型是假定隧道围岩为均质的、各向同性的、连续的弹塑性体理论模型。由于隧道围岩的非均质性、各向异性和不连续性,其解析解或数值解的结果只在均匀完整岩体中较吻合,其他大多数隧道围岩由于地质条件的复杂性和多样性,理论解与实际量测结果差别很大,理论解用于实践尚有待进一步深入研究。

(2)目前新奥法的支护手段以喷锚(喷射混凝土和锚杆)为支柱的提法不够全面,而应以符合新奥法基本原则的包含各种支护手段(含辅助施工措施)的提法较妥,确保隧道围岩不出现有害松弛,而只产生形变压力为前提。

(3)锚杆支护的使用是有条件的,它主要根据围岩的岩层产状和稳定状况起联结、组合和整体加固作用。因此,锚杆支护对于整体性差的围岩或自稳能力差、有涌水和大面积淋水地层等松软围岩作用不大。

(4)鉴于目前岩体力学尚不足以全面解决隧道工程问题,必须综合岩体力学和铁摩辛柯力学理论分析隧道围岩的应力和变形特征,确保支护结构安全。

(5)地下水对隧道围岩和支护结构影响的分析方法有待进一步研究,实践中必须慎重处理地下水对隧道围岩和支护结构的危害。

(6)许多隧道工程失败教训提醒人们,新奥法理论的基础和基本原则是正确的,其分析方法和支护手段是发展的,必须在实践中不断加以总结和完善的。

因此新奥法指导思想可总结为:新奥法是以岩体力学和铁摩辛柯力学理论为基础进行隧道设计和施工的新方法,它的指导思想是最大限度地发挥围岩的自承作用,要求修建隧道过程中尽可能保持围岩的原始状态,以喷射混凝土、锚杆为代表的初期支护和量测技术为支柱,把隧道围岩和各种支护结构作为一个共同作用的承载体系,即硬岩隧道用柔性支护、软岩隧道用强预支护,控制围岩变形发展。通过量测手段,及时掌握围岩和支护结构的变形和应力动态,确保隧道结构设计和施工信息化,具有极大的适用性和经济性。

## 2 公路隧道结构设计方法

### 2.1 概 述

隧道开挖后,在岩土体中形成新的空间,致使隧道周边岩土体失去原有的支撑。在应力释放和应力重分布过程中,围岩向隧道洞内产生变形,并可能发生围岩的破坏。为防止发生过度变形而导致围岩发生严重松弛甚至破坏,需要对围岩进行即时支护。支护结构所受围岩变形的挤压力或不稳定岩体的重力统称为围岩压力,它可以是围岩塑性变形引起的,也可以是围岩松动或破坏后的重力形成的压力和围岩发生岩爆的冲击压力等。国内外众多的隧道支护失败的经验教训表明,隧道工程中因对隧道围岩压力认识不足和支护设计参数不合理是造成隧道工程事故的主要原因。因此,作好隧道围岩压力的评价和计算,并选择合适的支护系统是确保隧道围岩和结构稳定的基本前提。

隧道围岩压力计算和支护设计参数的选定取决于隧道围岩分类。围岩压力的类型及量值是选择支护系统的前提。当前评价围岩压力虽然有理论公式求解、有限元分析以及规范推荐的计算公式和按围岩类型选择的经验公式,但客观地讲,还没有一种较理想的方法。目前《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90)中公路隧道围岩分类(见规范附表 1.1)是以围岩稳定性为代表的分类方法,虽然较正确地反映了主要地质因素对隧道工程的影响和作用,基本与当前国内外隧道工程技术发展现状相适应。但在分析特殊地质条件下的围岩压力和选取支护参数时,宜参考普氏理论和泰沙基理论(见文献[2]),通过与现行规范确定的围岩压力和支护设计参数进行比较,达到更好地反映实际围岩压力和选定更合理可靠的支护设计参数。

隧道施工过程中,由于工程荷载(如开挖、爆破等)的作用,改变了山体的初始应力状态,使隧道周围一定范围的岩体受到影响,这部分受到影响的岩体,称之为围岩。显然,隧道稳定性、围岩压力计算、支护设计类型和参数选定等均与围岩密切相关。因此,如何准确通过对隧道围岩稳定性分析和围岩压力计算来反映围岩的实际应力状况,是隧道稳定性计算和支护设计的最重要问题。

在特殊地质环境条件下,隧道开挖不仅改变围岩应力状态,还可能因围岩松动引起进出口边坡稳定性的降低而失稳。在岩溶发育的灰岩、裂隙发育的破碎岩体和松散土层等地下水丰富的地层中开挖隧道,以及隧道和地表水底之间存在透水性高的渗流通道时,因隧道开挖形成地下水的排泄通道,可能导致突水等灾害。对这些特殊的工程地质灾害问题,在隧道设计中应予以充分的考虑。

### 2.2 普通矿山法施工的隧道围岩压力计算及支护设计方法

#### 2.2.1 现行隧道设计规范内容简介

当没有采用强预支护或锚喷支护的矿山法施工的隧道,其模注衬砌所受到的围岩压力是

衬砌或支护结构为了阻止岩块松弛或移动下塌等形成的荷载,具有松弛荷载的性质,与隧道围岩压力计算的普氏理论或泰沙基理论相似。因此,隧道支护结构设计中,将围岩压力作为设计荷载就必须采取一些简化的假定,采取“松弛荷载”作为主动地压,用围岩抗力来考虑围岩和支护结构间的局部相互作用。即作为设计荷载的围岩压力是主动的松弛荷载和被动的围岩抗力两部分组成,前者主要反映围岩构造及特性的影响,后者反映支护结构特性的影响,其相关计算办法见《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90)(即文献[1])第三章“计算荷载”和第七章“结构计算”的内容。隧道结构衬砌计算如图 2.1 所示。

### 2.2.2 特殊地质隧道围岩压力计算及支护设计方法

值得注意的是,当隧道围岩为自稳能力差的松软围岩且地下水较丰富时,围岩对支护结构约束很小,为安全起见,设计计算和施工时应参照软土隧道结构设计和施工的思路,不宜考虑围岩抗力,而应按明洞设计计算方法进行结构设计,设计荷载可参考《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90)第三章“计算荷载”确定。

如果经计算围岩不稳定或结构明显不合理,则应采取改善围岩相对刚度即增强围岩自稳能力的做法,达到提供一定围岩抗力的要求,然后按 2.2.1 节中现行规范方法处理。其隧道结构衬砌计算如图 2.2 所示。

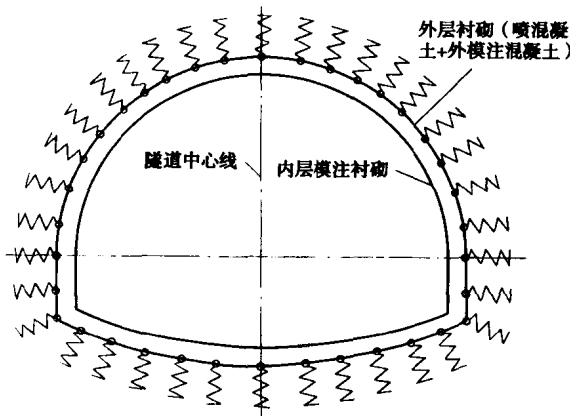


图 2.1 隧道衬砌结构模型之一

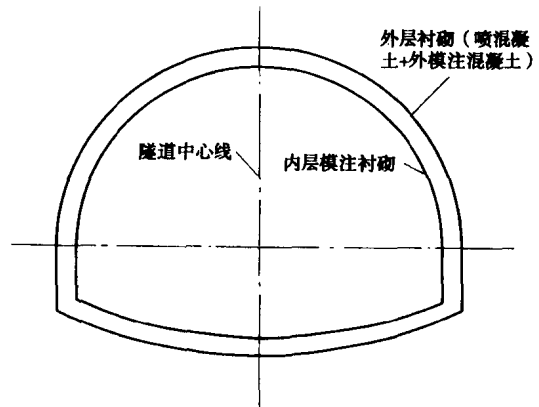


图 2.2 隧道衬砌结构模型之二

### 2.2.3 现行规范中有关结构计算方法存在的问题

虽然《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90)关于模注衬砌的计算方法,经大量的工程实践及试验的验证基本是符合实际情况的,但也存在如下问题:

(1) 计算模式是按照衬砌修筑后作为弹性体系建立的。实际上,不同的修筑方法使衬砌的受力状态变得不尽相同,因此,按照弹性体系进行设计计算至少是不全面的。例如,在先拱后墙法中,先修拱圈,筑墙之前拱已经存在多种受力情况,或者由于各种其他原因,会使某些部分的衬砌材料已经达到极限强度而破坏,产生各种裂缝,而且墙的修筑也不一定是连续均匀的,因此,再将衬砌作为连续弹性体来计算显然是不够妥当的。

(2) 由于地质情况千变万化,地质勘查工作往往也不能详尽,因此,如何更合理地确定计算荷载(大小及分布)尚需不断地做试验、量测、调查和进一步的理论分析工作。

(3) 计算模型中的一些假设有很大的局限性。例如,假定衬砌与围岩间的相互作用按局部

变形理论进行计算,但“局部变形”显然与实际情况有出入等等。为了使计算模型更准确地反映隧道与衬砌间的相互作用情况,还应作进一步的研究,并通过试验、量测、分析统计及理论分析的方法,得出更符合我国公路隧道实际情况的结果。

## 2.3 新奥法施工的隧道围岩压力计算和支护设计方法

新奥法是以岩体力学和铁摩辛柯力学理论为基础进行隧道支护设计和施工的隧道修建方法。其设计思路是最大限度地发挥围岩的自承能力,要求修建隧道过程中尽可能保持围岩的原始状态。它把隧道围岩和各种支护结构作为一个共同作用的承载体系,控制围岩变形的发展,避免了岩体塌方、防止过大的松弛压力出现。各种支护结构不再把围岩仅视作荷载(松弛压力),而且还把围岩视作承载结构的组成部分,因此,新奥法施工的支护结构承受荷载的性质由普通矿山法中的松弛压力变为承载围岩的形变压力。但由于隧道围岩的性质可能有很大的区别,在具体隧道工程设计时,需要根据围岩类别分别采用常规锚喷支护方法或采用强预支护方法,从而达到真正实现新奥法的理念。

### 2.3.1 常规锚喷支护原理与应用

新奥法施工的常规锚喷支护原理如图 2.3 所示。对于 VI、V、IV 类硬质围岩及稳定性较好的 III 类围岩,即时的锚喷支护(图 2.3)起着稳定围岩、控制围岩应力和变形、防止围岩松弛和坍塌及产生“松弛压力”的作用。其中,锚喷支护成为一种充分利用和加强围岩自身的承载能力,把围岩和支护结构组成一个统一结构工作体系的重要支护手段。锚喷支护与围岩共同作用的力学原理(图 2.3)可分为两种情况:

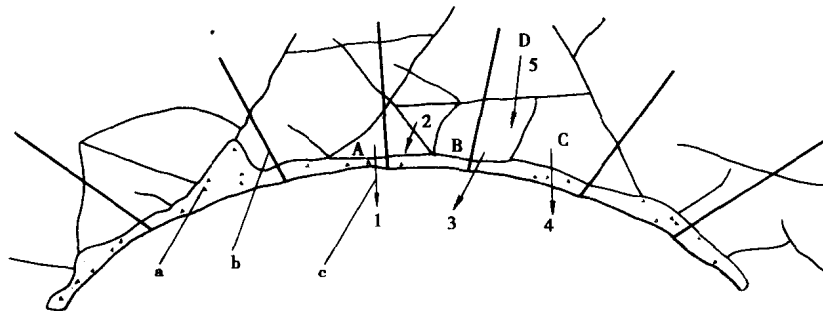


图 2.3 块状围岩锚喷支护原理示意图

a-喷混凝土;b-砂浆锚杆;c-数字表示危石坍塌顺序,字母表示危石块体

(1)对于 VI、V、IV 类硬质完整围岩,开挖后围岩本身足以承受围岩压力,只需要考虑局部掉块或岩爆,按《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90)表 7.4.3-2(见附表 2)确定支护参数即可,不必进行围岩压力计算和支护参数设计。

(2)对于稳定性一般的 V 和 IV 类其他硬质岩石及稳定性较好的 III 类围岩,开挖后围岩本身不足以承受围岩压力,需采用围岩和柔性支护共同变形破坏的弹塑性理论来阐述(图 2.4)。

由图 2.4 可以看出,对于需要支护的围岩,要使其不发生破坏,必须限制其变形的发展。这就需要在洞壁上施加一定的支护抗力,以使围岩达到新的平衡状态。图 2.4 清楚地表明,要使围岩所产生的变形越小,则需提供的支护抗力就越大;如果允许围岩产生较大的变形,则所需施加的支护抗力也较小。但当围岩变形超过允许值,导致围岩出现破坏而形成“松弛压力”,

则作用于支护结构上的围岩压力是随围岩变形的发展而迅速增大。理想的支护设计就是对应于  $E$  点的支护抗力  $P_{min}$  来维持围岩的稳定。通常支护设计应有一定的安全储备, 支护特性曲线在  $D$  点处与围岩特征曲线相交。新奥法的成功之处就在于它通过合理采用喷混凝土、锚杆支护方法与适当的支护时机, 使支护特性曲线在接近  $P_{min}$  处与围岩特性曲线相交, 取得平衡, 以充分发挥围岩的自承能力。而普通矿山法施工支护等传统支护, 由于不能提供连续的支护抗力或无法选择适当的支护时机也就不能在接近  $P_{min}$  处提供适宜的支护抗力。

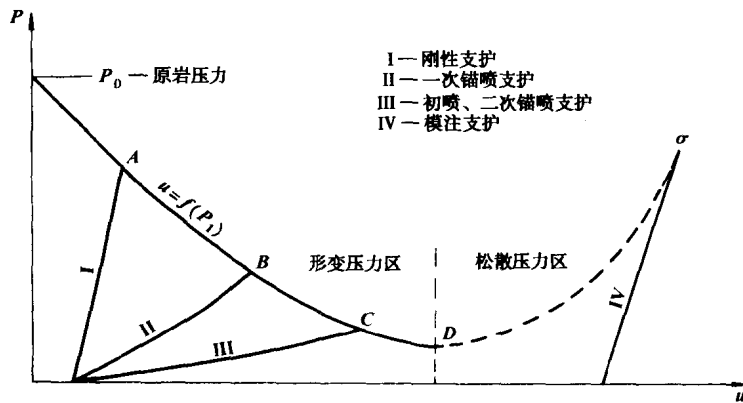


图 2.4 围岩位移支护特性曲线

实际工作中, 支护设计参数的确定, 包括支护时间和支护类型的确定往往要依靠工程类比法等经验方法确定, 参考《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90) 表 7.4.3-1 (见附表 1) 和表 7.4.3-2 (见附表 2) 确定支护设计参数。

总之, 以上两种情况的初期支护施工完成后, 隧道围岩基本稳定, 围岩或支护体系足以承受围岩压力, 围岩压力计算并非十分重要。

值得注意的是, 锚喷支护技术只是新奥法中最常见的各种支护技术中的一种, 因此, 即使是新奥法施工的隧道, 也应该针对不同的围岩地质情况, 依据不同的支护设计理论, 并选取相应的设计参数。

### 2.3.2 强预支护原理与应用

对于山岭隧道, 文献[1]第 6.2.6 条和文献[2]中规定了不宜直接使用锚喷支护的四类特殊地质情况:

- (1) 未胶结松散岩体或人工(自然)堆(坡)积碎石土;
- (2) 浅埋但不宜明挖地段;
- (3) 膨胀性岩体或含有膨胀因子、节理发育、较松散岩体;
- (4) 地下水活动较强, 造成大面积淋水地段。

对于以上四类特殊地质条件下的隧道开挖, 必须采用类似软土隧道盾构施工原理的强预支护技术, 即采用超前管棚、小钢管或插板、钢拱架和喷混凝土的联合支护体系, 或采用改良地层的设计方法, 如图 2.5 所示。

由图 2.5 还可以得出如下支护设计抗力计算原理:

①当隧道围岩采用强预支护而使围岩基本保持原始状态时, 则有:

$$T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \cos \alpha_2 + P = W$$



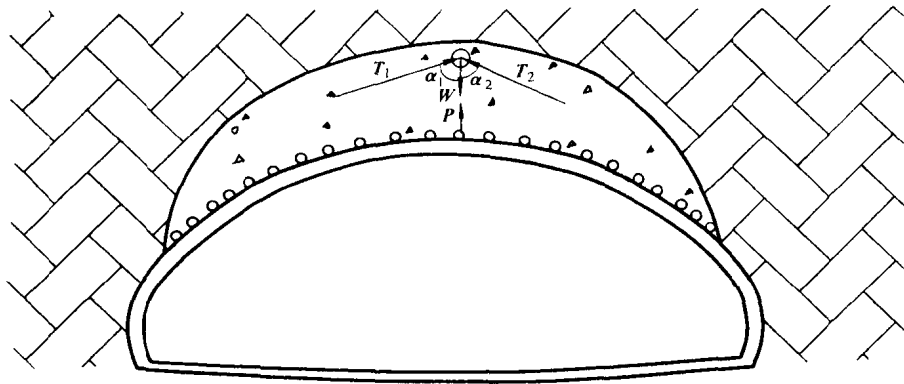


图 2.5 特殊地质围岩强预支护原理  
 $T_1, T_2$ -围岩反力;  $W$ -重力;  $P$ -支护抗力

式中:  $T_1, T_2$ ——围岩反力;  
 $W$ ——重力;  
 $P$ ——支护抗力(支护抗力  $P$  尽可能小)。

②当隧道围岩没有采用强预支护而发生较大松弛或塌方时,则有:  $P \geq W$ 。也就是说,对于特殊地质围岩必须采用强预支护技术才能确定支护结构承受的围岩压力是形变压力而不是松弛压力。同时,施作强预支护时也必须考虑到预支护的刚度和开挖后施作喷射混凝土的时间,这些都影响特殊地质围岩的变形,即影响围岩压力的大小和分布情况。因此,选取适当的预支护刚度和施作喷射混凝土的时间也是十分重要的。

工程实践证明和文献[3,6]指出,未胶结类土状围岩的山岭隧道,若工序紧跟,衬砌背后回填密实,施工质量好,土体压力就会相应减小直至零,如西北老黄土窑洞和华北地道战的地道就是例证。而水下隧道衬砌在地下水位以下部分是不允许有空洞的,必须回填注浆密实(模型试验也证明了这一点),或改变目前常用的防水板设计方案,采用直接在初期支护上喷防水材料,再用泵送混凝土做好二次支护,防止二衬脱空。这就是隧道围岩支护力学原理在实际工程中的应用。

对于 I 类、II 类、稳定性较差的 III 类围岩及特殊地质围岩,即时采用类似软土隧道盾构施工原理的强预支护(图 2.5)或改良地层的设计方法,同样起着稳定围岩、控制围岩应力和变形、防止松弛坍塌和产生“松弛压力”的作用。但其机理与锚喷支护不同,可参照普氏理论和泰沙基理论进行设计。由于特殊地质围岩自稳能力差,且伴有地下水的作用,为安全起见,不考虑围岩的内摩擦角  $\phi$  和内聚力  $c$  值(即  $c = \phi = 0$ )的作用,仅考虑由于强预支护而不产生有害松弛的围岩反力  $T_1$  和  $T_2$  的作用(图 2.5)。

有些隧道破坏事例的设计是参考《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90)表 7.4.3-2(见附表 2)拟定支护设计参数,且仅考虑锚喷支护作用。隧道初期支护施工完成后,二次衬砌施工前发生塌方,说明在这种情况下规范表 7.4.3-2(见附表 2)的局限性,而宜采用类似软土隧道盾构施工原理的强预支护的隧道支护力学理论来拟定预支护参数,可减少或避免类似事故的发生。

为完善特殊地质围岩强预支护力学原理,预支护抗力可参照围岩压力量测结果(参见文献[2])进行统计分析求得参考值。强预支护设计参数按工程类比法(如参考文献[4]中的表 2-28 或附表 4,即常用钢拱架支护设计参数)和曲墙式衬砌算法(参见文献[2])求得参考值。

在目前也可按照《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90)第三章计算荷载的办法或按泰沙基理