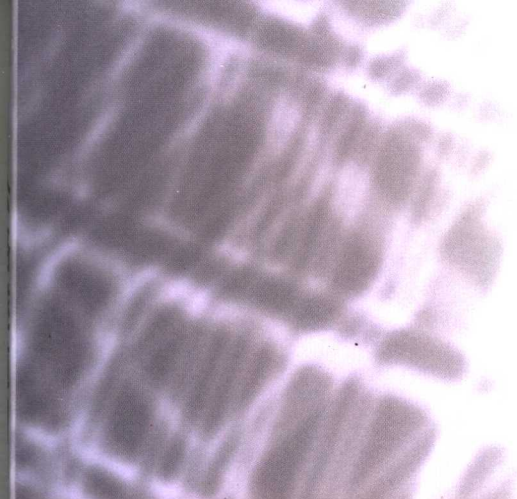




朱汉华
孙红月 著
杨建辉

公路隧道围岩 稳定与支护技术



科学出版社
www.sciencep.com

公路隧道围岩稳定与支护技术

朱汉华 孙红月 杨建辉 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

针对山区公路隧道建设的几个关键技术问题,作者结合 10 余年来亲身参与的隧道工程建设实践,提出隧道工程建设应实现目的与手段的统一,阐述了山岭隧道建造技术的许多理论和工法的适用性和一致性,强调回归复杂问题简单化的理念。本书内容包括新奥法指导思想总结,破碎岩体隧道开挖支护技术,连拱隧道设计理论与开挖支护技术,地下水对围岩稳定性作用方式与水下隧道开挖支护技术,山体稳定与隧道结构稳定关系,偏压连拱隧道开挖方案选择等。

本书既继承了以往公路隧道工程建设成功理论和经验,又对这些理论和方法进行了创造性的总结提高,可供从事隧道工程科研、设计、施工、监理、监督、管理的技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

公路隧道围岩稳定与支护技术/朱汉华,孙红月,杨建辉著. —北京:科学出版社,2007. 1

ISBN 978-7-03-018274-6

I. 公… II. ①朱… ②孙… ③杨… III. ①公路隧道-围岩稳定性-研究 ②公路隧道-围岩-支撑 IV. U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 151410 号

责任编辑:刘宝莉 张海娜 / 责任校对:温至丽

责任印制:安春生 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 1 月第一次印刷 印张: 14 3/4

印数: 1—3 000 字数: 273 000

定价: 35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

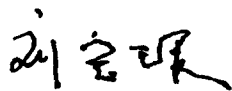
序

目前我国高等级公路建设正如火如荼地进行,建设重点逐步由平原区转向山地丘陵区。在山区修建高等级公路,由于复杂多变的地质环境条件,需要修建大量的隧道。而且随着车流量的增大,山岭段隧道也随之拓展为双车道、三车道等。隧道开挖跨度不断增大,洞形更为扁平,隧道围岩应力集中程度更高,衬砌受力也越大,隧道工程建设面临更大的机会和挑战。

破碎岩体是隧道工程常见岩体类型,其内部发育有多组结构面,岩体整体强度低,自稳能力差,隧道开挖后自稳时间仅为几个小时,甚至没有自稳时间,易出现冒落破坏,形成安全事故。连拱隧道特别是三车道连拱隧道,在我国尚属新型隧道结构,已建成的数量极少,缺乏可借鉴的设计施工经验,隧道在建设、运营过程中不同程度地出现围岩坍塌、衬砌裂缝、严重漏水等问题。因此,在破碎围岩条件下,大跨度特别是双车道或三车道的连拱隧道设计理论、开挖技术和支护技术是目前隧道工程研究的热点问题。

本书以研究隧道围岩稳定性为基础,强调支护技术与工程应用,核心内容是破碎围岩大跨度隧道的围岩稳定性与支护技术。对破碎围岩双车道和三车道的单拱和连拱隧道围岩位移、塑性区分布、衬砌内力分布等规律开展了研究,通过模型试验再现了隧道变形及破坏的过程,研究成果丰富了对破碎围岩稳定性与变形破坏规律的认识,为隧道的设计和施工提供了更为扎实的理论基础。

本书围绕隧道工程开挖支护的基本理念进行全面分析,强调目的与手段的统一,阐述了多种研究方法获得的成果,是作者长期隧道工程建设实践的经验总结和理论提升。在写作方法上,多用图形、图片等形式结合文字表述,在内容组织上做到了理论与实践相结合。我衷心祝贺本书的出版,相信它将在提升公路隧道建设技术水平中发挥积极作用,为我国公路建设事业的发展做出重要贡献。



中国工程院院士 中南大学教授

前 言

我国是一个多山的国家, 统筹区域协调发展、构建和谐社会是基本国策, 发展山区交通需要修建大量隧道。因此, 研究公路隧道围岩稳定与支护技术, 总结山岭隧道设计与施工方法是生产实践的必然要求。本书围绕隧道工程开挖支护的基本理念进行全面分析, 针对当前隧道工程建设中面临的破碎岩体、连拱隧道、地下水作用、山体稳定和偏压等几个关键技术问题展开系统的分析研究, 以期隧道工程安全、快速、经济地建设提供技术指导。

隧道工程设计和施工面向的对象是岩土体, 其性质不同于一般工程材料, 岩土体的工程地质环境也具有复杂性, 这导致隧道工程具有不同于一般地面工程的特点和规律。隧道工程结构由人工衬砌和天然围岩共同构成, 而且围岩是主要承载体。围岩压力类型可以相互转化, 即形变压力可以转化为松动压力, 反之亦然。支护结构对围岩位移起约束作用, 形成对围岩的支护力, 其反作用则是围岩作用于支护结构上的压力, 称为形变压力。如果支护强度不足, 围岩位移过大进入松弛变形阶段, 则形成了松弛压力, 其实质是部分围岩脱离母体后作用于支护结构上的重力。围岩中常分布着大量的结构面, 结构面剪切强度远低于岩石块体, 且不能承受拉伸作用, 受此影响, 岩体力学性质往往表现为各向异性, 在特定方向上的强度远低于岩石块体。当结构面与隧道临空面形成不利组合时, 失去支撑的围岩块体脱离母体, 其重力作用于支护结构形成松弛压力。如果采用强支护方法或隧道开挖后能够及时施加合理支护, 结构面得到强化, 岩体强度得到提高, 岩石块体不再脱离母体, 围岩压力则可以转化为形变压力。

破碎岩体是隧道工程常见的岩体类型, 围岩整体强度低, 自稳能力差, 隧道开挖后自稳时间短, 易出现冒落破坏, 产生安全事故。在此类岩体中开挖隧道难度很大, 支护技术一直是研究的重点问题。实践表明, 预支护是此类岩体中隧道开挖的有效技术手段。

连拱隧道较分线布置具有节约占地面积、减少洞口边坡加固工作量、减少隧道施工工程量、便于运营管理等优点, 同时连拱隧道可保持线路线型流畅, 增加洞口美观等。我国 20 世纪 80 年代末才开始建设连拱隧道, 已建和在建的连拱隧道数量居世界首位。连拱隧道特别是三车道连拱隧道, 在我国尚属新型隧道结构, 已建成的数量极少, 缺乏可借鉴的设计施工经验。连拱隧道设计理论、开挖技术和支护技术是目前研究的热点问题。

地下水一方面产生静水压力直接作用在衬砌上, 减小衬砌对围岩的支承能

力;另一方面,地下水与围岩相互作用影响围岩稳定。大量的工程实践也表明了相当部分的隧道塌方事故与地下水作用相关。

山体稳定是越岭隧道稳定的基础,为了避免隧道开挖引起隧道洞口边坡和洞体所在边坡的失稳破坏,对隧道洞口边坡和旁山隧道洞体边坡的岩体结构特征及稳定性应进行全面的评价。当潜在滑移面或稳定性安全余度较低时,首先必须加固山体,确保山体稳定。

由于地形、地质和施工等原因,许多隧道开挖存在偏压问题。目前在偏压连拱隧道有关问题上,侧重于地形偏压条件下连拱隧道开挖方案的研究,两主洞开挖顺序分为先内后外、先外后内和同时开挖等方案的选择。合理的开挖方案有利于加快工程进度、缩短总工期和节约费用。

山岭隧道设计与施工方法发展至今,世界各国推出许多理论和方法。作者在多条铁路、公路隧道建造实践中潜心研究并总结其成功经验和失败教训,完成了专著《公路隧道设计和施工新法》后又进行了系统理论、试验、实际工程的比较研究,总结提升山岭隧道建造技术为:

(1) 目的:在整体稳定性前提下,充分发挥围岩的自承作用,即基本维持围岩的原始状态,达到造价经济。

(2) 手段:满足上述目的适应当前生产力水平的各种理论和工法,且它们是发展的、与时俱进的。

(3) 检验标准:建造过程必须遵循能量最小原理,达到对围岩扰动最小。

(4) 全寿命理念:建造和维护全过程应综合考虑,遵循节约原则,否则就会造成极大浪费。

本书基于这种理念,较好地表达了山岭隧道建造技术的许多理论和工法的适用性和一致性,回归到“复杂问题简单化”理念,正像 Timo Shenko 力学理论一样,简化处理各种复杂边界条件的力学问题,便于山岭隧道建造应用,服务社会发展。

本书得以问世,是集体劳动的成果。傅鹤林、王戌平、金仁祥、郑东风、张序锁、王春雷、陈万忠、何凡友、陈荣毅、罗龙华、伊俊、陈国平、钱晓明、符文熹、严细水、吕庆、吴志军、张秉鹤、王坛华、邱道宏等,对本书的完成做出了重要贡献。申永江、刘永莉负责书中部分插图的 CAD 成图工作和书稿的校对工作。在此对他们的合作和辛勤劳动深表感谢。

本书的顺利完成,还和相关单位的领导和同事的关心和帮助密不可分,谨致我们的衷心谢意!

作者特别感谢中国工程院院士刘宝琛教授、王梦恕教授的悉心指导,感谢浙江大学尚岳全教授的热忱帮助。

本书内容是作者对公路隧道工程建设的粗浅体会,存在不足之处,敬请专家、同行指正。

目 录

序

前言

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 隧道工程的特点	2
1.2.1 隧道工程支护结构的构成特点	2
1.2.2 围岩压力类型的相互转化	3
1.2.3 围岩结构类型与工程尺度	4
1.2.4 围岩力学性质与地应力	5
1.2.5 隧道设计与施工一体化	6
1.3 隧道围岩变形破坏类型	7
1.3.1 隧道围岩变形破坏类型	7
1.3.2 脆性破坏	8
1.3.3 塑性围岩的变形与破坏	10
1.4 隧道围岩稳定性的有关问题	12
1.4.1 地压理论	12
1.4.2 岩体结构控制作用	13
1.4.3 新奥法	16
1.5 隧道围岩分类	18
1.6 隧道围岩稳定性研究方法	20
1.6.1 理论研究方法	20
1.6.2 模拟研究方法	21
1.6.3 现场试验方法	23
2 隧道新奥法的原理与支护设计	24
2.1 新奥法的基本原理	24
2.2 新奥法的发展过程	25
2.3 隧道工程新奥法支护的一般原理	26
2.4 隧道初期支护施工顺序有关问题	28
2.5 白鹤隧道洞顶塌方事故分析	32
2.6 岩石锚杆支护机理认识	34

2.6.1	锚杆的基本支护作用	34
2.6.2	锚杆支护机理	35
2.7	锚杆、喷射混凝土协调作用	38
2.8	围岩稳定性的观测和反馈	39
2.8.1	观察与量测方法	39
2.8.2	观察与反馈	39
2.8.3	量测反馈方法	42
2.9	用新奥法的思想处理塌方	43
3	破碎围岩隧道施工方法	45
3.1	概述	45
3.2	下导洞适度超前强预支护全断面施工方法	46
3.2.1	下导洞适度超前全断面施工方法的依据	46
3.2.2	破碎围岩强预支护方案	46
3.2.3	破碎围岩强预支护应注意的问题	48
3.3	软弱破碎围岩隧道开挖与支护顺序	49
3.3.1	隧道开挖顺序	49
3.3.2	加强支护与合理安排支护顺序	50
3.4	松动区对支护结构作用的平面有限元分析	51
3.4.1	洞顶松动区围岩变形特性恶化对支护结构的影响	52
3.4.2	洞顶松动体扩展对支护结构的影响	53
3.5	下导洞超前强预支护效果的三维有限元分析	54
3.5.1	全断面开挖后支护围岩和结构的应力场特征	55
3.5.2	洞顶出现显著松弛破坏后再支护的应力场特征	57
3.5.3	强预支护时隧道围岩和结构的应力场特征	59
3.6	小管棚短台阶法隧道设计与施工实例	62
3.6.1	隧道工程地质条件	62
3.6.2	小管棚短台阶法设计	62
3.6.3	小管棚短台阶法施工	63
3.6.4	施工中注意事项	64
3.6.5	施工工序及步骤	64
3.7	木花公路 2# 隧道塌方处理方案	66
3.7.1	洞内塌方处理	66
3.7.2	洞外塌方处理	67
3.7.3	塌方处理安全措施	67
3.8	本章小结	67

4 单拱隧道开挖方案与围岩稳定	68
4.1 概述.....	68
4.2 单拱隧道开挖顺序.....	69
4.2.1 台阶法	69
4.2.2 分部开挖留核心土法	70
4.2.3 中隔壁法 (CD 法)	70
4.2.4 双侧壁导坑法 (眼镜法)	70
4.2.5 交叉中隔壁法 (CRD 法)	71
4.2.6 施工方法比较	71
4.3 单拱隧道施工力学动态数值模拟与施工方法比较.....	72
4.3.1 数值分析模型概况	72
4.3.2 上下台阶法开挖支护的动态数值模拟	72
4.3.3 上下台阶留核心土法开挖支护的动态数值模拟	74
4.3.4 中隔壁法 (CD 法) 开挖支护的动态数值模拟	76
4.3.5 交叉中隔壁法 (CRD 法) 开挖支护的动态数值模拟	79
4.3.6 双侧壁导坑法 (眼镜法) 开挖支护的动态数值模拟	82
4.3.7 V 级围岩各种施工方法的比较	84
4.4 破碎围岩稳定性三维数值模拟研究.....	85
4.4.1 计算模型及参数选取	85
4.4.2 计算结果及分析	86
4.5 双车道隧道模型试验研究.....	92
4.5.1 模型材料研究	92
4.5.2 试验设计.....	94
4.5.3 毛洞模型试验	97
4.5.4 衬砌隧道模拟试验	106
4.6 三车道模型试验研究	108
4.6.1 试验设计	108
4.6.2 加压模型试验	110
4.7 本章小结	116
5 连拱隧道开挖方案与围岩稳定	117
5.1 概述	117
5.2 开挖方案	119
5.2.1 三导洞分步施工法	119
5.2.2 中导洞施工法	119
5.2.3 单洞施工法	120

5.2.4 双洞平行施工法	121
5.3 破碎围岩连拱隧道开挖支护数值模拟分析	122
5.3.1 计算模型及参数选取	122
5.3.2 计算结果及分析	123
5.4 双车道连拱隧道模型试验研究	133
5.4.1 试验设计	133
5.4.2 试验结果与分析	136
5.5 三车道连拱隧道模型试验研究	141
5.5.1 试验设计	141
5.5.2 隧道衬砌加压模型试验结果与分析	142
5.6 南山连拱隧道结构设计与施工	146
5.6.1 连拱隧道结构设计不足与优化改进	146
5.6.2 南山连拱隧道设计改进措施	147
5.6.3 施工方案及实施情况	148
5.6.4 南山连体隧道施工中出现的通病防治措施	150
5.6.5 工期控制与安全	151
5.7 本章小结	152
6 山体稳定与隧道稳定	153
6.1 概述	153
6.2 山体稳定性影响因素分析	153
6.2.1 地质构造因素	153
6.2.2 地下水因素	154
6.2.3 施工因素	155
6.3 治理滑坡的主要工程措施	155
6.4 任胡岭隧道滑坡	157
6.4.1 工程概况与地质环境	157
6.4.2 滑坡特征	160
6.4.3 滑坡成因机制分析	162
6.4.4 隧道滑坡治理	171
6.4.5 结论	174
7 地下水与隧道结构稳定	176
7.1 地下水与隧道围岩稳定的关系	176
7.2 单拱隧道围岩渗水模型试验	177
7.2.1 试验模型	177
7.2.2 单拱双车道隧道围岩渗水模型试验	178

7.2.3 单拱三车道无衬砌隧道围岩渗水模型试验	182
7.2.4 三车道有衬砌隧道围岩渗水模型试验	190
7.3 连拱隧道渗水模型试验	193
7.3.1 双车道连拱隧道渗水模型试验	193
7.3.2 三车道连拱隧道渗水模型试验	195
7.4 水下隧道开挖涌水预测分析	199
7.5 水下隧道的防水设计	201
7.5.1 隧道施工中由于地下水活动引起的工程问题	201
7.5.2 水下隧道或涌水量较大软岩(土)隧道的设计原则	201
7.5.3 延水关黄河隧道施工涌水设计	203
8 浅埋偏压连拱隧道开挖顺序研究	205
8.1 概述	205
8.2 施工方案有限元模拟研究	206
8.2.1 建立模型	206
8.2.2 计算原理	208
8.2.3 施工过程模拟	208
8.2.4 计算结果分析	209
8.3 现场量测资料分析	213
8.4 本章小结	214
参考文献	216

1 绪 论

1.1 概 述

近代隧道兴起于运河时代,从 17 世纪起,欧洲陆续修建了许多运河隧道。第一本涉及隧道工程的专著是 1556 年 Geory Bauer 所著的《采矿冶炼手册》。随着采矿和隧道工程的发展,地层压力理论于 14 世纪开创并不断发展。19 世纪中期开始的第二次工业革命使经济得到快速发展,交通流量也日渐增大,从而对交通提出了更高的要求。1823 年英国工程师勃召奈尔主持修建了泰晤士河下的水底公路隧道,由于隧道进水迫使工程停工 11 次。之后,勃召奈尔研制了盾构,经过 18 年的工期修成了世界上第一条在软土层里的隧道。到了 20 世纪 50 年代,人们才逐步总结出各种类型隧道及地下工程的规划、设计和施工的基本原理,在土木工程中逐渐形成了一个独立的工程领域。

在山岭公路隧道施工中,通过近两个世纪的探索,形成了以下几种施工方法:明挖法、盾构法、地下连续墙法、矿山法、新奥法等。这些施工方法都是一种手段,其核心就是基本维持围岩的原始状态,达到充分发挥围岩的自承作用的目的。在实际应用中并不介意采用什么理论和工法,只要在施工过程中遵循能量最小原理慎重选择合适的工法,达到对围岩的扰动最小。当然,满足基本维持围岩的原始状态和充分发挥围岩的自承作用的目的,回归到“复杂问题简单化”理念,也能较好表述山岭隧道建造技术的各种理论和工法的适用性和一致性。

我国公路隧道建设虽然起步较晚,但发展较快,已有了长足的进步,完成了不少工程,在设计理论和修建技术方面取得了一批研究成果。但目前我国公路隧道建设中的许多工程技术问题还有待于进一步研究和在实践中去解决,而且随着车流量的增大,六车道、八车道的高速公路建设越来越多,公路隧道也随之拓展为双车道、三车道,出现了双车道、三车道甚至更多车道的单拱和连拱隧道,隧道开挖跨度不断增大,洞形更为扁平,隧道围岩应力集中程度更高,衬砌受力更大。

连拱隧道具有一些独特的优点,如它较分线布置节约占地面积、减少洞口边坡加固工作量、减少隧道的施工工程量、便于运营管理等,同时连拱隧道可保持线路线型流畅,增加洞口美观度等。国外连拱隧道建设始于 20 世纪 30 年

代末 40 年代初, 盛于 70 年代末 80 年代初, 目前日本修建了 30 多座, 欧洲各国修建数量较少。我国 80 年代末 90 年代初才开始着手建设连拱隧道, 已建和在建连拱隧道数量居世界首位, 连拱隧道特别是三车道连拱隧道, 在我国尚属新型隧道结构, 已建成的数量极少, 缺乏可借鉴的设计施工经验, 存在建设工期较长、工序较多、造价较高及工程质量不够理想等问题, 隧道在建设、运营过程中, 不同程度地出现了围岩坍塌、衬砌开裂、严重漏水等问题。因此大跨度, 特别是双车道与三车道的连拱隧道设计理论、开挖技术和支护技术是目前研究的热点问题。

破碎岩体是隧道工程常见的岩体类型。其内部发育有多组结构面, 结构面间贯通性好, 岩体完整性差。此类岩体整体强度低, 自稳能力差, 隧道开挖后自稳时间为几个小时, 甚至没有自稳时间, 易出现冒落破坏, 形成安全事故。该类岩体多出现于受强烈构造运动并产生严重变形或破裂的岩体中, 隧道沿大断层布置时常出现此类岩体。在此类岩体中开挖隧道难度很大, 支护技术一直是研究的重点问题。实践表明, 预支护是开挖此类岩体中隧道的有效技术手段, 在永久支护结构发挥支护作用前, 预支护可以支撑围岩, 维护掌子面及附近围岩的稳定, 为安全施工创造条件, 一般预支护结构还可以作为永久支护的组成部分, 发挥长期支护作用, 有利于公路隧道的长期安全运行。

为适应国民经济的发展, 我国高等级公路在 2020 年前要建成五纵七横、总里程近 4 万公里的国道主干线。经过 10 余年的建设, 目前我国高等级公路仅 1 万余公里, 因此在今后近 20 年中, 还需要修建近 3 万公里的高等级公路, 任务十分艰巨。我国地形地貌以山地丘陵为主, 地质条件十分复杂, 各种地质灾害严重, 公路隧道建设难度大。因此, 作为高速公路的重要组成部分, 公路隧道工程的设计计算理论和修建技术一直是我国公路界高度关注的问题之一, 提高公路隧道的建设水平也是每位隧道科研、设计、施工工作者努力的目标。

1.2 隧道工程的特点

隧道工程设计和施工面向的对象是岩土体, 岩土体的工程性质不同于其他工程材料, 其工程地质环境也不同于其他工程, 这导致隧道工程具有不同于一般地面工程的特点和规律, 认识这些特点和规律是隧道工程科学设计、合理施工的基础。

1.2.1 隧道工程支护结构的构成特点

隧道工程结构由人工衬砌和天然围岩共同构成, 而且围岩是主要承载结构,

这与地面工程结构概念不同,地面工程结构是指人工构筑的承载结构。

围岩具有自承能力,其自承能力来源于围岩自身强度。隧道开挖后,在岩土体中形成新的空间即形成了临空面,导致隧道周边岩土体失去原有的支撑,径向应力降低,围岩向隧道洞内移动,产生相互挤压,切向应力升高,局部可能出现拉应力,围岩应力状态趋于恶化。但围岩自身强度如果高于二次应力,围岩是能够稳定的,因此围岩的自承能力大小取决于围岩强度的高低。此处的围岩强度不是指围岩中岩石块体的强度,而是包含了结构面分布与性质、岩石块体(结构体)强度和工程影响等多因素的综合指标。隧道工程中不支护而长期稳定的实例证明了围岩的自承能力,我国的西北窑洞即是一个生动的例证。

如果围岩强度低于二次应力,围岩就会进入塑性变形阶段,从而形成塑性区,这种隧道工程中就必须施加人工支护。目前人工支护多为两次施加,在此方面也不同于地面工程,地面工程结构一般是一次构筑完成。隧道工程的初期支护多为锚喷支护等,二次支护则为衬砌结构。

人工支护结构(锚喷支护等与衬砌)的作用在于保护围岩,不使围岩发生过大变形而导致强度大幅度地降低,促使围岩成为主要的承载结构,因此人工支护结构的主要作用不在于承载,而在于保护围岩,使围岩不致发生过大的变形。以此支护观为依据,现代设计思想应从衬砌结构设计转化为对围岩的设计,将围岩和人工支护结构视为一体,研究围岩和支护结构的相互作用,采用现代岩体力学方法设计支护结构,这种模式称为地层-结构模式。

与上述支护观点不同,传统支护观认为围岩只形成对支护结构的载荷,而没有认识到围岩的自承作用。与此支护观相一致,传统设计思想只将人工支护结构——衬砌视为承载结构,支护结构和围岩被分割开来,被动地承受围岩压力,用传统的结构力学方法设计支护结构,即结构-荷载模式。在考虑了围岩抗力后,结构-荷载模式在一定程度上也体现了支护结构与围岩间的相互作用,目前常用于二次衬砌的设计。

1.2.2 围岩压力类型的相互转化

新奥法认为围岩压力类型可以相互转化,即形变压力可以转化为松动压力,反之亦然。支护结构对围岩位移起到约束作用,形成对围岩的支护力,其反作用则是围岩作用于支护结构上的压力,称为形变压力。如果支护强度不足,围岩位移过大进入松弛变形阶段,则形成了松动压力。图 1.1 是围岩特征曲线,下降段为形变压力,上升段为松动

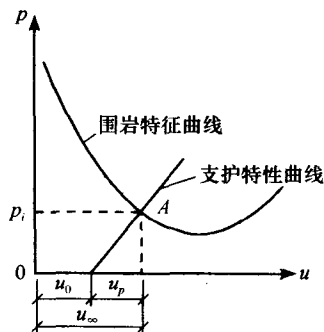


图 1.1 围岩特性曲线

压力。

松弛压力的实质是部分围岩脱离母体后作用于支护结构上的重力。围岩中常分布着大量的结构面，结构面剪切强度远低于岩石块体强度，且不能承受拉伸作用，受此影响，岩体力学性质往往表现为各向异性，在特定方向上的强度远低于岩石块体强度。当结构面与隧道临空面形成不利组合时，失去支撑的围岩块体脱离母体，其重力作用于支护结构上形成松弛压力。如果采用强预支护方法或隧道开挖后能够及时施加合理支护，结构面得到强化，岩体强度得到提高，岩石块体不再脱离母体，松动压力则可以转化为形变压力。图 1.2 中，围岩块体若支护不及时，会依次发生冒落，从而形成松动压力。施加锚喷支护后控制了块体的冒落，松动压力可转化为形变压力。

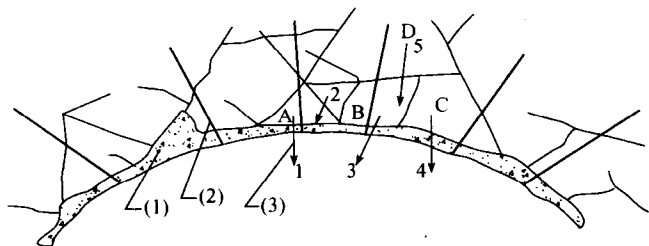


图 1.2 锚喷支护块状围岩松动压力向形变压力转化

(1) 喷射混凝土；(2) 砂浆锚杆；(3) 数字表示危石坍塌顺序，字母表示危石块体

1.2.3 围岩结构类型与工程尺度

隧道围岩内存在着大量的层理、节理、裂隙等各种结构面。结构面和结构体在岩体内的排列组合方式称为岩体结构。岩体结构不同时，岩体变形性质、强度性质和破坏机理有本质的区别，岩体变形主要是结构变形，岩体破坏往往是结构失稳，岩体结构是岩体力学性质的主导因素。选择支护型式和支护参数必须首先对其结构类型有一个正确认识，建立符合工程实际的计算模型，然后再进行分析计算，这样的计算结果才有工程意义和应用价值，否则就是无的放矢。工程中测得的隧道围岩抗压、抗拉强度往往是结构体（岩石块体）的强度，是岩体性质的一个方面，由于结构面的存在，岩体的性质与结构体相差很大，这不仅是强度高与低量值上的不同，更是两者在破坏形式、破坏机理和规模上的不同。对围岩的结构类型认识不清，支护型式和参数的选择必然是盲目的，大量的工程实践表明，隧道工程事故多与围岩结构类型认识不清有密切关系。

在岩体结构力学理论中，岩体结构可划分为整体结构、块裂结构、碎裂结

构、层状（板裂）结构、散体结构五大类。岩体结构类型划分与工程类型及工程规模尺度有关，研究围岩结构必须考虑工程的尺度。图 1.3 是被两组正交结构面切割的岩体，在其中开挖 1、2、3、4、5 号隧道，由图可见随着隧道规模不断变大，围岩结构类型相应发生变化。开挖 1 号隧道，围岩结构为整体结构，开挖 2、3、4、5 号隧道，围岩结构应划分为层状结构、块裂结构、碎裂结构、散体结构。认识到这一点对于研究大跨度隧道的围岩稳定和设计支护参数有重要意义。三车道隧道和双车道隧道相比，施工和支护难度增大不仅是跨度的增大，更应研究围岩结构类型的变化，这种变化对选择隧道的地质模型有影响。

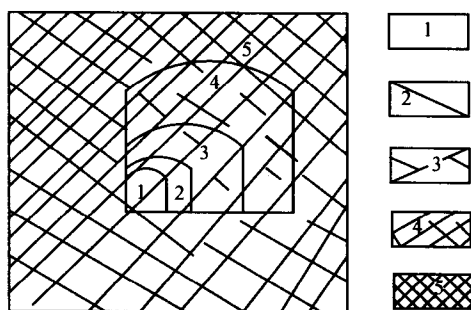


图 1.3 岩体结构与隧道尺度关系

1. 整体结构；2. 层状结构；3. 块裂结构；4. 碎裂结构；5. 散体结构

1.2.4 围岩力学性质与地应力

隧道工程所赋存的环境与一般地学工程结构不同，它处在一个地应力场环境中。地应力场可以改变围岩的变形和失稳机制，可以改变岩体的力学性质，这称为地应力的力学效应，这是岩体这种介质与其他材料不同之处。因此研究隧道围岩的稳定性只了解岩体结构是不够的，还要了解地应力的特征，并进一步研究地应力场的力学效应。

孙广忠等把地应力场的力学效应归纳为表 1.1。岩体介质类型划分也与地应力水平相关，见表 1.2。

表 1.1 地应力的力学效应

岩体类别	地应力的力学效应
完整结构岩体	(1) 破坏机制：由脆性向塑性转化 (2) 破坏强度：由低向高转化 (3) 变形模量：由低向高转化

续表

岩体类别	地应力的力学效应
碎裂结构岩体	(1) 结构面起作用向不起作用转化 (2) 岩体结构力学效应：由显著向消失转化 (3) 岩体破坏机制：由结构面控制向结构体控制转化 (4) 破坏强度：由低向高转化 (5) 变形模量：由低向高转化 (6) 岩体力学介质：由碎裂向连续转化
块裂结构岩体	起伏结构面破坏：由爬坡向峭断转化

表 1.2 岩体力学介质划分方案

岩体结构 赋存条件	完整结构	散体结构		碎裂结构	板裂结构	块裂结构
		细碎屑	粗碎屑			
低地应力 $(\sigma_3 < \frac{1}{2}\sigma_c)$	连续介质		碎裂介质		板裂介质	块裂介质
高地应力 $(\sigma_3 > \frac{1}{2}\sigma_c)$	连续介质					

从表 1.1 中可见，对于完整岩体，地应力可以改变岩体的破坏机制、破坏强度和变形模量。随着地应力的增大，完整岩体破坏机制由脆性向塑性破坏转化，岩体强度可以由低向高转化，变形模量也是由低向高转化。在碎裂结构岩体中也有类似的规律。岩体结构面在不同地应力水平下处于不同状态，这是地应力具有力学效应的原因。在低应力条件下，结构面在岩体变形、破坏中起着主要作用，随着地应力的增大，结构面趋于闭合，结构面的作用逐渐减弱，在高应力条件下，结构面不再起作用，岩体转化为连续介质，岩体的力学性质等于结构体的力学性质，从而使岩体强度和变形模量提高。

1.2.5 隧道设计与施工一体化

隧道设计与施工一体化是隧道工程的特点，应以新奥法为指导进行支护设计和施工。新奥法的理论核心是充分发挥围岩的自承能力，隧道设计与施工两个环节都要围绕这个核心来进行，并统筹考虑，把隧道设计和施工视为一个系统工程，因此隧道设计应成为系统设计。

隧道的预设计工作包含选择施工方法与施工顺序、现场监控与测量设计等内容。在施工期间要调查工程地质、量测隧道围岩位移和支护结构受力等重要的围岩稳定信息，依据这些信息可以对预设计内容进行修改，包括锚喷支护等参数、衬砌结构参数、防排水措施等，也可以对施工方案进行修改，如断面开挖顺序、台阶长度、支护实施时间等。新奥法设计程序如图 1.4 所示。