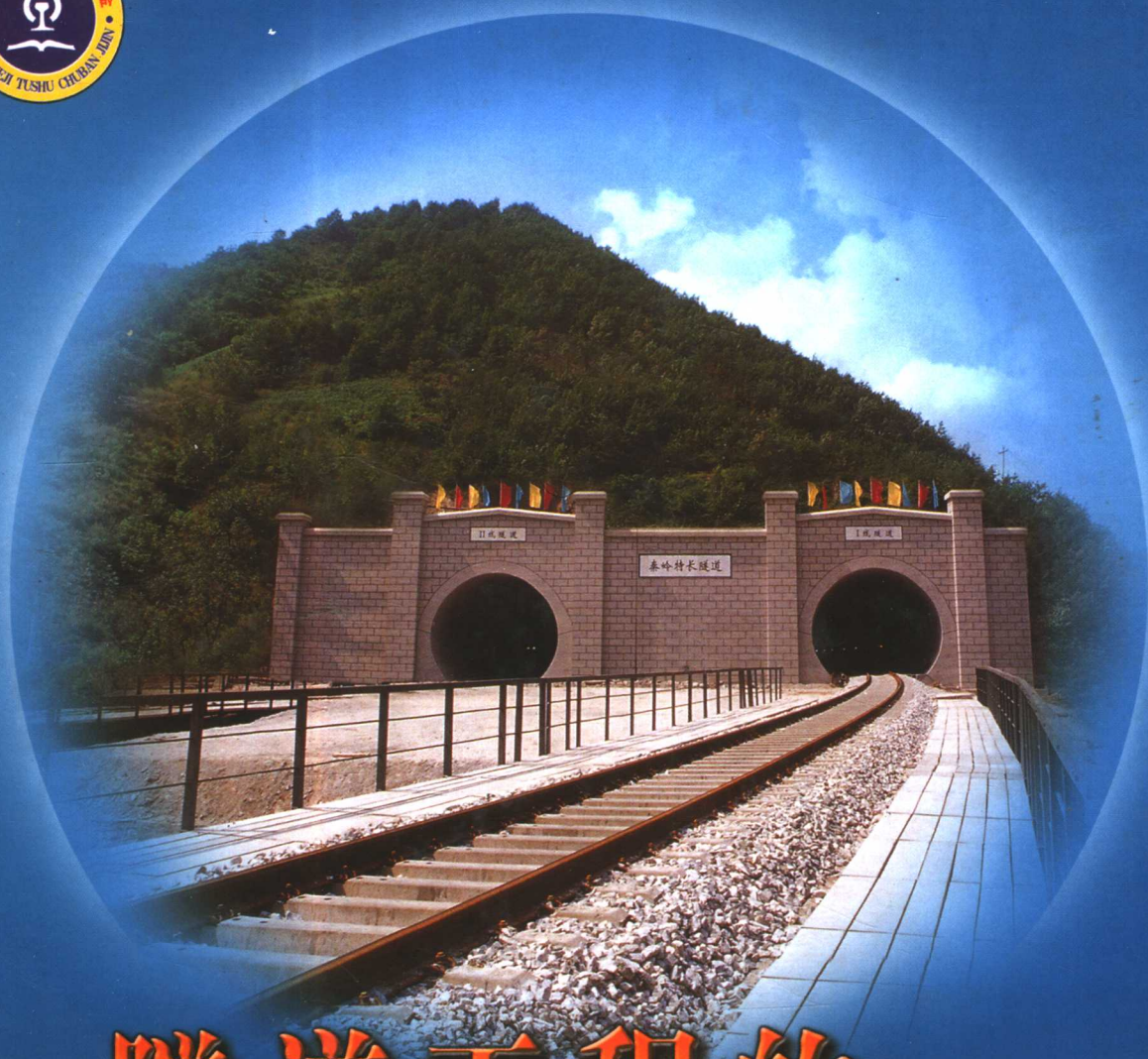




隧道工程的 技术进步

王建宇 著

中国铁道出版社

铁路科技图书出版基金资助出版

隧道工程的技术进步

王建宇 著

中国铁道出版社
2004年·北京

内 容 简 介

本书汇集了王建宇研究员在从事隧道与地下工程 40 余年的实践与研究过程中撰写的代表性学术论文与著作。

主要内容聚焦在对现代隧道修建新技术、新理念的理解、探索、实践与创新方面。体现了作者对于我国隧道与地下工程设计理论的发展、施工机械化程度和修建长大隧道能力的提高、复杂条件下隧道修建技术的提高所起到的促进作用;体现了作者对于我国隧道与地下工程可持续发展,尤其是在隧道工程质量的管理和控制、隧道工程和生态环境的协调方面所发挥的指导作用。

可供从事隧道与地下工程科研、设计、施工、监理的技术人员与管理人员,相关专业大学教师与学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

隧道工程的技术进步/王建宇编著. —北京:中国铁道出版社,2004.3
ISBN 7-113-05685-7

I. 隧… II. 王… III. 隧道工程-工程技术-文集 IV. U45-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 003740 号

书 名:隧道工程的技术进步

作 者:王建宇 著

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

策划编辑:刘启山

责任编辑:刘启山

封面设计:蔡 涛

印 刷:北京市彩桥印刷厂

开 本:787×1092 1/16 印张:17.75 插页:2 字数:439 千

版 本:2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~1000 册

书 号:ISBN 7-113-05685-7/TU·760

定 价:68.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话:63549457 发行部电话:63549495

序

作为一个数十年来致力于隧道工程的科技人员,王建宇同志的工作,特别是他在围岩稳定性分析和支护技术方面的科研成果和学术观点一直为同行们所重视。希望本书的出版能满足他们的这种关切。

从上个世纪 60 年代起,本书作者和他的同事们就开始从事隧道工程中锚杆和喷射混凝土支护的研究和开发,所发表的“卵石模拟试验”等科研成果曾对锚喷支护的推广有过较大影响。在研究中,他特别注重围岩地质环境的分析,系统地提出了不同岩体结构中锚喷支护的作用原理和相应的设计原则。作者将这种新型支护同光面爆破、监控量测等结合在一起,进行了一系列的现场试验,为我国软弱围岩隧道修建方法的革新提供了经验和依据。

在隧道工程的设计理论方面,本书作者的工作涉及到数值计算、经验方法和信息化设计等主要手段:针对当时隧道设计规范和有关技术标准普遍采用的“松散压力”理论,在国内较早地提出并阐明了“形变压力”概念;在经验方法方面,对基于工程数据库的“模糊聚类设计法”进行了探索;作为信息化设计的基础,提出了以位移测试为主的监控量测手段以及量测数据处理和反馈的一整套方法。

近年来作者的工作集中在隧道工程质量的管理和控制以及隧道工程与环境的协调方面。这不仅切合我国的实际,而且符合可持续发展的主题。本书反映了作者的这些工作成果。

综观全书,其内容不仅是作者科技生涯的写实,而且反映了他从事科技工作的一个鲜明特点:密切结合工程实际。诚如他自己所说:科学研究“要植根于工程实践的土壤”,“始终把自己工作的基点放在工程的需求上,从而使研究成果言之有物,有的放矢。”

相信这本名为“隧道工程技术进步”的书能从某个侧面反映我国隧道工程的技术进步,从而对读者有所帮助。

中国工程院院士

钱七虎

2003 年 11 月 25 日

前 言

40 多年前,当本书作者选择隧道工程作为自己终身职业的时候,并没有想到这门专业是那样地具有挑战性。隧道工程技术丰富的内涵,深邃的哲理无不吸引人们去探索,去追求。从木支撑,分部开挖,小矿车运输到锚喷支护,大断面综合机械化施工,回顾隧道工程技术的发展,除了得益于施工机械装备的改进外,重要的是隧道修建理念的更新。

从 20 世纪 60 年代开始,由于锚杆和喷混凝土一类“主动型”支护技术的使用,使人们对隧道工程中围岩与支护的相互关系重新认识,不再传统地将围岩视为荷载的来源,将支护结构的功能归结为“消极地”承受围岩自由坍塌下来的岩土体重量所产生的荷载。而是立足于保护、利用和调动(activation)“岩土结构”的自承能力。这就是隧道工程师们熟知的“新奥法”的精髓所在。

并不是所有的人都喜欢用“新奥法”这个名词来表达现代隧道修建的基本理念。例如,法国同行更多使用“收敛—约束法”这个词;在南美则称“喷混凝土支护隧道快速修建法”(RSST)。同南美的情况相仿,在我国,有的隧道工程师愿意叫“锚喷构筑法”,大概是因为这个名词直接表达了现代隧道修建新理念的技术背景。

应该指出的是,对“新奥法”的认识和理解,在国内外都还有争论。即使在欧洲,也有人列举几个失败的工例对“新奥法”进行质疑。甚至有人提出了“新奥法是否存在?”(Is there a NATM?)的疑问。

尽管如此,毋庸置疑的事实是,这种新理念确实引起了隧道工程从设计到施工的一系列重大革新,从而奠定了现代隧道修建技术的基础。几个工程的失败并不能从根本上动摇隧道修建的新理念,反而会引起对新奥法的深层次的思考。虽然说,锚喷支护是新奥法产生的技术背景,但作为现代隧道修建的新理念,它并不局限地指一种具体的施工方法和支护技术而是一种“原则”,一种“哲学”。隧道工程千变万化的地质背景和环境条件给工程师们创造性地运用新奥法提供了广阔的空间。

本书汇集了作者在不同时期撰写的一些代表性学术论文,其内容涉及隧道工程的诸多方面,主要内容却始终聚焦在现代隧道技术修建新理念的理解,探索和实践上。作者深信,这些内容将对从事隧道工程的同行们有所帮助,愿意在对它们进行全面修订后奉献给大家。

本书作者的技术工作生涯是从开发和推广锚杆和喷混凝土支护技术开始的。在掌握了锚杆和喷混凝土的材料、机具和施工工艺的关键技术,取得初步经验以后,很自然地把注意力集中到支护作用机理和设计方法的探索。1972 年,作者和他的同事们曾经用铜丝和棉纱网模拟锚杆和喷混凝土,用卵石模拟围岩进行模拟试验。试验表明,在安装了“锚喷支护”后的卵石“围岩”能够稳定可靠地自承。这就是说,即使对于犹如卵石的毫无粘聚性的松散围岩,锚杆和喷混凝土仍然有足够强大的支护能力。这个试验结果,曾对锚喷支护的推广产生了较大影响。

此后,在砂岩、泥岩互层中的普济隧道、严重风化千枚岩中浅埋的下坑隧道、开挖后围岩急剧变形的金家岩隧道以及软弱围岩中埋深仅为 7 m 的南岭隧道洼地段成功地进行了运用锚喷支护对软弱围岩隧道修建方法进行革新的现场试验,全面引进了新奥法理念,采用了以锚杆和

喷混凝土为初期支护,以模注混凝土为二次衬砌的“复合式衬砌”。

在经历了模拟试验和现场试验的喜悦后,不能不面对的事实是:传统的,建立在坍塌拱理论基础上的支护结构荷载计算方法,乃至“荷载—结构物”计算模式本身既不能说明锚喷支护的作用机理,更难以对其进行正确的设计计算。于是,作者引入了同传统松散压力完全不同的“形变压力”概念,并从分布规律以及同衬砌刚度的相关性等角度阐明了形变压力的特征。

接下来所做的工作是将“连续体模式”(continuum mode)引入设计,即把支护结构和构件作为围岩介质特殊的边界条件,直接对共同作用的围岩—支护连续体进行力学分析,确定围岩的稳定状态和支护系统的可靠性。电子计算机的使用和有限元、边界元一类数值方法的开发为这种计算分析提供了条件。在很长一段时间里,作者曾醉心于采用不同的岩土本构关系进行有限元计算。除了从连续介质力学角度所做的计算分析外,还根据石根华同志的 Key Block 理论对块状围岩进行稳定性分析。

这一类工作当然不是徒劳。在一定条件下,借助数值方法,能对隧道围岩的稳定性特征作出定性的判断,例如确定围岩变形和破坏形态,拉应力区或塑性区的部位和范围等,这些,对施工决策和支护设计都是非常有用的。但是,数值方法计算结果同实际的符合程度依赖于岩土模型以及表征隧道环境条件和岩土性态的参数选取。选取得不恰当会使结果面目全非——“输入的是垃圾,输出的也是垃圾”。而输入参数的确定并不是一件容易的事。这就降低了工程师们采用数值方法的热情。

其实,从总体上说,由于环境条件(包括地质情况)的调查和数量化表达方面的困难,对于隧道工程,要象对地面结构物那样,将力学计算作为设计的主要手段是不可能的。建立在围岩分级或分类基础上的经验设计方法以及同施工监测相结合的信息化设计方法都是十分必要的补充。

信息化设计,国外称 Observational Designing(监控设计)、Active Design(主动设计)或称动态设计(Design as you go)。本书采用的信息化设计名词是从日文资料中的“情报化施工”一词借用的。所谓信息化设计意即通过对隧道开挖过程中所采集(量测)到的反映围岩和支护结构力学行为的信息,对围岩的稳定状态和支护系统的可靠性进行判断和预测用以论证和调整预设计所确定的支护参数和施工方法。

对于软弱围岩的情况,围岩中各点的位移,特别是隧道周壁点的位移是围岩和支护结构物共同变形最直接,最明显的体现,比较容易测得。除了利用水平仪对拱顶和地表的沉降进行量测外,1979年参考国外资料研制的国内第一台卷尺式隧道净空变化测定计(收敛计),在下坑隧道首次使用,取得了良好的效果。

量测信息的反馈是通过对变形的时态曲线直接进行判断和采用反分析技术(Back Analysis)两条途径实现的。为此,曾开发了用于确定初始地应力、岩体变形模量,流变参数和衬砌内力的一系列反分析程序。

在隧道设计经验方法的研究方面,对隧道支护设计模糊类比方法的探索值得一提。

如果说,在上一个世纪的后 50 年,我国隧道工程技术进步主要表现为施工机械化程度和修建长大隧道能力的提高以及复杂环境条件下隧道修建技术的开发,那么,面向 21 世纪,以下两个问题应该成为当前以及相当长的一段时间内我国隧道技术进步的主题:

隧道工程质量的管理和控制;

隧道工程和生态环境的协调。

本书作者近年来的工作也主要集中在这两个热点问题上。在隧道工程质量方面,除了衬

砌厚度和混凝土品质外,须特别强调的是衬砌和围岩的密贴状况。采用包括测地雷达在内的地球物理检测手段很有必要。在生态环境的保护问题上,特别要注意地下水资源的保护。从这个角度看,无论对城市隧道还是山岭隧道,以往采用的“以排为主”的地下水治理原则都需要转变。这将引起隧道设计和施工方面的一系列变革。

根据本书收集的不完全统计资料,我国现有铁路隧道 5 200 座,总长达 2 500 km,其中长度在 5 km 以上的就有 31 座。仅这几个数字就已经令全世界刮目相看。实际上这几个数字还在不断更新。可以说目前中国已进入隧道修建的全盛时期。

我们伟大的祖国幅员辽阔,是个多山的国家,在铁路、公路、城市建设和能源开发等方面,特别是在西部开发中隧道工程的重要地位不言而喻。另一方面,由于地质情况和环境条件复杂多变,隧道工程所遇到的困难也是层出不穷的。隧道工程师应该是一个勇敢的探索者,在土木工程的领域里,可以说没有一种其他工程像隧道工程那样需要面对那样多的未知因素。隧道工程师还要淡泊功利。和地面建筑物不同,一旦隧道建成,从外形简单、并不“宏伟”的结构物本身很难找到建设者不畏险阻、艰辛劳作的痕迹,无以炫耀他们的智慧和创造。但这也许正是隧道工程师们的自豪所在。

作 者

2003 年 8 月

目 录

第 1 章 围岩与支护	1
1.1 围岩与支护结构物的相互作用——兼论形变压力	1
参考文献	12
1.2 块状岩体稳定分析中遍有节理问题的解析法	12
参考文献	22
1.3 隧道支护系统设计的模糊类比方法	22
参考文献	30
第 2 章 锚杆和喷混凝土	31
2.1 软弱围岩锚喷支护模拟试验	31
2.2 锚喷支护作用原理和设计原则的探讨	50
参考文献	66
2.3 成昆铁路隧道喷射混凝土衬砌质量调查	66
2.4 Application of Rockbolt-and-Shotcrete Support in China Tunneling	73
2.5 拉拔试验不能反映全长粘结型锚杆的施工质量	82
参考文献	88
2.6 Performance of Fixed Anchor in Ground Anchorage	88
References	96
2.7 隧道工程中的钢纤维喷射混凝土	96
参考文献	105
2.8 喷混凝土技术的应用前景	105
参考文献	115
第 3 章 施工监测和信息化设计	116
3.1 根据隧道围岩位移量测结果推求岩体初始地应力和弹性模量	116
参考文献	121
3.2 隧道开挖引起的围岩变形过程及岩体变形模量的反分析	121
参考文献	130
3.3 隧道工程监测和信息化设计原理	130
参考文献	202
第 4 章 隧道工程的技术进步	204
4.1 我国隧道工程的技术进步	204

参考文献	215
4.2 To promote technical exchanges and co-operation in tunneling technology	216
4.3 岩石力学要植根于工程实践的土壤中	220
4.4 对隧道工程技术若干问题的质疑	221
参考文献	229
第 5 章 21 世纪的隧道工程	230
5.1 隧道工程中值得重视的 2 个问题	230
参考文献	235
5.2 浅埋矿山法地铁隧道衬砌结构防水	235
参考文献	237
5.3 再谈隧道衬砌水压力	238
参考文献	244
5.4 隧道衬砌冻胀压力问题初探	244
参考文献	253
5.5 关于高速铁路隧道设计参数	254
参考文献	267
5.6 车速为 160 km/h 和 200 km/h 铁路隧道设计参数的研究	267
参考文献	274

第 1 章 围岩与支护

1.1 围岩与支护结构物的相互作用

——兼论形变压力*

1.1.1 问题的提出

隧道的开挖在地层中形成了新的空间,这就破坏了地层在初始地应力状态下的平衡,使围岩应力重新分布,引起围岩变形,破坏和坍塌。通常要修建支护结构物(例如混凝土衬砌)来控制围岩的变形,防止围岩的破坏。或把要坍塌的岩块支承住,以保证隧道的安全施工和正常使用。支护结构物的设计是隧道设计的主要内容。

地面结构物的设计通常归结为确定结构物的支承条件(约束条件),然后把它置于某一既定的荷载的作用下,运用结构力学方法对其进行强度、刚度和稳定性计算,从而确认其安全度。

隧道支护结构物现行的设计计算方法基本上袭用了设计地面结构物时所采用的这种“荷载—结构物”概念,其要点是:

(1) 把支护结构物与围岩看成是相互作用的两个方面,认为它们之间的相互作用表现为:围岩产生一个“主动荷载”(通常被称为“山体压力”)作用在支护结构物上;与此同时,围岩对支护结构物在主动荷载作用下所产生的变形具有约束作用,这种约束作用用弹性地基所提供的“被动抗力”来表达。按照这种概念,在计算支护结构物时采用如图 1.1.1 所示的图式。

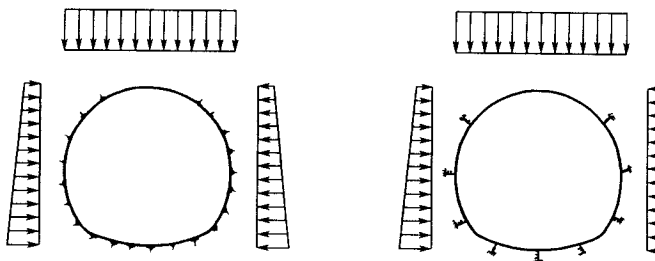


图 1.1.1 现行设计计算方法所采用的图式

(2) 认为作用在支护结构物上的“主动荷载”(山体压力)纯粹是由于围岩中坍塌下来的岩块的重量所引起。岩块的坍塌是支护结构物受力的唯一原因。在设计时采用隧道开挖后不加支护情况下围岩所可能坍塌下来的全部岩块的重量来计算山体压力。

在地下工程的实践中发现,大多数情况下,地下洞室开挖后围岩的坍塌并不延伸到地表。即使不加支护,围岩的坍塌也是有限度的。当这种坍塌致使洞室形状改变到一定程度时将不再发展,而在围岩中建立起新的平衡。这就是说,如果不加支护,洞室开挖后围岩力学形态将经历“平衡—变形、破坏、坍塌—新的平衡”的过程。亦即围岩通过运动自身建立起新的平衡的过程。这种过程的最终产物就是人们熟知的“坍塌拱”。

* 1978 年 9 月油印第 1 稿;1979 年 1 月油印第 2 稿;原题:“支护结构物的设计与山体压力问题”。

有不少人正确地总结了这种规律,并力图建立一些简单的数学公式来描述不加支护情况下围岩可能坍塌的范围,即坍落拱的形状。

M·M·普洛托季亚可诺夫从松散介质的极限平衡出发,认为坍落拱呈抛物线状,其高度为:

$$h = \frac{b}{f}$$

式中 b ——隧道跨度之半;

f ——取决于岩体性质的一个系数。

我国《铁路隧道设计规范》则根据各类围岩中的 200 多个坍方资料,用数理统计方法加以整理。从而得出计算各类围岩中坍塌高度的经验公式:

$$h = 0.45 \times 2^{6-S} (0.5 + 0.1B_t)$$

式中 B_t ——隧道跨度;

S ——围岩类别。

坍落拱的形成,充分说明了围岩的“自承”能力。根据这一点,人们很自然地想到:只要支护结构物能把坍落拱范围内可能坍塌下来的全部岩块支承住,使之不落入洞内,就能保证隧道的安全使用,围岩也不会继续坍塌。支护结构物现行设计方法取坍落拱范围内的全部岩石的重量来做主动荷载就是从这一点出发的。

这种建立在“坍落拱”理论基础上的现行设计方法从一定角度上反映了支护结构物同围岩之间的相互关系和支护结构物的作用原理。但这种设计方法的采用并不意味着人们对围岩和结构物之间关系认识过程的终结,也并不意味着人们在利用围岩的自承能力,合理地设计支护结构物方面已经取得自由。

通过对已成隧道衬砌工作状况和山体压力的调查、量测发现,按上述原理对衬砌所进行的计算,其结果与隧道衬砌的真实工作状态常常很不相符合。尤其是,在对锚喷支护进行研究的過程中也发现现行的设计理论不能说明这种新型支护的作用原理。这特别表现在以下两个方面:

(1) 衬砌变形,破坏的实际情况和山体压力的量测结果表明,支护结构常常受到强烈的水平方向的侧向荷载的作用。特别是在软弱围岩中,由于这种荷载的作用,衬砌会在拱腰及边墙等处产生拉裂或剪切破坏^[1]。而现行设计理论所考虑的山体压力则主要是作用于拱部的垂直压力。

(2) 工程实践表明,支护结构物的施作时间及结构的刚度对其静力工作条件有很大的影响。施作及时并具有一定柔性变形特点的薄衬砌(如锚喷支护)常常可以成功地取代现浇混凝土厚衬砌,有时具有更强的支护能力。现行设计原理则认为作用在支护结构物上的山体压力的大小和分布与支护自身的特性无关。基于这种认识,显然会得出衬砌越厚越安全的结论。

因此,在很多情况下,运用现行的方法并不能正确地反映围岩与支护结构物的相互关系及支护结构物的作用原理,并不能正确、可靠地设计支护结构物。这就提出了对现行的山体压力计算及支护结构物设计理论进一步探讨的必要。

1.1.2 山体压力的两种表现形态——松散压力和形变压力

现行设计理论把岩块的坍塌看成是支护结构物受力的唯一原因。并且根据隧道开挖后不加支护情况下可能坍落下来的全部岩块的重量来计算山体压力。这样做,实质上是认为洞室

开挖后围岩的稳定主要是靠坍塌致使洞室形状改变后自行取得的。支护结构物在围岩的变形、松散和坍塌面前“无能为力”,只能消极地等待着围岩在坍塌后自行出现的平衡,支护结构物的作用仅仅在于将可能坍塌下来的岩块支撑起来,使之不落入洞内。这就是说人们只能通过坍塌拱的形成来利用围岩的自承能力。

这种想法对于模注混凝土衬砌一类传统支护结构形式来说具有一定的道理。因为这类结构物与围岩往往难以紧贴,无法有效地控制围岩的变形和破坏,制止围岩的坍塌。相反地,只要当坍塌下来的岩块压在支护结构物上以后,支护结构物才能“吃劲”,才能受力。因而,在一定程度上可以认为这类支护结构物施作后,围岩力学形态的变化仍然如同未加支护时那样是自由的。因而推断:随着时间的增加,最后作用在衬砌上的荷载可以发展到等于坍塌拱范围内部岩体的重量。

这样想,是否普遍地符合实际情况呢?

实际情况是,洞室开挖后,围岩的坍塌要经历一个过程,只有当围岩的变形发展到一定程度时才会出现坍塌。坍塌乃是变形发展的结果。那么,我们能不能用支护结构物在围岩变形的过程中“主动”地控制这种变形,防止围岩的松散和坍塌,从而保证围岩的稳定,而不是“消极地”等待着坍塌以后围岩自行取得的稳定呢?

锚喷支护的出现提供了这种可能。锚喷支护施作及时。特别是喷混凝土,几乎可以在开挖后“立即”施作。同时,喷层同围岩又紧密贴合。洞室开挖后,及时地施作锚喷支护,可以使围岩的变形不再自由发展,而是在喷层和锚杆的约束下发展,支护结构物(喷层、锚杆)在同围岩的共同变形过程中对围岩提供支护反力。这就有效地控制了围岩的变形,阻止了坍塌的发生,使围岩取得稳定。在这种共同变形的过程中,支护结构物亦将受到来自围岩的挤压力,这种挤压力并不是坍塌岩块的重量所引起,而是由于围岩的变形所引起,是在支护同围岩的共同变形过程中对支护结构施加的,与由坍塌岩块重量所引起的“松散压力”不同。我们把它称为“形变压力”。

其实,这种由支护结构物同围岩的共同变形所产生的“形变压力”不唯在采用锚喷支护结构时有可能产生,在采用一般支护结构时也可能产生。例如模注混凝土衬砌的情况下也常常是存在的,因为在大多数情况下,支护结构物是在围岩尚未坍塌时施作的。

对于较坚硬的岩体,洞室开挖后围岩变形释放的过程一般很短,往往在衬砌施作前就基本释放完毕。由于地质结构面的相互交割或由于爆破影响会在围岩表面一定范围内形成松动、离层和将要坍塌的岩块。模注混凝土衬砌做了以后,由于同围岩不密贴,不能阻止岩块离层和松散的继续发展,时间一长便逐渐坍塌在衬砌背后,形成松散压力。

而软弱围岩一般呈现一定的塑性变形和流变特性。洞室开挖后,围岩变形的发展会持续较久的过程。当采用模注混凝土衬砌支护围岩时,由于顶替临时支护(木支撑)时扰动围岩以及由于衬砌同围岩不密贴引起背后坍塌会带来松散压力。而当这种坍塌发展到一定程度,衬砌背后被坍塌的岩块填满后,围岩的继续变形会对衬砌产生挤压,形成形变压力。随着围岩变形的逐渐发展,衬砌所受的形变压力渐大,衬砌对围岩所提供的支护反力亦渐大,从而使围岩的变形基本上稳定下来。因此,在软弱围岩中衬砌受到的荷载乃是形变压力和松散压力的综合。

工程实践证明,这种形变压力是确实存在的。例如,成昆铁路上的儿子湾二号隧道穿过断层破碎带。在通车后发现边墙内鼓侵入净空 30~50 cm,致使衬砌严重开裂。裂缝宽度达 3~5 cm。整治时凿去衬砌后发现背后的岩体安好,并无坍塌。这说明致使边墙开裂

的山体压力确实并非由于坍落下来的岩块引起的,而是由于围岩同结构物共同变形引起的形变压力(图 1.1.2)。

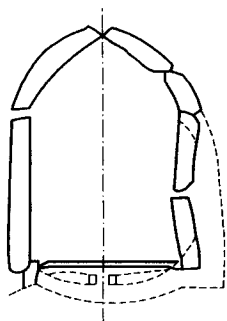


图 1.1.2 几子湾隧道衬砌开裂情况

陕西建筑科学研究所曾在黄土隧道中,用测力环和压力盒量测了衬砌所受的山体压力^[2]。相应地,用引伸仪量测了围岩内部若干点上的位移。量测结果表明。山体压力随时间而渐增,没有“突变”现象。而且,其增长规律与围岩变形随时间而增长规律极为吻合。如将量测到的各时刻山体压力平均值 P_t 除以 100d 时的山体压力平均值 P_{100} 得到一个无量纲量 $P_q(t) = \frac{P_t}{P_{100}}$;

同时,将各时刻测得的围岩变形(例如围岩中各点垂直位移平均值 Δ_t 除以 100d 时的变形 Δ_{100} 也得到一个无量纲量 $\Delta_q(t) = \frac{\Delta_t}{\Delta_{100}}$ 。结果发现,曲线 $P_q(t)$ 与 $\Delta_q(t)$ 极为吻合,它们都能以相当

高的相关系数用曲线 $q = \frac{t}{t_0 + t}$ 来拟合(图 1.1.3)。

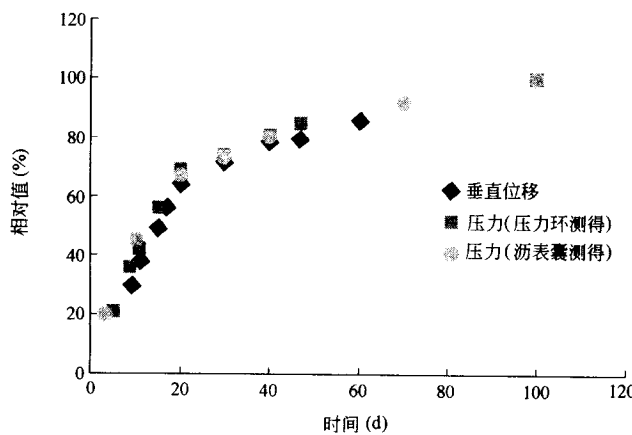


图 1.1.3 山体压力及围岩变形随时间增长曲线

这说明,在这种情况下。山体压力并不单纯由坍落下来的岩体(土体)的重量所引起,而与围岩的变形有密切的联系。或者说主要地由围岩与衬砌的共同变形情况所决定,是随着变形的发展而发展的,属形变压力。

地下结构的一些设计理论把山体压力仅仅理解为围岩中坍落下来的岩块的重量,并采用不加支护时可能坍落的全部岩块的重量来进行计算。实际上,这种由围岩中坍落下来的岩块重量所引起的对支护的作用——“松散压力”,仅仅是山体压力的表现形态之一。除去松散压力外,尚存在着由于围岩与支护结构物的共同变形而对支护结构物产生的挤压作用即形变压力(图 1.1.4)。

形变压力乃是山体压力的另一种表现形态。

以往对软弱围岩中的衬砌破坏形态的一些调查结果之所以同传统的设计理论分析计算出来的结果大不相同,原因之一是由于在考虑结构物的荷载条件时,没有注意到形变压力和松散压力这两类不同形态的山体压力的不同特点。特别是没有把形变压力的作用全面正确地加以考虑。

人们在评论“普氏”理论时,往往围绕着松散介质假定的片面性以及从极限平衡概念出发

所推导出来的坍落拱形状与实际坍塌情况是如何不符合进行一些抨击。而没有从山体压力的两种不同表现形态这个角度指出这种理论的局限性。普氏理论所描述的“山体压力”，实际上仅仅是松散压力，至于在建立物理力学模型时把岩体看成何种介质：是松散体、连续体或是块体，是弹塑性体还是流变体，则要根据具体问题具体分析。普氏把岩体看成是松散体，并用要极限平衡概念去推导坍落拱的形状，从一定的角度揭示了围岩的坍塌规律。当然，这种假定有局限性，正像采用连续体假定，块体假定等也有局限性一样。

用普氏公式来计算具体围岩在不加支护情况下最终坍落高度，有一定的近似性，有时偏大，有时偏小。正如用《铁路隧道设计规范》建议的坍方公式来计算围岩在不加支护情况下最终坍落高度也有一定的近似性一样，是可以理解的。

形变压力和松散压力这两种形态的山体压力形成的原因不一，本质不同，呈现着不同的特点：

(1) 松散压力既是坍落岩块的重量所起，因而它一般以垂直方向为主，作用部位主要是在拱部，作用于边墙的水平方向的侧压力乃是由于侧向部位松动岩块向隧道内坍落所引起，在量值上比较小。在隧道底部，则不会产生松散压力。传统的隧道衬砌断面其主要特点是“头重脚轻”。虽然在软弱围岩地层中采用了仰拱，但其矢跨比小，断面薄弱，而且和边墙的连接很不顺滑。这种衬砌断面形式适应了松散压力的上述特点。这种衬砌断面在我国广泛采用其原因是人们对衬砌结构的荷载的认识囿于松散压力概念。隧道裂损和病害之所以集中在隧道底部是同这种断面形式有关的[图 1.1.5(a)]。

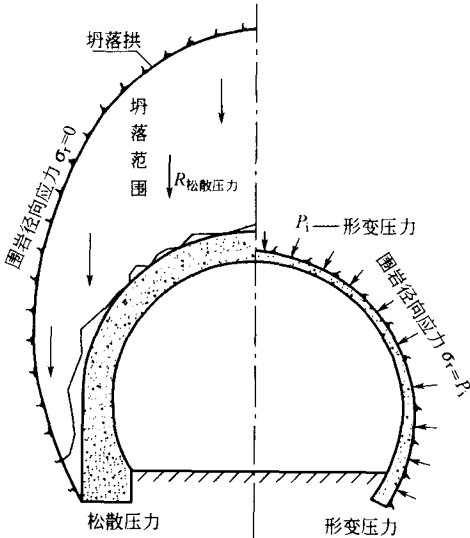


图 1.1.4 形变压力和松散压力

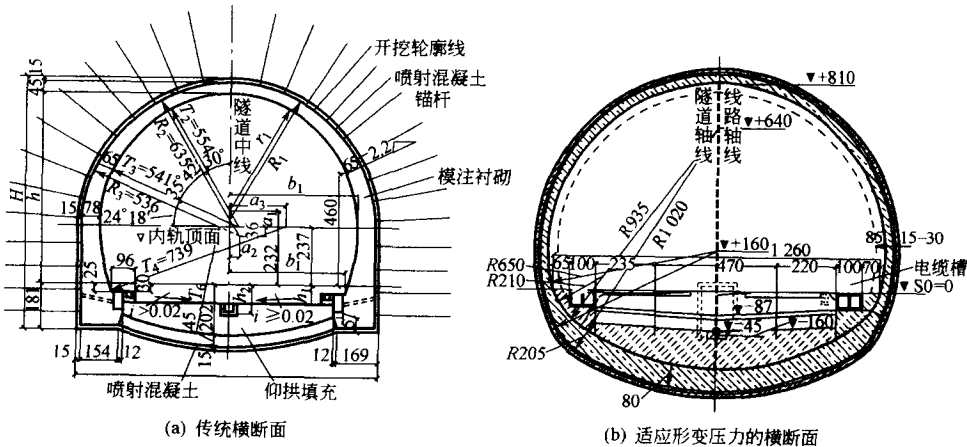


图 1.1.5 两类衬砌横断面

形变压力的方向和分布则主要取决于支护结构物同围岩的共同变形规律，因此，压力的方向并不一定以垂直方向为主，作用的部位亦不一定仅在拱部。在边墙，甚至在隧道底部也可能产生。很多情况下，水平方向的形变压力常常十分显著。压力盒所量测到的侧向山体压力常

常较大。在已成隧道也经常观察得到衬砌在强烈的侧向荷载作用下发生的破坏现象。在很多情况下这主要是形变压力作用的结果。我们用模拟试验也证实,在一定的初始地应力条件下,在围岩与支护的共同变形过程中,支护结构物所受的山体压力有时确实是以侧向为主。相应地,衬砌的破坏也是从侧墙开始的。为了适应形变压力的特点,必须修改衬砌横断面的形状[图 1.1.5(b)]。

(2) 从松散压力的概念出发,可以把不加支护情况下围岩可能坍塌下来的全部岩块的重量作为支护结构物的荷载。这种荷载的大小显然与支护结构的特性无关。不论采用何种支护结构物,计算所得的荷载都是一样的。

而形变压力既然是支护结构物与围岩共同变形的产物,那么它的大小和分布同支护的变形特性,即支护的刚度密切相关,并且同支护施作的时间亦有关。支护刚度的改变可以引起作用在其上的形变压力的改变。为了说明这个问题,可举一个极端情况作为例子。倘若我们在洞室开挖后立即施作一个与围岩很密贴的衬砌,而这个衬砌的刚度极大,以致完全阻止了围岩变形的产生,此时可以看成相当于围岩中挖掉一块岩体以后又立即填进去一块同样的岩体,即初始地应力状态并未得到改变。这样,传到这个刚度极大的衬砌上的荷载应该等于初始地应力,是很大的。因此,这个衬砌的施作虽然避免了松散压力的产生却招来很大的形变压力(图 1.1.6)。

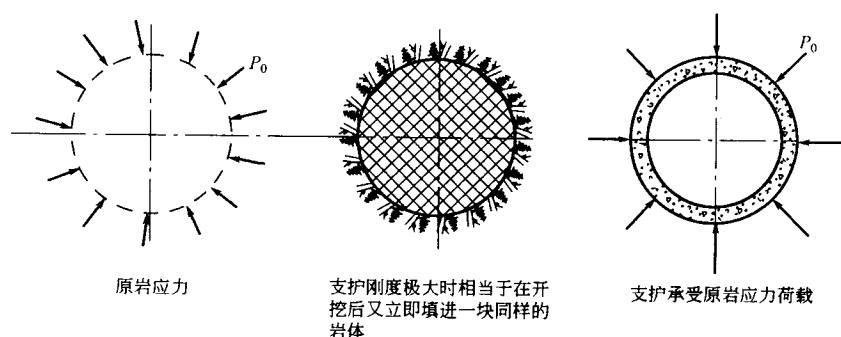


图 1.1.6 支护结构物刚度极大的情况

如果我们施作的支护结构物不但及时、密贴,而且具有一定的柔性,则情况就大不一样。衬砌施作后并不完全阻止围岩的变形和岩体应力重分布的发展,而是让衬砌与围岩一起产生一定量的共同变形,围岩在这种共同变形中取得稳定。此时,由于围岩产生的卸载作用而使得作用在支护结构物上的形变压力大为降低。

因此,必须合理地选择支护结构的刚度:一方面要使结构物具有一定的强度,以使对围岩的变形有足够的约束作用,有效控制围岩的变形,防止因岩体破坏和坍塌而形成松散压力;另一方面必须使结构物具有一定柔度,以充分利用岩体的卸载作用,改善支护结构物的静力工作条件。盲目加大衬砌厚度以求提高支护结构物的安全度的作法是不适宜的。

此外,合理地选择支护施作的时间,对改善支护结构的受力条件,增大安全度是有利的。例如可采用“新奥法”(NATM)所推荐的双层衬砌。第一层衬砌(喷混凝土)施作后,间隔一段时间,让围岩同柔性的薄衬砌一同产生一定量的变形,然后再施作第二层衬砌,在埋置较深的,初始地应力量值较大的软弱围岩条件下,采用这种支护方法能取得好的效果。

1.1.3 关于“主动荷载”和“被动抗力”

在讨论了山体压力的两种表现形态以后,我们会发现另一个问题:现行设计理论把支护结构同围岩之间的相互关系用“主动荷载”和“被动抗力”两个概念来表达,这种处理方法是不十分严谨的。引入“被动抗力”概念旨于考虑围岩对支护结构变形的约束作用,或者说考虑围岩与支护结构的共同变形。但是现行设计理论囿于松散压力的观念,将这种共同变形仅仅理解成是由于“主动荷载”——坍落岩块重量所引起的一种“被动”效果。按照这种理解,如果不存在坍落岩块,支护与围岩的共同变形就不存在了。事实上,在形变压力存在的情况下,围岩与支护结构物之间的这种共同变形并不单纯是松散压力的作用所引起的“被动”效果,而是初始地应力重分布引起的结果,是“主动”的。

因此,我们认为不必再把围岩与支护结构之间相互关系区分为“主动荷载”和“被动抗力”。“山体压力”这个术语不应被理解成为“主动荷载”,而应该将围岩与支护结构物之间的相互作用完全地包括进去。它可能既包含有松散压力,又包括形变压力,既包括现行设计理论所理解的“主动荷载”又包括所谓的“被动抗力”。或者说“山体压力”这个概念应该被理解成围岩和支护结构物二者界面上的接触应力。

值得指出的是,用压力盒测得的山体压力正是这种接触应力。它并不是现行设计理论所理解的“主动荷载”。既然在“山体压力”中围岩与支护结构物之间的相互关系已“完全地”得以反映,那么如若山体压力一经确定,就可以“抛开”围岩用图 1.1.6 所示的图式对支护结构物进行计算,无须如同图 1.1.1 那样将弹性地基的约束条件反映在在计算图式中。

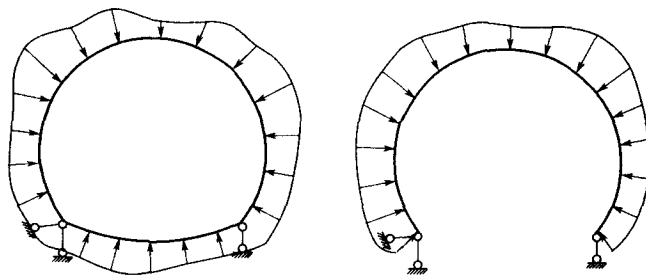


图 1.1.7 支护结构的计算图式

1.1.4 关于支护结构物设计的两个途经

最近十几年来,以锚杆—喷混凝土支护为代表的新型支护技术发展很快。与传统的旧式支护结构(木支撑,模注混凝土衬砌等)相比,这类新型支护结构的重要特点是它与围岩结合紧密,共同变形,难分彼此。例如,喷混凝土层乃和岩面粘结,贴合在一起,不象模注混凝土衬砌那样,在衬砌和围岩之间常有回填物的阻塞或留有空隙;锚杆更是一种装入岩体内部的构件,采用灌浆锚杆相当于在围岩内部配置钢筋。

于是,人们就开始考虑:在设计支护结构物时是不是一定要从“荷载—结构物”的观点出发,把支护结构物和围岩看成是相互对立的两个方面,亦即把围岩看成是产生荷载的来源。把支护设施看成是承受荷载的“结构物”呢?是不是一定要引入“山体压力”这样一个概念来反映支护与围岩之间的相互关系呢?可不可以把二者当作一个共同作用的整体,把支护结构物看成是这个整体的某种边界条件,认为支护结构物的修建相当于给岩体提供某种边界条件,从而

通过检算洞室开挖后围岩和支护结构共同体中的应力分布和变形情况,确认围岩的稳定性和支护结构物的安全度呢? 工程地质学和岩体力学的发展,高效率的计算工具电子计算机的采用提供了这种可能。下面介绍国内某单位所做的一个算例^[3]。

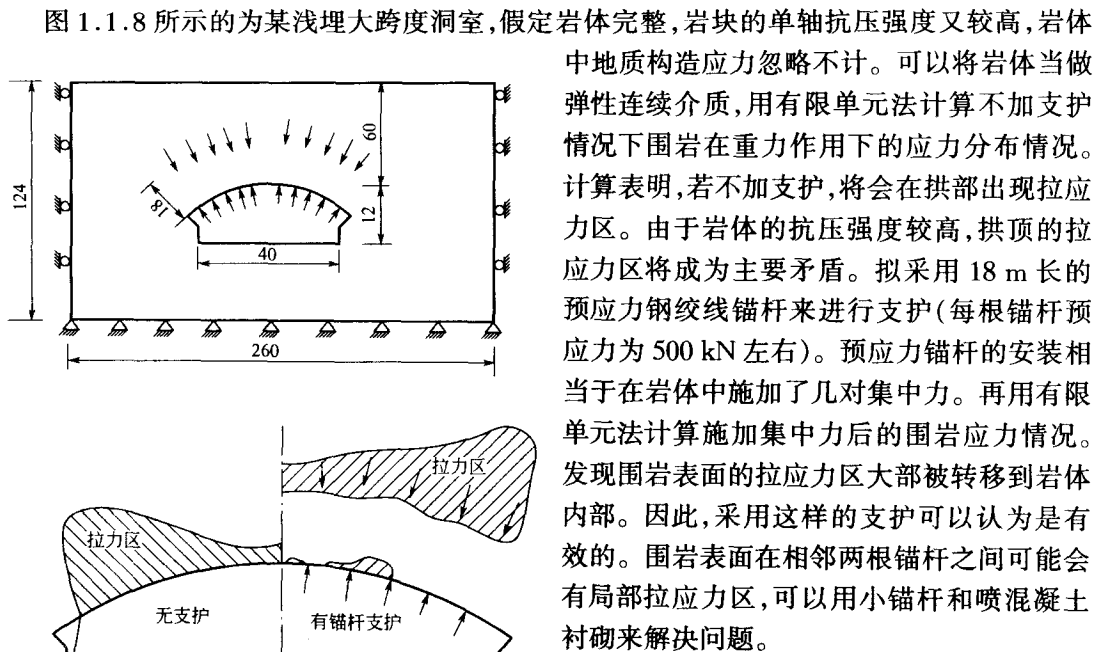


图 1.1.8 预应力锚杆支护大跨度洞室

架。如还安装有不加预应力的锚杆,则可以增设“杆单元”。

计算时,首先根据测试结果或通过有限单元计算确定围岩中各点的初始地应力 $\{\sigma_0\}$,根据初始地应力计算开挖边界处由于洞室内开挖而引起的“释放力”。然后,计算在释放力作用下的“释放应力” $\{\sigma'\}$ 及相应的位移 $\{u'\}$,岩体中的应力即为:

$$\{\sigma\} = \{\sigma_0\} + \{\sigma'\}$$

支护结构(喷层和锚杆)中的应力及位移则仅由洞室开挖后产生的“释放力”所引起,即:

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} \quad \{u\} = \{u'\}$$

通过这种计算,就可以了解围岩的稳定性以及支护结构物的安全度,从而正确地设计支护结构物。

在上面这两个例子中,支护结构物同围岩是作为一个整体来考虑的,不再将它们分成相互对立的两个方面,从而无须引入“山体压力”概念。

“共同作用”的概念在理论上是合理的。隧道中的支护结构物本来就是和围岩结合而存在的。围岩的稳定本来就是支护结构物和围岩的共同作用中取得的。这种从围岩同支护结构物共同作用概念出发进行设计与从“荷载—结构物”概念出发进行设计,成为隧道支护结构物设计的二个不同途径。