



“十三五”国家重点图书出版规划项目
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

矿山法隧道关键技术

Key Techniques of the Tunnel by Mining Method

关宝树

编者

围岩篇

地下水篇

初期支护篇

衬砌篇

施工技术篇

信息化施工篇

维修管理篇



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



“十三五”国家重点图书出版规划项目
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

矿山法隧道关键技术

Key Techniques of the Tunnel by Mining Method

关宝树

编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书围绕隧道结构物的“建造技术”、隧道结构物的“使用技术”展开论述。前者,包括6篇内容,分别对隧道围岩、地下水、初期支护、衬砌(永久支护)、施工技术、信息化施工的关键问题加以介绍;后者,包括1篇内容,对隧道维修管理加以阐述。

本书可供从事隧道工程施工、设计的工程技术人员以及科研人员使用,也可作为相关专业本科生、研究生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

矿山法隧道关键技术/关宝树编著. —北京:人民交通出版社股份有限公司, 2016. 8

ISBN 978-7-114-13150-9

I. ①矿… II. ①关… III. ①矿山—隧道工程—研究
IV. ①TD

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 144537 号

书 名: 矿山法隧道关键技术

著 者: 关宝树

责任编辑: 张江成

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 20.25

字 数: 474千

版 次: 2016年8月 第1版

印 次: 2016年8月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13150-9

定 价: 80.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

据统计,截至2015年底,我国铁路运营隧道已达13400座,总长超过13000km;目前正在建设中的约3800座,总长约8700km。截至2014年底,全国已修建公路隧道12404处,累计长度10756.7km,已建成的各类水工隧洞也超过10000km。这些铁路、公路、水工隧道绝大多数是用矿山法构筑的,因此,对修建隧道的矿山法而言,我们积累的经验教训极为丰富,这对发展矿山法隧道技术具有重要意义。本书以此为重点,介绍矿山法隧道中的一些技术问题,一方面总结我们的基本经验,另一方面借此机会介绍一下国外在这方面的技术现状和发展趋势,进而找出差距,大力创新,把我国矿山法隧道的修建技术提高到一个符合时代要求的水平。

应该说,在采用矿山法构筑隧道方面,我们所积累的技术经验是最丰富的,它在解决一个又一个技术难题中,不断发展和进步。到今天为止,可以说,矿山法已经成为全地质型的施工方法,随着技术的进步,与掘进机法、盾构法一样,也一步一步地向着工厂化施工技术的方向发展。

我们的经验表明,在矿山法隧道的设计、施工和运营管理中要牢记其所面对的两个对象,一个是围岩,一个是地下水。只有把这两个对象搞清楚、处理好,才能解决实质性的问题,因为在设计、施工和运营管理中所出现的问题恰恰表现在这两个对象上。

围岩和地下水,是客观存在的。开挖隧道时,会扰动坑道周边围岩的初始状态或改变地下水流的平衡和流动路径,这是不可避免的。因此,隧道设计和施工,毋庸置疑,就是要想尽办法来解决这两个问题。

从目前已经达到的隧道技术水平来看,解决“围岩”的基本技术,实质上是解决好隧道“开挖”和“支护”的关系。根据围岩的具体情况,隧道开挖和支护的关系,不外乎“先开挖、后支护”和“先支护、后开挖”这两种情况。前者是对具有自支护能力的围岩采用的技术,后者则是对不良围岩或自支护能力不充分的围岩采用的技术。因此,形成了各式各样的组合方法。例如,视围岩情况可形成:先开挖+初期支护,先开挖+强化的初期支护,先(预)支护+后开挖+初期支护,先(预)支护+后开挖+强化的初期支护+二次衬砌等组合方法。这也

是确保隧道及地下工程结构长期稳定性和耐久性的基本对策。

解决“地下水”问题的基本技术,也只有两种,一种是“排”,一种是“堵”,正确地处理“排”与“堵”的关系是解决地下水问题的关键。前者是在容许地下水位降低条件下的技术,后者是在考虑对周边环境影响的技术。

一句话,隧道及地下工程,就是与“水”斗,与“围岩”斗。因此,搞清楚“围岩”和“地下水”的来龙去脉,理顺“开挖”和“支护”的关系,正确处理“排”与“堵”的关系是非常重要的,这就是我们获得的基本经验。

在千变万化的地质和水文条件下,隧道开挖和支护技术也是千变万化的,但不管如何变化,万变不离其宗,总是围绕上述的基本技术而变。

写本书的目的,就是想从上述问题出发,重新整理思路,来谈解决关键问题的方法。有些是“老生常谈”,有的是新的认识。书中的许多资料,都是从国内外一些文献、标准、规范中引用的,大家可以参考相关文献。

本书将围绕隧道结构物的“建造技术”、隧道结构物的“使用技术”展开论述。前者,包括6篇内容,分别对隧道围岩、地下水、初期支护、衬砌(永久支护)、施工技术、信息化施工的关键问题加以介绍;后者,包括1篇内容,对隧道维修管理加以阐述。

本书不是全面阐明矿山法隧道技术的各个方面,而是针对矿山法隧道设计、施工、维修管理中的关键问题展开的,例如:在现有的技术水平上,如何提高混凝土二次衬砌的耐久性,在可能发生大变形的围岩中,如何不让大变形发生,以及如何通过“数据管理”改进隧道的设计、施工及维修管理的现状等问题。目的是提高我们现行的隧道设计、施工、维修管理的技术水平,以满足不断提高的隧道工程建设的需求。

本书所涉及的问题,在十年前我写的《隧道工程设计要点集》、《隧道工程施工要点集》、《隧道工程维修管理要点集》及《软弱围岩隧道施工技术》都有所论述,也可以说是这四本书的补遗,特别补充了近几年矿山法隧道技术发展的一些概况。“它山之石,可以攻玉”,了解其他国家在隧道工程中的一些做法和研究进展,对我们也是很好的启发。

有些拙见,可能会引起一些异议,希望大家关注并给予指正。

关宝树

2016年6月于北京

目 录

- I 围岩篇 /1
 - 一、围岩的基本概念 /2
 - 二、隧道开挖后的围岩动态 /4
 - 三、隧道开挖后周边围岩的稳定性 /8
 - 四、设计、施工中应该关注的围岩——软弱围岩及特殊围岩 /11
 - 五、掌子面前方围岩探查技术——超前钻孔技术的应用 /12
- II 地下水篇 /25
 - 一、地下水控制技术的基本观点 /26
 - 二、隧道涌水及其分类 /27
 - 三、涌水(地下水)处理的基本目标 /29
 - 四、排堵结合——控制地下水的最有效方法 /39
 - 五、防水型隧道 /44
- III 初期支护篇 /55
 - 一、初期支护的功能 /56
 - 二、喷混凝土 /58
 - 三、锚杆 /81
 - 四、钢架 /98
- IV 衬砌(永久支护)篇 /109
 - 一、复合式支护结构中衬砌功能的概念 /110
 - 二、衬砌的耐久性 /111
 - 三、提高衬砌耐久性的基本措施 /114
 - 四、喷混凝土永久支护 /118
 - 五、纤维混凝土衬砌 /126

六、中流动性混凝土的应用 /141

V 施工技术篇 /155

一、矿山法隧道开挖方法的演变 /156

二、软弱围岩隧道中开挖断面早期闭合的施工技术 /168

三、构筑衬砌厚度偏差小的二次衬砌 /183

四、大变形的控制技术 /187

五、量力而行,不断提高隧道施工机械化的水平 /200

六、施工的精细化管理 /211

VI 信息化施工篇 /223

一、实现真正的信息化施工的关键是“信息” /224

二、获取“信息”的方法和技术 /229

三、建立为信息化施工服务的数据库 /239

四、隧道信息化施工事例 /246

五、施工信息模型(CIM) /255

VII 维修管理篇 /267

一、隧道维修管理的特点 /268

二、建立“预防管理”的综合维修管理体制 /268

三、“初次检查”的重要性 /271

四、开发易于早期发现隧道构造状态变化的调查、检测技术 /277

五、建立用于“数据管理”的数据库,实现高效、经济的维修管理 /286

六、运营隧道的底部变异和维修管理 /301

参考文献 /313

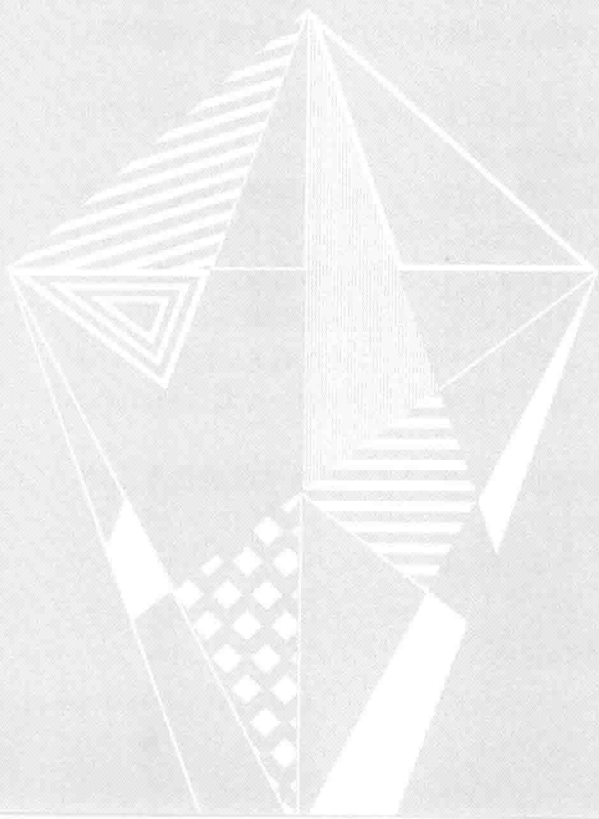
后记 /315

I 围岩篇

隧道工程首先要面对的是“围岩”，因此，无论是施工前、施工中或施工后（使用中）尽可能地搞清楚“围岩”，是非常重要的。这是认识隧道工程技术特性的基础知识，也是隧道工程设计、施工、维修管理中，必须具备的知识。

本篇将集中说明以下几个问题：

1. 围岩的基本概念
2. 隧道开挖后的围岩动态
3. 隧道开挖后围岩的稳定性
4. 设计、施工中应关注的围岩——软弱围岩和土砂围岩
5. 掌子面前方围岩的探查技术——认识围岩的基本技术



一、围岩的基本概念

一般来说,施工前要想搞清楚“围岩”是极为困难的,只能在施工中揭露围岩后,才能进一步加深对围岩的认识。从目前的认识水平看,我们对围岩的认识可以归纳如下。

(1)这里所谓的“围岩”,通常指受到隧道开挖影响范围内的地质体,或者说是受到开挖后应力再分配范围内的地质体,即所谓的**周边围岩**(图 1-1-1)。必须指出,隧道的稳定性决定于隧道周边围岩的稳定性,而周边围岩的稳定性又决定于施工技术及其自身的工程特性。

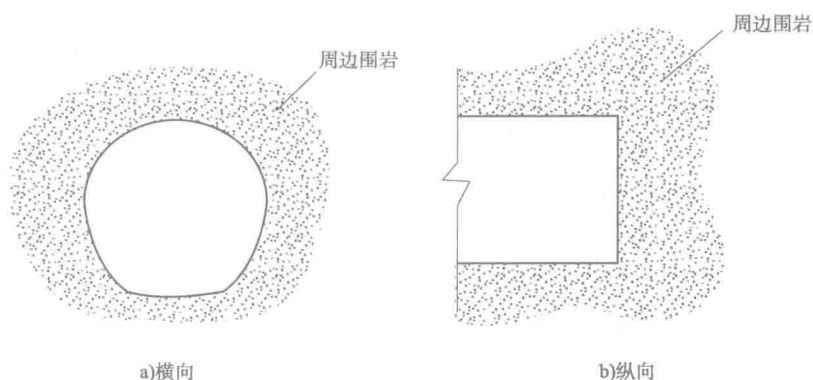


图 1-1-1 隧道周边围岩的概念

我们知道,隧道周边围岩不稳定是无法施工的。只有隧道周边围岩稳定或暂时稳定,施工才有可能。因此,以稳定和利用隧道周边围岩为重点,来规划隧道的设计和施工是隧道工作者追求的永恒目标。

(2)在一般情况下,隧道的周边围岩是三维的,它包括:掌子面、掌子面后方没有支护的横向范围内的围岩,以及掌子面前方一定范围内的围岩(图 1-1-1)。

实质上,周边围岩的稳定性主要决定于掌子面和掌子面前、后方围岩的稳定性。过去我们十分关注隧道掌子面后方横向的影响范围内的围岩动态,初期支护的选定基本上是以此范围的围岩动态决定的。对隧道来说,实质上,掌子面前方围岩和掌子面自身的稳定性更为重要。必须强调的是:掌子面也是一个支护构件,开挖过后它起着极为重要的支护作用。它的稳定与否,至关重要。施工中出现的许多问题,多数与掌子面的自稳性有关,因此,维护掌子面的稳定是非常重要的。这也是当前隧道施工技术发展的重要领域之一,也是预支护技术有了突破性发展的主要原因。

(3)除特殊构造的围岩条件外,一般来说,隧道开挖对周边围岩的影响范围是有限的。其范围与周边的地质条件和隧道的开挖方法有极大的关系,但大致在 $(1 \sim 3)D$ (D 为隧道开挖宽度)(图 1-1-2)。从理论上说,周边围岩的范围是由隧道开挖后的应力重分布的范围决定的,在此范围外应力仍然处于原始状态。从地质构造上说,周边围岩的范围是由其构造、岩类特性,特别是开挖后的动态所决定的,其范围与围岩动态密切相关。

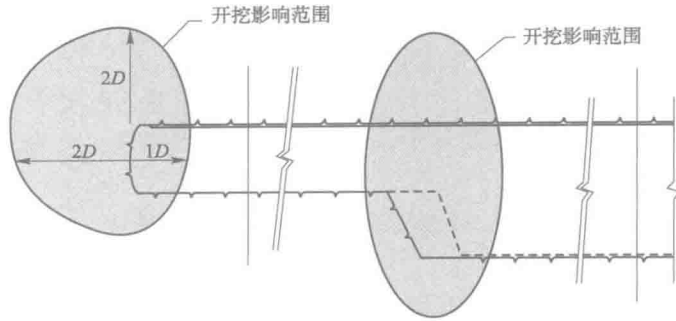


图 1-1-2 隧道开挖和围岩扰动(OGG, 2007)

(4)在通常情况下周边围岩是隧道结构的主体,也就是说,矿山法隧道结构的主体是周边围岩。众所周知,天然的洞穴都是无支护的,它可以依靠自身的支护能力(以后称为自支护能力),存在几百年、几千年甚至几万年。这说明,围岩本身是有“自支护”能力的,也就是说,围岩可以自己支护自己。实质上,从地质条件看,具有自支护能力的围岩,占大多数,而只有少部分围岩的自支护能力不足或缺乏自支护能力。因此,在隧道设计施工中,对良好围岩来说,爱护和“利用”围岩、尽可能地减少对周边围岩的损伤,避免围岩过度的松弛,充分发挥围岩的自支护能力,是非常重要的。而对一些缺乏自支护能力或没有自支护能力的围岩,在设计、施工中则应千方百计地采取对策“改造”围岩,提高围岩的自支护能力,显得更为重要。

(5)围岩也是构成隧道主体结构材料。它对矿山法隧道的设计、施工具有重要的、不可忽视的影响。这种材料的特点与其他材料,如金属、混凝土不同,具有潜在的不确定性以及易受施工影响的可变性。因此,通过施工中采取的各种开挖方法(全断面开挖与分部开挖、爆破开挖与非爆破开挖等)和支护方法(初期支护、超前支护以及围岩补强等),来利用和改变围岩作为构造材料的特性“为我所用”,这也是矿山法隧道施工技术发展的趋势。

(6)从设计角度看,围岩也是作用在隧道结构上的“荷载”。任何结构物的设计,都需要有一个明确的荷载。而隧道结构的荷载是什么?理论上是在无支护条件下是开挖后的再分配的应力与围岩强度的关系,在有支护的条件下则是支护与围岩相互作用的结果。因此,它受到支护刚性、围岩刚性、支护设置时间以及施工方法的影响,是很难用一句话说清楚的。但肯定地说,这种荷载(应力)与开挖、支护技术有关,是可变的,也是可以控制的,可大可小。这是隧道结构物的作用荷载的基本特征。因此设计、施工中把可能产生的荷载(松弛、应力)控制在最小限度内,也是发展矿山法隧道技术的一个重要前提。

(7)周边围岩是可以改造的。与其他材料不同的是,其改造过程是在施工过程中完成的。实质上,我们的施工就是利用围岩的这个特性,通过各种方法(如锚杆、注浆)和手段(预支护等),把周边围岩改造成“为我所用”的材料。

(8)围岩的特性是随时间和环境改变而变化的。它的变化可能诱发荷载、材料性能以及围岩承载性能的变化。这种变化虽然是缓慢的,但对使用中隧道的影响不容忽视。

作为一个隧道工程技术人员,要牢牢记住:“结构体—作用荷载—构成材料—时间”“四位一体”是隧道工程的重要的、独一无二的技术特征。因此,也就形成了“充分利用围岩的结

构作用(自支护能力)一尽可能地减小作用荷载的量级—提高围岩作为材料的强度”的技术理念。我们目前采用的各种技术方法,都脱离不了这一理念。

总之,隧道的一切,从规划、调查、设计、施工到维修管理都是由这个特性决定的。这是隧道工程最具特色的、与其他工程截然不同的特性。这个特性决定了隧道工程的设计、施工、维修管理的基本理念。

因此,可以把隧道设计、施工、维修管理的基本理念,归纳为一句话,就是要以“围岩为本”。

以“围岩为本”,不是一句空话,在隧道施工前、施工全过程中、施工后(运营)必须采取各种方法来了解围岩、认识围岩,并通过实践利用围岩、改造围岩,达到“为我所用”的目的。

二、隧道开挖后的围岩动态

隧道开挖后周边围岩的动态,视地质条件、开挖方法等是多种多样的。因此,搞清楚和正确评价开挖后的围岩动态,是解决隧道设计、施工中出现问题最基本的的前提条件,也是我们一直想解决,但到目前还没有完全解决的问题。

对围岩开挖后的动态,有许多说法,但多数与围岩分级联系在一起,其中比较通行的,列举如下。

新奥法(NATM)描述的围岩的动态类型(Schubert和Goricki,2004)如表1-2-1所示。

动态类型(Schubert和Goricki,2004) 表1-2-1

序号	基本的动态类型	隧道开挖中潜在的失稳模式/机理的说明
1	稳定的	稳定的岩体,有潜在的小型局部重力引起的掉块或滑动
2	稳定的、潜在的连续面-控制型岩块掉落	深部连续面-控制型,小型局部重力引起的掉块或滑动,偶尔局部剪切失稳
3	浅埋剪切失稳	浅埋,应力-控制型剪切失稳,与连续面和重力-控制型围岩失稳相配合
4	深埋剪切失稳	深部应力-控制型,剪切失稳和大变形
5	岩爆	高应力、脆性岩石和积累的应变能迅速释放引起的突然和猛烈的失稳
6	屈服失稳	狭小间距不连续面的岩石屈服,经常发生剪切失稳
7	在低围压条件下的剪切失稳	潜在的过量超挖,和逐步发展的烟囱型剪切失稳,主要是由缺乏侧压力所引起的
8	松散围岩	无内聚力的干燥(或潮湿)、强烈破碎的岩石或土的流动
9	流动围岩	有高含水量的强烈破碎的岩石或土的流动
10	膨胀	由于岩石的物理-化学反应和产生的岩体体积随时间的增加和水的应力缓和,导致隧道周边围岩向内移动
11	动态的频繁变化	非均质岩体条件下或在岩块充填构造混杂的情况(脆性的断层带)下造成的应力和变形的急剧变化

此外,Martin(1999)、Hoek(1995)等总结地下开挖的动态,给出了图1-2-1所示的10种失稳模式。

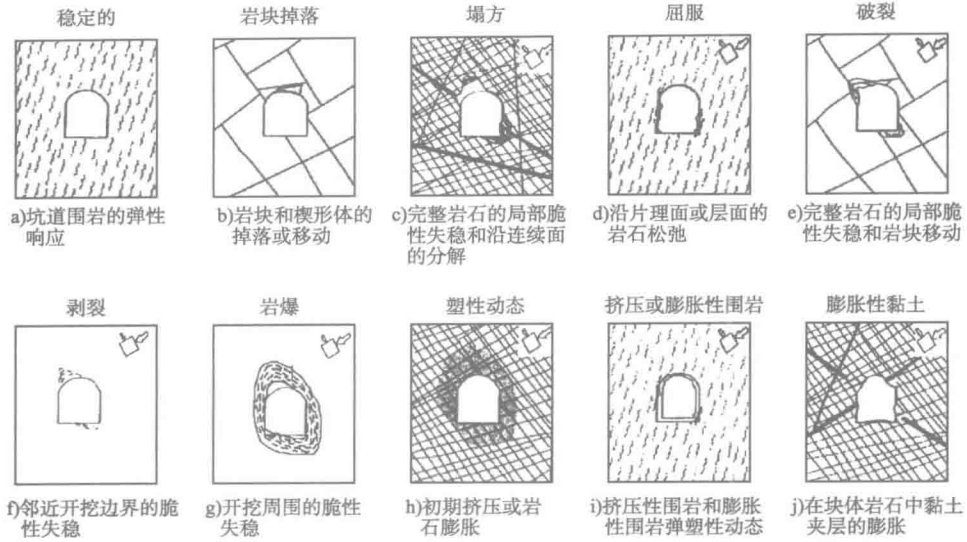


图 1-2-1 地下开挖中的围岩动态类型 (Martin et al, 1999)

表 1-2-2 是根据 Hoek、Brown (1980) 和 Hudson (1989) 的研究成果, 把失稳模式 (不稳定), 包括对地下水的影响分为三大组, 各组可归纳如下:

地下开挖的动态类型

表 1-2-2

动态类型	定义	结论
第 1 组 重力 - 控制型		
a. 稳定的	围岩在无支护条件下稳定几天或更长些	在低、中等埋深条件下的整体的、持久的岩石
b. 岩块掉落	单块	稳定的, 有单独岩块掉块的可能
	多块	稳定的, 有许多岩块掉块的可能 (体积小于 10m^3)
c. 塌方	大量的岩石碎片或碎块 (大于 10m^3) 向净空内快速移动	遭遇高度节理化或破碎的岩石
d. 松散围岩	微粒材料迅速侵入隧道, 直到在掌子面形成一个稳定的斜坡, 自稳时间是 0 或接近于 0	例如在地下水水位以上的中粗砂和砾石
第 2 组 应力 - 控制型		
e. 屈服	隧道表面的岩石成为碎片	在各向异性、坚硬、脆性岩石中发生, 在很大荷载下由于岩石构造变异引起的
f. 应力造成的破裂	在隧道表面逐步破碎成片、块或片帮	由于应力再分配造成片帮和岩爆的时间效应
g. 剥裂	侧壁和顶部的岩片突发的、猛烈的分离	中等和大埋深应力条件下整体、坚硬、脆性岩石, 包括弹出或剥落
h. 岩爆	比片帮来得更为猛烈, 并涉及相当大的体积 (严重的岩爆经常像地震)	大埋深的整体、坚硬、脆性岩石

脆性动态

动态类型	定义	结论	
第2组 应力-控制型			
i. 塑性动态(初期的)	经常伴随连续面和重力-控制型失稳发生的剪切失稳,产生初期变形	位于超应力条件的塑性(易变形的)岩石,经常从挤压开始	塑性动态
j. 挤压	与时间有关的变形,变形在施工期间可能会终止或长期继续,基本上与超应力引起的蠕变有关	超压的塑性,和具有高比例的低膨胀能力的云母矿物或黏土矿物的整体岩石和材料	
第3组 水的影响			
k. 分解形成的松散	围岩逐渐分解成片、块或片帮	一些适度的连贯、易碎的材料解体(崩解),如泥岩和坚硬的裂隙黏土	水化作用
l. 膨胀	母岩	围岩提前进入隧道,由于水的吸附引起膨胀,过程中有时会被误认为是挤压	膨胀性矿物
	黏土夹层或充填物	黏土夹层的膨胀是因水的吸附引起的,这导致岩块的松弛和黏土抗剪强度的降低	
m. 流动围岩	水和固体的混合物迅速从四面八方浸入隧道,包括仰拱	可能发生在地下水水位以下的具有很小或没有内聚力的微粒材料的隧道中	水的影响
n. 浸水	承压水通过开挖的渠道或在岩石中的通道浸入	可能会发生在多孔和可溶性岩石,或沿明显的通道或断裂和节理的路径浸入	

第1组:重力-控制型,大多是不连续性控制的失稳(块体掉落),一旦开挖,在顶部和侧壁预先存在的碎片或块体能够自由移动。

第2组:应力-控制型,由过大应力——即在超过围岩材料的局部强度引起的应力,造成的重力失稳。这种失稳可能发生两种主要形式,即:

(1)具有脆性特性的屈服、片帮或岩爆,即整体的脆性围岩;

(2)具有韧性或变形特性的塑性变形、蠕变或挤压,即整体的、软弱/韧性或连续的松散围岩。

第3组:水的影响。在设计中水压力是一个重要的荷载因子,必须考虑,尤其是在不同种类的围岩条件下。起因于地下水的失稳可能发生在含有大量水的流动性围岩,和能够引发不稳定状态的一些含有某些矿物质的岩石(如膨胀、崩解等)的围岩。水也可以溶解石灰石、方解石等矿物。

近年,在意大利法中,提出了围岩变形与控制的基本理念,形成了意大利法的核心技术,其中把对掌子面前方围岩的变形响应及前方围岩的应力-应变特性分为如图1-2-2所示的3个可能的状态,即:

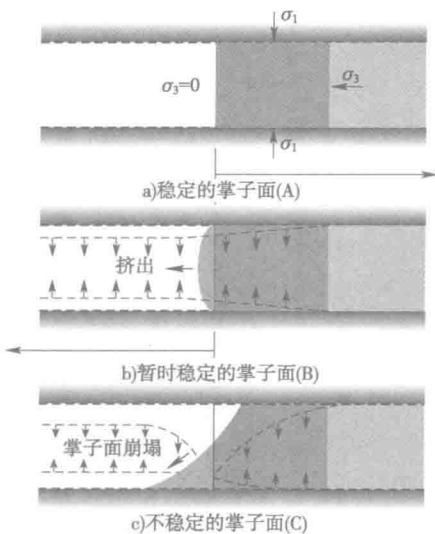


图 1-2-2 掌子面动态的分类

- (1) 稳定的掌子面动态(A);
- (2) 暂时稳定的掌子面动态(B);
- (3) 不稳定的掌子面动态(C)。

这是从围岩三维动态的角度对掌子面前方围岩分类的一个方法。稳定的掌子面动态(A)是自身形成稳定的状态。B和C的动态是属于暂时稳定和不稳定的状态,为使它们处于A的稳定状态,就必须采取事前的约束对策。其判定基准列于表1-2-3。

掌子面稳定性的判定基准

表 1-2-3

判定条件	A	B	C
围岩强度	围岩强度能够保持隧道稳定	围岩强度能够保持围岩暂时稳定	围岩强度小于围岩应力,隧道失稳
拱效应	解决开挖轮廓面形成拱效应	远离开挖轮廓面形成拱效应	不能形成拱效应
围岩变形	变形处于弹性范围内,大小以cm计	变形处于弹塑性范围内,大小以cm计	必须对掌子面前方围岩进行补强,否则掌子面会出现显著的不稳定现象
掌子面状态	这个掌子面是稳定的	掌子面能够维持暂时稳定	必须对掌子面前方围岩进行补强,否则掌子面会崩塌
地下水影响	只要地下水不降低围岩强度,隧道稳定性就不会受地下水的影响	地下水会降低围岩强度,从而影响隧道的稳定性,需要采取排出地下水的措施	必须采取对策把地下水排出,否则会严重影响隧道的稳定性
支护模式	主要是防止围岩劣化和保持开挖轮廓面的稳定	掌子面后方采取传统的约束围岩方法,有时也需要对掌子面前方围岩采取超前约束对策	必须对掌子面前方围岩进行补强,以提供人为的超前约束效应

这种分类的方法,虽然简单明确,具有一定的实用价值,但如何判定掌子面的稳定性仍然是个问题。

依上所述,围岩开挖后的动态,也就是稳定性受到许多因素的影响,是多种多样的,但其外观的综合表现,就是变形(包括掌子面的挤出变形、体积膨胀的变形以及再分配应力的变形等)、掉块、滑移或松弛(动)、流动、崩解等。过去仅仅用“变形”一词是很难概括隧道开挖后的围岩动态。围岩开挖后动态的不同,决定了对应的支护对策和施工方法的不同。

对于某些类型的围岩,动态可以从一个类型发展到另一个类型,如从最初的塑性动态发展为长期的挤压状态。

对于某些类型的围岩,可能发生多个类型的动态,这取决于应力和(或)某些矿物质的含量的大小。如前所述,即使围岩处于整体的、完整的区域,也必须强调和考虑岩块不稳定的风险。

从国内外的矿山法隧道的施工经验看,围岩开挖后的动态,按围岩构造及特性,基本上可按表1-2-4分类。

隧道周边围岩的基本类型及动态

表 1-2-4

围岩	坚硬、软弱,但构造完整的围岩	大、中块状围岩,包括层状围岩	土砂(包括碎块状及断层破碎带等)围岩	特殊围岩(包括挤压性和膨胀性围岩)
围岩开挖后的动态	弹性变形	掉块、松动	松弛、崩塌	挤压性变形,挤入
	塑性变形	滑移	大变形,挤入	膨胀性变形,挤入
	应力突然释放		变形持续时间长	变形不收敛,持续时间长
	掌子面长期稳定或暂时稳定	掌子面基本稳定或暂时稳定	要考虑地下水对开挖后动态的影响	要考虑地下水对开挖后动态的影响
掌子面不稳定			掌子面不稳定	

表 1-2-4 实质上是我国铁路隧道围岩分级的基础,我国铁路隧道围岩分级与周边围岩稳定性、开挖后围岩动态及相应的对策关系可归纳于表 1-2-5。

围岩分级的定性概念

表 1-2-5

围岩级别	I	II	III、IV	V、VI
稳定性	长期稳定	基本稳定	暂时稳定	不稳定
现象及措施	一般不需要支护,仅进行表面防护	毛洞有一定的自稳时间,可能有局部掉块或滑移,必要时采用局部锚杆或喷混凝土支护	自稳时间较短,开挖后围岩发生松弛,初期支护或加强的初期支护基本上可以使变形收敛,无须采用预支护方法	开挖后可能立即崩落,仅用初期支护难以控制变形的发展,需要进行预支护,先行控制可能发生的变形及松弛
与围岩构造的关系	坚硬、构造完整的围岩	大块状、厚层的坚硬围岩或软岩、构造完整的围岩	中块状围岩,包括有软弱夹层的层状围岩	土砂围岩,碎块状围岩,特殊围岩
开挖后的围岩动态	稳定,以弹性变形为主,可能出现岩爆	以局部掉块和弹塑性变形为主	弹塑性变形为主,易发生局部坍塌	松弛、坍塌为主,掌子面挤出变形,极易发生大变形
与支护结构的关系	无须支护,围岩具有充分的自支护能力,为防止围岩风化,可喷砂浆或混凝土防护	构造需要,采用薄层喷混凝土支护,局部掉块可采用随机锚杆支护	采用通用的初期支护或加强初期支护,二次衬砌作为安全储备	预支护、初期支护并重,必要时,二次衬砌承担后期的附加荷载

三、隧道开挖后周边围岩的稳定性

这里所谓的稳定性,通常是指开挖后在一定时间内无支护地段的周边围岩的稳定性。所谓的周边围岩,不仅指开挖面周边横向一定范围内的围岩,也包括掌子面前方(纵向)一定范围内的围岩。隧道开挖后,周边围岩不需要进行特别的处理,而在一定时间内能保持不发生有害变异(例如大变形、崩塌、掉块、挤入等)的自支护能力称为围岩稳定性,也有称之为围

岩自稳性或开挖面自稳性的。

从连续介质力学概念出发,受开挖影响的围岩仅仅是紧靠掌子面的前后方一定距离内的周边围岩。也就是说,以掌子面(指开挖面的正面)为界,可把开挖面分为掌子面前方围岩、掌子面、掌子面后方围岩(图 1-3-1),其应力-应变的变化是三维的。离开此范围以外的围岩,可以按二维的应力-应变状态考虑。

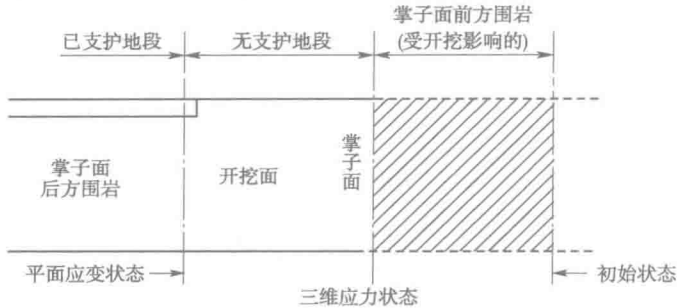


图 1-3-1 开挖面的概念图

因此,在谈围岩稳定性的场合,主要指此范围内的围岩稳定性。

此范围围岩的稳定性,在裸洞的场合,不仅取决于掌子面后方周边围岩(或无支护地段)的稳定性,也决定于掌子面及其前方围岩的稳定性。从工程实际和理论分析可以肯定,在某些情况下,维护掌子面及其前方围岩的稳定性,比维护掌子面后方周边围岩的稳定性更为重要。因此,在软弱围岩场合,把重点放到维护掌子面前方的周边围岩稳定性是非常重要的。

以全断面法为例,按最基本的状态,即侧压系数为 1 的状态,也就是静水压状态的圆形隧道场合的掌子面状况,围岩开挖后的应力分布状况分别示于图 1-3-2。左图表示是通过隧道中心的主应力线,可以看出,在掌子面附近主应力线倾向拱形形状,形成承载拱,由于隧道开挖的应力减少向掌子面深部围岩分配,进而保持稳定,应力分配的范围超过隧道直径以上,同时,拱顶的隅角处产生很大的应力。右图表示掌子面附近的最大剪应力分布,距掌子面一定距离形成承载拱的部分,应力大,掌子面因开挖而松弛,是易于不稳定的部分。实际

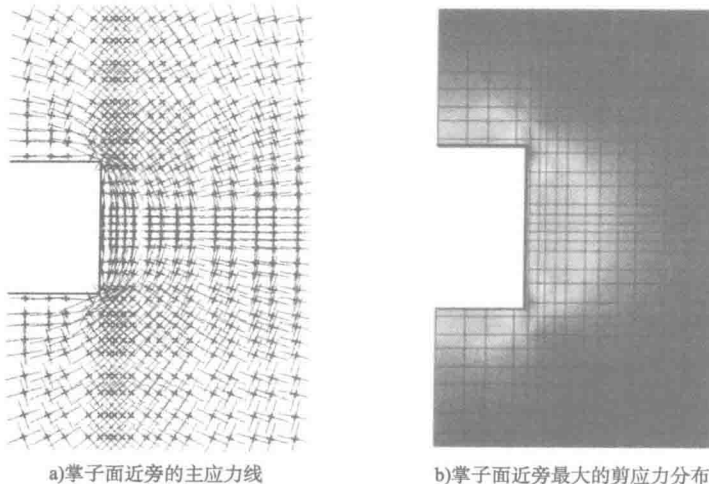


图 1-3-2 掌子面附近的主应力和最大剪应力分布

上的掌子面稳定,如图所示是距掌子面深部的穹拱状部分所保持的,距掌子面深部的围岩部分有称为“围岩岩蕊”的,不让此部分松弛对保持掌子面稳定是非常重要的,这也是形成意大利法的核心技术。

以台阶法施工为例,理论分析说明,隧道开挖扰动了周边围岩的初始应力状态,围绕推进的掌子面周围形成一个灯泡形的三维应力场,这样的应力场示于图 1-3-3。

在隧道掌子面,围绕隧道的应力流在隧道开挖前方成拱形,并沿纵向变化,在离开掌子面一定距离后达到初始应力状态,改变为二维应力状态。围绕坑道的应力扰动程度,主要取决于围岩条件、开挖尺寸、循环长度,其扰动范围大致在隧道掌子面前方达到开挖直径的 2 倍。

为了确保掌子面自稳性,也有人主张从改变掌子面的形状着手,即采用曲面掌子面或斜掌子面。前面的图 1-3-3 是表示直立掌子面近旁的主应力流,但在掌子面处产生穹拱效应,靠近掌子面的穹拱效应流被切断只留有残余部分。此部分,从应力看比形成穹拱的部分小,难以对掌子面稳定性发挥作用,是开挖面受开挖影响而易于松弛的部分,是受重力直接影响而易于不稳定的部分。图 1-3-4 表示掌子面形成曲面场合的主应力流线,围岩内的应力流线与图 1-3-3 的直立掌子面几乎没有变化,从印象上看是很合理的。

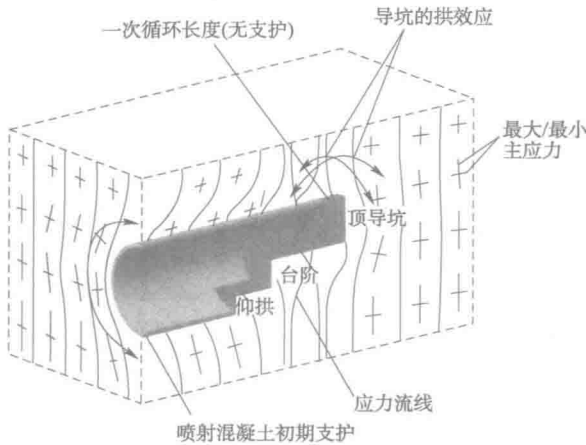


图 1-3-3 隧道周围的应力流(Witke,1984)

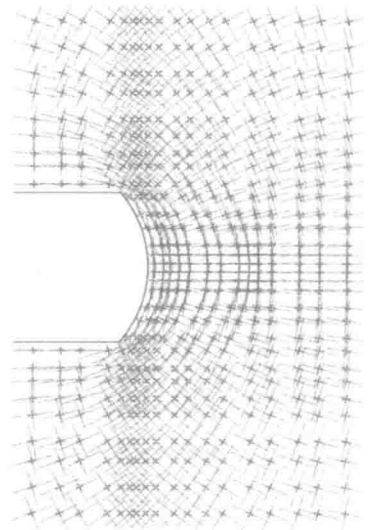


图 1-3-4 曲面掌子面近旁的主应力

图 1-3-5 表示曲面掌子面附近的最大剪应力的状况,与图 1-3-6 比较,应力变化的范围与直立掌子面的情况没有很大的变化,即,曲面掌子面,从应力上看变化不大,对掌子面整体的稳定也没有影响,但可以回避靠近掌子面的不稳定部分,对掌子面稳定是很有利的。

图 1-3-6 表示直立和曲面掌子面的纵向的挤出位移。曲面掌子面的位移比直立掌子面的位移小,这说明曲面掌子面没有包括掌子面附近的不稳定部分的位移。从这一点看,曲面掌子面是有利的。因此,从确保掌子面稳定性的观点出发,比直立掌子面容易。特别是,在掌子面周边的应力超过围岩强度的场合,掌子面的维护更为重要。但从施工角度看,目前的施工机械开挖曲面掌子面有一定的困难,因此,很少采用曲面掌子面。但近期的一些研究表明,开发曲面掌子面的技术已经受到关注,并在进行试验施工。