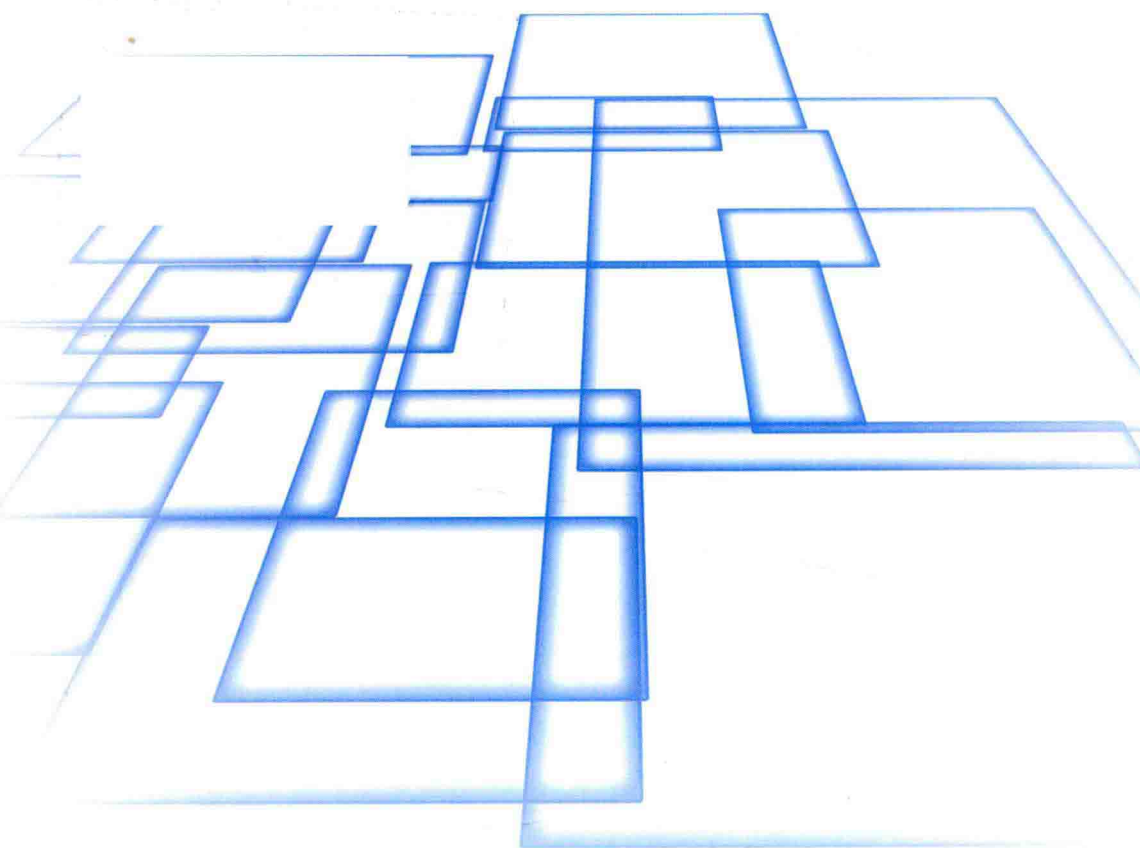




结构面及深部高应力影响下 隧道破裂过程及机理

贾 蓬 王述红 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

结构面及深部高应力影响下 隧道破裂过程及机理

贾 蓬 王述红 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2018

内 容 提 要

本书系统叙述了作者在浅部结构面控制型和深部应力控制型隧道破裂机制方面的研究成果。全书共分为 8 章, 主要内容包括 RFPA 数值方法在隧道稳定性研究中的应用、层状岩体隧道破裂机制、节理岩体隧道的破坏机理、隐含断层对隧道稳定性的影响、深部隧道典型破裂模式的发生机制、深部隧道围岩分区破裂机制和影响因素等。

本书可供岩石力学与工程、隧道与地下工程、工程力学、采矿工程等相关领域的科研人员、高校研究生和本科生参考。本书提供的数值试验思路和方法也可作为岩石力学、隧道与地下工程等相关课程开展数值实验教学提供思路。

图书在版编目(CIP)数据

结构面及深部高应力影响下隧道破裂过程及机理/贾蓬,
王述红著. —北京: 冶金工业出版社, 2018. 9

ISBN 978-7-5024-7879-7

I. ①结… II. ①贾… ②王… III. ①隧道施工—研究
IV. ①U455

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 209582 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 徐银河 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7879-7

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2018 年 9 月第 1 版, 2018 年 9 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 10.75 印张; 1 彩页; 208 千字; 161 页

68.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

前 言

由于工程岩体被各种结构面所切割，使得工程岩体的性质具有明显的不均匀性。在浅部围岩中开挖隧道时，围岩的稳定性往往受到结构面控制，常常出现隧道大变形、支护破坏，甚至隧道整体失稳破坏。而近 20 年来，随着包括我国在内的世界许多国家的铁路（公路）隧道、水利水电、采矿及重要的国防工程等开挖深度越来越深，其围岩的力学行为表现出较浅部围岩诸多显著不同的力学特点，工程灾害也更加明显。由于工程岩体及深部地应力场的复杂性，充分认识并了解隧道开挖后的力学响应及围岩的破裂机理，是岩石力学与工程研究的重要内容之一，对于围岩稳定性控制具有重要意义。

由于工程岩体表现出强烈的非均质性、各向异性和非连续性，在深部条件下地应力具有各向异性特征，采用解析的方法显然已经无法满足围岩稳定性分析的需要，现场监测和相似材料模拟试验已成为研究围岩稳定性及其破裂机制的重要手段。然而其不足之处在于，这些方法多数只能给出最终结果，而无法进行破坏过程及演化机理的分析，从而使许多理论与工程分析停留在“结果分析”上。尽管物理模型试验是工程结构破坏的主要研究手段之一，但物理模型试验成本高、周期长，且模型参数难以在有限个物理模型中调整，因此大大限制了物理模型试验在隧道稳定性研究中的应用。更大的困难还在于，许多地质和工程诱发的灾害难以在实验室条件下进行物理模型试验研究。尽管国内外学者在围岩稳定性方面已经做了大量的工作，但是由于地下工程的复杂性，对于围岩的破坏机理至今并没有完全认识清楚，尤其是对受结构面影响的隧道渐进性破坏规律以及深部复杂三向应力下围岩的破裂演化过程及破裂机理的认识仍然比较模糊。随着高速计算技

术和数值计算方法的快速发展,采用数值试验方法开展隧道的破裂过程分析,对于深入认识隧道的破裂机制不失为一种有效的方法和手段。

本书主要介绍了作者在结构面及深部高应力影响下隧道破裂过程及机理方面的研究成果。全书共分为8章,前5章的内容主要针对结构面对隧道破裂过程及破裂机理的影响开展了较为系统的研究;后3章针对深部复杂三向高应力环境下围岩的破裂演化特性、破坏机制及主要影响因素进行了物理试验和数值模拟分析。第1章绪论部分对结构面控制的围岩破坏以及深部高应力环境下岩体力学响应进行了介绍,对相关研究成果进行了综述;第2章在现有理论上,将不良地质构造、地应力等因素与围岩的变形和损伤演化联系起来,将RFPA强度折减法应用于岩石隧道稳定性分析中,在数值模拟中考虑围岩力学性质的逐步弱化,研究了卸载作用下围岩变形、损伤与逐渐失稳破坏的机理和演化规律,并对强度折减法在隧道稳定性分析中应用的可靠性进行了分析并阐明了其优势;第3章针对不同侧压、不同厚跨比条件下层状顶板的破坏机理、不同倾角结构面切割的岩体隧道的变形破坏特征和隧道的安全储备问题以及水平地应力对深埋垂直板裂结构岩体中隧道围岩破坏机理的影响开展了研究;第4章阐述被两组交叉节理切割的岩体中隧道围岩的稳定性及围岩破坏机制,研究了交叉节理的产状以及节理贯通程度对隧道破坏机制的影响,分析了在不同侧压力系数下,隧道围岩的破坏机制和安全储备问题;第5章探讨了隐含断层的分布位置和倾角对隧道围岩变形破坏机理及安全储备的影响,讨论了断层厚度和地应力对隧道破坏失稳机制的影响,给出了含隐含断层岩体中隧道稳定性判别的方法;第6章探讨了深部隧道典型破裂模式的发生机制以及各破裂模式间的相互演化过程,分析岩石非均匀性对深部围岩层状破裂模式的影响;第7章分析了深部隧道发生分区破裂的三向应力条件及深部围岩破裂的空间演化特征,给出了判定环状分区破裂模式出现的概念性判定方法;第8章深入分析了深部围岩分区破裂的主要影响因素,探讨了隧道尺寸、隧道形状对分区破裂的影

响,分析了层状岩体中的分区破裂和近距离平行隧道的分区破裂模式、深入讨论了岩石材料非均匀性对分区破裂的破裂尺度和破裂机制的影响,并开展了相似材料试验验证。

本书可供岩石力学与工程、隧道与地下工程、工程力学、采矿工程等相关领域的科研人员、研究生和本科生参考;本书提供的数值试验思路和方法也可为岩石力学、隧道与地下工程等相关课程开展数值试验教学提供思路。

本书的内容来自作者近年来主持和完成的一系列科研项目。包括国家自然科学基金项目(51304036、51474050、U1602232)、中央高校基本科研业务专项资金项目(90401004、N17010829)、辽宁省自然科学基金指导计划项目(201602251)、中国博士后科学基金特别项目(201104572)、中国博士后基金面上项目(20100471465)等。本书的出版得到了东北大学的资助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请读者批评指正。

作者
2018年6月

目 录

1 绪论	1
1.1 隧道围岩稳定性的主要影响因素	1
1.2 结构面对围岩稳定性的影响	2
1.2.1 结构面及其分级	4
1.2.2 围岩的结构特征及失稳破坏类型	5
1.2.3 围岩结构面研究综述	9
1.3 深部高地应力对围岩稳定性的影响	11
1.3.1 深部岩体的力学行为	11
1.3.2 深部围岩分区破裂的研究现状	12
1.4 隧道围岩稳定性的研究方法	15
1.5 本书的主要内容	20
2 RFPA 数值方法在隧道稳定性研究中的应用	22
2.1 RFPA 真实破坏过程分析方法	22
2.1.1 RFPA 简介	22
2.1.2 RFPA 方法的特点	23
2.1.3 岩石材料非均匀性的物理统计描述方法	24
2.1.4 岩土本构关系的细观统计损伤模型	26
2.2 RFPA 强度折减法	28
2.2.1 RFPA 强度折减法与传统有限元强度折减法的区别	28
2.2.2 RFPA 强度折减法模拟结果与实验结果的对照	29
2.3 RFPA ^{3D} 并行计算方法	31
3 层状岩体隧道破裂机制	33
3.1 概述	33
3.2 层状顶板破坏机理	37
3.2.1 数值模型及参数选取	37
3.2.2 层状顶板变形破坏特征	38
3.2.3 不同侧压下层状顶板破坏机理	40

3.2.4 不同厚跨比层状顶板的破坏机理	41
3.3 倾角对倾斜层状岩体隧道稳定性的影响	43
3.3.1 数值模型及参数选取	43
3.3.2 不同倾角结构面隧道变形破坏特征	44
3.3.3 不同倾角结构面隧道典型部位位移与应力分析	45
3.4 侧压比对倾斜层状岩体隧道破坏模式的影响	47
3.4.1 数值模型的建立	47
3.4.2 侧压比对隧道破坏模式的影响	48
3.4.3 侧压比对隧道位移的影响	51
3.4.4 侧压比对隧道安全储备的影响	52
3.5 垂直板裂结构岩体中隧道破坏失稳机制研究	53
3.5.1 概述	53
3.5.2 垂直板裂结构岩体隧道破坏机制	55
4 节理岩体隧道的破坏机理	59
4.1 概述	59
4.2 交叉节理岩体隧道稳定性	61
4.2.1 数值模型的建立	61
4.2.2 数值模拟结果分析	62
4.3 节理贯通程度对隧道稳定性的影响	69
4.3.1 数值模型的建立	69
4.3.2 模拟结果分析与讨论	69
4.4 地应力对节理岩体隧道变形特征的影响	72
4.4.1 数值模型的建立	72
4.4.2 数值模拟结果与讨论	73
5 隐含断层对隧道稳定性的影响	76
5.1 概述	76
5.2 断层位置和倾角对隧道稳定性的影响	78
5.2.1 数值模型的建立	78
5.2.2 上部隐含断层对隧道稳定性的影响	79
5.2.3 下部隐含断层对隧道稳定性的影响	83
5.3 不同地应力水平下隐含断层对隧道稳定性的影响	87
5.4 隐含断层厚度对隧道位移及安全储备的影响	91

6 深部隧道典型破裂模式的发生机制	95
6.1 概述	95
6.2 洞壁层状破裂形成机制	98
6.3 岩石非均匀性对层状破裂的影响	99
6.4 几种典型破坏模式的渐进演化	100
7 深部隧道围岩分区破裂机制	104
7.1 概述	104
7.2 分区破裂现象的数值模拟再现	106
7.2.1 数值模型	106
7.2.2 模拟结果与讨论	106
7.3 沿隧道轴向应力对破裂模式的影响	109
7.4 不同三向应力下隧道的破坏模式	115
7.5 环状分区破裂的概念化判定方法	118
8 深部隧道围岩分区破裂的影响因素	121
8.1 隧道尺寸对分区破裂的影响	121
8.1.1 不同直径隧道围岩分区破裂的数值试验	121
8.1.2 不同直径隧道围岩分区破裂的模型试验	121
8.2 隧道形状对分区破裂的影响	123
8.2.1 不同高跨比对分区破裂影响的数值试验	123
8.2.2 不同高跨比对隧道分区破裂影响的模型试验	125
8.3 层状岩体中的分区破裂	127
8.3.1 数值模型	127
8.3.2 模拟结果与讨论	128
8.4 平行隧道的分区破裂	131
8.4.1 平行隧道分区破裂数值试验	131
8.4.2 平行隧道围岩分区破裂模型试验	135
8.5 非均匀性对分区破裂尺度的影响	136
8.5.1 非均匀性对分区破裂尺度影响的数值试验	136
8.5.2 非均匀性对分区破裂影响的模型试验	138
8.6 非均匀性对围岩破裂机制的影响	140
8.6.1 非均匀性对围岩破裂模式的影响	140
8.6.2 非均匀性对围岩破裂机制的影响	141
参考文献	144

1 绪 论

1.1 隧道围岩稳定性的主要影响因素

隧道处于复杂的地质环境中，在隧道开挖前，岩体处于一定的应力平衡状态，隧道开挖后，围岩发生了卸载回弹和应力重分布，隧道周边的岩体由原来的三向应力状态变为二向应力状态甚至单向应力状态。当围岩中重新分布的应力超过了围岩的极限承载能力，则这部分岩体将发生破坏引起围岩失稳。影响隧道围岩稳定性的因素可归纳为两大类：一类是客观存在的地质环境因素或称为内在因素；另一类是人为的主观因素或称为外部环境。内在因素是影响隧道围岩稳定的基本决定因素，主要包括：围岩初始应力场状态、岩石的基本性质和地下水状态、围岩的结构状态等。外部环境是通过内在因素的作用而起作用的，主要包括：施工方法、支护措施、隧道的形状和尺寸及隧道的埋深等。

地下工程的一个重要的力学特征是：地下工程都是修筑在应力岩体之中的，也就是在有一定的应力历史和应力场的岩体中修建的。所以岩体应力状态会极大地影响在其中所发生的一切力学现象^[1]。围岩的初始应力场经历了漫长的应力历史而形成并处于相对稳定和平衡的状态，当隧道开挖后，围岩在开挖边界处解除了约束，失去平衡，此时隧道周边应力重分布，其结果引起周围岩体的变形或破坏，形成围岩新的应力场。这种应力传播等一切岩石力学现象无不与围岩的初始应力场密切相关，都是初始应力发展的延续。可以说，不了解围岩的初始应力状态就无法对隧道开挖后的一系列力学过程和现象做出正确的评价。

地下水活动可能导致某些岩体的结构强度降低，有些岩石吸水后，还会产生大的膨胀应力，造成缩径和围岩稳定性的破坏；松散岩石、断层破碎带和岩溶洞隙中的充填物有时会随着地下水形成泥石流大量涌入隧道，威胁施工安全。岩体内存在着大量的孔隙、节理、裂隙等，它们不仅严重影响着岩体的力学特性，还降低了其强度指标和变形模量，同时也严重影响着岩体的渗透特性^[2]。在大部分的围岩分类方法中都考虑了地下水的作用，如《工程岩体分级标准》中对围岩分级时采用系数 K_1 、 Q 系统中的节理渗水折减 J_w 等。

开挖方法对隧道围岩稳定性的影响较为明显。在同类岩体中，采用普通爆破法施工和控制爆破法施工，采用矿山法施工和盾构法施工或掘进机施工，采用大断面开挖和小断面分步开挖，对隧道稳定性的影响都不相同。例如，小断面分布开挖会造成围岩多次扰动，极易塌方。因此，目前大多数围岩分级都是建立在相

应的施工方法的基础上的。

隧道的形状和尺寸,尤其是跨度对隧道稳定性的影响较为显著。实践证明,在同类围岩中,跨度越大,隧道围岩的稳定性就越差。因为岩体的破碎程度相对增大了。例如,大块状岩体是指裂隙间距在 0.4~1m 的岩体。这是对中等跨度隧道($B=5\sim 15\text{m}$)而言的。若跨度较大(大于 15m)或较小(小于 5m),岩体的破碎程度就不同,或者变为碎块状,或者变成巨块状,围岩稳定性就不同。

坑道的形状主要影响开挖隧道后围岩的应力状态。圆形或椭圆形隧道围岩应力状态应以压应力为主,这对维持围岩的稳定性是有好处的。而矩形或梯形隧道,在顶板处的围岩中将出现较大的拉应力,从而导致岩体张裂破坏。

随着埋深的增加,初始应力场会随之增大,在围岩强度不变的情况下,围岩的围压比也发生了变化,可能会出现高应力场或极高应力场的问题,因而在施工过程中易出现诸如岩爆或大变形等现象。

1.2 结构面对围岩稳定性的影响

岩体是经过漫长的地质演化过程而形成的复杂结构,在其形成和存在的整个地质历史过程中,经受了各种复杂的地质作用,无论是岩石还是岩体,均具有明显的结构特征^[3]。一方面,作为构成岩体一部分的岩石,其内部存在大量的微裂隙和孔洞;另一方面,岩体在各种复杂的地质作用下,产生永久的变形和构造破坏形迹,形成如褶皱、断层、节理、层理、劈理、隐微裂隙、假整合和不整合等结构弱面。这些弱面的存在,不仅削弱了岩体和岩石的力学强度,而且控制着岩体的变形、破坏机制和力学法则^[4]。

工程岩体的变形破坏一般受结构面控制,结构面的分布、特征及组合关系是岩体稳定的内在因素,它决定岩体的稳定程度,可能变形破坏的边界条件、方式、规模及特征等^[4]。《工程岩体分级标准》^[5]对岩体结构面的定义为:岩体结构面(structural plane, discontinuity)是指岩体内开裂的和易开裂的面,如层理、节理、断层、片理等,又称不连续面。工程岩体往往被各种结构面所切割,使得工程岩体的性质具有明显的不均匀性。这些结构面按照地质成因可以分为沉积结构面、火成结构面、变质结构面、构造结构面、次生结构面。其中断层、沉积结构面、火成结构面等,其规模有大有小,大的可达几百千米^[3]。

工程实践表明,在被结构面切割的岩体中开挖隧道后,常常出现隧道大变形、支护破坏,甚至隧道整体破坏失稳。由于岩体形成的条件千差万别,结构面的情况复杂多变,研究结构面的方位、密度、组合关系及力学特性,对岩体变形和破坏规律的影响远较岩石性质的影响更为重要^[6]。

岩体当中存在的各种结构面,使岩体形成特定的结构,不同结构的岩体又具有不同的稳定性,不同的应力传播和分布,并且处在一定地应力和渗流场当中,

因而岩体结构稳定性主要受这方面的影响和控制。

工程结构的失稳破坏有相当一部分是沿软弱结构面发展的。调查资料显示：大瑶山隧道施工过程中出现的 29 次塌方，有 22 次与结构面有关，占塌方总数的 75.9%^[7]；国内外矿山开采中发生的突水事故中有 90% 与断层有关^[8]；辽宁抚顺地区 75% 的瓦斯动力现象发生在断裂带；山西阳泉二矿较大的瓦斯突出有 56% 发生在断裂附近^[9]。大量的工程实践证明，围岩的失稳破坏大多可沿岩体不连续面产生，因此，研究结构面对岩体工程结构稳定性的影响尤为重要。受断层带影响而在边墙位置发生的楔形大块状滑塌如图 1-1 所示。受不良结构面影响引起的隧道掌子面坍塌如图 1-2 所示。

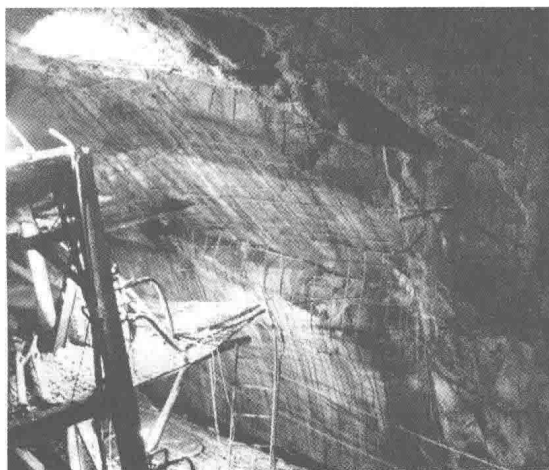


图 1-1 受断层带影响而在边墙位置发生的楔形大块状滑塌



图 1-2 受不良结构面影响引起的隧道掌子面坍塌

大量的实践表明,地下工程围岩的变形破坏通常是累进性发展的。由于围岩内应力分布的不均匀性以及岩体结构、强度的不均一性及各向异性,那些应力集中程度高,而结构强度又相对较低的部位往往是累进性破坏的突破口,在大范围围岩尚保持整体稳定性的情况下,这些应力-强度关系中的最薄弱部位就可能发生局部破坏,并使应力向其他部位转移,引起另外一些次薄弱部位的破坏,如此逐渐发展,连锁反应,最终导致大范围围岩的失稳破坏。因此,在进行围岩稳定性的分析、评价时,必须充分考虑围岩累进性破坏的过程和特点,针对控制围岩失稳破坏的关键部位采取有效措施,以防止累进性破坏的发生和发展,这正是支护设计的关键所在。

1.2.1 结构面及其分级

从岩体的基本形态看,岩体是由结构面和结构体组成的。谷德振教授^[10]指出:所谓结构面(structural plane)是指岩体中的各种地质界面,它包括物质分界面及不连续面。是在地质发展的历史中,在岩体内形成的具有不同方向、不同规模、不同形态以及不同特征的面、缝、带状的地质界面。如干净的层理、劈理、节理,其两侧岩块呈刚性接触称为面;由各种软弱物质所填充的不同成因的节理裂隙统称为缝;原生的有一定延续范围的软弱夹层称为层;带包括各种成因、各种规模的破碎带。后三者往往统称为软弱结构面。结构体是由不同产状的结构面相互切割而成,形成大小不一、形态各异、岩石种类不同的块体。他们的特性决定了岩体在受力状态下的不均一性和不连续性。

结构面规模不同,对岩体稳定性影响也不同。工程岩体范围内所发育的结构面依据其规模和力学效应大体可划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ五个等级。

Ⅰ级结构面是指大断层或区域性断层,一般延伸约数千米至数十千米以上,破碎带宽约数米至数十米乃至数百米以上。有些区域性大断层往往具有现代活动性,给工程建设带来很大的危害,直接关系到建设地区的地壳稳定性,影响山体稳定性。

Ⅱ级结构面是指延伸长而宽度不大的区域性地质界面,如较大的断层、层间错动、不整合面及原生软弱夹层等。其规模贯穿整个工程岩体,长度一般数百米至数千米,破碎带宽度数十厘米至数米。

Ⅲ级结构面是指长度数十米至数百米的断层、区域性节理、延伸较好的层面以及层间错动等。宽度数厘米至一米左右。它主要影响或控制工程岩体,如地下隧道围岩及边坡岩体的稳定性等。

Ⅳ级结构面是指延伸较差的节理、层面、次生裂隙、小断层及较发育的片理、劈理等。长度一般数十厘米至十几厘米,宽度为零至数厘米不等,是

构成岩块的边界面，破坏岩体的完整性，影响岩体的物理力学性质及应力分布状态。该级结构面数量多，分布具有随机性，主要影响岩体的完整性和力学性质，是岩体分类及岩体结构研究的基础，也是结构面统计分析和模拟的对象。

V级结构面是指隐性节理、微层面、微裂隙及不发育的片理、劈理等，其规模小，连续性差，常包含在岩块内，主要影响岩块的物理力学性质。

I、II结构面又称为软弱结构面，III级结构面多数也为软弱结构面，IV、V级结构面为硬性结构面。I级结构面控制工程建设地区的地壳稳定性，直接影响工程岩体稳定性；II、III级结构面控制着工程岩体力学作用的边界条件和破坏方式，他们的组合往往构成可能滑移岩体（如滑坡、崩塌等）的边界面，直接威胁工程的安全稳定性；IV级结构面主要控制着岩体的结构、完整性和物理力学性质，是岩体结构研究的重点和难点；V级结构面控制岩块的力学性质。

1.2.2 围岩的结构特征及失稳破坏类型

在整体结构的岩体中，控制围岩稳定性的主要因素是岩石的力学性质，尤其是岩石的强度。一般来说，岩石强度越高，坑道越稳定。此外，岩石强度还影响围岩失稳破坏形态，强度高的硬岩多表现为脆性破坏，在隧道内可能发生岩爆。而在强度低的软岩中，则以塑性变形为主，流变现象较明显。

岩体力学性质主要取决于岩性、结构及赋存条件三个方面，而岩体结构又是其重要内容。结构面和结构体在岩体内的排列组合方式称为岩体结构。由于结构面的存在，岩体的性质与结构体相差很大，两者在破坏形式、破坏机理和规模上有很大不同。岩体区别于连续介质岩石主要在于其具有结构的特殊性，而这种结构的特殊性对岩体力学形式往往具有强烈影响与控制作用^[11]。大量的工程失稳实例表明：工程岩体的失稳破坏，往往主要不是岩石材料本身的破坏，而是岩体结构失稳引起的。因此，在隧道开挖与支护设计中，应注意到不同围岩潜在的变形破坏基本特征，选择合理的开挖与支护加固处理方案，特别注意对潜在破坏的薄弱部位进行及时加固，防止围岩变形破坏向深部发展，确保围岩的原始强度和自承能力。

为了反映岩体中结构面和结构体的成因、特征及其排列组合关系，我国《岩土工程勘察规范》^[3]将岩体结构划分为5大类（见表1-1）。由表可知：不同结构类型的岩体，其岩石类型、结构体和结构面的特征不同，岩体的工程地质性质与变形破坏机理也都不同。结构面的性质与组合形式常常决定岩体变形破坏的方式。

表 1-1 岩体结构类型划分^[3]

岩体结构类型	岩体地质类型	主要结构体形状	结构面发育情况	岩土工程特征	可能发生的岩土工程问题
整体状结构	均质，巨块状岩浆岩、变质岩，巨厚层沉积岩、正变质岩	巨块状	以原生构造节理为主，多呈闭合型，裂隙结构面间距大于 1.5m，一般不超过 1~2 组，无危险结构面组成的落石掉块	整体强度高，岩体稳定，可视为均质弹性各向同性体	不稳定结构体的局部滑动或坍塌，深埋隧道的岩爆
块状结构	厚层状沉积岩、正变质岩、块状岩浆岩、变质岩	块状柱状	只具有少量贯穿型较好的节理裂隙，裂隙结构面间距 0.7~1.5m。一般为 2~3 组，有少量分离体	整体强度较高，结构面互相牵制，岩体基本稳定，接近弹性各向同性体	
层状结构	薄层及中厚层状沉积岩、副变质岩	层状板状透镜体	有层理、片理、节理，常有层间错动面	接近均一的各向异性体，其变形及强度特征受层面及岩层组合控制，可视为弹塑性体，稳定性较差	不稳定结构体可能产生滑塌，特别是岩层的弯张破坏及软弱岩层的塑性变形
碎裂状结构	构造影响严重的破碎岩层	碎块状	断层、断层破碎带、片理、层理及层间结构面较发育，裂隙结构面间距 0.25~0.5m，一般在 3 组以上，有许多分离体组成	完整性破坏较大，整体强度很低，并受到断裂等软弱结构面控制，多呈弹塑性介质，稳定性很差	易引起规模较大的岩体失稳，地下水加剧岩体失稳
散体状结构	构造影响剧烈的断层破碎带，强风化带，全风化带	碎屑状颗粒状	断层破碎带交叉，构造及风化裂隙密集，结构面及组合错综复杂，并多充填黏性土，形成许多大小不一定分离岩块	完整性遭到极大破坏，稳定性极差，岩体属性接近松散体介质	易引起规模较大的岩体失稳，地下水加剧岩体失稳

需要指出的是,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,随着隧道规模不断变大,围岩结构类型相应发生变化。

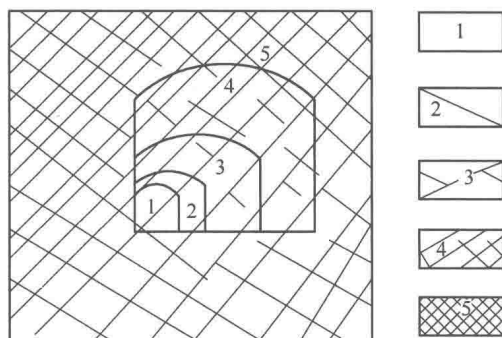


图 1-3 岩体结构与隧道尺度关系^[11]

隧道是修筑在具有一定应力历史的岩体中的,那么隧道的性质就会受到隧道围岩性质的影响。隧道围岩即隧道地质体,它经历了多次地质作用、经受破坏,形成一定的岩石成分、一定的结构、赋存于一定的地质环境中,在作为力学研究对象时被定义为岩体^[12],它是指受隧道开挖影响的一部分岩体。与连续介质岩石材料不同,岩体是赋存于一定地质环境中的复杂地质体,其中存在着各种软弱结构面,因此岩体强度不仅与组成岩体的岩石力学性质有关,而且这些软弱结构面的物质组成、发育程度、组合类型及力学性质等对岩体强度往往产生强烈影响,有时软弱结构面对岩体强度甚至起严格控制作用。此外,环境的地应力、温度和地下水及岩体受力条件等对岩体强度也有不同程度的影响。

隧道围岩失稳具有失稳原因多样性、失稳形式多样性,岩体失稳具有突发性,岩体失稳演化过程具有混沌特征,即失稳的进程可能会停下来,也可能发展下去,视影响演化的因素而定^[13]。王思敬、杨志法^[14]将地下工程岩体变形破坏划分为脆性破裂、块体运动、弯曲折断、松动解脱和塑性变形等 5 种,见表 1-2。

脆性破裂:整体状结构或块体结构岩体,岩性坚硬,在一般工程条件下表现稳定,会产生局部掉块,但在高应力地区,洞周应力集中可以引起岩爆,属于脆性破裂,岩石成为碎片射出或发出破裂声响。产生这种破坏的岩体结构条件为坚硬整体或块状岩体,易变形的软弱结构不发育。

表 1-2 隧道围岩变形破坏特征^[11]

变形破坏机制	变形方式	变形特征	岩体结构条件
脆性破裂	岩爆开裂	地下开挖围岩岩爆，或岩柱劈裂	整体状及块状岩体，岩性坚硬
块体运动	滑落滑动转动	块体沿结构面拉开或滑动，向洞内位移，在拱顶一般为崩塌，在洞壁为滑动，在动载作用下可产生倒塌或抛掷	裂隙块状岩体受贯穿结构面切割的块状岩体，层状岩体中有显著的软弱结构面切割
弯曲折断	弯曲挤入折断垮塌	岩层向临空面弯曲、折断、崩塌，在边墙上可表现为倾倒	层状岩体，薄层及软硬互层岩体
松动解脱	塌落边墙垮塌石流	崩塌或滑塌，岩碎块体松动、解脱而散开（溃散）	块状夹泥碎裂结构、镶嵌结构
塑性变形	塑性挤入剪切破坏底鼓收缩	围岩的塑性变形、洞体收缩，或局部挤出和剪切破坏	碎裂结构、层状碎裂结构，松软结构

块体运动：当块状或层状岩体受明显的少数软弱结构面切割，形成块体或数量有限的块体时，这种块体和围岩的联系很弱，在自重或围岩应力的作用下有向临空运动的趋势，逐渐形成块体运动的失稳方式，块体运动包括块体塌落、滑动和转动、倾倒、块体挤出等。

弯曲折断破坏：层状岩体由于层间结合力差，易于滑动，层状岩体的抗弯能力不强，在隧道开挖后，围岩受重力和地应力的双重影响，导致岩层向洞内变形，进而张裂、折断。

松动解脱：碎裂结构岩体在泥质软弱结构面含量较少的情况下有一定的承载能力，单轴压力及振动力作用容易松动、解脱、溃散成为碎块散开或脱落；在洞顶呈现崩塌，而在边墙则为碎块滑塌、坍塌。

塑性变形：松散结构岩体或碎裂结构岩体中含软弱结构面较多的情况下，在开挖后的临空状态及围岩应力作用下产生塑性变形及剪切破坏，表现为塌方、边墙挤入洞内、底鼓以及洞体收缩等。变形的时间效应比较突出，衬砌受压开裂往往延长。有些含蒙脱土或硬石膏等的膨胀岩体或软弱结构面，遇水膨胀，并向洞内挤入，产生边墙及洞底的鼓起，衬砌受力开裂等。

实际上，隧道围岩的变形和破坏是由于隧道开挖引起围岩的卸荷回弹、应力和地下水的重新分布而导致围岩发生塑性变形和破坏而引起的。一般最早的破坏主要发生在两个部位^[15]：结构面与临空面的不利组合形成的不稳定块体；最大压应力和拉应力集中的部位。图 1-4 是隧道围岩失稳破坏的典型示例。