

陈志敏 余云燕 赵德安 著

高地应力软岩 隧道荷载机制

清华大学出版社

高地应力软岩 隧道荷载机制

陈志敏 余云燕 赵德安 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以高地应力软弱围岩条件下的关角隧道、木寨岭隧道等工程为背景,系统研究了我国地应力及青藏地区的地应力分布规律。在此基础上,通过地应力现场实测、理论与数值分析,对高地应力软岩隧道围岩压力和围岩与支护结构相互作用机理进行了研究与应用。本书主要内容包括地应力与高地应力概述、软岩以及软岩隧道力学特性、中国特别是青藏地区不同岩性地应力的分布规律、隧道区域地应力实测与应力拓展、基于岩体软化“直-曲-直”模型的卡斯特耐尔扩展公式、基于开挖应力释放率模型的高地应力软岩隧道衬砌压力研究及其数值分析等内容。

本书内容丰富、图文并茂、数据资料翔实,反映了高地应力软岩隧道的荷载机制研究与应用的最新水平。本书适合于从事长大山岭隧道和深埋地下工程的科研、勘察设计与施工人员使用,也可供隧道与地下工程、岩土工程、地质工程等专业的高校师生参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

高地应力软岩隧道荷载机制/陈志敏等著. —北京:清华大学出版社,2017
ISBN 978-7-302-45480-9

I. ①高… II. ①陈… III. ①地应力—软岩层—隧道—载荷—研究 IV. ①U45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 275319 号

责任编辑:赵益鹏

封面设计:陈国熙

责任校对:刘玉霞

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:9

字 数:216 千字

版 次:2017 年 6 月第 1 版

印 次:2017 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~1000

定 价:50.00 元

产品编号:063349-01

“上天入地”是人类立体空间发展的必然趋势。21 世纪是世界隧道与地下空间大发展的世纪,必将出现更多的长大隧道工程。铁路、公路隧道等地下工程因互联互通的需要而迅猛发展,其“长、大、深、群”的特点日趋明显。高地应力软岩隧道大量涌现,都具有围岩软弱、地应力较高、变形大且持续时间长等特点。在地应力软弱围岩条件下修建隧道,由于软岩本身自稳能力差、塑性变形大,且具有明显的流变性,如对围岩变形、应力变化规律不了解或支护结构不合理,往往会发生过量变形而使隧道坍塌。这一问题已成为世界性的地下工程难题之一,已引起世界岩土力学和工程界的广泛重视。

本书以高地应力软弱围岩条件下的关角隧道、木寨岭隧道等工程为背景,系统研究了我国整体地应力及青藏地区区域地应力的分布规律。在此基础上,通过地应力现场实测、理论与数值分析,对高地应力软岩隧道围岩压力和围岩与支护结构相互作用机理进行了研究与应用。在“一带一路”和世界互联互通的大背景下,铁路、公路等重大交通基础设施建设尤为重要,必将面临大量高地应力软弱围岩产生的一系列问题和挑战,希望本研究得到的这些新的认识与规律能为此类隧道的研究、勘察设计与施工提供参考。

书中引用和参考了许多学者的著作,并吸纳了其中的一些成果,甚至有些资料的出处不甚明了,在此对所有作者表示诚挚的谢意!

本书的出版得到了国家自然科学基金(11662007)、甘肃省基础研究创新群体(145RJIA332)、甘肃省建筑节能和建设科技专项(JK2014-15)、甘肃省教育科学“十二五”规划课题(GS[2014]GHB0342)以及长江学者和创新团队发展计划滚动资助(IRT_15R29)的经费资助,在此表示感谢。

本书的科研和试验研究得到了中铁第一勘察设计院李国良总工程师及其他工程师的帮助;在地应力现场测试方面,得到了长江水利委员会长江科学院尹健民教授以及现场测试

工程师李永松博士的真诚帮助；本书的出版得到了清华大学出版社赵益鹏编辑的大力支持，在此，一并表示衷心感谢。

鉴于作者学识水平所限，疏漏和不妥之处在所难免，期望同行专家及读者提出批评意见和建议，作者表示衷心的感谢！

作 者

2017 年 3 月于兰州交通大学

第 1 章 绪论	1
1.1 地应力概述	1
1.1.1 地应力的概念	1
1.1.2 高地应力	2
1.2 软岩及软岩隧道	4
1.2.1 软弱围岩的含义及力学特性	4
1.2.2 软弱围岩隧道	7
1.3 高地应力软岩荷载问题的研究现状	8
1.3.1 高地应力软岩荷载问题国外研究现状	8
1.3.2 高地应力软岩荷载问题国内研究进展	9
1.4 高地应力软岩隧道的荷载机制	12
1.4.1 基于原岩应力和开挖位移的高地应力软岩隧道围岩压力研究	12
1.4.2 基于开挖应力释放率模型的高地应力软岩隧道衬砌压力研究	13
第 2 章 地应力的分布规律	14
2.1 地应力的影响因素分析	14
2.1.1 地应力成因	14
2.1.2 地应力的主要影响因素	15
2.2 全球地应力区域构造分析	17
2.3 中国应力场分析	18

2.3.1	中国实测地应力分析	18
2.3.2	中国不同岩性地应力分析	20
2.4	青藏地区地应力分析	22
2.4.1	青藏地区地应力成因	22
2.4.2	青藏地区地应力分布	23
2.4.3	青藏地区三大岩性地应力分布规律	23
2.4.4	综合分析	27
第3章	隧道区域地应力实测与应力拓展	29
3.1	国内外研究现状	30
3.1.1	国外研究现状	30
3.1.2	国内研究现状	32
3.2	地应力测量方法	33
3.2.1	应力解除法之空腔包体应变计法	34
3.2.2	孔底应力解除法	36
3.2.3	水压致裂法	38
3.2.4	声发射法	39
3.2.5	应力恢复法	41
3.3	软岩隧道的地应力测量	42
3.3.1	天池坪隧道高地应力现场测试与分析	43
3.3.2	两水隧道地应力测试结果分析	49
3.4	宏观地应力场拓展分析	51
3.4.1	BP神经网络改进与地应力场拓展	52
3.4.2	地应力场拓展分析	55
第4章	软弱围岩隧道	61
4.1	软岩隧道的现状	61
4.2	软岩隧道的特征分析	65
4.3	软岩隧道变形演化机制	66
4.4	软岩隧道变形原因	67
4.5	高地应力软岩隧道围岩压力和围岩与支护结构相互作用	67
4.6	高地应力软岩隧道围岩压力研究中的主要理论问题	69
第5章	高地应力软岩隧道的荷载机制	71
5.1	基于原岩应力和开挖位移的高地应力软岩隧道围岩压力的研究	71
5.1.1	围岩软化“直-曲-直”模型	74
5.1.2	软化模量的概念及其物理意义	74
5.1.3	岩体应变模型	75
5.1.4	基于岩体软化“直-曲-直”模型的卡斯特耐尔扩展公式推导	75

5.1.5	弹性区围岩应力分布的理论解	77
5.1.6	塑性软化区卡斯特耐尔扩展公式推导	79
5.1.7	塑性流动区卡斯特耐尔扩展公式推导	82
5.1.8	卡斯特耐尔扩展公式广泛性分析	84
5.1.9	卡斯特耐尔扩展公式与经典卡斯特耐尔公式对比分析	85
5.2	卡斯特耐尔扩展公式实例分析与工程应用	86
5.2.1	卡斯特耐尔扩展公式应用探讨	86
5.2.2	经典实例分析	87
5.2.3	木寨岭隧道高地应力V级软岩段应用	88
5.3	基于开挖应力释放率模型的高地应力软岩隧道衬砌压力研究	90
5.3.1	基于净空收敛曲线三阶段划分的高地应力软岩隧道衬砌压力研究	91
5.3.2	基于净空收敛曲线拟合的高地应力软岩隧道衬砌压力研究	99
5.4	高地应力软弱围岩条件下支护结构与围岩相互作用三维数值分析	106
5.4.1	关角隧道基于等效连续介质模型的三维数值分析	106
5.4.2	基于围岩参数全过程变化的木寨岭隧道V级软岩段 三维数值分析	128
参考文献		133

绪 论

1.1 地应力概述

1.1.1 地应力的概念

在漫长的地质年代中,地质构造运动等原因使地壳物质产生了内应力效应,这种应力称为地应力,它是地壳应力的统称。地应力^[1]是存在于地壳中的未受工程扰动的天然应力,也称为岩体初始应力、绝对应力或原岩应力,广义上指地球体内的应力。它包括由地热、重力、地球自转速度变化及其他因素产生的应力。

通常地壳内各点的应力状态不尽相同,并且应力随(地表以下)深度的增加而线性增加。由于所处的构造部位和地理位置不同,各处应力增加的梯度也不相同。地壳内各点的应力状态在空间分布的合称为地应力场。与地质构造运动有关的地应力场称为构造应力场,通常指导致构造运动的地应力场。

在地质力学中,构造应力场是指形成构造体系和构造型式的地应力场,包括构造体系和构造型式所展布的地区,连同内部在形成这些构造体系和构造型式时的应力分布状况。现今存在的或正在活动的地应力场称为现今构造应力场。现今构造应力场的研究,既要实地考察晚、近地质时期,特别是第四纪以来,岩石、地层发生的构造变形以及地区的升降,也要用适当的仪器装置及其他方法直接测量现今地应力的活动。进行地应力测量时,应根据活动的构造体系、活动的构造带(如地震带)和重大工程建设要求来布置测点,同时配合相应的地质工作。

新构造期与之前的喜马拉雅构造期的最大不同,在于应力作用的主应力方向出现了全新的特征。总体来说,在喜马拉雅构造期,中国岩石圈的主应力方向是南北向的。其中,中

国西部的主应力方向是北北东—南南西走向,中国东部则为北南走向或者北北西—南南东走向。

在新构造期,主应力方向发生了重大变化,除青藏高原西部和新疆大部仍主要为北北东—南南西走向外,中国北方大部已经变为北东东—南西西走向至东西走向,而中国南方大部则变为北西—南东走向,三者合起来呈现出放射状散布的特点。这种构造应力场是以前地史上不曾有过的,说明印度板块向北碰撞造成的影响已经较喜马拉雅期为弱,而西太平洋俯冲带的影响又开始显现出来,二者势均力敌的结果便是这种放射状应力场的形成。

李四光教授是中国地应力测量的创始人,早在 20 世纪 40 年代就提出地壳中水平运动为主,水平应力起主导作用。他提出,地壳内的应力活动是以往和现今使地壳克服阻力、不断运动发展的原因;地壳各部分所发生的一切变形,包括破裂,都是地应力作用的反映;剧烈的地应力活动会引起地震。因此,“地应力的探测是地质力学具有重大实际意义的一个新方面,是值得予以重视的”。新丰江水库地震和邢台地震后,李四光教授更加重视地应力测量工作。他提出,地应力测量是实现地震预报的重要途径。由此,中国的地应力研究与测量工作得到迅速发展。现在已具备完善的理论,多种测试仪器、手段广泛应用于地质、油田、矿山、水工、电站、地震等领域。李四光教授还特别注重从活动地带里寻找稳定地区,提出了“安全岛”理论,为建厂选址提供了依据,为国民经济建设做出了重大贡献。

地应力活动会产生或影响地质构造。剧烈的地应力活动会引起地震。地应力活动还可影响地壳内岩石、矿物的物理性质和化学性质。因此,也可以利用这种物理和化学性质的改变来分析地应力的活动情况。地应力是引起采矿、水利水电、土木建筑、铁道、公路、军事和其他地下或露天岩土开挖工程变形和破坏的根本作用力,是确定工程岩土力学属性,进行围岩稳定性分析,实现岩土工程开挖设计和决策科学化的必要前提。地应力状态对地震预报、区域地壳稳定性评价、油田油井的稳定性、核废料的储存、岩爆、煤和瓦斯突出的研究,以及地球动力学的研究等具有重要意义^[2]。

1.1.2 高地应力

关于高地应力的概念与分级,至今仍有很多不同的认识。但高地应力对隧道工程造成的典型问题已有共识,即对硬脆性岩体而言为岩爆问题;对于软岩(当围岩级别较高时),则易发生塌方及软岩塑性大变形等问题。

一般来说,高地应力是指初始应力,特别是它们的水平初始应力分量大大超过其上覆盖层岩体的重力。中国现行关于岩体初始地应力分级或评价的最新国家标准及各行业标准如下:《工程岩体分级标准》(GB 50218—2014)、《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012—2007)、《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)和《水力发电工程地质勘察规范》(GB 50287—2006)。其分级标准各有不同,其中较权威的《中华人民共和国国家标准——工程岩体分级标准》(GB 50218—2014)^[3]中指出,岩爆和岩心饼化产生的共同条件是高初始应力可根据岩体在开挖或钻孔取心过程中出现的主要现象按表 1-1 评估。

表 1-1 高初始应力地区岩体在开挖或钻孔过程中出现的主要现象

应力情况	主 要 现 象	$\frac{R_c}{\sigma_{\max}}$
极高应力	硬质岩：岩心常有饼化现象，时有岩爆发生，岩块弹出，洞壁岩体发生剥离，新生裂缝多，围岩易失稳，基坑有剥离现象，成形性差； 软质岩：开挖过程中洞壁岩体剥离，位移极为显著，甚至发生大位移，持续时间长，不易成洞，基坑发生显著隆起或剥离，不易成形	<4
高应力	硬质岩：岩心时有饼化现象，开挖过程中偶有岩爆发生，洞壁岩体有剥离和掉块现象，新生裂缝较多，基坑时有剥离现象，成形性一般尚好； 软质岩：开挖过程中洞壁岩体位移显著，持续时间较长，围岩易失稳，基坑有隆起现象，成形性较差	$4\sim7$

注： R_c 为岩石饱和单轴抗压强度； $\sigma_{\max}$ 为垂直洞轴线方向的最大初始应力。

岩心饼化产生的基本条件是高初始应力，而高初始应力区的存在已为工程实践所证实，如国内的家竹箐隧道、乌鞘岭隧道、新关角隧道及木寨岭隧道等。在国外，日本的锅立山隧道和平石线隧道等，奥地利的塔威龙隧道和刚史塔英隧道，阿尔贝格隧道和陶恩隧道，南非的许多金矿，苏联以及其他欧洲国家的许多地下工程都遇到了高地应力问题。早在 20 世纪 80 年代初，国外已经开始注意对高地应力问题的研究。1983 年，苏联的权威学者就提出对超过 1600m 的深(煤)矿井开采进行专题研究。1989 年国际岩石力学学会曾在法国专门召开“深部岩石力学”问题专题会议，并出版了相关的专著。近 20 年来，一些进行高地应力条件下深井采矿的国家政府部门和科研机构密切配合，在岩爆预测与防治、软岩大变形机制与支护措施、隧道涌水、高地应力下开挖技术等方面取得了很大的成绩，如美国、加拿大、澳大利亚、南非、波兰等^[4-8]。

不同国家对高地应力的定义较为悬殊，国内外对于如何界定高地应力和低地应力还没有一个统一的标准，常用的有以下两种定量判别方法。

(1) 以地应力的绝对大小划分，最大主应力达到 20~30MPa 时，就可以认为岩体处在高地应力状态。

(2) 利用岩石单轴抗压强度(R_c)和最大主应力($\sigma_{\max}$)的比值 $R_c/\sigma_{\max}$ (岩石强度应力比)来划分地应力的级别。但不同国家对地应力的高低界定值有很大的差别^[9]。

陶振宇教授^[10] (1983)对高地应力给出了一个定性的规定：所谓高地应力是指其初始应力状态，特别是它们的水平初始应力分量，大大超过其上覆岩层的岩体重量。这一定性规定强调了水平地应力的作用。天津大学薛玺成等^[11] (1987)建议用下式来划分地应力量级：

$$n = I_1 / I_1^0 \quad (1-1)$$

式中 I_1 ——实测地应力的主应力之和；

I_1^0 ——相应测点的自重应力(主应力)之和；

n ——比值。

显然，表 1-2 中薛玺成等人的地应力分级方案在物理概念上与陶振宇教授的高地应力定性规定并无本质区别。

表 1-2 地应力分级方案(薛玺成等,1987)

地应力级别	一般地应力	较高地应力	高地应力
<i>n</i>	1~1.5	0.5~2	>2
说明	<i>n</i> =1,为纯自重应力场	应力场中有 30%~50%是构造应力产生的,其余为重力应力场产生的	50%以上的地应力值是构造应力产生的

姚宝魁、张承娟^[12](1985)认为,陶振宇等人的分级、评价方法没有考虑岩体的变形和稳定条件,因而在工程建设实践中没有实用价值;他们认为,应从工程岩体的变形破坏特性出发来考虑地应力对不同岩体的影响程度,建议以下式作为判断高地应力的标准:

$$\sigma_1 \geq (0.15 \sim 0.20)R_b$$

(1-2)

实际上,式(1-2)继承了 Barton 等人(1974)关于 Q 系统分类指标的物理概念。现行《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)附表 C.0.2 中,也采用岩体强度应力比 $R_c/\sigma_{\max}$ 来划分高地应力级别,这是迄今为止可以参照的中国最具权威性的规范标准,该规范规定: $R_b/\sigma_{\max}$ 为 4~7,为高地应力; $R_b/\sigma_{\max} < 4$,为极高地应力。由此可见,不同的地应力分级方案有很大出入,反映出学术界和工程界目前对高地应力的定义及其分级尚未取得共识,甚至相差非常悬殊。

实际上,可以认为,高地应力是一个相对的概念,并且它与岩体所经受的应力历史和岩体强度、岩石弹性模量等诸多因素有关。孙广忠^[13]曾指出:在强烈构造作用地区,地应力与岩体强度有关;在轻缓构造作用地区,岩体内储存的地应力大小与岩石弹性模量直接相关,即弹性模量大的岩体内地应力高,弹性模量小的岩体内地应力低。孙广忠教授还提出了高地应力地区的六大地质判断标志,如表 1-3 所示。表 1-3 还列出了低地应力地区的一些地质判断标志,以便对比分析。

表 1-3 高、低地应力地区的地质标志

高地应力地区的地质标志	低地应力地区的地质标志
围岩产生岩爆、剥离 围岩收敛变形大 软弱夹层挤出 出现饼状岩心 水下开挖无渗水 开挖过程有瓦斯突出	围岩松动、塌方、掉块 围岩渗水 节理面内有夹泥 岩脉内岩块松动,强风化 断层或节理中有次生矿物,呈晶族,孔洞等

地应力高低及其危害的影响因素众多,以上的几种判别方式中常用的主要是强度应力比、岩体岩性、岩体特性、地质构造因素、岩石弹性模量等因素,只有结合工程区的各种因素综合判别,才能相对准确地判别高、低地应力问题,才能有针对性地采取相应的防控措施。

1.2 软岩及软岩隧道

1.2.1 软弱围岩的含义及力学特性

1. 软岩的概念

关于软岩的含义至今仍有多种解释。1981 年在东京召开的“国际软岩学术讨论会”规

定“软弱、破碎和风化岩石”为软岩。国际岩石力学学会(ISRM)定义软质岩为单轴抗压强度为0.5~25MPa的岩石。1984年在昆明召开的煤矿矿山压力名词讨论会上提出的定义为,软岩是指强度低、空隙度大、胶结程度差、受构造面切割及风化影响显著或含有大量膨胀性黏土矿物的松、散、软、弱岩层^[14]。何满潮等将软岩分成地质软岩和工程软岩分别予以定义,上述软岩为地质软岩,而工程软岩为在工程力作用下能产生显著塑性变形的工程岩体^[15]。何满潮系统地分析了软岩中矿物组成以及软岩中膨胀矿物特性,研究了软岩的单轴抗压特性、抗拉强度特性和三轴抗压力学特性,并研究了软岩的可塑性、膨胀性、崩解性、流变性和易扰动性等工程力学特性,通过试验研究发现了软岩的抗剪强度恢复特性。孙钧教授引入“不稳定围岩”作为软岩的条件,将软岩定义为在高地应力、地下水和强风化作用下,具有显著渗流、膨胀或崩解特性的软弱、破碎、风化和节理化围岩,简称为不稳定围岩岩体^[16]。

2. 软岩的分类与分级

软岩的种类繁多,不同软岩之间强度特性、结构面特点、泥质含量以及塑性变形的力学特点差异相当大,为了更好地研究软岩的力学与工程特性,将软岩分为膨胀性软岩、高地应力软岩、节理化软岩和复合型软岩四大类^[15,17],每类之间根据各自不同的特点又进行了分级^[15,18],如表1-4和表1-5所示。各类软岩产生塑性变形的机理是不同的,参见表1-6。

表 1-4 膨胀性软岩和高地应力软岩分级标准

软 岩 分 类	分 类 指 标			软 岩 分 级	分 级 指 标		
	抗压强度 /MPa	泥质含量 /%	结构面		ω_0 /%	σ_c /MPa	膨胀矿物组合
膨胀性软岩	<25	>25	少	弱膨胀性软岩	<10	15~30	S、I
				中膨胀性软岩	10~50	5~15	I、K
				强膨胀性软岩	>50	<5	M、M/I
高地应力软岩	>25	<25	少	高地应力软岩 超高地应力软岩 极高地应力软岩	—	25< σ_c ≤50 50< σ_c ≤75 >75	—

注: ω_0 为干燥饱和吸水率; σ_c 为单轴抗压强度,MPa; S 为绿泥石; I 为伊利石; K 为高岭石; M 为蒙脱石; M/I 为蒙/伊混层物。

表 1-5 节理化软岩和复合型软岩分级标准

软 岩 分 类	分 类 指 标			软 岩 分 级	分 级 指 标		
	抗压强度 /MPa	泥质含量 /%	结构面		节理组数	节理间距 /m	完整系数
节理化软岩	低~中等	不含	多组	较破碎软岩	1~3	0.2~0.4	0.55~0.35
				破碎软岩	≥3	0.1~0.2	0.35~0.15
				极破碎软岩	无序≥3	<0.1	<0.15
复合型软岩	低~高	含	少~多组	根据具体条件进行分类分级			

表 1-6 各类软岩塑性变形机理

软 岩 名 称	塑性变形机理
膨胀性软岩	片架状黏土矿物发生滑移和膨胀
高地应力软岩	处于高地应力水平时,岩石骨架中的基质(黏土矿物)发生滑移和扩容,此后接着发生缺陷或裂纹的扩容和滑移塑性变形
节理化软岩	工程力作用下,结构面发生滑移或扩容变形
复合型软岩	具有上述某种组合的复合型机理

3. 软岩的力学属性

关于软岩的力学特性,日本学者 R. Yoshinaka 等分别对凝灰岩、粉砂岩、泥岩和砂岩等四种软岩进行了三轴固结不排水剪切试验。研究表明,尽管在高围压作用下变形模量呈非线性增加,但对于最大失效应力,软岩很快进入屈服;随着围压的增加,残余状态起始阈值也相应增大,轴向应变和轴向塑性应变均倾向于屈服;一旦岩石进入屈服,变形模量随轴向塑性应变呈指数衰减。近年来,在中国的水工、道路及矿山建设中,越来越多地涉及软岩工程问题,大量工程实践提供了众多成功经验和失败教训,成为软岩技术发展的推动力。孙钧教授总结软岩的基本特征是:强度低,孔隙率高,容重小,渗水、吸水性好,易风化,易崩解,具有显著的膨胀性和明显的时效特性,认为高地应力地区的岩石蠕变将呈非线性性态发展。中铁四院在堡镇隧道软弱围岩大变形研究中,提出软弱围岩一般具有抗压强度低、强度应力比小,具有显著的塑性变形特征,变形量大、变形时间长,径向变形特征明显等力学特征。郭志研究员对软岩流变过程与强度进行了研究,提出根据流变过程中 4 个特征点的变化规律确定临界等速流变应力的方法和流变强度取值原则。周楚良研究了软岩强度衰减、流变与围岩稳定性,提出了岩石强度随时间呈指数函数衰减的计算公式,以及流变呈指数函数递增的规律。曲永新总结了国内外有关泥质岩成胶作用研究成果,提出了快速有效的泥质岩工程分类方法和判别指标^[19]。

岩土体的强度是指包含结构面网络的岩体(包括土体)的强度,岩体的强度不同于岩石(完整岩块)的强度,也不同于结构面的强度,岩体的强度受岩石强度、结构面强度、岩体结构、岩体赋存环境等多种因素的控制。因此,导致软弱围岩强度较低的原因主要有以下几点^[19]。

1) 岩石强度低

根据中国工程岩体分级标准、岩土工程勘察规范、铁路隧道设计规范等资料,一般将单轴饱和抗压强度低于 30MPa 的岩石称为软质岩或软岩。软质岩主要包括未成岩的岩石、已风化的岩石以及含有软弱矿物的岩石。未成岩的岩石,即尚未固结的岩石,其范围大致是新第三系以后的低固结或未固结的砂岩、泥岩,以及形成一部分冲积层的砂质土、砾质土、火山灰等未固结的以及固结度低的岩石,统称为未固结岩石。已风化的岩石是指由于风化作用而使强度降低的岩石,包括全风化的各类土。含有软弱矿物的岩石主要包括泥质岩组,含煤岩组,含盐、含石膏岩组,云母片岩、滑石片岩组等。

2) 岩体破碎

对于一些坚硬的岩石,如坚硬的岩浆岩、石灰岩、砂岩等,虽然岩石强度较高,但若受到强烈的构造运动影响,会导致节理、裂隙、断层等结构面发育,从而致使岩体强度降低,围岩

稳定性变差。

3) 围岩赋存环境差

隧道围岩由于赋存于富水、高地应力等不良地质环境中,而易引起涌水、塌方等地质灾害,赋存于这种地质环境下的围岩也可称为软弱围岩。隧道工程的软弱围岩,通常是指包括软弱、破碎、富水等不良地质条件下的围岩。从围岩级别上看,这类围岩基本上属于V、VI级围岩,对大断面和特大断面隧道,也包括一部分IV级围岩在内。简单地说,隧道软弱围岩就是用通常的初期支护及简易的小导管支护不能控制开挖后的围岩变形,而需要采用“有针对性的控制变形对策”(即所谓的辅助工法)的围岩。

1.2.2 软弱围岩隧道

软弱围岩由于强度低,对工程扰动极其敏感,在受拉或受压条件下将产生塑性区,使围岩和支护发生变形。一旦施工方法和工程措施不当,极易发生初期支护变形侵限和隧道坍方等工程灾害。从隧道开挖后的围岩变形看,在软弱围岩中开挖,经常出现以下力学现象:拱顶崩塌,掌子面失稳,底鼓现象严重,长时间的持续变形或变形不收敛,初期支护严重变异,在富水条件下出现异常涌水与围岩流失等。综合而言,在软弱围岩地质条件下,变形的终极结果是造成掌子面崩塌、拱部坍塌以及各种异常现象。

围岩变形是评价隧道围岩稳定性的重要指标,也是隧道设计的基本准则之一。隧道开挖后,围岩变形稳定性大致经历三个阶段:弹性变形阶段,弹性变形和塑性变形共存阶段,以流变为主,流变、塑性变形共存,同时围岩发生损伤、断裂、挤出及膨胀耦合作用阶段。坚硬围岩以弹性变形和塑性变形为主,而软弱围岩则以塑性变形和流变变形为主。软弱围岩隧道的变形特征主要包括以下几点^[19]。

1. 变形量大

隧道开挖后,能够产生显著的塑性变形是软弱围岩最主要的显性特征。实测数据表明,软弱围岩洞壁位移可达数十厘米,甚至一百多厘米,往往表现为初期支护严重破裂,如喷射混凝土开裂脱落、钢架扭曲,甚至引起二衬混凝土的开裂。

2. 初期变形速度快

坚硬围岩在隧道开挖后,变形很快达到稳定状态,其变形速率很小。而软弱围岩隧道开挖后,变形速率较大。

3. 变形持续时间长

软弱围岩不仅初期的变形速度快,而且延续时间长,具有明显的流变特征。众多研究表明,软弱围岩隧道开挖后很长一段时间内,支护或衬砌上的压力一直在变化,这可解释为软弱围岩蠕变的结果。例如花岗岩、砂岩等坚硬岩石蠕变变形很小,且在很短时间内趋于稳定。而页岩、泥岩等软弱岩石的蠕变变形非常明显。可见,软弱围岩的蠕变特性对隧道围岩的变形及其稳定性影响显著。

4. 围岩破坏范围大

软弱围岩隧道周边的塑性区扩大,特别是支护不及时或结构刚度、强度不足时,围岩破坏范围更大。

5. 压力增长快

围岩压力随开挖时间迅速增大,在很短的时间内,围岩即与支护结构接触,产生较大的围岩压力。如果施工方法和支护措施得当,支护封闭后变形就应得到控制。反之,即使支护封闭后,变形还会发展,以致支护发生破坏。因此,掌握施工阶段大变形的发展规律和控制技术,是软弱围岩隧道施工的关键。

6. 变形破坏形式多样

软弱围岩隧道的变形破坏形式一般表现为喷射混凝土严重开裂、初期支护变形侵限、钢架变形扭曲、隧底上鼓、拱顶掉块坍塌等。如关角隧道9号斜井井身X0+40~X0+25段右侧(面向掌子面)边墙出现不同程度的变形,钢架扭曲、混凝土剥落。I线隧道DK308+000~DK308+115段、II线隧道DYK307+820~DYK307+940段洞身过大的变形导致喷射混凝土剥落掉块,拱架严重变形,并发生扭曲。正洞DYK304+430~DYK304+500段,多处出现喷层开裂、剥落,型钢钢架扭曲,底部上鼓。个别地段出现变形侵限、坍塌以及衬砌开裂。两水隧道DK359+407~DK359+427区段,施工中变形量大,多处出现变形侵限、喷层脱落掉块、支护开裂、钢架扭曲、拱脚失稳、底板隆起等现象,其中最大侵限处侵入净空40cm。天平山隧道DK372+760~DK372+765段拱部喷射混凝土开裂,钢架扭曲。

围岩的强度是指围岩抵抗外力的能力,包括抗压强度、抗拉强度和抗剪强度。对于隧道而言,不同部位的围岩所处的应力状态各异,有的部位以压应力为主,则应考虑围岩的抗压强度,有的部位以拉应力为主,则应考虑围岩的抗拉强度。当隧道开挖后,如围岩重分布应力超过围岩的强度,则将出现压缩破坏、拉伸破坏或剪切破坏,以及压剪或拉剪的混合破坏等。围岩强度不同于岩石强度,也不同于结构面强度,而是指包含结构面的岩体的强度,因此,围岩强度受岩石强度、结构面强度、岩体结构、围岩赋存环境等因素的控制。从以上分析可知,影响围岩强度的主要因素是岩石强度、围岩的完整性系数以及结构面的特征等。软弱围岩的强度特征主要有以下几点:①软弱围岩的强度随岩石强度的降低而降低,当围岩的完整性及结构面特征恒定时,围岩的强度和岩石强度呈线性变化;②当构成围岩的岩石强度恒定时,围岩强度随围岩的完整性系数减小而降低,即围岩越完整,围岩强度越接近岩石强度,围岩越破碎,围岩强度越低;③当围岩中存在控制性软弱结构面时,如存在断层、挤压破碎带,则围岩的强度受结构面产状与洞轴的关系以及结构面强度两个因素的影响;④软弱围岩的强度受地下水影响较敏感,地下水对软弱围岩有显著的软化和泥化作用。地下水对软弱围岩的软化和泥化作用主要表现在对结构面中充填物物理性状的改变上,岩体结构面中充填物随含水量的变化,发生由固态向塑态直至液态的弱化效应,使软弱围岩的力学性能降低,黏聚力和内摩擦角值减小,围岩变形量大,稳定性降低。

1.3 高地应力软岩荷载问题的研究现状

1.3.1 高地应力软岩荷载问题国外研究现状

在围岩压力和围岩与支护结构相互作用机理研究方面,有以岩体本构模型为出发点的

理论研究,也有新兴科学理论及方法交叉发展。由于地质条件的差异性,不同国家和地区研究的侧重点也不相同,更有工程实践超前理论发展等特点。

在隧道围岩的应力分布、稳定性及围岩压力研究方面,许多学者对连续介质围岩中单拱隧道的解析解进行了研究。半个多世纪以来,一些学者曾采用各种岩体本构模型和不同的强度准则,对隧道围岩的应力和位移进行过广泛的研究。许多岩石力学工作者以弹塑性理论为基础研究了围岩的应力分布、稳定性及围岩压力。从理论上讲,弹塑性理论比较严密,但数学运算复杂。为了简化计算和分析,一般总是对圆形洞室进行分析,因为圆形洞室在特定条件下是应力轴对称的,数学上容易解决。在这当中比较有名的有芬纳(Fenner)公式、卡柯(Caquot)公式和勃莱(Bray)公式^[20]。

当前,科学技术的发展日新月异,各学科之间相互渗透,相互影响。由于岩体材料的复杂性、模糊性和不确定性等,许多新兴科学理论及方法被引入到本领域中来。由 Kachnov 和 Rabotnov 创立的损伤力学理论,现已被广泛应用于各个工程领域,成为固体力学研究的一个前沿。Dougill 最早把损伤力学应用于岩石和混凝土材料。Kyoya^[21]等最先将损伤力学应用于地下洞室岩体的稳定性分析。近几年,Kawamoto^[22]、Zhang Wohua^[23]等又将其应用延伸到节理裂隙岩体。分形几何学是 Mandelbrot 创建并发展起来的一门研究自然界不规则现象及其内在规律的学科。它主要研究一些具有自相似性的不规则曲线或位形。分形几何已被应用于岩石力学问题的研究中。Chiles^[24]通过对岩体中 6600 多条断裂形迹的统计分析指出,这些断裂具有统计自相似性,并提出了岩体裂隙网络模拟的分形方法。模糊数学也被引入岩石力学领域以研究天然岩石的不确定性。此外,神经网络理论、系统工程、人工智能专家系统、灰色系统理论、控制论、信息论的成就也在岩体力学领域中得到应用^[20]。

由于东、西方地质条件的差异性,欧美等发达国家对高地应力条件下的硬岩及岩爆等问题研究的相对较多,而对以构造应力作用为主的隧道软弱围岩的本构模型、开挖支护后围岩压力与位移、应力分布等研究相对较少。

1.3.2 高地应力软岩荷载问题国内研究进展

随着中国经济、技术的飞速发展,尤其是近年来重大地下工程建设规模越来越大,埋深越来越深,高地应力问题在国内引起了极大关注和深入研究。仅在隧道工程方面,就遇到了大量的高地应力问题。近几年来,穿越高地应力区且工程地质环境恶劣的软弱围岩长大隧道工程不断涌现,典型的如全长 20.050km 的兰武二线乌鞘岭特长隧道^[25],全长 32.605km 的新关角隧道^[26],以及兰渝铁路木寨岭隧道^[27](全长 19.090km)、天池坪隧道(全长 14.528km)、两水隧道(全长 4.94km)等。高地应力软弱围岩问题的主要表现就是大变形问题,尤其是从乌鞘岭隧道的修建开始,中国科研工作者再次更加关注高地应力软弱围岩的大变形问题。

目前中国对高地应力问题的研究主要集中在地应力测试、高地应力下岩体力学性质、高地应力下岩体变形与破坏、岩爆机理与防治、软岩支护等方面,取得了大量有价值的研究成果。对高地应力下软岩变形机理的关注和研究要从中国修建二郎山隧道时遇到软岩大变形说起。李永林^[28](2000)在研究二郎山软岩变形后认为,大变形是剪切错动断裂面下的失稳,是正应力作用下局部产生的失稳。何满潮^[15](2002)进一步系统地论述了软岩工程力学