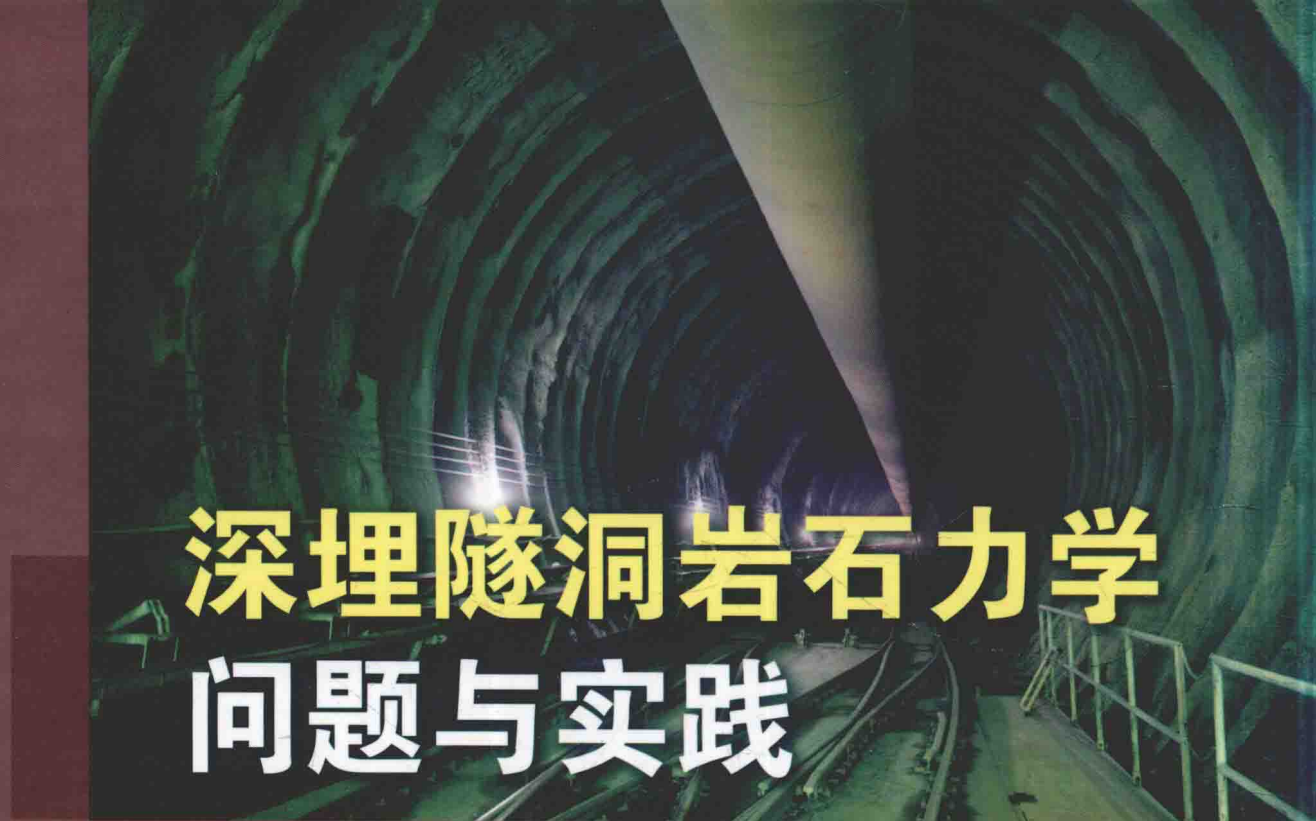




深埋隧洞岩石力学 问题与实践

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

张春生 侯靖 褚卫江 刘宁 朱焕春

著

SHENMAI SUIDONG YANSHI LIXUE
WENTI YU SHIJIAN



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

深埋隧洞岩石力学 问题与实践

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

张春生 侯靖 褚卫江 刘宁 朱焕春

著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书围绕深埋水工隧洞中的岩石力学问题,总结近几十年来深埋地下工程的研究思路和经验教训,以锦屏二级引水隧洞为工程依托,借鉴国际上其他领域内深埋工程的设计经验,系统开展了深埋岩石力学问题研究工作,力争将认识提高到目前岩石力学领域的最新研究和认识水平,并将在锦屏二级引水隧洞工程中获得的认识和经验总结提炼出来,作为今后深埋地下工程研究工作和设计工作的借鉴。

本书可供从事水利水电、交通、矿山、石油存储、核废料存储、输水输气等深埋地下工程的设计、科研、工程技术人员借鉴参考,也可供相关高等院校师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

深埋隧洞岩石力学问题与实践 / 张春生等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016. 11
ISBN 978-7-5170-4918-0

I. ①深… II. ①张… III. ①深埋隧道—水工隧洞—岩石力学—研究 IV. ①TV672

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第294117号

书 名	深埋隧洞岩石力学问题与实践 SHENMAI SUIDONG YANSHI LIXUE WENTI YU SHIJIAN
作 者	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 著 张春生 侯靖 褚卫江 刘宁 朱焕春
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 31.5印张 756千字 6插页
版 次	2016年11月第1版 2016年11月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	158.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

近年来,随着我国经济的快速发展,一大批水利水电、交通、矿山等国家战略与生命线工程开工建设,工程规模之巨大、地质条件之复杂,为世界所罕见。这些工程的建设涉及的深埋工程通常处于高应力环境中,开挖引起的岩体强卸荷以及复杂的地质条件,一方面导致了岩体力学响应的复杂性,另一方面也构成了岩体破坏失稳类型的多样性,这给深埋工程的建设带来了巨大挑战。此外,深部岩体复杂的力学特性和响应,也将直接产生更加严重的工程灾害,如硬岩岩爆和软岩大变形等,虽然国内外地下工程实践已积累了丰富的支护设计经验,但是由于缺少工程实践条件,针对深埋工程的研究成果相对比较少,很多问题超越了现有的工程经验和认识,需要形成一套专门系统的研究方法和工作思路,为类似工程建设所用。

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司承担设计的锦屏二级水电站深埋隧洞作为世界上埋深最大、技术难度最高的隧洞工程之一,75%以上洞段埋深超过1500m,最大埋深达到2525m,实测地应力超过了100MPa。在隧洞开挖过程中遭遇了严重的高应力破坏,遇到岩爆超过千次,常规的开挖支护设计方法很难满足安全需要,工程建设面临巨大的技术挑战,在掘进过程中遇到高地应力破坏、强烈岩爆、软岩大变形等各种技术难题极具代表性,也给深埋岩石力学问题的研究提供了丰富的素材,因此利用锦屏二级工程特定条件,开展深埋隧洞岩石力学的基础理论和工程技术性问题的研究,形成针对深埋工程设计和建设的系统性工作理念和技术方法,对我国水电工程建设以及深埋地下工程的建设具有重要的指导性意义。

鉴于岩石力学是一门实践性很强的工程应用学科,而工程实践是推动学科进步的主要动力。本书不同于一般科技图书面面俱到地论述岩石力学问题,也不同于一般教科书从岩石力学的原理和公式层层展开,而是致力于解决工程中的实际问题,编撰的出发点和最终目标都是为工程实践服务,而且不仅仅在于交流经验、传播思想,更重在启迪明智、创新思维;以锦屏二级深埋隧洞为主要依托工程,以我国水电行业现行技术工作方法为基础,以建设工程中面临的关键技术难题为对象,紧密围绕深埋水工隧洞中的岩石力学问题,充分借鉴国际上其他领域深埋工程的设计经验,总结近几十年来深

埋地下工程的研究思路和经验教训，特别是理论认识、技术方法和工程措施，以翔实的资料和真实的数据对深埋岩石力学与地下工程问题进行了全面的探索 and 总结，力争将认识提高到目前岩石力学领域的最新研究和认识水平。本书既是以深埋工程为依托的一项科研成果，也是从事这项工作的工程师们的实践经验的结晶，愿这项成果能够受到广泛的关注和应用，相信本书对于深埋地下工程的建设实践和成果共享大有裨益。

本书包含十章：第一章介绍了岩石力学与深埋地下工程相关的基本概念和研究历程，帮助读者了解相关背景，并对工作流程和工作要求也做了相应的阐述，帮助读者建立起一个大概的框架和研究思路，即在深埋条件下，地应力成为影响围岩稳定性乃至围岩力学特性的基础性因素。第二章主要介绍了深部地应力场的相关研究工作方法。深埋岩体受高应力的影响，其试验方法、力学特性、开挖响应以及支护设计都不同于浅埋工程，由于目前国内对于深埋工程的研究，主要停留在理论阶段，真正接触的工程实践并不多，同样在锦屏二级工程研究的开始阶段，由于认识上的不足，也走过一些弯路。第三章～第六章，从最基础的岩石力学试验开始，结合锦屏二级深埋隧洞的实践经验，对深埋工程的特殊研究工作方法进行了系统的论述。岩爆和软岩大变形是深埋工程中的两个关键的工程难题，此类问题的防治措施仍在探索的过程中，虽然国内外工程实践已积累了大量的工程经验，但仍存在很多问题超越了现有的工程经验和认识。第七章～第九章对锦屏二级深埋隧洞中的工程实践经验进行提炼总结，为读者在遇到类似工程问题时提供借鉴。第十章对书中的相关成果在锦屏二级深埋隧洞工程中的应用进行了概括总结，以帮助读者形成系统的认识。

在研究与编撰过程中，雅砻江（流域）水电开发有限公司、中国科学院武汉岩土力学研究所、Itasca 国际咨询公司对相关成果的研究提供了资助和技术支持，在此表示衷心的感谢！

由于时间仓促，加上水平限制，书中难免有错误或不完善之处，敬请读者批评指正，愿共同探讨！

作者

2016 年 1 月

目 录

前言

第一章 岩石力学与深埋工程	1
第一节 概述	1
第二节 岩体工程潜在问题与工作流程	7
第三节 深埋工程研究与工作方法	12
第四节 锦屏二级水电站深埋水工隧洞群	25
第二章 深部地应力分析与工作方法	29
第一节 概述	29
第二节 地应力测试和分析方法	29
第三节 地应力的一般分布规律	55
第四节 地应力分布的局部性	59
第五节 深部地应力分析方法的实践应用	71
第六节 本章小结	96
第三章 深埋岩石破裂损伤特性试验方法	98
第一节 概述	98
第二节 岩体力学特性与试验	99
第三节 深埋大理岩脆-延-塑转换特性试验	102
第四节 深埋脆性岩石破裂特性试验	105
第五节 深埋脆性岩石无损取样技术	116
第六节 现场综合原位试验	122
第七节 复杂岩体力学特性数值试验	158
第八节 本章小结	162
第四章 深埋岩体力学特性及其描述方法	164
第一节 概述	164
第二节 岩体的基本力学特征	165
第三节 岩体强度准则	167
第四节 深埋工程常用数值方法	175
第五节 脆-延-塑转换特征的连续力学方法描述	181
第六节 脆-延-塑转换特征的非连续力学方法描述	191
第七节 脆性岩石破裂扩展时间效应	197

第八节 本章小结·····	212
第五章 深埋脆性围岩开挖响应及监测优化·····	214
第一节 概述·····	214
第二节 深埋脆性围岩主要开挖响应·····	215
第三节 深埋脆性围岩开挖响应特征分析·····	230
第四节 深埋围岩破裂损伤演化特征分析·····	235
第五节 深埋围岩损伤区深度预测·····	242
第六节 深埋隧洞监测设计优化·····	248
第七节 本章小结·····	263
第六章 围岩支护设计与实践·····	265
第一节 概述·····	265
第二节 围岩支护设计基础·····	266
第三节 块体稳定支护设计·····	269
第四节 变形问题支护设计·····	272
第五节 应力型破坏支护设计·····	282
第六节 深埋隧洞支护实践经验总结·····	292
第七节 本章小结·····	307
第七章 岩爆诱发机理与影响因素·····	309
第一节 概述·····	309
第二节 岩爆类型与特征·····	311
第三节 应变型岩爆诱发机理·····	316
第四节 构造型岩爆诱发机理·····	320
第五节 岩柱型岩爆诱发机理·····	329
第六节 地应力状态对岩爆的影响·····	332
第七节 岩石力学特性对岩爆的影响·····	335
第八节 工程因素对岩爆的影响·····	339
第九节 开挖尺寸对岩爆的影响·····	343
第十节 其他因素对岩爆的影响·····	347
第十一节 锦屏二级岩爆诱发机理总结·····	350
第十二节 本章小结·····	351
第八章 岩爆的预警与防治·····	353
第一节 概述·····	353
第二节 岩爆风险预警与评价方法·····	354
第三节 岩爆防治方法的选择·····	371
第四节 岩爆条件下的围岩支护设计方法及其应用·····	375
第五节 应力解除爆破技术及其应用·····	383
第六节 岩爆防治施工技术要求·····	389

第七节	钻爆法掘进条件下岩爆防治经验总结.....	393
第八节	TBM 掘进条件下岩爆防治经验	403
第九节	本章小结.....	408
第九章	深埋大直径软岩隧洞变形与稳定控制.....	410
第一节	概述.....	410
第二节	软岩的基本概念.....	411
第三节	深埋软岩变形破坏的内在机制.....	412
第四节	软岩变形程度评价及支护对策.....	421
第五节	深埋软岩隧洞支护设计方法.....	426
第六节	锦屏二级绿泥石片岩洞段变形与稳定控制.....	445
第七节	深埋大直径软岩隧洞的长期稳定性评价.....	471
第八节	深埋大直径软岩隧洞监测设计优化.....	479
第九节	本章小结.....	487
第十章	总结与展望.....	488
参考文献		490

第一章 岩石力学与深埋工程

第一节 概 述

一、基本概念

岩石力学是一门新兴的交叉性学科,作为一门独立学科起源于20世纪中期。岩石力学的突出特点是强调实践性,同时由于行业特点和地域性要求的差异,岩石力学也赋予了行业和地域特色。本书所述内容的基础是中国水电行业高地应力条件下的工程实践,同时借鉴和引用了近期国内外深埋岩石工程的认识和理念,使本书的内容能够紧跟国际研究潮流。鉴于本书定位于具备良好岩石力学知识和一定实践经验的读者,为方便阅读理解,本节专门介绍本书所引用的岩石力学基本概念,这些基本概念包括:①岩石和岩体的定义与差别;②岩石力学工作范畴;③深埋的定义和对应的埋深水平及现场界定;④岩体力学特性(力学行为)和围岩开挖响应。

1. 岩石和岩体的定义和差别

岩石和岩体的定义和差别在很多教科书中已经被提及。本书中“岩石力学”术语中的岩石包括了岩石和岩体,但多指岩体。其中的岩石是某种单一岩性的完整块体,而岩体是岩(石)块和结构面组成的综合体。当岩石被单独引用时,指某一岩性类型的完整块体,其力学特性用标准试样的室内结果描述。这一话题并非来自中文表达或中文翻译,在英文中同样存在,国际岩石力学学会的英文为“International Society for Rock Mechanics”,学会对“岩石力学(Rock Mechanics)”工作范畴的定义包括岩石(rock)和岩体(rock mass)。虽然字面上有些误导,但已经约定俗成,本书中不再另作讨论。

2. 岩石力学工作范畴

岩石力学起源和发展经历了两个中心:一个中心是起源于矿山行业的一些英语国家,如美国、南非、加拿大等;另一个中心是民用工程的部分欧洲国家,如奥地利、法国、葡萄牙、意大利等。这两个中心建立的岩石力学体制基本相同,工作范畴包括现场调查、试验测试、计算分析、工程设计和施工技术服务等,主要包括科研和工程实践两种方式。因此,本书所叙述的内容包含了从基础资料调查到施工现场技术服务的整个流程,而不是把岩石力学工作范畴局限在试验测试和计算分析环节。

3. 埋深的定义和对应的埋深水平及现场界定

(1) 深埋的定义和对应的埋深水平。本书中的深埋是一个不确定概念,不特指某个具体的深度。深埋是高地应力的简化和通俗表达方式,可以定义为工程活动导致岩体普遍开始表现出非线性力学行为所对应的埋深。该定义的核心是岩体非线性力学行为,即工程活动(如开挖)导致的应力变化使得岩体的表现已经普遍地超出了弹性阶段,岩体内部结构特征出现变化,基本强度受到显著影响。该定义中包括了两个修饰词,即“工程活动”和

“普遍”，前者区别于自然岩体，即本书讨论的对象为工程岩体，岩体荷载的来源是工程活动（如开挖）对自然地应力场的扰动和改造；后者针对了自然条件的变化性。工程岩体表现出非线性特性的两个基本影响因素是岩体强度和地应力水平，二者都具有显著的空间变化性。比如，当一条竖井开挖到 500m 时因为局部异常可以发生显著的应力型破坏现象，但真正开始普遍出现这类问题的埋深可能在 1500m，就这个工程而言，埋深大于 1500m 则属于深埋。

地应力和岩体强度是决定工程岩体是否普遍出现应力型问题（岩体非线性的工程表现）的两个基本因素，在一定的岩体强度条件下，埋深是影响地应力水平的基本因素，因此本书中深埋的岩石力学含义是高应力。不过埋深不是唯一的因素，构造应力水平还可以显著影响一个地区的总体地应力水平，使得同一埋深条件下不同地区的地应力水平差异悬殊。比如中国西部地区的地应力水平总体高于东部，同样岩体条件下，深埋在西部对应的深度会明显低于东部。另一方面，即便是在西部地区地应力分布完全相同时，当两个不同工程场址区的岩体强度存在明显差别时，岩体开始出现非线性响应的埋深也会不同，深埋对应不同的具体深度。

（2）深埋的现场界定。这是工程实践中关心的问题之一，即什么条件下开始出现工程需要关心的深埋特定问题。上述关于深埋定义中的岩体非线性是一个学术性概念，对应的工程术语为应力型问题，它包括硬质围岩出现如破裂、片帮、岩爆等一系列破坏形式，可以在工程实践中观察和辨别。地下岩体开挖以后，开挖面周边一些部位会出现应力升高，即二次应力集中现象，如果围岩中二次应力最高水平超过岩石单轴抗压强度时（注意深埋高围压条件下岩体的峰值强度和围岩二次应力水平可以超过岩石单轴抗压强度）。例如很多岩浆岩的单轴抗压强度可以超过 200MPa，意味着在深埋条件下的围岩应力可以更高一些。因此围岩一旦产生应力型破坏，其能量水平相当高。目前世界上有记录的资料显示破坏释放的能量等同于里氏 5.1 级的地震。这种能量释放基本上发生在开挖工作面附近，而不是像构造地震那样远离地表建筑物数公里乃至数十公里的地下深部。因此几乎任何加固措施都不可能避免这种能量水平造成的工程影响。

4. 岩体力学特性和围岩开挖响应

岩体力学特性（或称为岩体力学行为）和围岩开挖响应分别代表了学术性概念和工程性概念。其中的岩体力学特性泛指岩体受到荷载作用以后可能出现的变化，最基本的表达方式应力-应变关系曲线（本构关系）；围岩开挖响应指岩体力学特性决定的工程表现形式，比如具有脆性特性的岩体开挖以后的表现形式，包括弹性变形、破裂损伤、破裂扩展以及破裂扩展以后导致的鼓胀变形等，这些都通称为给定条件下围岩的开挖响应。

岩体力学特性包含的内容非常丰富。从连续介质力学角度，岩体力学特性可以采用本构关系来定量描述，具体通过一些数学方程和参数的方式来实现。比如在应力-应变阶段全过程曲线中以峰值强度为界，可以大致地分为峰前特性（行为）和峰后特性（行为），工程实践中常常用岩体的弹性模量和峰值强度定义峰前力学行为，而用脆性和塑性程度及残余强度描述峰后曲线形态。

岩体的峰值强度和残余强度不仅取决于岩体自身基本条件（岩石类型和结构面发育状况），而且还与受力，如围压状态密切相关。岩体强度和围压之间的函数关系即为岩体强度

准则,包括摩尔-库仑 (Mohr-Coulomb, MC) 强度准则和霍克-布朗 (Hoek-Brown, HB) 强度准则等。所有这些术语及其含义已经在很多岩石力学著作和文章中叙述,这里不再详述。不过与浅埋条件下相比,这些传统的理论(如强度准则)在应用环节可能存在一些差别,体现了同样的理论在深埋和浅埋条件下应用方法的差异,这将在下文中叙述。

虽然大部分条件下可以采用传统的力学理论来描述深埋岩体力学行为和分析深埋工程的潜在问题,但是深埋岩体的某些力学行为有时并不能很好地被数学函数所描述,需要基础理论和技术手段上的更新。深埋脆性岩石的破裂特性就是典型实例,在研究破裂发生和发展过程时,岩体破裂特性直接影响了连续介质力学理论的适应性。这是因为当应力水平接近岩体的峰值强度时,硬质脆性岩体内往往会产生大量的细小破裂,并可能改变岩体的宏观力学特性。细小破裂的产生和发展过程是问题的内在本质,此时传统的连续力学理论可能存在基础性缺陷,需要采用细观非连续力学理论和相关技术手段描述这一行为。

深埋岩石力学研究和工程实践中需要建立的一个概念是岩体力学特性的变化性,即便是给定埋深条件下的给定岩体,其力学特性也不是一成不变的。影响岩体力学特性的“外在”因素还包括时间、尺寸和围压条件,分别称之为岩体力学特性的时间效应、尺寸效应和围压效应。

(1) 时间效应。在一般埋深条件下,普遍认为岩体力学特性的时间效应多限于软弱性质岩石地区,表现为流变变形。但在深埋条件下,硬质岩石组成的岩体也可以表现出很典型的时间效应,在一些场合也被类比性地称为硬岩流变。深埋条件下硬质岩体力学特性时间效应的内在实质是破裂扩展,或称为应力腐蚀现象。在完整岩体内产生微小裂纹以后,裂纹端部产生局部应力异常,在受到外界条件的影响、如湿度和温度的变化以后,裂纹端部扩展。这一过程可以重复出现,表现形式上是裂纹随时间扩展。

(2) 尺寸效应。岩体力学特性尺寸效应是一个古老的岩石力学问题,因为对这一特性缺乏有效的定量研究成果,其工程应用水平相对较低。即使人们认识到这一特性的存在和对工程的潜在影响,但难以定量地评价其影响方式和程度。

岩体力学特性中尺寸效应的最基本描述是峰值强度。假设对同一岩体取不同尺寸的试样进行试验时,获得的强度值随试件尺寸增大而减小。当然,岩体力学特性尺寸效应远不只是表现在峰值强度上,还会影响到应力-应变曲线的形态,即影响到岩体的基本力学特性,甚至导致性质上的变化(如从脆性转换到塑性)。岩体峰后力学特性的尺寸效应更能帮助解释一些工程,如锦屏二级深埋隧洞岩爆风险和开挖洞径之间的非单调变化关系,同时也对岩体峰后非线性力学特性尺寸效应的这一基础性研究提出了要求,体现了实践对理论发展的促进作用。

导致岩体力学特性产生尺寸效应的一个基本因素是岩体内的结构面。小尺寸试件内可以不包括任何结构面,而大尺寸试件内可以出现多条结构面,即不同尺寸岩体试件中结构面数量对岩体力学特性可以产生显著影响。然而,现实中的问题可能并不如此单一。以加拿大 URL (Underground Research Laboratory) 竖井片帮破坏为例的研究成果显示,即便是没有任何可见结构面的完整岩体,其强度也存在尺寸效应。此外,很多变质岩中存在不同规模的岩脉发育,岩脉也可以改变岩体力学特性,表现为力学特性随尺寸的变化。

岩体尺寸效应的理论研究往往以“试件”为对象,对“试件”施加荷载进行研究。工

程实践中感兴趣的是工程活动荷载变化范围内的岩体，加载也是针对这部分岩体而言。以隧洞为例，在同等条件下开挖洞径越大，围岩受载范围也越大，相当于试件尺寸越大。因此在地下工程实践中开挖断面的差异可能会显著地涉及岩体力学特性的尺寸效应，使得同样条件下不同开挖洞径之间的围岩响应方式存在差异甚至可能缺乏足够的可比性。

(3) 围压效应。岩体力学特性的围压效应是深埋条件下的一个普遍问题，实际上也已经体现在经典的岩石力学理论中。比如几乎所有的岩体强度准则包括最常用的摩尔-库仑强度准则和霍克-布朗强度准则，它们都是强度和围压之间的函数关系，都描述了岩体峰值强度随围压变化的基本特征。当深埋条件下岩体围压超过一定水平时，岩体的强度和围岩应力水平都可以超过岩石单轴抗压强度。

岩体力学特性的围压效应不仅仅只是体现在峰值强度的变化性方面，围压水平还可以影响到岩体的峰后力学行为。岩石室内三轴试验结果已经揭示一些类型的岩石存在脆-延转换特性，即低围压条件下岩石表现出脆性特性，围压升高以后脆性减弱而延性增强，甚至直接表现为理想的塑性特征。图 1-1 给出了不同围压岩样的应力-应变曲线，显示了这一现象。

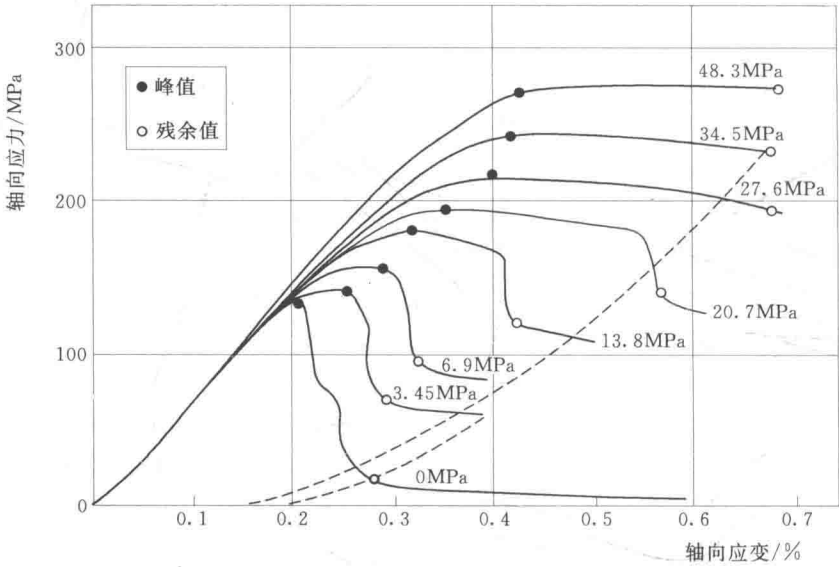


图 1-1 岩石脆-延转换力学特性的室内试验结果^[1]

岩体力学特性是决定地下工程开挖以后围岩响应的主导性因素，因此岩体固有力学特性决定了围岩开挖响应的性质和类型，岩体力学特性的变化（时间效应、尺寸效应和围压效应等）将直接影响到围岩的现场表现。

岩体的峰前力学特性决定了围岩的弹性变形和发生屈服破坏的条件。在深埋条件下，这两个方面的响应往往不被工程关注。这是因为围岩弹性变形基本不导致任何工程问题，多是开挖过程中释放的部分。深埋的定义是围岩开始普遍地出现非线性行为，即围岩会普遍地产生屈服现象。

深埋工程实践往往关心的是围岩屈服程度和表现形式,其中岩体峰后力学特性起到了决定性作用。在其他条件相同时,峰后行为中脆性特性突出时,围岩瞬间剧烈破坏程度相对较大;也具备导致剧烈岩爆破坏的条件。此时工程中关心的围岩变形是脆性破裂发展一定程度以后岩体扩容、体积膨胀的结果,意味着这部分岩体已经丧失了很大一部分的承载力,对支护力的要求可能会更高一些。但延性或塑性特征占主导地位时,围岩强度损失相对不明显,也不可能产生如岩爆一类的剧烈脆性破坏,同等条件下有利于工程的施工安全。

深埋硬质岩体力学特性时间效应决定的最常见现场表现形式是破裂滞后现象。开挖面新揭露的岩体完整性很好,依照浅埋条件下的经验可以不进行支护,但是在一段时间以后,岩体的完整性逐渐变差,甚至出现大面积的围岩坍塌破坏,工程实践已经验证了深埋条件下完整围岩可能仍然需要及时有效的系统支护。当然这只是岩体力学特性时间效应对工程实践造成的一个方面的影响,工程实践中还涉及诸如支护类型选择、支护时机、围岩长期安全性诸多等环节的问题。

二、本书的编写思路

深埋地下工程岩体通常处于高应力环境下,开挖导致的岩体的强卸荷以及复杂的地质条件构成的工程建设条件一方面导致了岩体力学性质的复杂性,另一方面也构成了岩体破坏失稳类型多样性,表现出复杂多变的变形破坏模式,这给深埋地下工程的建设带来了巨大挑战,常规的支护方法和支护类型很难满足此类工程的支护需求。此外,深部岩体复杂的力学特性和响应,也将直接导致更加严重的工程灾害,如硬岩岩爆和软岩大变形等,这类环境的支护设计方法也仍在探索的过程中,虽然国内外工程实践已积累了大量的支护设计经验,但是仍存在很多问题超越了现有的工程经验和认识,都需要形成一套系统的研究方法和工作思路。

本书以锦屏二级引水隧洞为工程背景,以建设工程中面临的重大关键技术问题为对象,对深埋岩石力学与地下工程问题进行了系统深入的探索和研究,遵循地下工程设计的基本流程,希望能够在深埋地下工程建设中具有广泛的适用性和更好的针对性,这也形成了本书编排的主要思路。

本书第一章首先介绍了岩石力学与深埋地下工程相关的基本概念和研究历程,帮助读者了解相关背景,并对工作流程和工作要求也做了相应的阐述,帮助读者建立起一个大概的编写和研究思路,之后对依托工程锦屏二级水电站引水隧洞工程做了详细的介绍,以方便读者能够迅速融入到本书的编写背景中。

围岩的开挖响应现场表现形式、监测方法以及数值分析技术这些内容贯穿于本书编写的各个章节中,因此本书第二章对该部分内容进行了详细的介绍。

地应力是深埋地下工程中岩体最重要的赋存条件,是制约深埋工程建设的关键因素,在工程建设前必须对地应力场有一个清晰准确的认识,因此本书第三章首先介绍了深部地应力场的分析与工作方法。

在高地应力条件下围岩将表现出不同于浅埋工程的力学特性,例如锦屏二级深埋大理岩所表现出的脆—延—塑转换特性,这些特性无论对于分析围岩的开挖响应还是制定支护策略,都是关键性的基础工作,该部分内容包含在本书的第四章中。

为了更加准确地理解围岩开挖响应所包含的工程信息,需要借助于合理有效的监测和测试手段,以及时了解围岩安全性,并通过调整设计方案和完善施工方法等保证围岩稳定,将该部分内容写入了第五章中。

处于高应力环境下的深埋岩体,在开挖时会发生强烈的岩体卸荷现象,加之各类复杂地质问题,不仅导致了岩体力学性质的复杂性,也构成了岩体破坏失稳类型的多样性,这些破坏都给深埋工程的支护设计带来了巨大挑战,单一或孤立的支护方法和支护类型很难满足此类工程的建设需求。本书的第六章介绍了不同类型破坏的支护方式及在锦屏二级深埋隧洞中的支护设计实践和应用效果。

岩爆和软岩大变形是深埋工程中的两个特殊的工程难题,此类问题的防治措施仍在探索的过程中,虽然国内外工程实践已积累了大量的工程经验,但仍存在很多问题超越了现有的工程经验和认识,本书的第七章、第八章和第九章将在锦屏二级深埋隧洞中的工程实践经验提炼总结出来,为读者在遇到类似工程问题时提供借鉴。

三、本书适用范围

我国岩石力学起步相对较晚的重要原因之一是 20 世纪 90 年代之前我国大型地下工程数量相对较少,岩石力学研究缺乏足够的实践支持,与外界交往也不够广泛和深入。深埋岩石力学研究更是如此。在金属矿山领域,尽管实施了大量大型地下矿山开采,但是开采深度相对不大。除金川等少数几座岩体条件较差的矿山存在一些困难外,普遍性的应力型问题没有真正地表现出来。

最近几年煤矿开采速度较快,一些大型煤矿也达到了约 1200m 的埋深水平。与国际上深埋矿山相比,我国深埋矿山有着自身独有的一些特色。虽然应力型问题已经开始普遍性地影响到深埋矿山的开采,但问题的类型存在一些差别,如瓦斯、顶板稳定等在金属矿山难以遇到或者基本不存在。即便是同样关心的岩爆问题,二者在成因机制和控制手段上也存在差别。

过去我国的岩石力学工程主要研究对象为地表和近地表岩体,应力水平相对较低,岩石强度高,结构面往往成为控制性因素。在过去很长一段时间内,主要针对结构面控制型问题,三峡水电站就是其中最典型的实例。然而,随着工程的需要,开始面对高应力问题,也遇到了难以逾越的难题,如秘鲁 Olmos 深埋引水隧洞 TBM 掘进过程遭遇强烈岩爆以后进度严重滞后,更严重的问题在于缺乏有效的应对措施。

我国西部水电开发中虽然深埋地下工程并不常见,绝大部分地下工程特别是地下厂房洞室群通常也是位于地表以下数百米的深度范围内,然而应力型破坏依然成为西部水电工程建设中需要普遍关注的问题,甚至是对工程建设周期和运行安全占据重要地位的关键性问题之一。其主要原因是我国西部的构造条件和水电站场址所在的深切河谷地貌,使得这些场址区普遍存在高应力现象,其中比较突出的工程部位包括坝基和岸坡内的地下厂房洞室群。

我国西部地区是近现代地壳活动相对活跃的地区,2008 年发生的汶川地震和 2013 年发生的芦山地震就是这种活跃性的表现。地表 GPS 位移监测结果显示了西部地区地表目前仍然处于有规律的运动过程中,岩体初始地应力水平相对较高。

深切河谷地貌可以严重影响岩体地应力分布,在近河床区域形成相对突出的应力集

中现象,形成坝基岩体的高应力水平,可能导致坝基开挖过程的应力型破坏,小湾水电坝基开挖过程中已经出现这类问题。此外,河床应力集中区还会影响到河谷岸坡两侧低高程部位的一定范围内,形成一个与河谷地貌形态相关的局部地应力异常区,当地下厂房洞室群布置在这一区域内时,同样可能面临高应力问题。雅砻江流域的锦屏一级水电站地下厂房、江边水电站地下厂房在开挖过程中都遇到过对工程造成严重影响的应力型问题,前者表现为下游拱肩一带岩体破裂扩展导致的持续松弛,后者为强烈的岩爆破坏。

在我国西部开发建设中,在相对较长一段时间内,交通和水电工程仍然会涉及深埋条件下的地下开挖,还需要解决好这些工程中可能遇到的应力型问题。也就是说,原本是深埋矿山行业关心的应力型问题将比较普遍地存在于我国西部水电、交通、水利工程建设中,这些行业相对缺乏解决应力型问题的认识和经验积累。撰写本书的重要目的就是针对我国西部地下工程建设中的高应力型问题,这些问题可以出现在深埋条件下,也可以是由深切河谷地区特定的初始地应力引起。

我国深埋工程建设在应对高应力问题时,可以借鉴和引用国际、国内深埋矿山行业取得的成果,特别是理论认识、技术方法和一些工程措施。但是,由于行业特点和要求、既往积累、地域文化等方面的显著差别,针对我国深埋工程应力型问题需要建立起适应于本行业和地域实际要求的工作方法和流程,希望本书能起到这方面的作用。

为此,本书以我国水电行业现行技术工作方法为基础,特别强调目前工作方法与解决应力型问题要求之间的差异,并针对应力型问题系统叙述基础资料采集(现场调查、试验、测试等)、分析评价、监测和支护设计、施工技术要求等几个环节需要遵循的工作方法和流程,使得相关的认识和经验能够应用于未来的工程实践之中。

第二节 岩体工程潜在问题与工作流程

一、主要潜在问题

工程建设中的岩体问题大体可以分为三大类,即软岩问题、应力型问题和结构面控制型问题,如图1-2所示。以地下工程为例,这三类问题的典型表现形式分别为围岩大变形、岩爆和结构面组合的块体破坏等。当然,由于现实条件的变化性和复杂性,岩体工程中实际出现的问题在特征和性质上要复杂得多,也可能出现一些复合类型或过渡类型的破坏方式。比如在深埋地下工程实践中,应力型破坏往往还与结构面相关,出现中间情形的破坏类型。

图1-2所示的三种破坏类型分别受到三个基本因素的控制,分别为岩性(岩石强度)、地应力和结构面。这三个基本因素中的任何一个起主导性作用时,都可以导致潜在问题类型和性质的变化。因此,这三类问题也可以叙述为岩性软弱时的软岩问题、高地应力条件下的应力型问题以及结构面占主导作用时的结构面控制型问题。当然,这种叙述是相对粗略和宏观的表达。因为其中的任何一个因素都不可能独立于其他因素存在于自然的岩体中,因此也就不应该绝对和独立地看待这三种类型的问题。针对这三类问题的发生条件和主要表现形式可以进一步叙述如下。

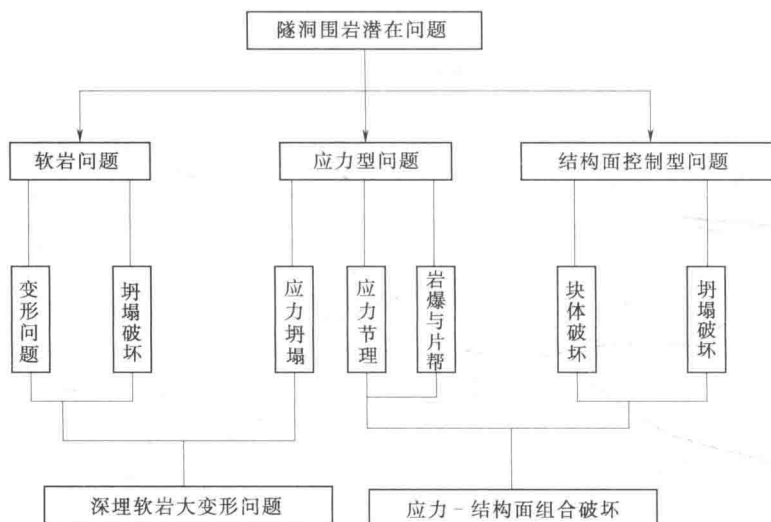


图 1-2 岩体基本地质条件与围岩潜在问题关系简图

(1) 软岩问题。软岩问题主要是岩性起到控制作用的结果，主要体现了岩石基本力学性质的作用。一般来说，只要岩石性质足够软，软岩大变形问题就可能存在。高应力可以使得这类问题更加突出，或者说更容易导致大变形问题的产生。此时结构面的作用往往起次要作用，岩石越软弱，结构面的作用越被弱化。大变形及其导致的坍塌是软岩条件下隧洞开挖以后围岩最常见的潜在问题，这两种方式都大量出现在工程实践中。要说明的是，不应单纯从围岩强度指标自身来判断是否属于软岩，而是要从围岩强度与围岩应力之间的相对关系来分析。

(2) 应力型问题。工程实践中讨论应力型问题时往往针对硬质岩石条件，它同样是应力水平与围岩强度之间关系比较的结果。高应力条件下可以导致完整坚硬岩石的剧烈破坏，成为应力型破坏的典型表现。岩爆、片帮、应力型节理、破损等都是相对坚硬和完整岩体条件下围岩的潜在应力型破坏方式，应力坍塌则主要出现在岩体承载力和应力水平差异明显的非脆性岩体中，多为结构面相对密集发育的岩体，如断层影响带等。

(3) 结构面控制型问题。结构面控制型问题往往指硬质岩石地区低应力水平下结构面切割引起的块体破坏，以岩质边坡工程最常见，也大量存在于浅埋大跨度地下工程中。根据经验，当开挖跨度超过结构面平均间距的 10 倍时，结构面切割导致的块体稳定问题比较普遍。但在深埋高应力条件下，结构面也可以导致围岩的严重破坏。为了区分起见，高地应力条件下与结构面密切相关的破坏也增加了其他限定词，如构造型岩爆等。

在岩体质量相对较高的条件下，浅埋地下工程尤其是大跨度地下工程潜在问题主要为结构面控制型破坏，它与深埋地下工程的应力型破坏存在性质上的差别。因此，从浅埋到深埋体现了量变导致的质变，从而影响到从地质调查到施工技术要求全过程的工作思路、方法和技术等。表 1-1 以坚硬的脆性围岩为例，简要地总结了浅埋和深埋工程实践中在若干环节的差别。

表 1-1 浅埋和深埋条件下脆性岩体特性和工程措施的差别

项目	浅 埋	深 埋
关键因素	结构面几何尺寸与结构面强度	岩体地应力水平与岩体强度
表现形式	块体破坏	剧烈破坏如岩爆、塑性大变形
地质调查	结构面分布和强度特征	岩体力学参数和地应力状态
强度参数	低围压条件下的低黏结强度和高摩擦强度	高围压条件下的高黏结强度和低摩擦强度
岩体特性	结构面控制的非连续性	岩体非线性
计算分析	非连续力学方法	连续非线性力学方法
工程布置	避开与主要结构面的不良几何关系	避开与最大主应力及结构面的不良几何关系
爆破作业	控制爆破减少扰动	特高应力条件下可能需增加扰动解除高应力
加固策略	针对结构面的刚性加固	针对高应力的抗爆、适应变形加固
加固时机	及时加固避免松弛	允许岩体适度应力释放又需要维持必要的强度

二、基本工作流程

上述概要性地介绍了岩石力学学科起源、发展过程及岩石力学学科的工作内容和范畴。概括来说,岩石力学是研究岩石和岩体的物理和力学特性,并将这些研究成果用于工程实践,从而实现对潜在风险的预判和有效控制。岩石力学工程师的基本职责是在现场调查基础上、通过开展必要的试验测试和分析、判断潜在问题的风险程度、制定控制风险的工程措施并提出实施技术要求,复杂工程实践的岩石力学工作往往不能缺少试验测试和计算分析,但试验测试和计算分析绝对不是岩石力学工作的全部。

图 1-3 是归纳总结的岩石力学工作流程,也是本书试图传达的重要理念之一:服务于工程实践的岩石力学工作是由多个环节组成、具有流程要求的系统性工作,而不是仅仅局限在少数几个环节。岩石力学学科虽然要求在一些基础性环节达到精与深,但其实践性属性决定了对系统性的要求,需要在工程经验基础上来促进其发展。

地质测绘和勘探资料是岩石力学工作的基础,它提供了包括地层岩性、地质构造、地质演变历史过程等在内的基本资料。这些资料通常包含了具有普遍性意义的岩石力学信息。比如,岩性类型和近代构造运动活跃程度可能决定了场址区地应力水平,地层年代与历史构造背景也可能指示了岩体内细观裂纹发育条件和对岩体宏观力学特性的潜在影响。

在地质背景资料基础上,岩石力学第一项工作是岩石力学现场调查,主要目的包括以下两个方面。

(1) 工程基本问题性质的判断。它决定了岩石力学试验测试和分析及监测与支护设计的基本工作方向。如果现场判断存在应力型问题的可能性,地应力测试与判断、岩体非线性力学特性的测试与分析验证等则成为岩石力学工作的重要基础性工作内容,反之,当地应力水平不足以导致应力型问题时,工作重点可能转移到结构面空间分布和强度的调查与测试,计算分析也相应地以结构面切割块体稳定为重点。

(2) 解译现场现象。地质勘探工作往往包括钻孔和勘探洞的开挖,当勘探部位的地应力水平足够高时,勘探工作会揭示出一些现场现象,如钻孔岩芯饼化、孔壁破坏、探洞围岩片帮等,这些现象通常可以可靠地指示深埋工程所关心的基础性信息,如地应力相对于