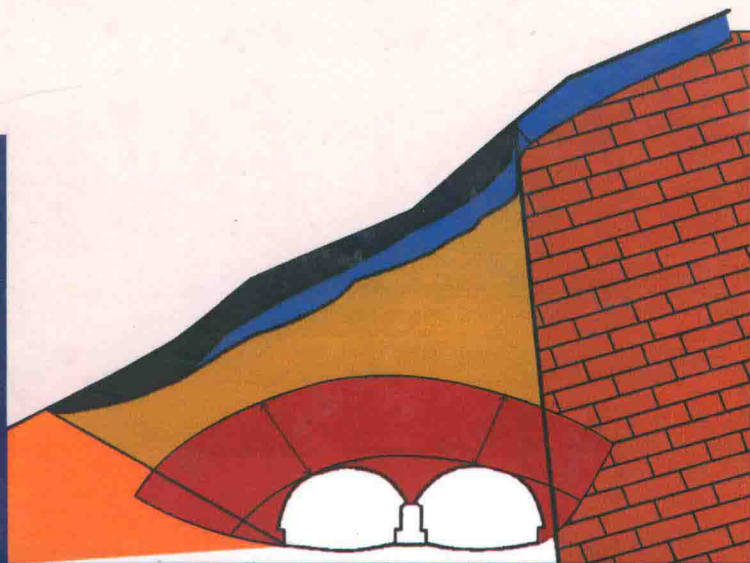


The Stability Analysis and Design Theory of
Surrounding Rock of Underground Engineering

地下工程围岩 稳定分析与设计理论

郑颖人 朱合华 方正昌 刘怀恒 编著



人民交通出版社
China Communications Press

地下工程围岩稳定分析与设计理论

郑颖人 朱合华 编著
方正昌 刘怀恒

人民交通出版社

内 容 提 要

本书从力学理论与地下工程设计角度详细阐述了地下工程围岩稳定分析的解析解、数值分析和数值极限分析,包括岩体原岩应力、围岩应力的线弹性分析、弹塑性分析、黏弹塑性分析、弱面体分析、线弹性分析有限元法、弹塑性分析有限元法、结构面分析有限元法、动力分析有限元法、围岩有限元反分析法、地下工程分析软件介绍、有限元极限分析法、隧洞围岩破坏机理、围岩压力理论、隧洞设计方法等内容。

本书适用于岩土工程勘察、设计和施工人员,亦可供大专院校相关专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程围岩稳定分析与设计理论/郑颖人等编著

. --北京:人民交通出版社,2012.12

ISBN 978-7-114-10249-3

I. ①地… II. ①郑… III. ①地下工程—围岩稳定性—研究 IV. ①TU94②TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 298260 号

书 名: 地下工程围岩稳定分析与设计理论

著 者: 郑颖人 朱合华 方正昌 刘怀恒

责任编辑: 吴有铭 李 农 丁 遥 李 洁

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 31

字 数: 794 千

版 次: 2012 年 12 月 第 1 版

印 次: 2012 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10249-3

定 价: 128.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)





地下工程围岩稳定分析与压力理论的发展已有近百年的历史,经历了古典压力理论、散体压力理论与弹塑性形变压力理论三个阶段,而后者又经历了解析计算法、数值计算法与数值极限分析法三个阶段。1983年出版的《地下工程围岩稳定分析》一书,在解析计算与数值计算上已做了较系统的阐述,近年来数值极限分析法及其相应的地下工程稳定分析、破坏机理认知与设计计算方法又有了新的发展,因而需要适应新的需求,在原有的基础上加以修改、补充、提高,形成系统的当代著作。

本书是一本比较系统和实用的论述地下工程围岩稳定分析和设计理论的学术著作,可作为研究生的教材与参考书。本书具有新颖性,与时俱进;内容比较全面系统,博览群论,能充分反映当代地下工程稳定分析理论;便于读者自学,有较好的启发性,适用于不同层次的研究生及其他读者。

本书内容反映了以下研究成果:

(1)1980年,用复变函数求解了圆形隧洞的无衬砌、有衬砌和有回填层的围岩应力与变形的线弹性解,以及非圆形隧洞的线弹性解。

(2)2007年,提出了能考虑中间主应力的岩土材料三剪能量屈服准则,它是岩土材料与金属材料的共同屈服准则,形成了材料的屈服准则体系。发展了德鲁克—普拉格(Druker-Prager)准则,推导出广义霍克—布朗(Hoek-Brown)准则,并建立了德鲁克—普拉格各准则间的转换关系。

(3)1978年,在国际上率先推导出轴对称条件下圆形隧洞的弹塑性位移解,并给出岩土介质与衬砌共同作用的围岩弹塑性形变压力解答。

(4)1980年,推导出轴对称条件下圆形隧洞黏弹性与黏弹塑性解,并给出岩土介质与衬砌共同作用的围岩黏弹性与黏弹塑性形变压力解答。

(5)在国家标准《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2002)基础上补充发展了结构面的结合程度分类表,具有较好的科学性、实用性与可操作性,并被国家标准所采纳。

(6)在开挖荷载释放中,提出了基于不平衡力的应力释放与开挖步、增量步以及跨开挖步的开挖边界应力释放的两种新算法。

(7)在弹塑性求解中,推导了理想塑性条件下几种屈服条件的增量本构关系。

(8)提出了隧道施工动态增量反演分析与位移预报、横观各向同性黏弹性模型增量位移反演分析、偏压条件下隧洞衬砌结构压力反演分析等反演方法。采用复变量求导法(CVDM)提出以监测位移反演岩土力学参数的方法,在反演隧洞抗剪强度方面具有很高的精度和效率。

(9)指出了有限元强度折减法本质上是极限分析方法,与传统极限分析方法原理相同,只是方法不同,因而将其命名为数值极限分析方法或有限元(可以是有限元、有限差分、离散元等)极限分析方法。

(10)概括提出了判别岩土破坏的三种计算判据,尤其是指出了塑性区贯通是破坏的必要条件,而非充分条件。

(11)首次应用有限元强度折减法求解隧洞围岩稳定安全系数和极限荷载,从而给出了围岩稳定的定量指标,亦即隧洞的剪切安全系数与拉裂安全系数。

(12)导出了圆形隧洞滑移线方程,纠正了以往的错误公式。

(13)用模型试验验证了隧洞有限元极限分析解答的正确性,并首次提出隧洞破裂面的确定方法,扩展了有限元极限分析的功能。

(14)指出了隧洞破坏机理随埋深不同而不同,浅埋隧洞破坏在顶部,深埋隧洞破坏在两侧;矩形隧洞在一定埋深下存在普氏压力拱,而拱形隧洞不存在普氏压力拱。

(15)提出了求解节理隧洞破坏形式和安全系数的方法,并得到模型试验的验证。

(16)消除浅埋隧洞松散压力公式推导中一些不切实际的假设,并考虑浅埋隧洞土体强度遇水降低的实际情况,提出了浅埋隧洞上松散压力的修正算法,包括基于岩柱理论的修正算法和基于弹塑性理论的松散压力数值算法。

(17)在原有隧道围岩分级的基础上,提出了隧洞围岩分级方法的新建议,并在围岩自稳能力判断中引入稳定性定量指标,按围岩等级的稳定性,对各级围岩分别给出无衬砌情况下围岩最小安全系数,并由此反算确定各级围岩的抗剪强度参数,提升了围岩分级的科学性与实用性。

(18)1988年提出了圆形隧洞锚喷支护的解析算法。

(19)提出了岩体块体理论赤平解析法,特别适用于节理岩体隧洞稳定性的分析,在国内外得到了应用。

(20)提出了隧洞设计的基本原则,更新了设计理念。由此给出土体和岩体深埋隧洞的设计计算方法,包括初次衬砌与二次衬砌的设计计算,并通过试验给出了初次衬砌混凝土的抗剪强度参数。

(21)指出了地震作用下隧洞会出现拉破坏和剪切破坏,并在有限元动力强度折减法基础上,提出了有限元静态动力时程分析法与完全动力时程分析法,后者能充分考虑动力效应,降低费用。

全书包括地下工程围岩力学的解析计算、数值计算、数值极限分析计算,以及地下工程破坏机理、围岩压力理论、隧洞设计计算方法等六方面内容,力求形成较为完善的力学体系,并便于自学、理解和富有启发性。为便于读者学习,各部分自成体系,章节安排中基础部分与专题部分分开,读者可择其所需进行阅读。

编著者最大的愿望是:希望本书能对我国岩土力学与地下工程的教学、科研和设计工作有所帮助。鉴于地下工程学科正处在发展与变革之中,本书引入了较多的新内容,有些内容还不够成熟,书中难免有错误与不当之处,恳请国内外专家和读者批评指正。

本书内容吸收了30年前作者与已故著名岩石力学与采矿学家于学馥先生共同编写的《地

下工程围岩稳定分析》一书中的部分内容,在新书出版之际特别感谢与怀念于学馥先生。本书是作者与后勤工程学院和同济大学相关科研团队共同的科研成果结晶,各章编写名单如下:

- 第1章 朱合华,郑颖人
- 第2章 朱合华,丁文其,张清照
- 第3章 方正昌
- 第4章 方正昌,郑颖人,朱合华,张琦
- 第5章 方正昌,夏才初,郑颖人
- 第6章 郑颖人,刘明维
- 第7章 刘怀恒,蔡永昌
- 第8章 刘怀恒,蔡永昌
- 第9章 刘怀恒,丁文其,张清照
- 第10章 马险峰,陈之毅,朱合华
- 第11章 朱合华,刘明维,武威
- 第12章 朱合华,李晓军,唐晓松
- 第13章 郑颖人,赵尚毅,邱陈渝
- 第14章 郑颖人,张子新,张琦,邱陈渝,王永甫
- 第15章 郑颖人,孙辉,向钰周
- 第16章 郑颖人,丁文其,肖强

杨林德、王在泉、王谦源、孔亮、洪赓武、徐干成、苏生瑞、王成、张红、杨臻、丛余、徐浩、沈奕、朱宝林、春军伟、黄锋、薛凤忠、魏新欣、谢东武、卞跃威等提供了部分素材与诸多帮助,并付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心感谢。

目录 MULU

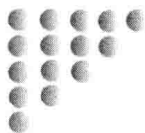


第 1 章 绪论	(1)
1.1 围岩稳定与围岩压力理论的发展和现状	(1)
1.2 围岩稳定与围岩压力理论的研究内容和方法	(4)
参考文献.....	(5)
第 2 章 原岩应力	(7)
2.1 概述	(7)
2.2 原岩应力的分类	(8)
2.3 原岩应力的分布规律与特征.....	(11)
2.4 影响原岩应力的主要因素.....	(15)
2.5 原岩应力的分析方法简述.....	(17)
2.6 原岩应力的测试方法简述.....	(19)
参考文献	(25)
第 3 章 围岩应力与变形的弹性分析	(26)
3.1 概述.....	(26)
3.2 线弹性理论平面应变问题基本方程.....	(28)
3.3 圆形隧洞围岩应力与变形的弹性分析.....	(32)
3.4 非圆形隧洞围岩应力与变形的弹性分析.....	(43)
参考文献	(45)
第 4 章 围岩应力与变形的弹塑性分析	(46)
4.1 概述.....	(46)
4.2 一点的应力状态和应变状态.....	(47)
4.3 塑性屈服准则.....	(51)
4.4 轴对称条件下围岩应力与变形的弹塑性分析.....	(59)
4.5 非轴对称情况下围岩塑性区边界线的近似计算.....	(69)
参考文献	(72)
第 5 章 围岩应力与变形的黏弹塑性分析	(73)
5.1 概述.....	(73)
5.2 几个常用的流变模型.....	(75)
5.3 流变问题的一般解法.....	(83)

5.4	圆形隧洞围岩应力与变形的黏弹性分析	(86)
5.5	围岩应力与变形的黏弹塑性分析	(94)
	参考文献	(98)
第6章	弱面体围岩应力分析	(99)
6.1	岩体结构面的概述与分类	(99)
6.2	弱面屈服准则	(105)
6.3	圆形隧洞节理围岩塑性区应力的近似计算	(115)
6.4	圆形隧洞围岩塑性区边界线的近似计算	(117)
	参考文献	(120)
第7章	岩石弹性分析有限元法	(121)
7.1	概述	(121)
7.2	有限元法的基本概念	(122)
7.3	平面问题的几种常用单元	(127)
7.4	岩石性态的模拟	(131)
7.5	开挖及施工过程的模拟	(132)
7.6	计算模型的建立及计算示例	(142)
	参考文献	(145)
第8章	岩石弹塑性分析有限元法	(147)
8.1	岩石的变形破坏与非线性	(147)
8.2	弹塑性增量应力—应变关系	(149)
8.3	弹塑性模型	(153)
8.4	有限元非线性分析的基本方法	(160)
8.5	弹塑性分析的初应变法与初应力法	(163)
8.6	拉破坏的非线性分析	(169)
8.7	岩石黏弹塑性分析有限元法	(174)
8.8	算例及应用简介	(181)
	参考文献	(184)
第9章	岩体结构面分析有限元法	(185)
9.1	岩体结构面特征	(185)
9.2	结构面特性及破坏形态	(187)
9.3	模拟结构面的单元	(190)
9.4	层状岩体的单元特性	(197)
9.5	岩体结构面的非线性模型	(201)
9.6	计算示例	(205)
	参考文献	(213)
第10章	动力分析有限元法	(215)
10.1	概述	(215)
10.2	岩体动力有限元法的原理	(220)
10.3	岩体地下结构抗震计算	(227)

10.4	岩石隧道地震响应时程分析算例	(233)
	参考文献	(236)
第 11 章	隧洞围岩有限元反分析法	(238)
11.1	概述	(238)
11.2	岩体隧洞的现场量测	(241)
11.3	考虑施工过程的增量有限元优化反分析法	(245)
11.4	偏压条件下隧洞衬砌荷载反分析法	(253)
11.5	岩土体抗剪强度参数反分析法	(257)
	参考文献	(266)
第 12 章	适用于地下工程分析的软件介绍	(269)
12.1	ANSYS	(269)
12.2	FLAC	(272)
12.3	ABAQUS	(275)
12.4	PLAXIS	(280)
12.5	同济曙光(GeoFBA)	(283)
	参考文献	(286)
第 13 章	有限元极限分析法及其在隧洞工程中的应用	(287)
13.1	概述	(287)
13.2	有限元极限分析法的原理	(287)
13.3	有限元极限分析法基本理论	(289)
13.4	有限元强度折减法在均质隧洞中的应用	(293)
13.5	均质隧洞安全系数计算	(297)
	参考文献	(302)
第 14 章	隧洞围岩破坏机理	(304)
14.1	概述	(304)
14.2	隧洞破坏机理	(308)
14.3	岩爆破坏机理	(330)
14.4	岩体隧洞块体稳定性分析	(338)
	参考文献	(360)
第 15 章	围岩压力理论与计算	(362)
15.1	围岩压力分类与影响因素	(362)
15.2	围岩形变压力计算	(367)
15.3	松散压力计算	(373)
15.4	隧洞围岩分级及其建议	(382)
15.5	深埋隧洞围岩压力的经验公式	(396)
	参考文献	(397)
第 16 章	隧洞设计计算	(399)
16.1	隧洞设计计算方法及基本原则	(399)
16.2	隧洞锚喷支护设计计算	(402)

16.3	土体隧洞设计计算	(418)
16.4	深埋岩体隧洞的设计计算	(429)
16.5	隧洞信息化设计与施工	(433)
16.6	地震作用下隧洞的稳定分析与设计计算方法研究	(439)
	参考文献	(450)
	名词索引	(452)
	彩图	(457)



1.1 围岩稳定与围岩压力理论的发展和现状

早在原始社会,人类便开始使用地下洞穴居住。在漫长的岁月中,劳动人民在生活和生产中逐渐积累了若干使围岩稳定的经验。如人类建造黄土窑洞,认识到顶部必须是拱形,而不能采用平顶;什么样的黄土可以开挖窑洞,尺寸多大。人类对围岩^①稳定与围岩压力理论的提出和深入研究,是随着科学和工业的发展开始的。松散地层(主要是土层)围岩稳定与围岩压力理论的研究,至今已有百余年的历史,它与土力学的发展密切相关。随着采矿业的发展,坚硬岩层围岩稳定与围岩压力理论的研究也经历了近百年的发展。岩石力学作为一门学科提出,则是20世纪50年代的事。特别是最近30年来,这门学科发展极其迅速。隧道与地下工程的发展,一方面是由于采矿、交通、水利水电、军工及其他民用地下工程开发发展的需要;另一方面也与工程材料、施工工艺、施工机械、量测技术及其他学科的发展是分不开的,尤其是弹性、塑性和流变力学等基础理论,以及有限元法等数值方法和计算机技术的应用,使隧道与地下工程的理论分析与计算,获得了有效的手段。

地下工程围岩压力理论的发展大致可分为如下三个阶段:古典压力理论阶段、散体压力理论阶段、弹塑性压力理论阶段。而弹塑性压力理论阶段又经历了解析计算、数值计算与数值极限分析计算三个阶段。

20世纪20年代以前,主要是古典压力理论阶段。该理论认为,作用在支护结构上的压力是其上覆岩层的重量 γH , γ 、 H 分别表示岩体的重度和地下工程埋置深度。可以作为古典压力理论代表的有海姆(Heim A.)、朗金(Rankine W. J. M.)和金尼克(Динник А. Н.)理论。其不同之处在于,他们对地层水平压力的侧压系数有不同的理解。海姆依据静水压力认为侧压系数为1,朗金根据散体理论认为是 $\tan^2(45^\circ - \varphi/2)$,而金尼克根据弹性理论认为是 $\mu/(1-\mu)$,其中, μ 、 φ 分别表示岩体的泊松比和内摩擦角。由于当时地下工程埋置深度不大,因而曾一度认为这些理论是正确的。

^①围岩是隧道与地下工程行业中的一个术语,是指隧道与地下工程周围的岩体。由于隧洞通常所遇到的是岩体,因而称为围岩,而实际上隧洞周围的介质既可以是岩体也可以是土体,所以围岩也包括隧洞周围的土体。

随着开挖深度的增加,越来越多地发现,古典压力理论不符合实际情况。于是又出现了散体压力理论。该理论认为,当地下工程埋置深度较大时,作用在支护结构上的压力,不是上覆岩层重量,而只是围岩坍塌拱内的松动岩体重量。对于浅埋隧洞,可以作为代表的有太沙基(Terzaghi K.)理论——支护上承受的压力是上覆土层重量与上覆土层和相邻土层摩阻力之差。对于深埋隧洞,代表性的有普氏(Протолъяконов М. М.)理论——支护上承受的压力是围岩坍塌拱内的松动岩体重量。散体压力理论是相应于当时的支护形式和施工水平发展起来的。由于当时的掘进和支护所需的时间较长,支护工程与围岩不能及时紧密相贴,致使围岩最终往往有一部分破坏、坍塌。但是散体压力理论没有认识到围岩的坍塌并不是形成围岩压力的唯一来源,亦即不是所有的地下工程都存在坍塌拱。更没有认识到地下工程主要围岩压力并不是松散压力而是形变压力;也无法理解通过稳定围岩,以充分发挥围岩的自承作用问题。此外,散体压力理论也没有能科学地确定坍塌拱的高度及其形成过程。

由于围岩的复杂性和散体理论不够全面科学,必然导致基于工程类比的经验法广泛应用。进入20世纪70年代后,工程围岩分级由定性向半定量、由单因素向多因素综合评价方向发展,并由此得到了能够反映多因素的围岩压力估算公式。具有代表性的为挪威巴顿(Barton N., 1974)的Q系统分类、南非波兰籍学者比尼阿夫斯基(Bieniawski Z. T., 1992)的RMR分类中的预测围岩压力的计算公式。这种类型的公式考虑了多方面因素的影响,但涉及的指标较多,且这些指标的选取存在很大的主观性。因此,其计算结果在很多情况下因人而异,不利于工程技术人员的使用。国外的分级大多数是学者个人进行的,其水平和适用性与我国的国家标准和行业标准存在差异,如国家标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086—2001)、《工程岩体分级标准》(GB 50218—94)和行业标准《公路隧道设计规范》(JTGD70—2004)、《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)等。围岩分级的经验方法还会持续一个很长的阶段,但经验方法也必须发展,更加科学化、精确化、实用化,这也是当前围岩压力研究的重要方面。

随着工业的发展,人们认识到地下工程围岩压力主要是围岩与结构之间的形变压力。1962年,卡斯特奈(Kastner H.)称之为真正的地层压力。20世纪70年代中期,我国教科书上称之为变形压力或形变压力。加上地下工程施工工艺的进步、弹塑性理论与数值分析的发展,围岩压力理论进入弹塑性阶段。

人们首先应用弹塑性解析理论求解围岩形变压力,但由于问题的复杂性,能够求解的围岩压力不多,重点是研究隧洞的弹性解与塑性解。尽管围岩压力理论中直接引用线弹性分析的地方不多,但线弹性分析是弹塑性、黏弹性、黏弹塑性及弱面体力学分析的共同基础。对于强度很高、完整性很好、埋深不大的岩体,隧洞的围岩一般处于弹性阶段;对于节理岩体,如果围岩应力不高,或者当采用紧跟作业面的施工方法及支护向围岩提供很大的抗力时,围岩也有可能处于弹性状态,如再略去其各向异性的影响,那么可应用线弹性理论分析。经典的基尔西(Kirsch G.)公式是这方面的代表性例子。

实践证明,土体和软弱、松散岩体围岩常常进入塑性,直至破坏状态,所以研究围岩稳定就不能不考虑塑性和破坏问题。从20世纪50年代后期开始,有学者引用弹塑性理论来研究围岩稳定问题。著名的芬纳(Fenner R.)—塔罗勃(Talobre J.)公式和卡斯特奈(Kastner H.)公式就是这方面的代表性例子。他们导出了圆形隧洞的弹塑性应力解。此外,由于岩土的流变特性,也有学者开始将流变理论引用到围岩稳定分析中来,以研究围岩应力、变形的时间效应。然而当时还没有求出隧洞围岩的弹塑性位移解析解,因而无法得到考虑支

护与围岩共同作用的围岩压力理论解,当然也无法获得形变压力。1978年国际隧道工程专家在巴黎的会议上指出,有望采用基于围岩与支护共同作用的特征线法解决地下工程设计问题,随后国际上获得了相应的解答,特征线法成为当时隧洞设计的流行解法。而在我国,1978~1982年间导出了圆形隧洞的弹塑性、黏弹塑性位移解与围岩压力解析解。这些成果都录入1983年出版的《地下工程围岩稳定分析》一书中。然而,解析解只能导出简单情况下的围岩压力解,对复杂的围岩压力问题必须采用有限元法等数值方法解决。数值方法有连续体方法(如有限元法、有限差分法、边界元法等)和非连续体方法(离散单元法、流形法、DDA法等),已逐渐成为分析围岩二次应力状态和确定塑性区范围的重要研究手段之一。国内外编制了Plaxis、FLAC、Madas、GeoFBA等许多岩土及地下工程的专用软件,而华裔学者石根华和我国学者在岩土力学数值计算方面也作出了卓有成效的成就。总体来看,从20世纪60年代至80年代,主要发展了弹塑性解析解及其相应的隧洞设计计算方法,如奥地利学者勒布希维兹(Rabcewicz L. V.)的基于破裂楔体理论的锚喷支护计算方法以及我国的基于解析解的锚喷支护计算方法等;在80年代以后,我国应用数值分析方法求解围岩形变压力逐渐普遍;现在我国科研、设计和教学等部门,在一些重大工程的设计中,基于数值分析方法的隧道围岩与衬砌结构共同作用理论来求解实际工程问题,已经逐渐普遍起来,并开始纳入规范。

运用共同作用理论解决实际工程问题,必须以原岩体应力和真实岩体强度作为前提条件,由此进行理论分析才能把围岩和支护的共同变形与支护上的作用力(围岩压力)、支护设置时间、支护刚度等关系,正确地联系起来。否则,使用假设的外荷载条件和假设的岩体强度进行计算,就失去了它的真实性,降低了计算成果的科学价值和实用意义。因而目前应用共同作用理论解决实际生产问题还有一定的困难,如计算所需要的真实原岩应力和岩体力学参数还难以准确确定,对支护设置前围岩变形量的释放尚缺乏正确的估计,尤其是对围岩破坏机理认识不足和缺乏围岩破坏、失稳的判断准则等,导致围岩稳定性的定量分析无法满足设计要求。因此,目前根据共同作用理论所得的计算结果,一般只能作为设计的参考依据,即它们仅具有定性使用价值,达不到严格力学意义上的设计要求。

在岩石力学中,为了获得真实的原岩应力来满足设计要求,岩体地应力的测试和监测技术迅速得以发展。同时,为了获得准确的岩体力学参数,以参数辨识为主的反分析预测法近十几年来在岩石力学中迅速发展。它以隧道施工中的大量监控量测信息为基础,通过参数反演,从而获得衬砌结构上的真实围岩压力,为当前解决岩体参数不够准确的问题提供了有效方法。与此同时,以测试为手段的现场监控设计法也正在发展,通过现场实测来获得设计的定量参数作为工程设计依据,以修正围岩压力值,提高设计的可靠性。

随着力学的发展,人们逐渐认识到材料的塑性屈服并不等于材料的破坏,因而需要建立材料的破坏准则,这对岩土材料尤为必要。然而,材料的破坏准则至今仍未解决,致使隧洞围岩稳定性评价一直缺乏一个定量的评判指标。尽管传统的极限分析法可以提供岩土材料整体失稳的判据,但这种方法需要事先知道岩土的潜在破坏面。对于一些比较简单的岩土工程问题,如均质材料中的边(滑)坡问题、地基承载力问题可以获得潜在破坏面,从而求出岩土工程的稳定安全系数或极限荷载,以满足岩土工程设计的需要。然而,由于隧洞工程的复杂性,至今尚无法采用传统极限分析法求解隧洞工程的稳定安全系数和极限荷载。

传统有限元法仅凭位移、应力及拉应力区和塑性区大小不能确定地下工程的安全度与破裂面,致使地下工程设计无法进入严格力学的定量分析阶段。1975年英国力学家辛克维兹(Zienkiewicz O. C.)提出有限元强度分析法和超载法,可以应用数值分析方法求解材料的稳

定安全系数和极限荷载。2004年,本书作者认识到有限元强度折减法和超载法实质上是应用有限元法求解极限分析,因而把上述方法称为有限元极限分析法并应用于地下工程稳定分析,进一步拓展了该方法的功能,不仅能求得稳定安全系数和极限荷载,而且能求得材料的破坏形态,例如隧洞的破坏区与破坏面。有限元极限分析法的基本原理是通过改变岩土体强度参数的折减或增加荷载,使岩土体处于极限状态,因而自动生成破坏面而求得安全系数,不仅不需要事先找出潜在破坏面,反而可求得破坏面。它为隧洞围岩稳定性提供了具有严格力学意义的定量指标,从而为隧洞的设计计算提供了有力的技术支撑。正如我国著名岩石力学与采矿专家于学馥先生在《地下工程围岩稳定分析》著作的前言中所说:

“由于岩石力学被引入地下工程,才有可能使今日的地下工程逐步摆脱工程类比的认知方法,进行科学理论与定量计算阶段。并可预见,在不久的将来,地下工程也会像结构力学和地基基础被引入地面建筑一样,出现一个前所未有的迅速发展,使对围岩稳定性的评价稳妥可靠,维护方法和支护设计更科学、更安全可靠和经济合理。目前正在走入科学理论和定量计算阶段。”

本书的目的之一是推动有限元极限分析法在隧洞工程中应用,推动围岩压力理论进入数值极限分析阶段。尽管该方法目前尚处于开始阶段,还存在一些问题或缺乏足够的验证,但其前景无限,必然会逐步发展与完善。

此外,除弹塑性材料破坏理论外,另一些破坏力学理论(如断裂力学、损伤力学)也进入到岩石力学研究中,人们逐渐意识到围岩渐进性破坏过程与围岩压力间的关系,已有学者将这些破坏力学理论用于围岩稳定性分析和围岩压力预测。

总的来说,由于地下工程围岩压力本身的复杂性使其计算方法和计算参数受到制约,难以达到理想的结果。而且围岩压力受到工程地质条件、初始地应力、洞室形状和尺寸、施工方法及时间效应、支护结构形式和刚度等多方面因素的影响,任何一种方法都很难把所有因素考虑周全,因而围岩压力理论需要不断发展与完善。与此同时,围岩压力的经验方法将会长期存在,但经验方法也需要不断提炼与升华,例如将围岩稳定安全系数指标引入围岩分级有助于围岩参数准确性的提升。

值得指出的是,虽然当前围岩稳定与围压理论有了很大的发展,但仍然是粗浅的。各种理论也还处在验证和发展阶段。企图采用一种理论,解决各种不同地质条件下和不同目的的地下工程围岩稳定分析问题是不现实的。比如围岩稳定不仅取决于因松散压力与形变压力诱导的岩体整体失稳,而且还由于围岩结构面与临空面的不利组合而造成块体局部失稳,所以围岩稳定分析中也需要考虑这一因素,尤其是大跨度地下工程。因此对于块状和层状的坚硬岩体,还需要运用工程地质和力学计算相结合的分析方法,即所谓岩石块体极限平衡分析法,来研究岩块的形状和大小及其失稳条件,与有限元法相结合的块体理论方法也是当前岩石力学发展的一个方向。随着地下工程埋深的增大,深埋隧洞的岩石力学成为人们关注的另一个焦点,而以能量突然释放为特征的岩爆力学是解决深埋地下工程问题的关键。

1.2 围岩稳定与围岩压力理论的研究内容和方法

围岩稳定与围岩压力理论是研究围岩应力、变形、破坏规律,以及围岩压力 and 支护原理的科学。由于围岩应力、变形、破坏和围岩压力都是地层开挖前原岩应力历史发展的延续,所以

必须从原岩应力状态出发,结合岩石力学性质、本构关系和赋存条件开展研究。

围岩稳定与围压理论研究的方法有:理论分析、室内力学性质和模型试验、数值分析和现场实测等方法。其主要内容包括:

(1)岩土介质的力学性质、力学模型及本构关系,岩土力学性质的室内和现场测试。

(2)围岩地层的原岩应力状态及其测试技术。

(3)各种洞形围岩应力、变形和破坏规律,围岩压力的计算。

(4)围岩应力、变形、破坏过程、围岩压力和支持应力、变形状态的现场测试与模型试验,支护的设计与计算。

(5)围岩稳定性及其分级。

(6)围岩破坏的防治和加固处理。

在上述研究内容中,本书着重讨论围岩稳定的理论分析,有关原岩应力、岩石强度试验、现场测试和模型试验等内容,不作叙述。

生产实践和科学实验是围岩稳定与围岩压力理论研究的物质基础。诸如原岩应力的量测、岩石和岩体力学性质的测定、围岩应力和变形的现场试验,以及各种模型试验等,都是建立围岩稳定与围岩压力理论的物质基础。任何脱离物质基础的理论研究,都是缺乏科学依据的。

然而围岩稳定分析离开理论研究也是不可想象的。地下工程围岩稳定分析脱离理论研究只能使其永远在经验的工程类比之中徘徊不前。必须指出,现有的围岩稳定与围岩压力理论几乎都是建立在已有的力学理论基础上的,例如弹性理论、塑性理论、松散介质理论和流变理论等。这些理论都有一定假设条件,它虽然与复杂多变的自然地质体之间存在着一定的差异,但在科学发展的进程中是允许把复杂的条件加以简化和抽象的,并在发展中逐步提高。因此地下工程设计目前还主要凭借人们在生产实践中所获得的有限的经验作为依据。但是人们不应当满足于这些经验,更不能因此而阻碍理论的发展。相反,应当积极地去促进理论的发展,因为实践一旦插上理论的翅膀就可自由翱翔。

现代计算技术正在迅速发展,计算机的应用使围岩稳定分析进入崭新阶段。过去许多不能计算的问题,现在已经可以进行计算了。此外,岩体作为自然体,它所反映的性态是多变的,带有一定的概率性,大量的科学实验数据也需要利用计算机进行处理。因此,计算机对岩石力学是十分有用的工具。但是它也只能在人们所规定的模式(模型和程序)下工作。在计算技术和手段高度发展的今天,计算模型和物理过程的研究与提炼,就显得比以前更重要。岩土力学与地下工程的监测化、数字化与信息化是当前总的发展方向。

还应当指出,岩体是天然地质体,它经历了漫长的自然历史过程,各类岩体有各自的成因,也经受了各种地质构造变动过程,所以围岩稳定与围岩压力理论研究,与工程地质和地质力学的研究是分不开的。

建立合理的围岩稳定与围岩压力理论,应当应用各种研究手段。综合利用生产实践经验、现场测试、模型试验、理论与数值分析研究成果,才能获得更好的效果。

参 考 文 献

[1] Динник А. Н. Статьи логорному Делу, Углетехиздат, 1957.

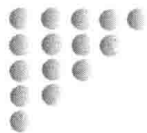
[2] 于学馥,郑颖人,刘怀恒,等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京:煤炭工业出版社,1983.

[3] 塔罗勃 J. 岩石力学(中译本)[M]. 北京:中国工业出版社,1965.

- [4] 卡斯特奈 H. 隧道与坑道静力学(中译本)[M]. 上海:上海科技出版社,1980.
- [5] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Geotechnique,1975, 25(4): 671-689.
- [6] 郑颖人. 圆形洞室围岩压力理论探讨[J]. 地下工程,1979(3).
- [7] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [8] 孙钧. 地下工程设计理论与实践[M]. 上海:上海科技出版社,1996.
- [9] 杨林德,朱合华,丁文其,等. 岩土工程问题安全性的预报与控制[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [10] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
- [11] 郑颖人,孔亮. 岩土塑性力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [12] 郑颖人,赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报,2005,38(1): 91-99.
- [13] 郑颖人,胡文清,王敬林. 强度折减有限元法及其在隧道与地下洞室工程中的应用[C]//中国土木工程学会第十一届、隧道及地下工程分会第十三届年会论文集. 2004:239-243.
- [14] 何满朝,景海河,孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [15] 张黎明,郑颖人,王在泉,等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学, 2007,28(1):97-101.
- [16] 谷兆祺,彭守拙. 地下洞室工程[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
- [17] 关宝树. 隧道力学概论[M]. 成都:西南交通大学出版社,1993.
- [18] 郑颖人,赵尚毅,李安洪,等. 有限元极限分析法及其在边坡中的应用[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [19] 郑颖人. 岩土数值极限分析方法的发展与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(7): 1297-1316.

第2章 原岩应力

DI'ERZHANG



2.1 概 述

未受到任何工程扰动影响而处于自然平衡状态的岩体称为原岩,原岩中存在的应力称为原岩应力,亦称初始应力或地应力。原岩应力在岩体空间有规律的分布状态称为原岩应力场或初始应力场。原岩应力场呈三维状态有规律地分布于岩体中。人类在岩体表面或岩体内部进行的活动,扰动了原岩的自然平衡状态,使一定范围的原岩应力状态发生改变。变化后的应力则称为二次应力、扰动应力或次生应力。次生应力直接影响着岩体工程的稳定,为了控制岩体工程的稳定,必须明确次生应力,然而次生应力是在原岩应力基础上产生的。为此,首先要对原岩应力有一定的认识。

岩体的原岩应力,是指岩体在天然状态下所存在的内在应力,在地质学中,也称天然地应力或地应力。岩体的原岩应力主要是由岩体的自重和地质构造运动所引起的。由地壳构造运动在岩体中所引起的应力称之为构造应力,岩体的地质构造应力与岩体的特性(例如岩体中的裂隙发育密度与方向,岩体的弹性、塑性、黏性等)有密切关系,也与正在发生过程中的地质构造运动以及与历次构造运动所形成的各种地质构造现象(例如断层、褶皱等)有密切关系。此外,原岩应力还有如上覆岩体的重量所引起的自重应力、气温变化所引起的温度应力等,人类工程活动,比如筑坝、在岩体中开挖洞室,也会引起岩体中应力的变化,只是把这种情况下的应力状态称为重分布应力、二次应力或扰动应力。对于岩体工程来说,主要考虑自重应力和构造应力,二者叠加起来构成岩体的初始应力场。

地面和地下工程的稳定状态与岩体的原岩应力状态密切相关。岩体的原岩应力状况对岩体工程建设有重要影响,了解岩体的原岩应力对岩体中工程结构的设计和施工都是必要的。工程实践中,原岩初始应力状态对开挖引起的变形、支护的荷载以及对围岩稳定的影响是显著的。在岩体中进行开挖以后,改变了岩体的原岩应力状态,使岩体中的应力重新分布,引起岩体变形,甚至破坏。在高地应力地区,开挖后常会出现岩爆、洞壁剥离、钻孔缩径等岩体变形破坏现象。