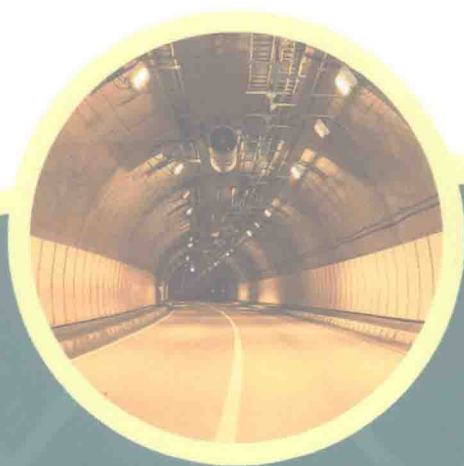


孙少锐 吴继敏 魏继红 著

裂隙岩体地下洞室超欠挖 预测理论及工程应用



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

裂隙岩体地下洞室超欠挖 预测理论及工程应用

孙少锐 吴继敏 魏继红 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

内 容 简 介

本书以裂隙岩体超欠挖预测理论和工程应用为主题,重点阐述了裂隙岩体结构面几何特征的识别理论和方法,提出了基于力学机理的结构面网络模拟的洞室超欠挖预测理论和洞室超欠挖的广义分数维理论,应用和发展了块体理论与结构面网络模拟相结合的方法,探讨了基于地质统计模型的小波神经网络预测地下洞室超欠挖的方法,系统介绍了图像处理技术预测洞室超欠挖中的方法。本书立足于裂隙岩体结构面几何特征和力学特征,从岩体的本质特征出发,在裂隙岩体地下洞室超欠挖的预测理论和工程应用方面,不但浓缩了作者和所在团队的研究成果,而且又发展和提升了国内外的研究现状和研究成果。

本书可供水利、水电、交通、矿山、石油等行业从事地质工程、岩土工程专业的科技人员使用,也可作为高等院校和科研院所相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

裂隙岩体地下洞室超欠挖预测理论及工程应用/
孙少锐等著. —南京:河海大学出版社,2013. 10
ISBN 978-7-5630-3493-2

I. ①裂… II. ①孙… III. ①地下洞室—岩石
力学—超欠挖—预测技术 IV. ①TU929 ②TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 240174 号

- | | |
|------|---------------------------------------|
| 书 名 | 裂隙岩体地下洞室超欠挖预测理论及工程应用 |
| 书 号 | ISBN 978-7-5630-3493-2/TU·98 |
| 责任编辑 | 成 微 谢业保 |
| 封面设计 | 黄 煜 |
| 出版发行 | 河海大学出版社 |
| 地 址 | 南京市西康路 1 号(邮编:210098) |
| 电 话 | (025)83737852(综合部) (025)83722833(发行部) |
| 经 销 | 江苏省新华发行集团有限公司 |
| 排 版 | 南京新翰博图文制作有限公司 |
| 印 刷 | 南京新洲印刷有限公司 |
| 开 本 | 787 毫米×960 毫米 1/16 |
| 印 张 | 11.25 |
| 千 字 | 218 |
| 版 次 | 2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷 |
| 定 价 | 28.00 元 |

前 言

裂隙岩体地下洞室的超欠挖预测及评价是工程地质和岩体力学研究领域的一个重要发展方向,在以往地下洞室稳定性评价中,超欠挖的预测及评价经常不受重视,这无论从经济意义还是从工程安全稳定的角度看都有所欠缺,鉴于国内研究洞室超欠挖课题较少的现状,笔者自 1998 年涉足该领域,跟随导师吴继敏教授在宜兴铜官山抽水蓄能电站开始现场地质资料的调查和分析工作,之后在攻读硕士学位期间,跟随导师继续从事该领域的科研工作。但真正开始系统从事该课题的研究工作是在 2000 年攻读博士学位前,在此之后,先后依托金丽温高速公路连拱隧道工程、九华山大跨度三连拱隧道工程、诸永高速公路隧道工程和苏州凤凰山隧道工程等相关工程,开展了一系列的现场地质调查和研究工作,先后经历了 10 余年的历程。获得博士学位留校任教后,笔者仍然以该问题为主要研究方向,在国家自然科学基金的资助下,又发展和提升了该领域的研究内容,以岩体结构组合特征对超欠挖的影响为主线开展研究,取得了一定的研究成果。必须指出,由于地下洞室超欠挖预测的研究很难从定量的角度进行,因此超欠挖的预测往往具有一定的模糊性,而且评价结果的准确程度往往达不到工程应用所要求的精度,所以本书的研究主要从基础研究的角度出发,同时兼顾部分应用研究,取得的主要研究进展如下:

(1) 在充分考虑岩体受力的地质力学机理基础上,结合野外测得的结构面几何特征参数及现场地应力分布特征,提出一种基于地质力学机理的结构面网络模拟技术,并把该技术运用到地下洞室的超欠挖预测中。另外,本书从块体理论的角度出发,对超挖块体和关键块体之间的关系进行分析研究,并将块体理论与结构面网络模拟技术相结合,预测地下洞室超挖块体的大小。

(2) 从岩体的破坏机理出发,对裂隙岩体开挖后的洞室周边分数维进行研究,提出了裂隙岩体洞室开挖周边的广义分数维模型,研究了不同影响参数与洞室周边分数维之间的关系,并且从分形理论的角度建立洞室周边广义分数维与洞室超欠挖之间的关系,从而建立了以岩体破坏机理为基础的超欠挖与广义分数维之间的关系。从洞室周边破坏机理的角度出发研究了爆破产生的洞室周边界,并建立应力、应变与超欠挖之间的关系,完善了洞室超欠挖与分数维及洞室动态破坏之间的关系,同时还研究了超欠挖对围岩应力场的影响。

(3) 提出了基于地质统计模型的小波神经网络对地下洞室超挖情况进行预测的基本方法。将地质统计模型理论和小波神经网络理论相结合,预测了洞室超挖块体的大小。对洞室围岩的 *RMR* 分类和 *Q* 分类与超欠挖之间的关系进行了详细的研究。研究不同开挖洞径与洞室超欠挖之间的关系,并由此建立了 *RMR* 分类和 *Q* 分类之间的关系以及超欠挖与围岩分类及洞径之间的复相关关系。

(4) 首次将图像的开操作和闭操作方法运用到洞室超欠挖图像的处理与分析中,并将处理后的洞室图像与洞室的设计形状对比分析,得到洞室在该断面上的超欠挖方量,从定量的角度解决了以往工程中难以解决的超欠挖评价问题。

本书共分 5 章,第 1 章为绪论,第 2 章为裂隙岩体结构面的基本特征,第 3 章为洞室超挖预测中的结构面网络模拟技术及块体理论,第 4 章为裂隙岩体地下洞室超欠挖模拟方法研究,第 5 章为洞室超欠挖评价中的图像处理技术。

需要指出的是,本书是基于笔者和所在团队多年的研究成果著作而成,作者和所在的团队为本书的出版倾注了大量的心血,南京水利科学研究院米占宽高工、江苏省地质调查研究院陈杰教高、王彩会高工和宋京雷工程师参加了部分内容的编著工作,课题组部分研究生也为此付出了辛勤劳动,特别感谢国家自然科学基金委员会给予的项目资助(“基于结构面特征精细识别与模拟的洞室超挖预测理论研究(编号:41002089)”、“岩体结构面粗糙度 3D 精细识别、剪切破坏机理及工程应用研究(编号:41102162)”),同时也感谢从事课题研究过程中给予帮助的项目合作单位!

本书由河海大学孙少锐、吴继敏、魏继红负责撰写并统稿。

由于著者水平有限,不当之处在所难免,恳切希望读者批评指正,另外,书中引用参考文献中一些学者的研究成果或观点,在此表示感谢。

作 者

2013 年 7 月 6 日于南京河海大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 裂隙岩体地下洞室超欠挖的研究现状	3
1.2.2 基于数值分析方法的研究现状	4
1.2.3 基于模糊概念预测方法的研究现状	7
1.2.4 基于图像处理评价方法的研究现状	11
1.3 拟采用研究方法存在的问题	12
1.4 主要研究内容	15
第 2 章 裂隙岩体结构面的基本特征	17
2.1 结构面特征的基本概念	17
2.1.1 结构面的几何特征	18
2.1.2 结构面的力学特征	18
2.2 结构面的基本特征	21
2.3 洞室超欠挖与地质因素之间的关系	27
2.4 结构面特征研究的基本方法	28
2.4.1 确定裂隙岩体几何特性参数的统计分析	28
2.4.2 裂隙岩体几何特性的描述	30
2.5 结构面产状的取样误差修正	31
2.5.1 修正的结构面产状概率模型	32
2.5.2 结构面产状的概率分布模型	35
2.6 结构面迹长的概率模型	37
2.6.1 结构面迹长估计的 Kulatilake 法	37
2.6.2 结构面大小的确定方法	42
2.6.3 结构面密度确定的 K-W 法	43
2.6.4 结构面位置的确定方法	44
2.7 本章小结	44

第3章 洞室超挖预测中的结构面网络模拟技术及块体理论	45
3.1 结构面三维网络模拟的计算机实现方法	46
3.2 结构面网络模拟技术的基本理论	48
3.2.1 基于地质力学机理的结构面网络模拟技术	50
3.2.2 结构面网络模拟中的切片技术	51
3.3 结构面网络模拟技术在地下洞室超挖预测中的实现	54
3.3.1 理想化的地下洞室开挖结构面网络模拟图	54
3.3.2 工程应用	55
3.4 洞室超挖预测中的块体理论	58
3.4.1 块体理论的发展	58
3.4.2 块体理论的基本假定、研究方法和特点	59
3.4.3 块体理论的基本原理	60
3.4.4 块体理论在地下洞室超挖预测中的应用及实现	60
3.5 本章小结	70
第4章 裂隙岩体地下洞室超欠挖模拟方法研究	71
4.1 分形理论在洞室超欠挖中的应用	71
4.1.1 分形理论	72
4.1.2 洞室周边破坏的分数维理论模型	73
4.1.3 广义分数维模型在洞室超挖预测中的应用	77
4.2 岩体爆破开挖对地下洞室超挖的影响	82
4.2.1 洞室开挖方法及爆破方式	82
4.2.2 爆破开挖对超挖的影响	85
4.2.3 应用数值方法研究地下洞室超欠挖问题	89
4.2.4 不同岩体完整性系数条件下爆破对洞室超挖的影响	92
4.2.5 超挖对洞室围岩稳定性的影响	97
4.3 洞室超挖预测中的小波神经网络理论	105
4.3.1 神经网络的基本理论	105
4.3.2 小波理论	106
4.3.3 基于小波理论的神经网络在洞室超挖预测中的应用	110
4.4 围岩类别对洞室超欠挖的影响	118
4.4.1 围岩分类概述	118
4.4.2 洞室围岩分类的基本理论	119
4.4.3 RMR 和 Q 分类与洞室超欠挖之间的关系	120

4.5 本章小结	128
第5章 洞室超欠挖评价中的图像处理技术	129
5.1 图像处理技术概述	129
5.2 图像处理技术的基本理论	131
5.2.1 图像的几何失真校正	131
5.2.2 图像的投影重建技术	133
5.2.3 图像的灰度形态学基本运算	136
5.3 图像处理技术的具体实现	137
5.3.1 空间坐标系的确定	138
5.3.2 图像的几何校正	139
5.3.3 图像的灰度值校正	140
5.3.4 图像的投影变换	140
5.3.5 图像的开操作和闭操作	145
5.4 图像处理技术在洞室超欠挖评价中的应用	145
5.4.1 概述	145
5.4.2 应用图像处理技术评价超欠挖的基本方法	147
5.4.3 图像处理技术在洞室超欠挖评价中的应用	149
5.5 本章小结	152
参考文献	153
后记	168

1.1 研究目的和意义

随着科学技术的进步和建设事业的发展,大型地下工程日益增多,例如城市地铁、大型水电站等,许多工程的地下洞室布置在裂隙岩体中。在裂隙岩体地下洞室开挖过程中,塌方事故或超欠挖现象频繁发生,直接影响施工工期,有的甚至影响人身安全,并需回填大量混凝土。据国内外隧道施工统计,由于超欠挖等工程问题造成的停工时间大约占总工期的30%(见表1.1)。这表明,地下工程施工中超欠挖的预测和防治是亟待解决的一个重大问题,该问题的解决对于提高施工质量、加快施工速度、保证施工安全、节省工程投资具有特别重要的经济效益^[1]。

表 1.1 洞室超挖统计表(据卿光金)

Table 1.1 Overbreak statistics of tunnels (from Qing Guangjin)

国家	隧道名称	隧道长度 (m)	开挖断面 (m ²)	超挖值		施工时间 (年)
				超挖厚度 (cm)	超衬砌率 (%)	
前苏联	顿巴斯十月矿		8~20		47.6	1967
前苏联	近卫军矿井坑道	525	9.1		112	
前苏联	列宁矿井	825	8.4		106	
挪威	阿克斯-莱德隧道	11 700	70		6	
瑞士	梅尔斯隧道		60		15~50	1966
加拿大	麦克唐纳铁路隧道	14 700	42	32.5		1984
法国	某铁路隧道				50	1971
日本	新丹那铁路隧道	7 985	63.8		21.4	1959

(续 表)

	隧道名称	隧道长度 (m)	开挖断面 (m ²)	普通爆破 (cm)	光面爆破 (cm)	时间 (年)
国内	普济隧道	494.5	58	43	15	1976
	三关口隧道	1 491	15.6		10~20	1991
	南岭隧道	6 040	96		15	1983
	大瑶山隧道	14 300	82~101		73	1983
	花果山隧道	3 741	75		30	1986

超欠挖问题是洞室开挖施工中普遍存在的问题。洞室在开挖施工时,特别是大断面洞室开挖施工中易于发生超欠挖问题。超欠挖造成的危害不仅仅是人员、材料、设备和资金的大量投入,还会对隧道施工和使用带来安全隐患。目前,隧道开挖越来越多,规模也越来越大,在大断面的隧道施工中使用机械化的程度也越来越高,但钻爆法在岩体洞室的开挖中仍然具有不可替代的地位。由于洞室施工中所穿越的岩体种类较多,地质条件相对复杂,开挖技术的不同使围岩受到的破坏程度也不同,不良的施工方法经常造成较严重超欠挖现象的产生。超欠挖通常是由于岩体结构面和开挖临空面的不同组合产生的,在洞室开挖过程中,爆破开挖将引起关键块体松动,围岩产生塑性区。由于开挖出现临空面,当关键块体优势面的抗剪强度小于其下滑力时,关键块体就会塌滑或塌落,形成超欠挖。

21 世纪人类已经不能满足于地上的空间,地下工程建设已日益得到众多建设者的青睐,特别是在水利电力、交通运输、矿山开采以及军事工程中,修建规模巨大的地下洞室已呈迫在眉睫之势。但随之带来的问题是相当一部分地下洞室在结构面比较发育的岩体中开挖,在这类岩体中开挖地下洞室,不良地质条件对工程的进度、工程经费等造成了巨大的影响,因此,对洞室开挖面上不稳定块体的大小预测(超欠挖预测)已经成为一个非常重要的专业课题。研究超欠挖规律以指导施工、改善结构受力、节省工程造价非常重要,国外已对此进行了一定的研究,形成许多计算理论和方法,例如岩体稳定理论、概率方法等;但国内对超欠挖预测及评价的研究较少,方法也不多见。

目前,地下洞室的规模越来越大,地下洞室群的地质环境更加复杂。例如我国正在建设和规划中的溪洛渡、小湾、龙滩等水电站的地下厂房洞室群,规模空前,施工开挖的技术难度大。对于这些大型地下洞室群,采用合理的超欠挖预测方法、优化的施工开挖方式,对于减少超欠挖、保证施工安全、减少投资有着重要的意义。

随着工程建设规模的逐渐扩大,针对地下洞室超欠挖的研究受到前所未有的重视,洞室的超欠挖预测及评价在研究工程岩体的稳定性方面将有着举足轻重的

地位。分析岩体的本质特征,采用不同的预测和评价方法,结合不同的工程实例对裂隙岩体地下洞室超欠挖问题进行研究就显得十分迫切和必要。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 裂隙岩体地下洞室超欠挖的研究现状

目前国内外在岩体超欠挖预测及评价方面的研究尚不成熟,国内在岩体的开挖方法上对洞室超欠挖的影响做了较多的研究工作,大多根据不同的工程采用不同的开挖方法来控制超欠挖。吴继敏等^[1]从研究岩体的结构面特征出发预测了洞室的超欠挖问题;周佳娟等^[2]从定量的角度,对 TBM 施工对隧道围岩及支护结构的影响进行了分析;余健等^[3]对公路隧道超欠挖的统计规律进行了研究,研究了各类围岩超欠挖在洞室不同部位的分布规律;杨德远^[4]从纯数学的角度提出了隧道截面超挖和欠挖的面积计算方法;赵会兵^[5]研究了钻爆法施工洞室超欠挖概率统计规律;王明年等^[6]用自适应有限元研究了超欠挖对洞室围岩稳定性的影响。国外对超欠挖问题也有一定的研究,Revey^[7]对地下矿井中超欠挖的控制和影响进行了研究,提出了从控制爆破的角度控制超欠挖的方法;Maerz 和 Frank 等^[8-10]提出采用光照断面的方法评价洞室超欠挖的数量,研制了相应的设备和仪器,编制了相应的计算程序,取得了较好的效果;Thidemann^[11]对围岩变形对超欠挖的影响进行了研究;Abe^[12]对超欠挖方量的大小提出了评价方法;Martna^[13]研究了围岩受压后对洞室超欠挖的影响。但是,由于岩体本身的复杂性,对超欠挖问题的研究还很难从定量的角度进行,只能在较为理想的条件下,根据岩体的结构面特征,分析可能存在的超欠挖问题。鉴于目前研究超欠挖方法缺乏的现状,本书尝试从不同分析方法入手,对地下洞室的超欠挖进行预测和评价,主要采用的技术有:结构面网络模拟技术、块体理论、岩体的爆破开挖方法、图像处理技术以及一些基于模糊概念的预测方法,如人工神经网络、分形理论等。尽管这些方法已经在岩体力学的其他领域得到极大的发展,但这些方法并没有运用到裂隙岩体地下洞室的超欠挖预测和评价中,要将这些方法应用到地下洞室的超欠挖预测及评价中,就必须对这些方法进行深入研究,修正这些方法以适应洞室超欠挖预测及评价的需要。本书将从这些方法入手,分析当前这些方法的发展趋势,深入探讨这些方法在裂隙岩体超欠挖预测和评价中的适用性。

1.2.2 基于数值分析方法的研究现状

(1) 结构面网络模拟技术及块体理论的研究现状

对结构面特征(结构面产状、间距、迹长等)的研究从 1932 年 Schmidt^[14] 根据统计学的基本原理研究产状开始,陆续出现了一系列研究成果,对结构面几何形状的研究更是多种多样,先后提出了各种节理系统模型^[15],例如:正交模型, Baecher 圆盘模型, Veneziano 模型, 马赛克模型等^[16]。目前工程中广泛采用的是假设结构面的形状为圆盘状来研究应用,例如中国水利水电科学研究院的汪小刚、陈祖煜等^[17]成功地对小湾电站的坝基进水口边坡的楔体稳定性进行了研究,取得了较好的结果。

国外对结构面网络模拟技术已经进行了较深入的研究,并开发出若干程序,例如 Warburton. P. M. ^[18] 开发出的 BLOCKS 程序、麻省理工学院^[19] 的 FRAC-MAN 程序、Ivanova^[20-23] 的 Geofrac 程序等,这些程序的开发对结构面网络模拟技术的发展起到了极大的推动作用。国内对结构面网络模拟技术的研究在最近几年也有了长足的进展,潘别桐^[24] 引进该技术后,中国水利水电科学研究院、长江科学院、马鞍山矿院等^[25-27] 科研机构对其进行了深入研究,先后开发出了基于不同理论或技术的模拟方法,由二维逐渐推广到三维,并将其应用于工程实践。

块体理论最早是由石根华博士于 20 世纪 70 年代提出来的,其后与 Goodman 教授合作,使得块体理论得到了极大的发展^[28-29]。在国外,Chern 等^[30] 根据洞室表面的结构面网络图计算了三维关键块体的最大可动域;Kuszmaul 等^[31] 应用晶胞单元法,根据结构面间距预测了二维条件下洞室顶部关键块体的大小;Maerz 等^[32] 根据以前学者对洞室块体大小的研究,基于测线法的结构面网络模拟技术,提出了用 MAKEBLK 方法来计算块体大小的方法,并编制了相应的计算程序;Mauldon^[33-34] 研究了结构面的连通率,根据结构面的二维连通率建立了关键块体的出现概率以及块体大小分布的预测方法;石根华等^[35] 根据洞室节理的平洞展示图研究了关键块体的大小,将块体理论和结构面的网络模拟技术较好的结合在一起;Sofianos^[36] 则根据洞室顶部块体与其他块体相互挤压等作用,基于弹塑性理论,研究了洞室顶部块体的稳定性条件;Crawford 等^[37] 研究了地应力和节理的刚度系数对洞室关键块体稳定性的影响;Hoerger 等^[38] 根据结构面特征概率分布的基本原理,提出了关键块体出现的概率预测方法,得出结构面的产状、大小和间距对关键块体出现的概率起到关键性作用的基本结论;Yow 等^[39] 研究了洞室开挖

以后关键块体产生一定位移条件下的稳定性,并分析了块体位移对作用在关键块体上力的影响;而 Elsworth^[40]对平面应变条件下圆形洞室关键块体的受力情况进行研究,得出关键块体的稳定性安全系数;Kuszmaul^[41]根据节理组的间距估计了地下洞室关键块体的大小,结合数值分析方法对二维和三维两种情况都进行了研究,编制了相应的计算程序;Sofianos 等^[42]对非静水力学天然应力场条件下,圆形洞室顶部楔形体的稳定性进行了研究,得出影响楔形体稳定性的两个参数分别是楔形体的夹角和节理的内摩擦角。

在国内,傅鹤林^[43]提出用节理概率模型对块体理论进行修正的方法,将块体理论中把节理看作无限延伸的假设考虑为节理的延伸为指数分布的概率密度函数,即将无限长的节理考虑为有限长;陈斗勇等^[44]将理论力学中定轴转动理论分析运用到块体理论中的滚动起始条件,建立了岩块转动的力学模型和数学表达,提出了转动块体的判定条件;张思俊等^[45]利用 CAGD 和图形交互技术在二维平面图的基础上反求三维块体边界,避免了直接在三维空间中求密集节理系统切割洞室洞壁产生的隐藏最大关键块体,降低了问题的复杂性和工作量;张子新等^[46]将分形几何与块体理论结合,建立了分形块体理论,提出了分形块体理论赤平投影的解析法;何满潮等^[47]结合块体理论和赤平投影方法,建立了块状岩体的稳定可靠性分析模型,对空间块体的稳定概率进行了研究;张社荣等^[48]应用随机块体理论,通过对结构面力学指标和几何参数的测量和分析,建立了随机块体结构模型;盛谦等^[49]应用块体理论和正交设计方法对三峡工程地下厂房围岩中裂隙可能构成的随机块体类型、几何特征和稳定性进行了分析研究。

(2) 岩体爆破开挖的研究现状

在工程岩体爆破开挖过程中,即使在同一类岩性的岩体中,由于结构面的发育程度、产状及岩体所处的风化带不同,其爆破效果也明显不同,有时甚至相差较大。这充分证实结构面对岩体的爆破效果具有控制作用。岩体中原始结构面是由于地壳运动产生的,其可视为一种岩体初始损伤。如裂纹、裂隙与岩体整体的尺寸相比小得多,但不影响岩体的完整性,这些结构面引起的损伤称为细观损伤;细观力学的研究已经成为当前力学界一个重要的研究课题。如裂纹、裂隙与岩体尺寸相比数量级相近,则直接影响岩体的完整性,这些结构面引起的损伤称为宏观损伤。一般情况下,裂隙岩体中这两种损伤是同时存在的,它们对岩体爆破效果有不同的影响,直接或间接影响洞室超欠挖的数量。

近年来,随着爆破技术的迅速发展和计算机应用的普及,人们对爆破理论模型的研究提出了更高的要求。追溯岩体爆破理论模型的研究历史,可将理论模型的研究历程分为三个阶段:①以 Harries 模型^[50]和 Favreau^[51]模型为代表的弹性理

论阶段;②以 BCM 模型^[52]、NAG-FRAG 模型^[53]为代表的断裂理论阶段;③以 Grady-Kipp 模型^[54]、Kuszmaul 模型^[55]为代表的损伤理论阶段。爆破理论三个阶段的发展为岩体爆破理论的研究和发展奠定了坚实基础,损伤理论的引入为爆破模型理论的研究注入了活力。这是因为,损伤模型的研究注重裂纹集合的宏观作用,同时考虑了荷载历史,比断裂模型更能体现岩体的非均质特性,因而代表了模型的最新研究水平和发展方向。

国外岩体爆破的理论研究从 20 世纪 50 年代初开始。Obert 等^[56]在研究了岩体性质(包括强度、密度、节理产状、波阻抗)与岩体爆破破碎之间的关系后指出,张开型或充填型节理会造成声阻抗不匹配以及应力波的反射作用。Barker 等于 20 世纪 70 年代末研究了岩体爆破机理,认为在节理面处由波的作用产生新鲜破裂面,岩体沿节理面破裂是由于 P 波尾部拉应力波派生的剪应力造成的。Margolin 等^[52]提出了一种 BCM 模型,该模型从微裂纹扩展原理出发建立了应力使裂纹扩展、裂纹扩展增加裂纹密度的理论,成功地解决了应力场如何使微裂纹扩展和裂纹的存在又如何影响应力场这两个互为因果的问题。Daneshmandi 等^[57]将断裂强度因子 K_{IC} 引入 BCM 模型,Grady 和 Kipp 提出的 G-K 模型,将损伤系数的概念引入到模型中,从而从定量的角度来确定岩体破碎过程和因裂纹连接而产生破坏的平均碎块尺寸。Taylor 等在 G-K 损伤模型的基础上引入有效体积模量和裂纹密度的表达式,使 G-K 模型的应用范围得到进一步推广。

国内对裂隙对岩体性质影响的研究是从 20 世纪 50 年代开始的,70 年代以后得到了迅速发展。钱七虎等^[58]根据断层与裂隙带的几何关系,考虑界面处的应力连续等边界条件,结合实际的地质特征,研究了应力波通过裂隙带的衰减规律。何思为^[59]提出了主结构面控制裂隙岩体爆破质量的观点。李宁^[60]用约束节理单元法模拟了应力波在节理处的传递过程,推导了动态约束节理单元的有限元方程和数值分析公式。杨军^[61]提出了爆破的分形损伤模型和脆性损伤模型,并针对爆破工程数值计算的实际问题提出了解决方案。

总之,裂隙岩体爆破模型的研究以 20 世纪 80 年代为界线,在此之前为对爆破产生的现象进行研究,之后为对爆破的理论模型进行研究。理论模型的研究仅仅从理论上研究爆破对围岩产生的影响,与试验相差的较大。究其原因,理论模型的研究不能考虑岩体裂隙的综合影响,只能从局部或者某一方面进行研究,这就出现了理论与实际无法适应的现象,理论研究滞后于试验的发展。裂隙岩体爆破研究的难点在于岩体非连续性、显著的各向异性和破裂过程的复杂性。因此,研究损伤参数的新的试验理论和方法,寻求和建立岩体的宏观节理裂纹激活和扩展理论、损伤参数和试验方法,是爆破损伤模型发展和实际应用的关键问题。

(3) 洞室围岩分类的研究现状

地下洞室围岩分类研究在国外开展得比较早,20世纪20年代,国外就已经开始对围岩进行分类,在20世纪60年代以前,洞室的围岩分类主要根据岩体的强度来进行,后来,很多学者认识到单一的评价指标不能完全反映岩体的整体特性,因此逐渐引入岩体的完整性系数作为围岩分类的另一个指标,如前苏联学者普罗托吉雅柯诺夫于1929年提出用坚固性系数对围岩进行分类的方法;Terzaghi于1946年提出的Terzaghi分类;Deere于1964年提出的RQD分类等;之后,国外的很多学者将反映岩体的多个指标逐渐考虑到围岩的分类中来,如Barton的Q分类系统;Wickham的岩体结构评价分类(RSR);Bieniawski的地质力学围岩分类(RMR);Laubscher和Taylor考虑节理方位和风化作用的影响,于1976年提出了修正的RMR法;德国的RCT围岩分类;Oliver于1976年提出的岩石持久性分类方法;Franklin于1974年提出的岩石间距-岩块强度双参数分类;国际岩石力学学会于1981年提出的国际岩石力学学会分类法。

国内围岩分类的研究从20世纪50年代引进前苏联的普氏分类开始,也有了较大的发展。20世纪70年代以后,根据我国国内的实际情况,有很多学者提出符合我国国情的围岩分类,如谷德振教授于1979年提出的岩体质量指标Z系数分类法;陈德基提出的岩体块度模数分类法;杨子文的岩体质量指标分类法;吕小平于1993年提出的层次类比系统分类法等。另外,很多行业根据本行业的特点,分别提出了符合自己行业特点的围岩分类方法,例如,水电工程界提出的水电工程地下工程围岩分类、评分系统(SD分类);我国于1995年颁布的《工程岩体分级标准》以BQ公式作为各类工程岩体分级的标准。

1.2.3 基于模糊概念预测方法的研究现状

在地下洞室的开挖过程中,超欠挖的发生与众多因素有关,不同的预测方法往往造成超欠挖预测结果的多样性,各种方法所考虑影响因素的影响方式和内容并不完全相同,使得预测结果的精度相差较大。同时超欠挖与其影响因素之间存在复杂的关系,这种复杂关系的识别存在一定的模糊性。建立一种能够综合考虑多种影响因素、提高预测结果精度的方法是很必要的。选取影响超欠挖问题的必要因素(如岩体结构面基本特征等),对超欠挖进行综合预测。人工神经网络模型是一种可以综合考虑岩体结构特征的新兴数学方法,将神经网络的基本理论应用到洞室的超欠挖预测中无疑给该领域的研究增添了新的生命力,尤其是根据同一区域的地质资料,结合已经开挖洞室的超欠挖情况,对已知超欠挖资料进行训练、学

习,利用训练出来的网络对尚未进行开挖的洞室进行预测预报是十分有效的。

(1) 人工神经网络的研究现状

人工神经网络是模拟人脑的神经结构及信息处理过程的构造系统,它是随着神经科学与脑功能研究发展开始的。1943年,Mcc Culloch 和 Pitts^[62]合作提出了神经元的 M-P 模型,它首先提出了神经节的概念,把神经元看作双节开关,利用布尔逻辑函数对神经过程进行数学模拟;1944年,Hebb^[63]提出 Hebb 规则,并于1949年提出神经元群、突触和返响回路的概念。根据心理学中的条件反射机理,探讨了神经细胞间连接强度的变化规律,总结成著名的 Hebb 学习法则:如果两个神经元都处于兴奋激活状态,那么彼此的突触连接权就会得到增强。1958年,Rosenblatt^[64]引入了感知机的概念;1960年,Widrow 和 Hoff^[65]提出自适应线性元 Adaline(adaptive linear element)网络,这是在当时研究大脑自适应学习系统的基础上提出的单层前馈感知机模型;1961年,Caianiello 发表了关于神经网络数学的理论著作,提出了神经元方程,用布尔代数模拟机能的动力过程,分析和研制细胞有限自动机的理论模型;但是,在1969年,由于 Minsky 和 Papert^[66]对人工神经网络的悲观结论,人工神经网络的研究一度处于低潮。直至1982年,美国加州工学院物理学家 Hopfield^[67-69]提出了 HNN 网络模型,并引入了计算能量函数的概念,人工神经网络的研究和应用才迎来了第二个高潮;1983年,Sejnowski 和 Hinton^[70]提出了“隐单元”概念,推出大规模并行处理的 Boltzmann 机,使用多层神经网络并行分布改变各单元连接权,克服了单层网络的局限性,为神经网络进入非线性处理领域奠定了基础。随后,各种神经网络模型层出不穷:BP 网、RBF 网、Hopfield 网、BSB 模型、Kohonen 模型、ART 模型等等,它们正在被模式处理与识别、图像与数据的压缩、模糊知识的处理、决策评估与优化等诸多领域广泛应用。

人工神经网络是一种由大量简单处理单元以某种方式互相连接而成的,对连续的或断续输入作出状态响应的动态信息处理系统。它是人脑的生理研究成果为基础,通过模拟人脑的结构和机理,以实现人脑某些功能为目的而建造的。从拓朴学的观点看,人工神经网络可以被看作是以处理单元为节点,用加权有向线连接的有向图。

迄今为止,根据不同的需要已经设计出了近 40 种不同的人工神经网络模型,这些模型在三个方面存在一定的差异,包括神经元特征、互连模式和学习规则。这些模型在不同的研究领域各有特色,应用条件和范围也不相同,但它们有共同的特征^[71]:①人工神经网络实现了并行处理和传送信息的机制,网络内各层神经元之间具有集体计算能力,可以大大提高信息处理速度。②人工神经网络的连接权矩阵具有可变性,使人工神经网络具有很好的学习能力和柔韧性。③包含大量神经

元及更复杂连接的人工神经网络,使网络具有高度的容错性和稳定性。④所有人工神经网络模型都是由许多相对简单的神经元按一定拓扑结构构成的大规模复杂网络系统。大量神经元的协同行为往往构成一类非线性动力学系统,因而具有非线性动力学系统的一些基本特性,如自适应性、自组织性、协同性等。⑤人工神经网络采用分布式的信息存储方式,信息分布于神经元连接权矩阵,因而人工神经网络具有全息记忆和联想的能力。

人工神经网络并不是独立发展的,独立发展的神经网络往往带有一定的局限性,现在有很多学者^[72-74]将神经网络和遗传算法结合,提出基于遗传算法的神经网络;徐卫亚等^[75-76]提出了概率神经网络的概念以及神经网络的反馈设计方法,并将其应用到边坡的稳定性分析中;Heil 和张邦礼^[77-81]等提出了小波理论与神经网络理论相结合的概念,并将其应用到土木工程领域中。

(2) 分形理论的研究现状

分形几何的概念是由 Mandelbrot B 于 1975 年对自然界中不规则形状物体的几何形状综合研究和分析后首先提出来的^[82]。分形几何有两个基本的特征:自相似性和分数维。经过几十年的研究,它已经发展成一门新兴的数学分支,它是研究和处理自然与工程中不规则图形强有力的理论工具。在传统几何中,自然界中的许多客观实体,诸如岩体裂隙、岩块的几何形态等都不能准确得到反映,而只能简单或粗略地描述其外形特征。资料表明:自然界中的许多客观现象和过程都具有分形构造,比如地表的山和谷组成的凸凹地形,岩体的断裂构造和岩体爆破块度分布及岩体颗粒的表面形态等,这些在传统几何中无法确切刻画的现象及过程通过分形几何可以得到很好的描述。

分形几何与传统几何的区别之一是特征长度,所谓特征长度就是指某物体长度的代表,如球的半径、岩块的平均粒度。具有特征长度的基本形状具有共同的重要性质,即构成其形状的线或面的平滑程度,也就是说几乎任何位置都是可以微分的。分形几何就是研究那些不具有特征长度但具有自相似性的客观事物。如在以往对爆破块度研究中,通常把各种形状的不规则岩块近似地取其可通过的筛网尺寸或当量直径来描述岩块的大小,这实际上就是把岩块的表面形状认为是平滑的,在传统几何范围内的特征长度描述是不完整的,缺乏对表面形状的确切刻画,而分形几何可通过分数维给出岩体形状的确切描述。

分形理论在岩体表面起伏性的研究方面具有重要的应用价值。Saouma 等^[83]用分形几何来研究混凝土断裂表面的粗糙度,建立了分数维与断裂韧性和裂纹扩展方向之间的关系;Lange 等^[84]采用图像分析技术进行三维断裂表面的定量分析,计算了粗糙度参量和分数维之间的关系;Issa^[85]使用截岛法和 2D 傅里叶变换