

计算岩体力学

——理论与实践

沈新普 徐秉业 岑章志 编著
朱泽虎 刘天泉

中国环境科学出版社
· 北京 ·

计算岩体力学

——理论与实践

沈新普 徐秉业 岑章志 编著
朱泽虎 刘天泉

中国环境科学出版社
· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

计算岩体力学:理论与应用/沈新普等编著. —北京:中国环境科学出版社,1995.4

ISBN 7-80093-732-1

I. 计… II. 沈… III. 岩石力学-数值计算-高等学校-教材 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 03677 号

计算岩体力学 ——理论与实践

沈新普 徐秉业 岑章志 编著
朱泽虎 刘天泉
责任编辑 刘永良

中国环境科学出版社出版

(100062 北京崇文区北岗子街8号)

北京市通县永乐印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

*

1995年4月 第 一 版 开本 787×1092 1/32

1996年4月 第 一 次印刷 印张 5

印数 1-15 000 字数 112千字

ISBN 7-80093-732-1/Z·904

定价:6.00元

前 言

岩体力学是研究岩体的力学性能与力学行为的学科。它以岩体为研究对象,以力学方法为基本分析手段,几十年来解决了大量的工程问题,但随着岩体工程复杂程度的提高,原有的解析手段显得有些不能满足工程需要:过分的简化使力学模型在较大程度上偏离了真实岩体,让人对结果的真实性有些拿不准。80年代以来,随着计算机的日益普及,岩体力学数值方法也得到了迅速的推广,这方面的文章和各种文集也如雨后春笋。但至今为止,也没发现一部系统而完备的介绍岩体力学数值计算技术的专著。各种传统的岩石力学教科书对岩体力学数值技术涉及的少而又少,尤其是关于弹塑性软化本构模型、弹塑性节理单元、弹塑性物性辨识等几个最基本而又很重要的内容,目前的文献多见于期刊杂志,专门用于岩体力学计算程序设计的思路与技巧方面的文献也并不多见。本书算是为了改善这种状况而作的一种尝试。

本书的重点是以下几个方面:1. 弹塑性软化本构模型的理论及程序设计。2. 弹塑性软化物性辨识技术与程序设计。3. 弹塑性软化岩体施工过程数值模拟与程序设计。4. 结合上述理论解决工程问题。其他几个方面的内容如基础理论和基本方法简介则是为了便于阅读本书和理论体系的完备而引入的。

工程岩体是一种复杂的地球介质,对其变形的影响因素

目 录

前言	(V)
第一章 绪论	(1)
第一节 现代岩体力学及其应用的若干进展与问题	(1)
第二节 边坡治理工程	(11)
第二章 非线性问题的基本数值解法	(18)
第一节 引言	(18)
第二节 直接迭代法(逐次逼近法)	(18)
第三节 Newton-Raphson 法	(22)
第四节 切线刚度法	(25)
第五节 初始刚度法	(26)
第三章 线性弹性问题的有限单元法简介	(28)
第一节 引言	(28)
第二节 连续体离散化	(28)
第三节 单元分析	(29)
第四节 总体分析	(35)
第四章 弹塑性理论及弹塑性有限单元法的原理	(39)
第一节 引言	(39)
第二节 弹塑性理论的基本原理	(39)
第三节 矩阵公式	(48)
第四节 用于数值计算的屈服准则表达式	(50)

第五节	屈服面上的奇异点	(53)
第六节	弹塑性有限元表达式	(55)
第七节	岩体弹塑性有限元分析中使用的节理元和 无限元	(56)
第五章	弹脆塑性软化本构理论的特点及其数值计算	(67)
第一节	引言	(67)
第二节	弹脆塑性增量本构理论的特点	(70)
第三节	弹脆塑性本构积分的数值格式	(73)
第四节	增量型弹脆塑性有限元求解格式	(75)
第五节	算例	(77)
第六章	岩土工程开挖过程数值模拟及开挖载荷计算 格式	(80)
第一节	引言	(80)
第二节	岩土工程弹塑性分析中的开挖载荷计算	(80)
第三节	开挖过程数值模拟及程序设计	(85)
第七章	岩土工程弹塑性物性辨识问题数值求解	(87)
第一节	引言	(87)
第二节	迭代求解弹塑性位移反分析问题的正则化 最小二乘法	(90)
第三节	灵敏度系数矩阵的计算格式	(93)
第四节	改进的灵敏度系数矩阵计算格式	(94)
第五节	正则化最小二乘法求解弹塑性位移反分析 问题的数值迭代格式	(98)
第八章	抚顺西露天矿北帮边坡及石油一厂地表变形 综合整治总体设计有限元计算	(108)
第一节	引言	(108)

第二节 当前边坡岩体弹脆塑性有限元分析·····	(117)
第三节 设计终界(D界)开采引起的边坡与地表变 形预测及治理措施模拟·····	(133)
附录一·····	(139)
附录二·····	(142)
参考文献·····	(144)

第一章 绪 论

第一节 现代岩体力学及其应用的若干进展与问题

岩体力学是解决地下工程、矿山建设及土木工程中所遇到的岩体工程问题的基础理论。随着现代化建设的发展,各种岩体工程规模越来越大,结构也日趋复杂,其安全性与经济性愈来愈引起人们的关注。对岩体力学理论的要求日趋迫切,从而大大推动了岩体力学的发展。而测试技术的提高与计算技术的发展,给岩体力学的发展提供了良好的手段。目前岩体力学涉及变形理论、模糊理论^[1]、块体理论^[2]等各种理论分支,在岩体工程中得到广泛应用。本节将就近年来岩体力学某些方面的理论与应用的进展及存在的问题作一个一般性的介绍与讨论。

现代工程岩体力学的理论体系可大致用图 1-1 来说明。在分析与解决岩体工程问题的过程中,应首先通过模型试验等手段来确定岩体的本构关系,然后利用本构模型及已有的理论知识与技术手段建立问题的岩体结构的模型,并用解析的或数值的求解方法求解原问题所对应的边值问题,之后再 将分析结果用于指导工程设计与施工。由于地质结构是一个复杂的岩体系统,具有一定的不可确定性,在施工过程中必须

对结构系统进行动态位移及应力监测,通过信息反馈,结合反分析技术,进行对该地质构造及结构的力学性能的再辨识,及时调整原设计参数及施工方案,从而起到对工程的指导作用。下面分别讨论图 1-1 中的几个方面的内容。

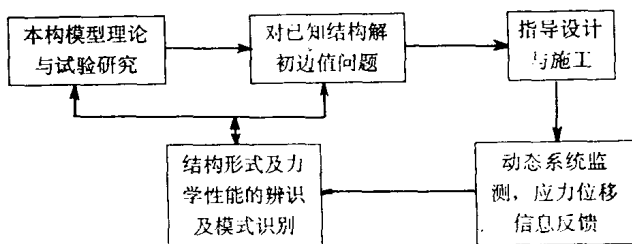


图 1-1 工程岩体力学分析体系简图

1. 本构模型的试验与理论研究

计算机技术的迅速发展使得人们在岩体行为进行分析时能够采用复杂的本构模型,因此,地质材料的本构关系长期以来得到了广泛的关注并有了大量的研究成果^[3-7],已提出的各种本构模型能较好地表达地质材料在破坏发生以前的行为。然而由于受试验手段等客观条件的限制,对破坏发生以后的材料行为的研究还很不完善,由于结构系统在整体破坏以前就会有局部破坏发生,况且工程中(如地下开采)的施工就是在结构不断发生局部破坏的环境前提下进行的,破裂的岩体仍有相当的承载力。因此对岩体强度峰值后区特性的研究是目前岩体类材料本构关系研究的一个热点^[8]。

对岩体强度峰值后区特性的研究是建立在试验基础上的,试验一般可分为单轴压缩及三轴压缩试验等^[9]。单轴压缩试验的原理是利用岩体力学试验机对圆柱形标准岩体试件进行压缩,从而获得试件所受载荷及其轴向变形的力-位移曲

线,并可以换算成名义上的应力-应变曲线。从单轴压缩试验曲线可以看出岩体的力-位移关系具有明显的三个阶段^[10],如图 1-2 所示。第一阶段是线弹性阶段。第二阶段是非线性变形阶段,这一阶段岩体内部裂隙扩张引起非线性特性,直到达强度极限。第三阶段是岩体裂隙失稳扩张,试件承载力下降,材料性能劣化,直至材料破裂。

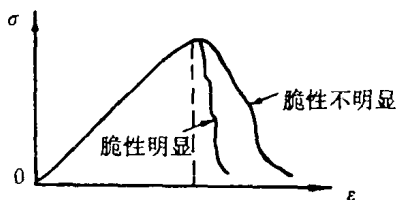


图 1-2 岩石全过程曲线的模型

岩体的三轴试验是用来研究在围压作用下的岩体的力学行为特征的。试验表明,在高围压作用下,岩体特性曲线的后区呈较弱的脆性

根据岩体试验的软化情况,通常将岩体特性曲线分为图 1-2 中所示的两类。

为了用数学关系式描述岩体材料在达到强度极限后的变形软化现象并在计算中通过本构关系式表达,众多的学者分别从宏观到微观的角度出发提出种种型的本构模型,其中应用广泛的有:

(1)弹性线性软化塑性模型如图 1-3 所示。该模型将岩体峰值后区特性近似为线性软化,在分析脆性不太明显的岩土材料时应用较广,对脆性明显的材料不适用。

(2)弹脆塑性软化模型如图 1-4 所示。该模型能较好地反映大多数岩石所具有的脆性软化现象,应用较广。

上述两种模型的着眼点是反映岩体材料在达到强度峰值

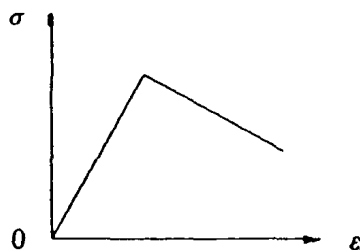


图 1-3 弹性线性软化塑性模型

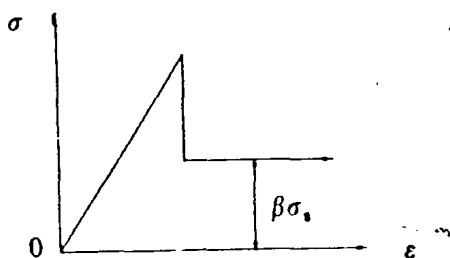


图 1-4 弹脆塑性本构模型

后的材料性能的劣化即软化现象,对岩体材料的变形局部化问题及尺寸效应问题未能很好地体现出来。

(3)弹塑性损伤本构模型。该模型是从损伤力学角度出发,定义某种表征材料内部裂隙的损伤变量,建立起相应的损伤演化方程,导出材料的塑性损伤本构模型。目前对岩体的塑性损伤本构理论的研究很多^[11-15],但大都针对某种特定情况而言,不具备普适性。受计算机条件的限制,基于微观研究的本构模型在国内岩体工程中应用不多,数值分析程序中大都采用前两种本构模型。

目前,建立统一的、能够反映塑性、损伤和断裂行为,并考虑变形局部化和变形劣化的岩体材料本构模型是国内外广大岩体力学理论工作者竞相研究的课题之一。

2. 岩体结构的位移分析及承载力计算

工程中的岩体结构大都是天然的地质结构,在年代久远的地壳运动中,经历了多次的变形,结构中存在有大量的裂隙、断层及节理面等不连续结构面,由于岩体结构的封闭应力效应使得结构体内有时有比重力作用大得多的初始地应力存在,这就给岩体力学分析带来极大困难。

岩体力学分析的目的就是要找出外部条件作用下,岩体结构变形及破坏的规律;反映在工程上,就是要给出一个预设的特定岩体结构在施工过程中可能产生的变形及结构稳定性的评价,并给出结构的最优设计及最优施工方案。

现代岩体力学的分析方法大致可分为三种:试验方法;简化结构模型的解析求解;复杂结构的数值方法。试验研究方法通常是用作对岩体材料性能的认识手段,对具体结构的模型试验及原位试验,鉴于试验的复杂性和专门性,本文不作介绍。下面着重讨论工程中常用的岩体力学解析法和数值法。

(1) 解析法

早期的岩体力学是按照弹性力学及材料力学的方法分析岩体结构的。解析法受简化模型的限制,往往不能详细考虑岩体结构中的各种裂隙、节理面及初始地应力的影响。这种分析方法所获得的结果与实际情况有一定的差距。50年代以来兴起的岩体力学把岩体结构看作是由各个岩块通过结构面结合在一起岩体体系^[16]。进入80年代以来,岩体力学在原有基础上,结合结构力学的分析手段及工程地质的分析结果,得到更进一步的发展,形成了岩体结构力学^[17-18]。岩体结构力学的基本观点是岩体变形,而岩体变形是由岩体材料变形和岩体结构变形两部分组成的,岩体结构控制着岩体的变形,而岩

体的材料变形是由结构体弹性变形、结构体粘性变形、结构面闭合变形、结构面错动变形四种成分构成的。根据岩体地质特征,归纳出四种岩体介质即:连续介质、碎裂介质、块裂介质及板裂介质,并给出相应的岩体结构变形规律:软弱结构面滑移变形规律、软弱夹层挤出变形规律、块状结构体转动变形规律和板状结构体弯曲变形规律。将岩体结构力学效应概括为三条法则即爬坡角效应法则、尺寸效应法则和各向异性效应法则。岩体结构力学是建立在结构分析和工程地质分析基础上的,对一些典型介质中的岩体结构能较好地求解其变形及承载能力(稳定性)问题。但是,由于岩体结构力学对于岩体的变形软化现象考虑不足,在分析问题时忽略了残余承载能力的影响,在某些问题的应用中显得不完备。

在岩体力学与工程地质结合并得到发展的同时,连续介质岩体结构力学也得到了发展,其特点是将岩体的应变软化本构关系引入到岩体结构的弹塑性位移及稳定性分析之中。1985年文献^[19]中提出了简化了的弹脆塑性本构模型,给出了结合能量法原理得到的某些应变软化结构的稳定性分析结果。文献^[20]在此基础上提出了求解弹脆塑性应变软化结构承载能力的损伤面扰动法,其原理是:认为材料应变软化是当应力达到强度极限后裂隙扩张产生的结果,称结构中塑性区为损伤区,损伤区与弹性区的交界面为损伤面,对于给定位移边界条件下的岩体结构,如果损伤面一个微小扩展对应外载荷的增长,则认为该结构处于稳定状态下,如果该扩展对应的外载荷的增长为零,则认为该结构处于临界失稳状态,所对应的外载荷即为极限承载能力;若该扩展对应的外载荷减少,则结构已失去稳定,求解岩体结构承载能力的损伤面扰动法过程简单,可以有效地求出典型结构(梁、拱、架、板)的弹脆塑性极限承载能力。

由于解析法无法考虑岩体结构的非均匀性、非规则性、非线性等非理想因素,所以从 20 年代以来岩土工程数值方法得到了广泛应用和迅速发展。

(2) 数值法

岩体力学数值方法是固体力学数值法与岩体力学相结合的产物。随着对岩体结构裂隙结构面等非连续性特殊性能认识的不断深化,目前的岩体力学数值计算程序已能对岩体结构的各种非理想特性加以模拟并给出较精确的解答。在各种数值求解技术中,常用的方法为有限元法和边界元法。由于边界单元法求解时所占内存较多,当材料种类较多,塑性变形较为严重时,边界元法的技术处理比较困难,故大型工程中多用有限单元法作为数值分析工具。目前有限元法分析岩体结构在外部作用下的变形及应力的作法一般是先进行地质勘探,搞清岩体地质构造,通过试验或类比法选定材料的本构关系模型(一般是弹塑性软化型或粘弹塑性软化型的),用二次节理单元模拟岩体结构面。

只要地质构造的数值模拟比较成功,目前的有限元分析程序通常能得出有意义的位移解来。在以往的数值计算中,由于求解技术的限制,一般只考虑从变形开始到局部破坏发生以前的行为^[21-22]。由于临近极值点时,有限元系统刚度阵出现严重的病态,导致常用的载荷控制法的有限元程序无法求出直到整体破坏的全程载荷-位移曲线。后来的“位移控制法”使得通过极值点的数值计算成为可能。但由于技术上的原因该法未能得到广泛应用。80 年代出现的“弧长法”^[23,24]比较好地解决了应变软化结构的载荷-位移全程曲线的计算问题。

“弧长法”最初是用作金属结构的变形稳定性与屈曲问题中的全程载荷-位移计算的。80 年代中期弧长法被用于应变

软化简单结构的全程载荷-位移计算^[25,26]。

“弧长法”的引入使得许多岩体力学问题有了解决的可能:可以用弧长法计算出露天矿边坡随开采过程而发生的变形,并能预测出边坡面上的局部失稳点和临界边坡角,从而为露天边坡的开挖施工及边坡加固设计提供有效的依据;弧长法还可以用来模拟各种岩体工程(隧道、地下开采等结构)随着开挖的过程而发生变形的情况。目前弧长法在岩体力学数值计算领域已受到重视,各种应用研究正在进行之中。

在数值计算得到充分发展的今天,解析法仍然能够存在并得到发展的原因,首先是对典型理想结构,解析法能获得精确的解答,可用以考核程序的可靠性及数值方法的正确性;原因之二是虽然数值法得到了极大的发展,但对岩体结构的某些特征仍不能很好地反映出来,即数值模拟技术还不够完善,而结合各种工程手段简化的典型结构解析法有时能获得比数值法结果更好的结果。

3. 物性辨识

岩体结构是天然的地质结构,由于结构内裂隙发育,各种材料相互交错,用取样试验手段所获得的材料参数往往不能很好地反映整个结构的实际性能,这在很大程度上影响了岩体结构数值分析与解析计算所得结果的正确性与可靠性。多年来岩体材料性能参数的辨识问题一直是岩体力学研究中的热门课题。

早期的岩体材料性能参数辨识方面的文章,大多将结构视为弹性体,用解析或者数值方法由位移或应力的实测数据反求结构材料性能参数^[27,28]。然而一些实际岩土工程中结构的变形常常包含有不可忽略的塑性变形。此时将结构视为弹性体是一种粗略的处理方式,随着岩体力学求解技术的不断

提高,对结构材料参数识别的弹塑性反分析方面的研究越来越多。*Maier*^[29]用最优化理论中的单纯形法进行了矿井巷道材料参数的弹塑性位移反分析,国内一些学者也相继进行了采用复合形法、可变容差法等优化算法进行弹塑性位移反分析的可行性^[30]及应用^[31]方面的研究,虽然有了上述工作,但非线性材料参数辨识中的若干基本问题如:完整的高效求解各种情况下非线性多参数辨识问题的求解格式、所建格式的求解稳定性和抗噪音(测量误差)的能力以及解的唯一性等问题均未得到很好解决。

目前反分析研究的任务之一是寻找提高反演求解效率的途径。材料参数性能的弹塑性位移反分析实质上就是岩体系统的辨识问题,所以借鉴已有的系统与控制理论方面的成果可能是今后岩体结构非线性反演问题求解的发展途径之一^[23]。此外,目前对岩土材料本构关系模型的认识都是通过全程加载试验的方式来进行的。由于全程加载试验机刚度的影响较大,导致对本构模型的认识不够清楚,而实质上这一认识过程是一个识别问题,也属于反问题的一种。应用非线性反分析技术来处理本构关系的模式识别问题能够有效地避开实验手段的局限性。目前结合试验测量技术和反分析手段进行的本构关系模型的识别问题也引起学者们的注意。

4. 岩体结构施工过程数值模拟及其他施工力学问题

岩体力学工程应用的一大内容就是为工程施工设计提供可靠的理论依据,不仅要依据经验类比法所作的岩体工程设计给出安全性和经济性等综合评价,还要对几种不同的可能的施工方案进行“优选”。由于岩体工程结构的稳定性不仅与地质环境有关,也与人为的施工因素有关。施工过程是一个非线性变化过程。不好的施工方案可能导致结构的失稳。要

实现上述目的就必须按设计的施工方案对工程施工进行全过程数值模拟,从而发现问题、解决问题。这里所遇到的第一个问题就是对开挖过程的合理模拟。由于岩土工程材料的力学行为的非线性性质,使得数值解的精度在很大程度上受工程施工过程的数值模拟格式的影响。因此对于岩土工程开挖过程的数值模拟格式及相应的载荷计算方法受到许多学者的重视^[33,34]。另外,由于岩体工程施工是一个四维问题(三维空间加一维时间),有时时间效应的影响不容忽视,对特定的地质环境尤其是软岩结构,选择合理的掘进速度与支护时间将有利于岩体结构内部自承体系的形成^[35],保证施工进程的安全进行并减轻初期支护的负担。反之,如果掘进速度选择不当,则或者自承体系的自承能力尚未达到高峰,或者自承能力已大部消失。这就势必影响安全施工,并给支护工作带来极大困难。近几年来对开挖过程中对岩体稳定有重要作用,并随时间而不断变化的岩体内部自承体系的研究已经起步,并开始引起有关学者的注意,有关测试工作已经进行并用于施工指导。这方面的理论分析和数值模拟研究国内尚不多见。目前“明天施工面上将发生什么情况”这一与工程施工紧密相连的岩体力学新问题已清楚地摆在我国广大岩体力学工作者的面前。

现阶段其他施工力学问题诸如开挖步的优化组合、地下洞室长轴方向布置等,实质上是前述问题与优化原理的组合^[36],当前述几个问题之一解决后,结合现有的优化原理即可方便地得到解决。

5. 节理岩体的损伤与断裂

节理岩体是含有大量裂隙的岩体。随时间发展,一定的外部条件会引起细观裂隙扩展成宏观裂纹,直至岩块破裂,岩体的断裂失稳是影响岩体稳定的重要因素。在连续介质损伤