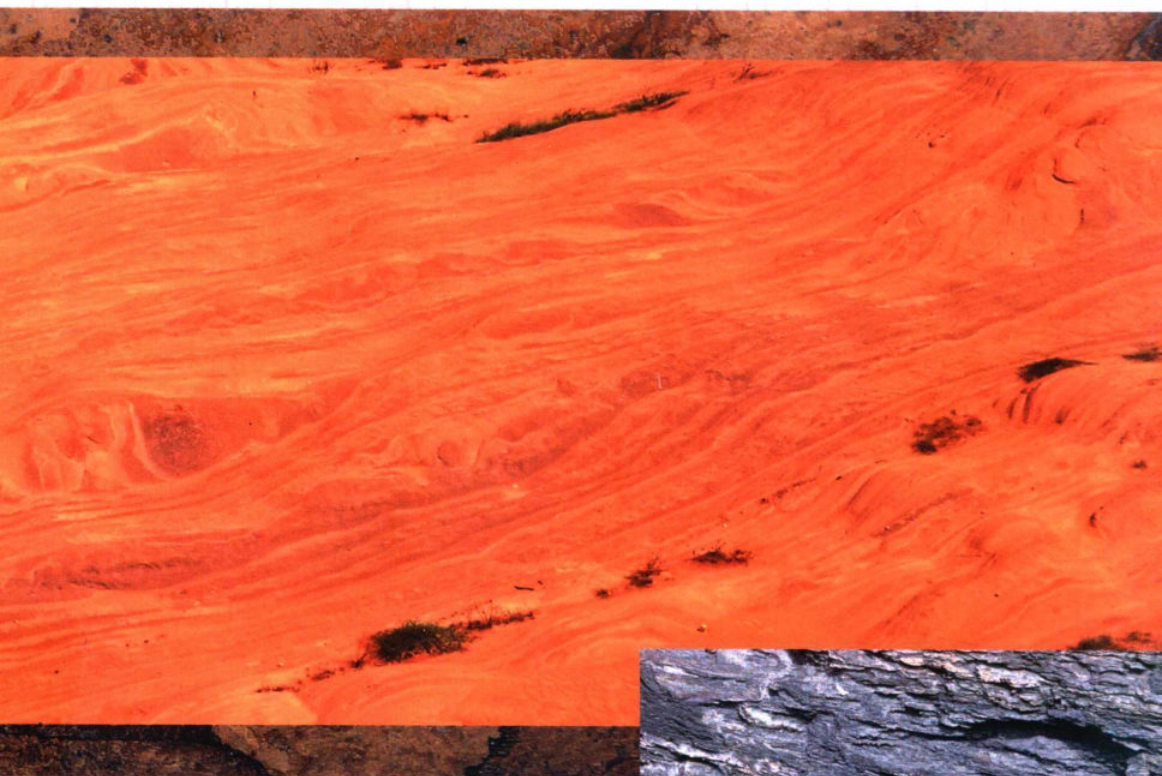


脆塑性岩石类材料破坏 后区力学特性研究

◎ 史贵才 编著



CUISUXING
YANSHILEI
CAILIAO POHUAI
HOUQU LIXUE TEXING YANJIU



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

国家自然科学基金项目(51678083)资助

住房和城乡建设部科学技术项目(2012-K3-23)资助

江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修计划资助

脆塑性岩石类材料 破坏后区力学特性研究

史贵才 编著



东南大学出版社

SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

内 容 简 介

岩石是一种复杂材料,峰值后区特性一直是岩石力学界十分关注的问题。本书在前人工作的基础上,对岩石的应力应变全过程曲线分类进行了有益的探讨;应用塑性位势理论,详细推导了对应于不同屈服准则的应力脆性跌落过程塑性流动因子的确定方法,并且给出了非理想脆塑性模型应力脆性跌落过程中产生的非零位移增量的一种简便的近似处理方法;分别对大理岩、红砂岩和花岗岩等几种脆性比较明显的岩石进行了应力脆性跌落系数的试验研究,给出了大理岩和红砂岩的应力脆性跌落系数与围压的关系表达式;应用研制的三维弹-脆-塑性有限元与无界元耦合分析软件对小湾水电站地下洞室群的围岩稳定性进行了不同屈服条件下的分析,验证了研究成果的有效性和实用性。

本书可作为土木、水电、桥梁、隧道、岩土力学与工程等工科专业高年级本科生和研究生的教学参考书,亦可供有关科研与工程设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

脆塑性岩石类材料破坏后区力学特性研究 / 史贵才
编著. —南京:东南大学出版社, 2019. 12
ISBN 978-7-5641-8803-0

I. ①脆… II. ①史… III. ①岩石-工程材料-塑性
力学 IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 293020 号

脆塑性岩石类材料破坏后区力学特性研究

Cuisuxing Yanshilei Cailiao Pohuai Houqu Lixue Texting Yanjiu

编 著 史贵才
出版发行 东南大学出版社
出 版 人 江建中
社 址 南京市四牌楼 2 号
邮 编 210096

经 销 全国各地新华书店
印 刷 虎彩印艺股份有限公司
开 本 700 mm×1000 mm 1/16
印 张 11.25
字 数 225 千字
版 次 2019 年 12 月第 1 版
印 次 2019 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-8803-0
定 价 46.00 元

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830)

前 言

岩石是一种复杂材料,也正是这种复杂性吸引了众多的科学工作者。研究全过程曲线,特别是峰值后区特性一直是岩石力学界十分关注的问题,因为无论在理论上,还是在岩体工程的实践方面,它都具有重要意义。对于大量的岩石工程问题而言,所涉及的岩类脆性性质十分明显,以往进行有限元非线性分析一般采用理想弹-脆-塑性模型,能够很好地反映脆性非常明显的岩土材料的峰值后区力学特性。然而,对于脆塑性不是那么理想化而软化速率又大到不满足经典塑性理论中对软化速率的限制的脆塑性岩土材料,采用理想弹-脆-塑性模型分析时必然有一定的误差,且应力坡降越缓,围压越大,误差越明显。为此,在前人工作的基础上,开展在过峰值应力以后的应力跌落过程中,允许应变增量不为零的非理想脆塑性模型研究。

全书共分9章。第1章绪论,介绍岩石的全过程曲线和岩石的本构模型,综述了有限元脆塑性分析模型的研究意义和现状以及面向对象有限元方法和无界单元方法的研究现状;第2章介绍岩石应力应变全过程曲线以及关于传统岩石分类的讨论,并在介绍新一代电液伺服自适应控制岩石力学试验机及新的试验结果基础上提炼出脆塑性岩石类材料数值模拟的计算模型;第3章在总结和引用前人成果的基础上,介绍岩石的弹-脆-塑性分析模型以及经典塑性理论对软化材料软化速率的限制,最后阐述了利用塑性位势理论来确定应力跌落的方法以及非理想弹-脆-塑性分析中应力脆性跌落过程中产生的非零应变增量的处理方法;第4章对几种脆性比较明显的岩石的应力脆性跌落系数进行试验研究,并分别给出大理岩和红砂岩的应力脆性跌落系数与围压的关系表达式,对某一大理岩介质中的地下构筑物进行弹塑性、理想脆塑性和非理想脆塑性三维有限元对比分析;第5章对非线性有限元分析中不同屈服条件进行对比研究,并以空心球壳受内外压问题为例进行了数值分析对比;第

6章研究无界单元方法,分别阐述了映射无界元和衰减无界元的基本原理及其形函数的具体构造方法,总结了几种常用的映射无界元和衰减无界元的形函数,而且详细推导了一种简单而又非常实用的无界单元—6节点无界元的形函数和其他相关计算公式;第7章设计了面向对象三维非线性的弹-脆-塑性有限元分析软件EBPFEM3D,能进行弹塑性或弹脆塑性有限元计算,能较好地模拟脆塑性岩石的力学性能,可考虑开挖卸荷,可模拟岩体中的不连续面,可模拟岩土工程中经常涉及的无限和半无限域问题;第8章应用分析软件对小湾水电站地下硐室群的围岩稳定性采用不同的屈服准则进行了分析,给出了不同屈服准则计算所得的硐室特征部位的位移值和相应于等面积圆的各机组剖面的塑性区域图,验证了研究成果的有效性和实用性;第9章总结了本书的研究内容,并展望了脆塑性岩石破坏后区力学特性研究的未来发展方向。

本书可作为土木、水电、桥梁、隧道、岩土力学与工程等工科专业高年级本科生和研究生的教学参考书,亦可供有关科研与工程设计人员参考。

由于作者水平有限,书中难免有错误和疏漏之处,敬请同行、专家和读者批评指正,不胜感激!

本书编写过程中引用了葛修润院士以及郑宏博士、王水林博士、侯明勋博士、卢允德硕士等师兄弟的研究成果,在此特别致谢!

史贵才

常州工学院

2019年9月

目 录

1	绪论	(1)
1.1	岩石的全过程曲线与岩石的分类	(1)
1.2	岩石的本构模型	(2)
1.3	脆塑性岩体的研究现状	(4)
1.4	面向对象有限元法的研究现状	(7)
1.5	无界单元法的研究现状	(9)
1.6	主要内容	(10)
	参考文献	(11)
2	岩石的全过程曲线	(21)
2.1	岩石的全过程曲线	(21)
2.2	关于传统岩石分类的讨论	(22)
2.2.1	关于Ⅱ型全过程曲线的实验条件及存在问题的讨论	(24)
2.2.2	Ⅱ型全过程曲线违背Ⅱ'yushin 公设	(25)
2.3	新一代电液伺服自适应控制岩石力学试验机及新的试验结果	(26)
2.4	脆塑性体数值模拟模型	(29)
2.5	本章小结	(31)
	参考文献	(31)
3	脆塑性岩体分析原理	(33)
3.1	经典塑性理论对软化材料软化速率的限制	(33)
3.2	应变空间中表述的弹塑性理论	(36)
3.3	利用塑性位势理论来确定应力跌落	(37)
3.4	应力脆塑性跌落过程中的位移增量的工程近似处理	(44)
3.5	算例	(44)
3.6	本章小结	(46)
	参考文献	(46)

4	脆塑性岩石应力脆性跌落系数的试验研究	(47)
4.1	试验目的	(47)
4.2	试验设备及试样	(48)
4.2.1	试验设备	(48)
4.2.2	试样	(49)
4.3	试验步骤	(51)
4.3.1	单轴试验步骤	(51)
4.3.2	三轴试验步骤	(51)
4.4	应力脆性跌落系数的试验确定	(52)
4.4.1	大理岩的应力脆性跌落系数的三轴试验确定	(53)
4.4.2	红砂岩的应力脆性跌落系数的三轴试验确定	(56)
4.4.3	花岗岩的应力脆性跌落系数的单轴试验确定	(59)
4.4.4	小结	(60)
4.5	本章算例	(60)
4.6	本章小结	(65)
	参考文献	(65)
5	岩土工程常用屈服条件的对比研究	(66)
5.1	概述	(66)
5.2	岩土材料的屈服条件	(66)
5.2.1	莫尔(Mohr)条件的基本思想	(66)
5.2.2	莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)条件	(67)
5.2.3	德鲁克-普拉格(Drucker-Prager)条件	(69)
5.2.4	广义米赛斯条件	(69)
5.3	用广义 Mises 屈服条件去逼近莫尔-库仑屈服条件的研究	(72)
5.3.1	理想弹塑性厚壁球壳受内外压问题	(72)
5.3.2	脆塑性厚壁球壳受内外压问题	(77)
5.4	本章小结	(79)
	参考文献	(79)
6	无界单元法	(81)
6.1	概述	(81)
6.2	衰减无界元	(82)
6.2.1	衰减无界元的基本原理	(82)

6.2.2 几种常用的衰减无界元模型	(85)
6.3 映射无界元	(87)
6.3.1 映射无界元的基本原理	(87)
6.3.2 几种常用的映射无界元模型	(89)
6.4 6节点三维无界单元	(92)
6.4.1 6节点映射无界元	(92)
6.4.2 6节点三维衰减无界元	(95)
6.5 算例	(96)
6.6 无界元在地应力场分析中的应用	(99)
6.6.1 岩体初始地应力场的有限元分析	(99)
6.6.2 无界元应用于地应力场分析	(108)
参考文献	(114)
7 脆塑性有限元分析程序设计及其应用	(116)
7.1 使用面向对象的方法来编写程序的必要性	(116)
7.1.1 数据结构与算法	(116)
7.1.2 程序设计语言 and 传统程序设计方法的局限性	(117)
7.2 面向对象方法的起源与发展	(121)
7.2.1 面向对象方法的起源	(121)
7.2.2 面向对象编程语言的发展	(121)
7.3 面向对象的程序设计方法的基本思想	(122)
7.3.1 面向对象认识方法学	(122)
7.3.2 面向对象的方法的编程思想	(123)
7.4 面向对象方法的基本概念	(123)
7.4.1 对象(Object)	(124)
7.4.2 消息与方法	(125)
7.4.3 数据抽象(Data Abstraction)	(126)
7.4.4 类与对象	(126)
7.5 面向对象程序设计方法的主要特征	(127)
7.5.1 封装性	(127)
7.5.2 继承性	(127)
7.5.3 多态性与动态聚束	(128)
7.5.4 面向对象方法与结构化方法在概念上的区别	(128)
7.6 面向对象程序设计的基本过程	(129)

7.6.1	面向对象软件方法的基本原则	(129)
7.6.2	面向对象的软件开发模式	(129)
7.6.3	面向对象的程序设计的基本过程	(130)
7.7	面向对象有限元程序设计	(131)
7.7.1	面向对象有限元分析	(131)
7.7.2	面向对象有限元设计	(133)
7.7.3	面向对象有限元实现	(143)
	参考文献	(144)
8	工程实例	(147)
8.1	工程概况	(147)
8.2	主要工程地质概况与岩体力学参数	(148)
8.3	小湾水电站地下洞室有限元分析	(149)
8.3.1	计算模型	(150)
8.3.2	计算结果	(152)
8.4	本章小结	(160)
	参考文献	(160)
9	结论与展望	(161)
9.1	主要结论及认识	(161)
9.2	展望	(162)
	附录	(164)
附录 1	大理岩常规三轴压缩试验应力应变曲线	(164)
附录 2	红砂岩常规三轴压缩试验应力应变曲线	(167)
附录 3	花岗岩单轴压缩试验应力应变曲线	(171)

1.1 岩石的全过程曲线与岩石的分类

岩石是一种复杂的材料,也正是这种复杂性吸引了众多的科学工作者。理论源于实践,并需要得到实践的检验。试验是一切科学研究的基础,岩体力学的研究也是从试验开始的。使用岩石力学试验机对圆柱形岩石试件进行单轴或三轴压缩试验是研究岩石的强度和变形特性及岩石发生破裂的发展过程的一种基本试验手段。进行岩石单轴压缩试验时试验机对岩石试件所施加的轴向力和试件轴向变形的关系曲线通常称为力-位移曲线。如果将力和位移换算成名义上的应力和应变,则又可称为应力-应变曲线。众所周知,不管使用何种类型的试验机,通过岩石的单轴压缩试验都可以取得岩石的峰值强度。在达到峰值强度之前的力-位移曲线叫做峰值前区特性曲线。过峰值强度以后的力-位移曲线叫做峰值后区特性曲线。包括前、后区特性曲线在内的完整的力-位移曲线叫做全过程曲线,或称全程曲线。

研究全过程曲线,特别是峰值后区特性一直是岩石力学界十分关注的问题,因为无论在理论上,还是在岩体工程的实践方面,它都具有重要意义。例如,岩体在生成之后受到过多次剧烈的构造运动的作用,都不同程度地受到了破坏,因此在原位上的岩体的材料性质应该说在一定程度上是与岩石的峰值后区性能相当;而在工程实践中,“破裂的岩石”,特别是当侧面有支撑时,仍然能够支撑住相当大的负荷。显然,在研究矿柱的稳定性及地下巷道中发生岩爆的可能性时,对岩石的峰值后区特性的深入了解也是十分重要的。

最早的三轴试验是在普通试验机上进行的,将圆柱体岩样放置在液压腔中,利用油压对岩样进行侧向加载,在维持侧限压力(也称围压,confining pressure)不变的同时,对岩样进行轴向压缩。1911年,Von Karman发表的Carrara大理岩的三轴压缩曲线是标志性的成果^[1]。Mogi采用此方法进行试验,得到了白云岩的三轴试验曲线^[2]。随着实验技术的发展,Wawersik对原有刚性试验机作了改进,采用人工伺服的方法,得到了一系列岩石试样单轴的全过程曲线,并首次在刚性试验机上得到Tenness大理岩的三轴压缩全过程曲线,最后指出根据岩样单轴压缩破坏的稳定与否,可以将岩石分为Ⅰ型和Ⅱ型^[3]。随后,Gowd T N,Rummel F^[4]在刚

性试验机上得到某多孔砂岩的三轴脆-延转化特征。Fredrich 研究了方解石类岩石,得到颗粒尺寸对脆-延转化特性的影响^[5]。林卓英等对大冶大理岩和江西红砂岩三轴压缩全过程进行了较为系统的研究,着重研究了围压对脆-延转化的影响^[6]。Mogi 设计了对长方体柱体试样进行三向不等压加载的真三轴试验机,并从 1967 年开始发表了一系列的文章,论述了中间主应力对岩样强度、变形、脆性和延性的作用^[7]。邓小亮^[8],徐松林等^[9]先后研究了大理岩三轴压缩下的全过程曲线及其力学性能。

葛修润针对当前试验机的弊病,研制了一套功能多样化、体积小型化的岩石力学多功能试验系统,该试验系统在整体性能上达到了国际先进水平,他在这一系统上进行了大量试验的研究,指出岩石Ⅰ型和Ⅱ型的分类是不适宜的,Ⅱ型后区曲线的出现和不够完善的控制方式与试验条件有关,并提出了新的岩石分类方案^[10-12]。

1.2 岩石的本构模型

试验技术的不断改进使人们能够更进一步认识岩体的特性,计算机技术的迅速发展使得人们对岩体进行分析时能够采用复杂的岩石本构模型,因此,岩石类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,已提出的各种本构模型能较好地表达岩石材料在破坏发生以前的行为。不过由于岩体本身的复杂性和岩体力学相对来说较为年轻,当前岩石本构模型的发展落后于土模型,表现为土的模型较多,各种模型能适应不同的土和工程使用,而且这些模型一般均能考虑土的硬化、软化及剪胀特性。但是至今反映岩石变形特性的实用计算模型并不多。因而有专家指出,对于岩石来说,重要的是建立实用模型,这些模型不要太复杂,但应当反映各类岩石的基本特性。岩石材料在受力过程中一般经过弹性、应变硬化、破坏(峰值)、应变软化、残余塑性流动等几个阶段。先前对于岩石类材料,多采用照搬经典的弹塑性力学理论以直接应用于岩石之中,并且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。况且工程的施工就是在结构不断发生局部破坏的前提下进行的,破裂的岩体仍有相当的承载力。因此对岩石强度峰值后区特性的研究是目前岩石类材料本构关系研究的一个热点。

为了用数学关系式描述岩石材料在达到强度极限后的应变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形式的本构模型,其中应用广泛的有:

(1) 弹性-线性软化-残余塑性模型。这一模型首先由日本学者川本眺万^[13]提出,这个模型的特点是:在峰前,忽略强化阶段,认为岩石只产生弹性变形,并简化

为线性弹性,过峰值后,岩石进入软化段,对于软化段,简化为线性关系。软化阶段以后出现残余塑性阶段,该阶段的塑性简化为理想塑性。根据实验的结果,一些岩石没有明显的残余塑性变形,可以把这个模型简化为弹性-线性软化模型。

这一模型在岩土工程中应用较多^[14-19]。方德平等应用该模型,并考虑岩石脆塑性过渡特性,建立了文中所使用的岩石力学模型,推导了在不同外压 P 的作用下出现的软-弹、残-软-弹、残-塑-弹三种情况下的围岩位移和应力公式,并进行了有限元计算,取得了较好结果^[14,15],并在文献^[15]应用该模型进行隧道开挖和支护的有限元分析研究,建立了在三个阶段的基本方程。蒋明镜等应用本模型模拟土的应力应变曲线,用三折线模拟体应变、小主应变与大主应变的关系曲线^[18]。采用双剪统一强度理论的屈服函数形式,推导并给出了柱形孔扩张时,应力场、应变场和最终扩张压力计算时所需的公式和求解步骤。

(2) 弹性-脆性跌落-塑性残余模型。该模型是 Lo 和 Lee 于 1979 年最先在边坡的稳定性计算中采用的,在峰值应力前,仍简化为线弹性;而当应力达到峰值应力后,假定应力从峰值强度面直接跌落到残余强度面上,然后在残余强度面上做塑性流动^[20]。这一模型是对线性软化的简化,能够反映脆性比较明显的岩土材料的软化现象,应用比较广泛^[21-31]。

(3) 临界状态模型。临界状态模型由 Roscoe 等提出^[32],被作为描述土的力学行为的理论基础,后来被引入岩体力学^[33]。在岩体力学中,对临界状态的理解是:岩石经过塑性硬化(或软化)之后达到类似理想塑性的一种状态。在此状态下,岩石塑性变形的发展将不再伴有应变硬化(或者软化)特性以及塑性体积变形,也就是说,临界状态就是岩石的塑性体积应变增量为零的状态。周维垣等通过引用非关联流动规则和临界状态理论,建立了岩石的弹塑性本构模型,该模型充分考虑岩石的剪胀,能够处理岩石的先硬化后软化的情况^[34]。

(4) 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。1976 年 Dougill 最早把损伤力学应用于岩石和混凝土。Dragon^[35]利用断裂面概念对岩石和混凝土的连续损伤进行了理论探讨。Krajciaovic^[36]使用热力学和空穴运动学对脆性材料的损伤本构方程进行了较全面的研究。日本 Kyoya Ichikawa 和 Kawamoto 将损伤力学理论引入节理岩体的研究中^[37],用一个二阶对称张量代表岩体中节理裂隙的几何特征。以动力学为基础进行的损伤研究最早见于 Hongliang 和 Ahrens 在实验室通过对冲击荷载作用下岩石的损伤研究,提出用 P 波速来定义损伤变量^[38,39]。

1.3 脆塑性岩体的研究现状

众所周知,脆塑性体的基本特征就是在其 σ - ϵ 曲线上存在一个突变的、不可控的脆性段。推广到复杂应力状态的就是:当使应力点由某一初始弹性态加载到峰值强度面后,将发生突变而迅速跌落至残余强度面上。正是由于屈服面在应力空间中的这种不连续变化而增加了分析的难度。

Lo 和 Lee 于 1973 年在边坡的稳定性计算中采用过线弹性-脆性跌落-塑性残余模型,假定应力从峰值强度面直接跌落到残余强度面上,为广大研究人员指明了一个有前景的研究方向^[20]。Dems 和 Mroz 于 1985 年也提出了该模型^[21]。但是,由峰值强度面到残余强度面的应力跌落方式一直是有限元分析中争论的一个焦点。其后,研究人员提出过很多种假想的应力跌落方式,然而,不同的应力路径所得的结果往往相去甚远。为了回避应力跌落方式的不确定性,部分学者仍将脆性破坏作为连续的应变软化模型来处理^[40],但是这显然有违于脆性岩石的变形特征。因为脆塑性体由峰体强度面到残余强度面不是一个渐近过程,而是突发的和不可控的,跌落后的峰值强度也是不可恢复的,而用连续的应变软化模型显然是不能刻画这些特征的。再者,即使将其视为连续的应变软化模型,也不能取真实的软化段来进行计算。已有部分学者,如 Pietruszczak 和 Mroz^[41],Prevost 和 Hughes^[42]等从理论及计算上证明:当材料的软化速率较大时,会使得塑性力学问题的解不唯一。郑宏等还证明,当软化速率较大时,还会使得经典意义下的本构积分无法进行^[24,25]。刘文政于 1989 年提出了利用塑性位势理论来确定应力跌落过程的方法^[22]。郑宏于 1993 年结合三峡工程课题也独立发现了该方法。后来郑宏等还证明了脆塑性体仍然满足 Il'yushin 公设,给用塑性位势理论来确定应力跌落过程的方法找了一个理论基础^[24,25]。近年来,对弹脆性岩石类材料力学性能的研究得到越来越多国内学者的重视,也取得了大量的研究成果^[43-73]。在各种各样的实验研究基础上,采用不同的特征指标对脆性显著的岩石类材料峰值后区特性进行概念描述和数值模拟研究见表 1.1,但是大多处于理论与实验研究阶段,能够真正应用于数值模拟的成果尚不多见,特别是非理想脆塑性模型的研究仍然有待继续深入。

表 1.1 常见描述脆性材料应力跌落效应方法汇总表

参考文献	试验方法	脆性指标	备注
Hucka and Das ^[74] ; Kahraman ^[75] ; Altindag ^[76]	单轴压缩试验和 巴西试验	$B_1 = \sigma_c / \sigma_t$	σ_c ——单轴抗压强度 σ_t ——单轴抗拉强度

(续表 1.1)

参考文献	试验方法	脆性指标	备注
Honda H, and Sanada Y ^[77] ; Hucka and Das	硬度试验	$B_1 = (H_\mu - H)/K$	H_μ ——微观压痕硬度 H ——宏观压痕硬度 K ——体积模量
Heinze G. ^[78] ; Hucka and Das	硬度试验	$B_1 = (H_\mu - H)/2.6$	H_μ ——微观压痕硬度 H ——宏观压痕硬度
Baron et al. ^[79] ; Hucka and Das	应力应变试验	$B_1 = W_r/W_t$	W_r ——破坏时弹性应变能量 W_t ——破坏时总能量
Protodyakonov ^[80] ; Hucka and Das	Protodyakonov 冲击试验	$B_1 = q\sigma_c$	q ——冲击试验形成的 直径小于 0.6 mm 碎片百分比 σ_c ——单轴抗压强度
Coates ^[81] ; Hucka and Das	应力应变试验	$B_1 = \epsilon_r/\epsilon_t$	ϵ_r ——破坏点的总应变 ϵ_t ——破坏点的弹性应变
Bishop ^[82]	应力应变试验	$B_1 = (\tau_p - \tau_r)/\tau_p$	τ_p ——峰值抗剪强度 τ_r ——残余抗剪强度
Reichmuth ^[83]	点荷载试验	$B_1 = K_b, K_s P/h^2 = S_t - K_b P$	K_b ——相对脆性指标 K_s ——形状因子 P ——破坏荷载 h ——加载点间距 S_t ——抗拉强度
Hucka and Das; Kahraman	单轴压缩试验和 巴西试验	$B_1 = (\sigma_c - \sigma_t)/(\sigma_c + \sigma_t)$	σ_c ——单轴抗压强度 σ_t ——单轴抗拉强度
Hucka and Das	莫尔包线	$B_1 = \sin\varphi$	φ ——莫尔包线上法向应 力为零时内摩擦角
Hucka and Das	斜剪试验	$B_1 = 45^\circ - \varphi/2$	φ ——莫尔包线上法向应 力为零时内摩擦角
Lawn and Marshall ^[84]	硬度和断裂韧性 试验	$B_1 = H/K_{IC}$	H ——硬度 K_{IC} ——断裂韧性
Martin CD ^[85] ; Gong and Zhao ^[86]	应力应变试验	$B_1 = \epsilon_{1f} \times 100\%$	ϵ_{1f} ——不可恢复轴向应 变
Quinn ^[87]	硬度、应力应变 和断裂韧性试验	$B_1 = HE/K_{IC}$	H ——硬度 E ——弹性模量 K_{IC} ——断裂韧性
Bruland ^[88]	TBM 冲击试验	$B_1 = S_{20}$	S_{20} ——小于 11.2 mm 的碎片百分比

(续表 1.1)

参考文献	试验方法	脆性指标	备注
Altindag ^[76,89]	单轴压缩试验和巴西试验	$B_1 = \sigma_c \times \sigma_t / 2$	σ_c ——单轴抗压强度 σ_t ——单轴抗拉强度
Hajiabdolmajid and Kaiser ^[90]	应力应变试验	$B_1 = (\epsilon_f^p - \epsilon_c^p) / \epsilon_c^p$	ϵ_f^p ——摩擦强化所需塑性应变 ϵ_c^p ——粘聚力损失所需塑性应变
Copur et al. ^[91]	贯入试验	$B_1 = P_{dec} / P_{inc}$	P_{dec} ——平均力衰减周期 P_{inc} ——平均力增量周期
Jarvie et al. ^[92] ; Miskimins ^[93]	矿物学测井或实验室 X-衍射技术	$B_1 = W_{qzt} / (W_{qzt} + W_{carb} + W_{clay})$	W_{qzt} ——石英含量 W_{carb} ——黏土含量 W_{clay} ——碳酸盐矿物含量
Rickman et al. ^[94]	密度和声波测井数据	$B_1 = \left(\frac{YMS_C - 1}{8 - 1} + \frac{PR_C - 0.4}{0.15 - 0.4} \right) / 2$	YMS_C ——杨氏模量的复合式 PR_C ——泊松比的复合式
Suorineni et al. ^[95]	矿物学测井或实验室 X-衍射技术	$B_1 = S_F G_F F_F$	S_F ——刚度因子 G_F ——纹理因子 F_F ——片理因子
Wang and Gale ^[96]	矿物学测井或实验室 X-衍射技术	$B_1 = (W_{qzt} + W_{dol}) / W_{total}$	W_{qzt} ——石英含量 W_{dol} ——黏土和白云石含量 W_{total} ——矿物总重
Yagiz ^[97]	贯入试验	$B_1 = F_{max} / P$	F_{max} ——最大贯入力 P ——最大力下贯入深度
Altindag ^[98]	单轴压缩试验和巴西试验	$B_1 = \sqrt{\sigma_c \times \sigma_t} / 2$	σ_c ——单轴抗压强度 σ_t ——单轴抗拉强度
Tarasov and Potvin ^[99]	应力应变试验	$B_1 = E / M$	E ——弹性模量 M ——峰后模量
Tarasov and Potvin ^[99,100]	应力应变试验	$B_1 = (M - E) / M$	E ——弹性模量 M ——峰后模量
Meng et al. ^[101]	应力应变试验	$B_d = \frac{(\tau_p - \tau_r) \lg k_{ac}(AC) }{\tau_p} \frac{1}{10}$ $B_t = (\tau_p - \tau_r) \frac{\lg k_{ac}(BC) }{10}$	τ_p ——峰值抗剪强度 τ_r ——残余抗剪强度 $k_{ac}(AC)$ ——初始屈服点与残余强度起始点连线的斜率 $k_{ac}(BC)$ ——峰值强度到残余强度的跌落速率

(续表 1.1)

参考文献	试验方法	脆性指标	备注
Jin et al. [102]	矿物学测井或实验室 X-衍射技术	$B_1 = (W_{\text{QFM}} + W_{\text{Carb}}) / W_{\text{Tot}}$	W_x ——组分的质量分数 W_{QFM} ——石英+长石+云母 W_{Carb} ——碳酸盐质量 W_{Tot} ——各组分总质量
Rybacki et al. [103]	应力应变试验	$B_1 = H/E$	H ——硬化模量 E ——弹性模量

1.4 面向对象有限元法的研究现状

现代计算技术在计算能力和存储容量上的革命仅仅提供了计算更复杂问题的有效工具,而程序的高效性要求是永远不会过时的。

面向对象有限元是面向对象程序设计方法与有限元技术相结合的产物。利用面向对象的方法来研究有限元,是对有限元新方法有益的尝试和创新性发展,必将大大地改进有限元软件的性能,提高有限元软件的开发效率。由于面向对象方法的数据抽象和封装、继承与重载、多态等技术以及面向对象的程序类与类之间的强内聚性和低耦合性,可以在相当程度上避免传统的面向过程或结构化有限元软件的难重用、难移植、难排错等情况的发生,这对构造大系统是很有好处的。

面向对象有限元方法(OOFEM)的研究始于 20 世纪 80 年代后期,它是一门初露端倪的科学。在国际上,Rehak 和 Baugh 于 1989 年提出了有限元程序设计的新技术——面向对象的方法^[104],并且从知识工程的角度研究了这种方法,建立了有限元分析的一个类库。Peskin 和 Russo(1988)用面向对象方法设计了三个基本类:Problem、Domain 和 Equation^[105]。Miller(1988),Forde, Foschi 和 Stierner(1990)研究了面向对象有限元程序的原型^[106,107]。Forde 等的原型把对象分成节点、单元、边界位移、材料、形函数、元素及元素组等,每一种对象都有独立处理数据的能力,并建立了向量类和矩阵类。对象的组织结构采用链表结构,计算中采用的链表主要有对象链表、材料链表、节点链表、边界位移链表、边界力链表和元素组链表。Forde 等还对面向对象的有限元方法和传统的有限元方法做了比较。Fenves(1990)在面向对象有限元程序设计的复杂算法方面研究了用面向对象的概念来对节点重新编号的方法^[108],指出了面向对象的程序设计在开发工程软件方面的优点,即它的数据抽象技术具有很大的灵活性,程序模块化程度高,代码的重用性强。Mackie(1992)提出了扩展的有限元对象^[109],并且指出:面向对象的方法在有限元问题的应用中,可以提高有限元程序的模块化程度,减少错误的产生,并使程序设

计的思路更为清晰化。Zimmermann, Dubois-Pèlerin 和 Bomme(1992—1993)研究了面向对象有限元编程的控制规则,并用 Smalltalk 语言编制了面向对象有限元程序的原型和利用 C++ 语言实施的提高计算效率的原型^[110,111]。Ju 和 Hosain(1994)运用面向对象的概念来设计有限元的子结构^[112]。Mackie 运用对象的概念开发了一个可以表述有限元数学方法的系统^[113],这个系统使得矩阵、方程组可以由继承得到。上述的一系列相关研究成果使世人逐渐认识到面向对象的方法设计有限元程序相对于传统的面向过程的有限元程序有着许多优势,并催生了一些能够进入实际应用的面向对象有限元程序。1994 年, Rihaczek 等人提供了一个用 OOFEM 解决热传导问题的实例^[114],作者提出用一个 Assemblage 类来联接有限元模型类和分析类,两者之间通过该类相互作用和进行数据传递。该类还负责单元和节点之间拓扑关系的建立、荷载和约束的处理等等。1995 年 Meissner, Diaz 和 Schöenborn 运用 OOFEM 对一个三维岩土工程问题进行了分析^[115]。Werner, Mackert 和 Stark(1995)研究了在隧道工程中如何用面向对象的模型来设计与分析问题^[116]。

在国内,面向对象有限元的研究工作跟进比较早,其中西南交通大学做的工作比较深入和具体。崔俊芝、梁俊等简要介绍了面向对象有限元的基本概念,并通过面向对象分析和设计提出了一些类,如形状函数类、高斯类和元素类等,对象的组织也建议采用链表结构^[117]。周本宽等指出“与传统的有限元程序(通常采用 FORTRAN)相比,面向对象有限元程序更加结构化、更易于编写、更易于维护和扩充,程序代码的可重用成分更大,它为开发大型有限元分析软件提供了一条新途径”,同时着重提出了普通有限元程序当中类设计的一种新思路^[118]。除此之外,这篇文献当中设计了一套较为完善的有限元分析系统,其中包括节点类 Node、材料类 Material、载荷类 Load、高斯积分 Gauss、形函数类 ShapeFun、单元类 Element 等等。周本宽等^[118]及其后曹中清^[119,120]研究的都是线性静力学方面的 OOP 程序设计。李会平等^[121]以曹中清的论文为基础结合弹塑性有限元分析基本步骤,运用面向对象基本特性继承了曹中清论文中的几个有限元类,形成了新的弹塑性有限元分析方法类。文中提供了一个可以扩充已有有限元类库的方法,体现了面向对象编程方法的巨大优越性。孔详安等对有限元计算中的一些数学对象给出了面向对象的分析,主要提出了事件类、几何形状类和物理特性类,派生新元素时需要从几何形状类和物理特性类多重继承,同时还指出利用面向对象的方法可以方便有限元的程序的编写并且有利于程序的维护和扩展^[122-124]。

张向等^[125]给出了一个面向对象的有限元程序设计的实例。作者给出了节点类、节点边界条件类、节点力类、节点数据类、材料类、形函数类和单元类的接口定义,并且还给出了一个简单的矩阵运算库。项阳等^[126,127]给出了面向对象有限元