

张东明
尹光志
王浩
黄滚
著

岩石变形局部化 及失稳破坏的理论实验



科学出版社

内 容 简 介

岩石的局部化变形是岩土材料失稳的一个重要特征,研究局部化变形带的起动、演化发展及剪切带形成规律对于研究岩石材料失稳破坏具有重要的意义。本书介绍了软岩的局部化失稳破坏的理论与实验研究成果。全书共9章,第1章介绍了国内外变形局部化的研究现状;第2章研究了三向压缩应力状态下软岩失稳破坏规律;第3章介绍了岩石变形局部化的自组织临界性;第4章利用光测方法研究了软岩的变形局部化现象;第5章介绍了平面应变条件下泥砂岩的单轴压缩特征;第6章介绍了岩石弹塑性本构模型及变形局部化的力学模型;第7章介绍了岩石变形局部化的分叉现象;第8章介绍了梯度塑性理论,并依据该理论研究了软岩的变形局部化现象;第9章通过数值模拟手段分析了岩石变形局部化及剪切带的形成过程。

本书适用于采矿工程、安全技术及工程、岩土工程等相关领域的科研人员使用,也可作为高等院校相关专业研究生和本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩石变形局部化及失稳破坏的理论与实验/张东明等著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-031925-8

I. ①岩… II. ①张… III. ①岩石变形-研究 IV. ①TU454

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 150052 号

责任编辑:沈 建 / 责任校对:赵燕珍

责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年3月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2012年3月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:217 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

岩石的局部化变形是岩土材料失稳的一个重要特征,是材料破坏的先兆,岩石中的局部化变形直接导致了加载过程中岩石整体强度的降低,使岩体工程的承载力下降。所以研究和预测局部化变形带的起动、演化发展及剪切带形成规律对于研究岩石材料失稳破坏具有非常重要的意义。本书应用理论研究、实验研究和数值分析相结合的方法,对软岩的局部化起动、演化、形成宏观剪切带及失稳破坏进行了深入系统的研究,得到了一些有益的研究成果。

本书通过重庆红色泥砂岩单向、三向受压状态下的实验研究,分析了软岩的损伤演化规律及裂纹扩展的非线性分形特征。在此基础上结合岩石强度概率分布假设,采用重正化群模型对岩石失稳破坏过程中的临界现象进行了研究,得到了岩石材料失稳破坏的理论临界点。通过实验数据与重正化群模型计算结果的对比,证明了重正化破坏模型能准确地模拟岩石的失稳破坏,并能有效地推测出破坏的临界点,建立判断岩石稳定状态的判据。

分析了岩石变形局部化与失稳破坏过程中的自组织临界特征,采用“沙堆元胞自动机”模型,从新的角度对岩石变形过程中的裂纹扩展、损伤演化以及能量释放等细观尺度上的自组织临界行为进行了研究。

自行研制了平面应变加载系统,研究了泥砂岩在平面应变加载条件下的变形局部化行为及失稳破坏机理。对平面应变加载过程中的弹性波速变化特征进行了研究,跟踪了岩石变形局部化的演化全过程,并根据弹性波测试结果得到了软岩变形局部化的起动点和失稳破坏的临界点。同时,还研究了平面应变条件下,加载速率、含水量的变化对软岩变形局部化发生和发展的影响规律。

采用激光数字散斑光测方法,对泥砂岩和泥岩两种软岩试件进行变形局部化对比实验研究。研究了单轴压缩状态下,加载速率对软岩变形局部化的影响。经过一系列散斑干涉的相关分析,实时、定量地跟踪和测定了软岩变形局部化的变化规律,观测到了泥砂岩和泥岩变形局部化带的“转动”全过程,并确定了局部化起动的时刻,定量地测定了局部化带的宽度及局部化带内的变形速度。

介绍了岩石的弹塑性本构关系,采用滑块-弹簧组合系统研究了岩石剪切带形成的力学模型,并得出了该力学模型控制的变形局部化起动条件。依据材料失稳破坏的分叉理论,对软岩变形局部化进行理论研究,确定软岩变形局部化起动条件以及局部化方位角等理论模型。对弹塑性材料变形局部化进行分叉分析。根据Maxwell不相容条件,对岩石在平面应变和平面应力状态下的局部化准则进行了

理论分析。

本书介绍了材料变形破坏的梯度塑性理论,并对岩石变形局部化带的理论宽度进行了分析,并根据实验数据得到了泥砂岩的内部长度以及单轴压缩和平面应变状态下局部化带的宽度。基于岩石微元的强度分布函数满足威布尔分布的假设,采用 RFPA2D 对岩石单轴受压、等围压三轴、平面应力以及平面应变几种状态下的局部化剪切带形成过程和失稳破坏进行了数值分析。

本书的出版得到了重庆大学煤矿动力灾害与控制国家重点实验室、重庆大学复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室、重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室所提供的大力支持和帮助表示感谢!

岩石变形局部化失稳的理论与实验涉及多学科理论与方法,许多理论与方法还需要做更多更深入的研究来充实和完善,由于作者的水平有限,书中如有不妥之处,敬请读者与同行批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外变形局部化的研究现状	3
1.2.1 变形局部化的理论研究现状	3
1.2.2 变形局部化的实验研究现状	10
1.2.3 变形局部化的数值分析方法研究现状	15
1.2.4 变形局部化的观测手段	17
1.3 本书的研究方法与内容	18
第 2 章 三向压缩应力状态下软岩失稳破坏的研究	19
2.1 岩石等围压三轴压缩实验研究	19
2.1.1 岩石试件物理特性及实验设备	19
2.1.2 岩石三轴压缩实验	20
2.2 岩石失稳破坏过程中的损伤	25
2.2.1 单轴压缩状态岩石损伤演化规律	25
2.2.2 岩石损伤本构模型	30
2.2.3 岩石裂纹的分形特征	31
2.3 岩石破裂的重正化群模型	34
2.3.1 单元强度的统计分布	34
2.3.2 岩石失稳破坏的临界点及其重正化预测	35
2.4 本章小结	42
第 3 章 岩石变形局部化的自组织临界特征	43
3.1 单向应力状态下岩石细观断裂演化的自组织特征	44
3.2 BTW 沙堆元胞自动机模型	50
3.3 岩石材料变形局部化面内损伤断裂的沙堆元胞自动机模拟	52
3.3.1 沙堆动力学规则	52
3.3.2 损伤因子的模拟计算	53
3.3.3 裂纹扩展能量释放率的模拟计算	54
3.3.4 变形局部化平面内损伤断裂演化沙堆模型的计算机模拟	55
3.4 本章小结	60

第 4 章 软岩变形局部化的光测实验研究	61
4.1 光测技术的研究现状	61
4.2 常用的光测方法	63
4.2.1 白光散斑	63
4.2.2 激光散斑	64
4.2.3 数字散斑	66
4.3 激光散斑测量方法用于岩石变形测量的可行性	68
4.4 实验装置及实验方法	69
4.4.1 试件	69
4.4.2 实验装置	69
4.4.3 实验方法	70
4.5 实验结果分析	71
4.5.1 加载全过程曲线	71
4.5.2 变形局部化带形成过程	72
4.5.3 细观裂纹周围的局部变形场	79
4.5.4 变形局部化带倾角的变化	81
4.6 本章小结	81
第 5 章 平面应变条件下泥砂岩变形局部化的实验研究	83
5.1 引言	83
5.2 实验设备与装置	83
5.2.1 压力室及试件	83
5.2.2 实验过程	86
5.2.3 实验结果分析	88
5.3 本章小结	95
第 6 章 岩石弹塑性本构模型及变形局部化的力学模型	97
6.1 岩石的局部化破坏与剪切带	97
6.1.1 散粒体材料的变形局部化模式	99
6.1.2 弹塑性岩土材料的变形局部化	99
6.2 岩石材料的弹塑性硬化本构模型	101
6.3 局部化剪切带的力学模型	105
第 7 章 岩石变形局部化的分叉研究	112
7.1 岩土材料分叉研究概述	112
7.2 材料的失稳判据	114
7.2.1 Drucker 公设下的失稳准则	114
7.2.2 Hill 分叉准则	115

7.2.3 极限点分叉准则	115
7.2.4 经典的不连续分叉准则	116
7.2.5 丧失强椭圆性准则	117
7.2.6 分叉准则小结	117
7.3 材料分叉的两种类型	118
7.3.1 连续分叉	119
7.3.2 不连续分叉	120
7.4 基于岩石硬化本构模型的局部化分叉分析	121
7.5 岩石变形局部化的连续硬化分叉准则	125
7.5.1 岩石弹塑性响应分叉临界值	126
7.5.2 岩石的弹塑性局部化准则及相应的方位角	127
7.6 本章小结	138
第 8 章 基于梯度塑性理论的岩石变形局部化研究	139
8.1 岩石的梯度塑性本构模型	139
8.2 局部化带的梯度塑性分析	141
8.3 基于 Mises 屈服准则的梯度塑性局部化分析	142
第 9 章 岩石变形局部化及剪切带形成的数值分析	149
9.1 数值分析的理论基础	149
9.2 基于 RFPA ^{2D} 的局部化剪切带演化数值分析	151
9.2.1 RFPA 数值实验模型	151
9.2.2 数值模拟结果及分析	153
9.2.3 软岩平面应变条件下局部化剪切带形成的全过程	163
参考文献	168

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

岩石作为一种特殊的地质材料,在经历了漫长的地质年代演化后,其结构和构造都有极其复杂的特性。当前岩土工程的迅速发展,要求人们对岩石这种特殊材料进行更深入地认识和了解,因此,对岩石材料组成结构的正确分析以及对岩石材料力学特征的正确描述都具有十分重要的意义。

由于岩石材料的复杂性,其内部存在着许多裂隙和各种微缺陷,是一种具有初始损伤的介质,这些初始损伤将会对岩石的力学性能产生强烈的影响。试验研究表明,岩石在外载作用下的应力-应变变化过程就是其内部微缺陷萌生、扩展演化和连接成核的过程。现代非线性弹性理论和弹塑性理论都是对应力应变关系的拟合,而不能从本质上反映这一过程。研究人员一直在试图找到一种统一的理论来对岩石受力过程的本构关系进行描述,且不断有新的理论被应用于岩石材料,如应用弹塑性断裂理论来研究宏观裂纹出现后对岩体强度的影响,应用损伤力学来反映岩石在受力过程中内部结构的变化,并将损伤变量引入到本构方程中,岩体本构方程能从本质上反映岩石的力学行为,并已经成为研究的热点课题。

岩石作为一种典型的地质材料,在非均匀变形下就会出现局部变形,并且会引起损伤及微裂纹的局部化集中发展,这种现象即所谓的变形局部化现象。变形局部化在地质沉积中是非常普遍的现象,在地层受到相互的地质作用后,岩体因局部剪切带的发展而破坏,形成断层带或裂隙带等不连续破坏面。在大型的岩体中,变形局部化表现为断层、剪切带或规模不等的破坏面等不连续面。材料中存在的裂纹会使材料的强度发生变化,因而不能单纯用材料力学对其进行研究。由于断裂力学的引入,这类问题得到了很好的解释。岩石中的局部化变形同样也直接导致了加载过程中岩石整体强度的降低,使岩体工程的承载力下降。所以研究和预测局部化变形带的起动、发展及其倾角和宽度对于岩石材料是非常重要的。通过对岩体不连续面的观察,人们发现,不连续面通常有几种形式:一类是厚度很小的单一变形带,但上下盘的错动量较大;另一类不连续面的厚度相对比较大,上下盘的错动偏移量也很大。与岩体一样,在岩石试件的应力应变全过程中也常出现与上述情况类似的断裂面。图 1.1 所示为岩体中常见的两类不连续面:一类是断层错动面,其接触面很窄;另一类为断层带,其接触面较宽。这两类典型的岩体不连续

面都是岩石分叉和局部化变形的宏观体现。

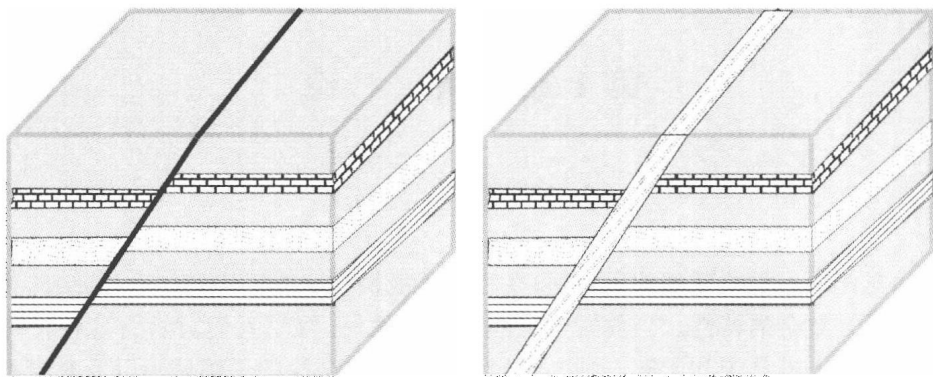


图 1.1 岩体中两种典型不连续面

变形局部化是岩土材料失稳的一个重要特征,是材料破坏的先兆,局部化变形表现为在试件局部形成应变的不均匀分布,即存在应变梯度。局部化的产生与发展涉及一系列相继发生的晶体学和非晶体学的变形现象,由于大应变导致材料内局部区域产生应变相对集中的亚结构,并由此产生剪切带,导致产生微裂纹,随后微裂纹的长大与聚合最终导致了沿剪切带方向的断裂。变形局部化现象在大部分材料的力学过程中都可以观察到,如金属材料、岩土材料、复合材料等。从微观、细观的晶体范围到宏观的岩体、地壳,都会有不同程度的局部化现象发生,它是当前国内外研究的热点。在各个学科领域的局部化问题研究中,材料科学则强调变形局部化产生与发展的微结构特征以及影响局部化的结晶结构因素,在理论分析与数值模拟等方面都取得了很多突破性的进展。

通过对土体变形的应力应变全过程以及从微观到宏观力学行为的研究,近年来学者们已经进行和完成了不少与土和散粒体材料变形局部化发展的研究工作。

与土类似,岩石在试验室测试中也表现出变形局部化现象。Ord 等(1991)的研究表明,像土这样的延性材料在局部化带中表现为明显的塑性变形,且局部化带的宽度较大。岩石等脆性材料的变形局部化则主要是由于微裂纹和孔隙等微缺陷所引起。岩石的变形局部化主要体现为剪切带或狭窄的压缩带,通常认为局部化变形促使了岩石的软化行为。局部化变形区域主要包括不连续面和边界,正是局部化变形区域将本来是均匀的变形区域分成了两部分,使两者之间出现了一个非均匀变形区域。在土等延性材料的不连续面中,由于发生了明显的塑性变形,因此其速度场的梯度是不连续的,但变形速度场仍然连续。在与之不同的脆性材料中,不连续面则表现为变形速度场的不连续性。于是,可以将材料的局部化变形分成两类,即连续变形局部化和非连续变形局部化。

由于实验设备条件和测试手段的限制,对岩石材料变形局部化的研究工作相对较少,取得的成果还很有限。本书将对重庆红砂岩加载过程中的变形局部化进行理论和实验研究,并利用数值分析手段作补充,对重庆红砂岩变形局部化的微观和宏观机理进行分析研究,预测其局部化带的起动的方向以及局部化变形引起的剪切带的发展变化情况。

1.2 国内外变形局部化的研究现状

1.2.1 变形局部化的理论 research 现状

岩土类材料弹塑性变形的最终特征为原来均匀变形模式被一种急剧不连续的位移梯度所取代,这类不连续一般只局限在一个很狭窄的带状区域内,并随之萌生裂纹,随着裂纹的扩展形成宏观剪切带并直至发生失稳破坏。这个过程说明剪切带的发生、发展是材料破坏的前兆。最早在金属铸造加工领域,大量的屈曲、缩颈以及剪切带等引起加工构件的报废,这种塑性集中变形在宏观和微观上均表现为非均匀,金属学上认为变形局部化是晶体有限塑性变形的常见现象,因此,局部化变形的研究也是目前固体力学界研究的焦点。

早在1960年,根据材料不同密度区对射线吸收能力上的差异,英国剑桥大学最先采用X射线技术,无论在单剪或挡墙模型试验中,均发现密度降低区域,当时称之为破坏层面,后来称为剪切带。剪切带是指局部化变形发展成为一个集中剪切的带状区域,不论在松砂或是密砂,在黏土的排水或不排水的平面应变(应力)和三轴试验中均可观察到剪切带形成。一般认为,就承受塑性大变形的材料而言,原先平滑分布的变形模式被一种急剧不连续的位移梯度所取代,其特征是大量的剪切变形集中在相对狭窄的带状域内,边界相对而言近乎平行,一般将这种集中剪切的变形区域称为剪切带。

但是,剪切带的形成机理一直困扰着岩土工程师们,以致人们觉得剪切带的产生只是某种边界条件下的特有现象,与岩土特性无关。以后,进一步的研究发现:即使改良试验仪器和优化试验方法,局部化变形现象仍不能完全避免。结构承载力的降低可能是几何原因引起失稳的结果,也可能是组成结构的材料特性所致。

Hill 最早研究了弹塑性连续介质的不稳定问题,Mandel(1966)接着对服从非关联流动法则的硬化型 Mohr-Coulomb 材料进行研究,证明当硬化模量降低到某一临界值 H_c 时将出现解的分叉现象:一个解是试样继续发生均匀变形,并表现出硬化的趋势;另一个解是出现剪切带,并在宏观上表现出软化趋势,物理软化机制是由材料本构特性所决定。从物理机制分析,应变局部化往往与试样中存在薄弱点或应力集中点有关,颗粒的定向排列先从这一点开始,逐步扩展形成一条贯穿的

剪切带。

Rudnicki 等(1975)在压力敏感材料的三轴压缩中,应用了弹塑性 Drucker-Prager 模型来预测局部化的产生,表明 Drucker-Prager 模型中的非关联流动法则对局部化的预测结果有很大的影响。Vardoulakis 发展了 Hill 等(1975)的分叉理论,应用塑性变形理论的本构方程,推导出了定义剪切带倾向的经验公式。

法国著名学者 Desrues 等(1985)精确地对砂土试件的平面应变压缩过程中剪切带的方向进行了测量。

王自强等(1995)建议,剪切带内外应采用反映不同程度损伤的本构模型,可分析损伤对剪切带形成的影响,又可称为不连续分叉分析(即带内外采用不同的本构模型)。孙红等(2001)基于各向异性损伤模型,探讨了各向异性损伤对剪切带形成的影响,结果表明,最小主应力方向的损伤对剪切带形成的影响比最大主应力方向强烈。

张启辉等(2000)采用可以考虑主应力轴旋转影响的土的弹塑性本构模型——关口太田模型,分析了主应力轴旋转对软土剪切带形成的影响,认为最可能发生局部化剪切变形的方向同主应力轴的旋转角有关,但主轴旋转对激发变形局部化失稳的影响不大。

杨强(2002)根据 Ottosen 等(1991)对应变局部化问题的特征值分析,得到了弹塑性材料的局部化条件。

近年来国内外学者在变形局部化及剪切带方面的交流也十分频繁。1982 年,国际理论与应用力学联合会(IUTAM)在荷兰 Delft 举行的关于“粒状材料破坏和变形”的研讨会上,有多篇涉及剪切带变形的文章,其中包括剪切带形成机理和方向性、端部约束对分叉的影响、剪切带形成对应力应变关系的影响等问题。为了促进国际间的局部化变形研究的交流与合作,曾先后在德国(1988 年)、波兰(1989 年)、法国(1993 年)和日本(1997 年)召开了四届“土和岩石局部化变形和分叉理论”专题研讨会,对当前局部化研究的进展和研究方法进行讨论和交流,极大地促进了局部化研究的发展。

Hadamard 早在 1903 年即对变形局部化作出过分析研究,后来被 Thomas (1961)、Hill(1962)、Mandel(1966)和 Rice(1976)等进一步发展,在某种程度上进行了完善。变形局部化理论被应用在包括土和岩石等各种弹塑性材料中,以预测剪切带的存在以及剪切带倾角、发展方向。

目前关于变形局部化的理论研究内容包括:剪切带形成的力学特性描述,临界力学条件,以及剪切带内部变形的发展演化规律等。对于应变局部化和剪切带,学者们从不同的角度对其进行了研究,并取得了一些成果,目前主要的应变局部化研究理论有分叉理论、Cosserat 理论、非局部应变理论和梯度塑性理论等。下面对变形局部化的理论研究现状作简单介绍。

1. 局部化分叉理论

岩石试件破坏常常是以狭窄剪切带形式存在的局部化变形为先导,建立在金属塑性理论基础上的分叉理论(bifurcation theory)为研究局部化变形的产生、发展及其产生剪破裂的机理提供了有效的方法,为剪切带的研究提供了有力的工具。Vardoulakis 等(1978)结合密砂的本构关系特点,将其引入到砂土的剪切带形成分析中,建立了产生局部化应变的必要条件。

分叉理论认为几何上出现分叉的原因与结构刚度矩阵出现 0 本征值有关。在分叉理论中,如果存在一个基本解 u_0 和分叉解 $u_0 + \Delta u$, 均满足控制方程:

$$[K]\{u\} = \{F\}$$

则按有限元法的常规表达方式,一个离散体系由荷载增量 $\{\Delta q\}$ 引起的变位增量 $\{\Delta u\}$ 应满足下列方程:

$$[K]\{\Delta u\} = \{\Delta q\} \quad (1.1)$$

对于一个稳定问题,上式的解 $\{\Delta u\}$ 应当存在而且是唯一的。但是在某一特定条件下,可能出现解的不定和分叉。假设在基本解 $\{\Delta u_0\}$ 以外,还存在一个分叉解 $\{\Delta u_1\}$, 均满足式 (1.1), 则可得

$$[K]\{\delta u\} = 0 \quad (1.2)$$

式中, $\{\delta u\} = \{\Delta u_1\} - \{\Delta u_0\}$ 。显然,此式要有非 0 解,结构劲度矩阵 $[K]$ 的本征值必须满足下列条件:

$$\det([K]) = 0 \quad (1.3)$$

这就是出现分叉解的必要条件。

按照上述理论,在结构或试样加荷过程中必须不断进行刚度矩阵本征值的计算。一旦出现本征值为 0 的情况,就要改变计算方向,除了基本解以外,还要进行分叉解的搜索。针对不同的本构模型,可以得出不同的分叉时的临界硬化模量 H_c 及相应的剪切面与大主应力之间的方向角 α 。

分叉理论的物理含义可以解释如下:引起均匀变形和引起变形局部化所需要做的功各不相同。达到分叉点时,两种变形方式消耗的能量恰好相等。此后,变形局部化方式的耗能将小于均匀变形方式,结构最终以这一方式破坏。显然,在分叉点附近,解的唯一性失去保证,此时,矩阵 $[K]$ 变成病态,从而难以保证计算结果的正确性。此外,上述分叉理论也未对剪切带的厚度问题作任何交代。

Hill 等(1975)最早将剪切带现象归因于变形模式的分叉,基于 Biot 的前期研究工作,假定材料是不可压缩,而且材料为初始各向同性或正交各向同性的,采用平行于轴向和与轴向成 45° 方向两个剪切模量描述的本构方程。并根据控制方程结合唯一性和分叉理论,得出剪切带形成的局部化条件。此后,Amann 等(1980)结合高强度钢的试验指出,传统塑性理论所预测的剪切带产生与试验结果有差距,

临界应变的理论值往往过高,因此,建议分析剪切带时应采用更合理的本构描述,例如,非共轴的屈服顶点模型。

Hill 等(1975)的本构关系是建立在正交流动假设基础上的。Needleman (1979)放松对条件的限制,在本构描述中,除了轴向剪切模量和 45° 方向的剪切模量外,增加了表征静水压力和偏应力的耦合项参数,以考虑非正交的影响,分析结果表明:非正交流动促进局部化分叉。Chau(1992)在 Hill 等和 Needleman 分析的基础上继续放松不可压缩条件的限制,引入新的本构方程并考虑塑性屈服对平均应力的依赖性以及剪切引起的塑性体应变,其意义在于将 Hill 提出的不可压缩材料的剪切带分析问题扩展为可以考虑材料的压缩性,使分叉时对应的切线模量更小,尤其在存在侧向压力的平面应变变形问题中,与 Needleman 分析结果的区别更加明显。同时,以上三者的分析结果的差异也说明分叉解对本构模型的依赖性。

Yamamoto(1978)将 Gurson 本构模型应用于带状缺陷的材料,取初始带内的材料的空洞含量比带外高,研究表明,比之无缺陷的材料而言,初始缺陷的存在会大大地促进局部化分叉。

Vardoulakis 等(1978)最先将金属分叉理论引入到砂土分析中,针对不同的局部化变形模式,结合砂土具有摩擦和剪胀等特性建立适合岩土的本构模型,本构关系通过“发挥”摩擦角和剪胀角表述,建立砂土局部化分叉条件。

在分叉的临界时刻,材料本身经历一个相应材料性质分叉过程,从微结构的分析得出,分叉时伴随着塑性膨胀和材料软化的行为,材料在微结构层次中的不均匀性和缺陷对剪切带的形成产生强烈影响。

2. Cosserat 理论

Cosserat 理论(一般偶应力理论)于 1909 年由 Cosserat 兄弟提出,在此理论中,考虑每一个材料粒子作为一个完美的刚性颗粒,在变形时,不仅有位移产生,同时还伴随着转动,导致了应变和应力张量的非对称性,此理论已是一种非线性理论。

为了克服分叉理论的缺点,一些学者用了 Cosserat 早年提出的粒状材料微极非线性弹性理论。Cosserat 模型假定材料为均匀直径的球状或棒状颗粒的集合体,颗粒除了移动以外,还可转动。因此,在应力应变分量中,在原来对连续介质定义的应力 σ_{ij} 之外还需增加力偶项 μ_{ij} , 而应变 γ_{ij} 之外还需补充旋转项 κ_{ij} , 从而建立与之相应的弹性应力和应变关系。Muhlhaus(1986)提出平面变形条件下的粒状材料的 Cosserat 理论,假设材料由具有等直径 R 的圆柱(rod)组成,如图 1.2 所示。

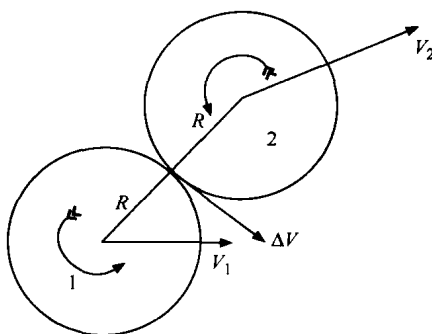


图 1.2 Cosserat 理论示意图

经过一系列的推导,将颗粒间的剪应变表达为偏应变分量 e_{ij} 和曲率张量 k_i 的表达式:

$$\gamma = [(3e_{ij} - e_{ji})e_{ij} + 4R^2 k_m k_m]^{1/2} \quad (1.4)$$

式中, e_{ij} 为偏应变张量;曲率 k_i 则表示颗粒间的相对旋转。

当不计力偶应力时,上式退化为常规偏应力。利用广义 J_2 形变理论的本构方程就可得到 Cosserat 理论型的本构方程,采用该模型预估剪切带的倾角和厚度的演化与实验结果吻合较好。

3. 非局部应变理论

传统的本构理论只就连续介质中孤立一点的应力应变关系进行研究。单元越小,剪切带越薄,破坏时耗散的能量也就越少,最终导致能量耗散趋势于 0 的错误结果。而且模型中没有长度的量纲,因此不能得出关于剪切带厚度的任何信息。为了使能量耗散保持常量,Bazant(1984)引入与颗粒尺寸类似的特征长度 l ,并让某点应力与以 l 为半径的范围内各点的塑性应变之间建立关系。这就是塑性应变非局部化的思路。具体来说,就是把传统的弹塑性应力应变关系式写为

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\{\Delta\epsilon\} - \Delta\bar{\lambda}\{n\}\} \quad (1.5)$$

式中,塑性乘子 $\Delta\bar{\lambda}$ 已经不是就每一单元进行计算,而是由 l 范围内所有单元加权平均得出。Adachi 等(1996)建议取权函数为正态误差分布函数,则以一维问题为例, $\Delta\bar{\lambda}$ 的平均值将为

$$\Delta\bar{\lambda} = \frac{1}{A} \int_{-l}^{+l} \exp(-s^2/l^2) \lambda(s) ds \quad (1.6)$$

式中, $A = \int_{-l}^{+l} \exp(-s^2/l^2) ds$; s 为积分点到考察点的距离; l 为选定的积分范围。

Schanz 等(1999)根据三轴试验结果,提出的本构模型中考虑摩擦硬化和黏聚力软化,其中控制软化过程采用非局部化的体积应变变量,根据局部塑性体积应变率、

权函数和附加参数定义非局部体积塑性应变率,这种非局部化演化方程为模拟应力应变(包括软化)关系提供了有力的工具。

4. 梯度塑性理论

由于经典塑性理论的本构关系不包含任何特征长度尺度,所以它不可能预测材料力学性能在微观尺度下的尺寸依赖性。以经典连续介质力学为基础的研究方法,已不适用如此小的尺度。所以,需要建立连续介质框架下考虑应变梯度影响的新的本构模型来描述尺度效应,同时也希望在韧性材料的宏观断裂行为和原子断裂过程之间建立联系,发展微米尺度下连续介质力学理论。应变梯度理论就是一种能够解释上述尺度效应的有效方法之一。

20 世纪 60 年代 Cosserat 微极非线性弹性理论再一次引起人们的注意,他们将 Cosserat 偶应力理论加以拓广,引入了微极弹性理论的术语,仅利用位移矢量来描述连续介质理论。根据非局部化理论的思路,Borst 和 Muhlaus(1992)考虑相邻应变影响,在应力应变关系中加入塑性应变的梯度项 ∇^2 ,这就引出梯度塑性理论。这一理论在某种意义上把塑性应变类比为可扩散的流体而影响相邻点的应力应变关系。该理论在硬化规律中除硬化参数 h 外还加入硬化参数的散度项。

$$F(\sigma, H, \nabla^2 H) = 0$$

Toupin(1962)讨论了在连续介质中引入高阶梯度的基本原理,他假定应变能密度函数不仅依赖于应变而且依赖于转动梯度,得到了线弹性偶应力理论。Mindlin 等(1953)认为连续介质中每一个物质点,从微观角度可以看做一个胞元。这个胞元不仅跟随连续介质作宏观运动和变形,而且自身还会有微观位移和微观变形。因此,应变能密度函数不仅依赖于应变张量而且依赖于变形张量及微观变形梯度。在 1968 年,Green、Mcinnls 和 Naghdi 提出了一种塑性微极理论。另外 Naghdi 和 Srinivasa 发展了 Cosserat 理论,并分析了含有位错演化的问题。所有这些理论都是基于简化的偶应力理论基础。

近年来,引进表示长度量纲的参数已提出了几种应变梯度理论。1993 年 Fleck 和 Hutchinson 从几何位错及统计位错角度出发,发展了一种只考虑转动应变梯度影响的应变梯度理论。当分析裂纹尖端场或微米压痕时,Fleck 和 Hutchinson 提出了较完整的应变梯度理论,既考虑了转动应变梯度,又考虑了拉伸应变梯度。Shu 和 Fleck(1998)在 Fleck 和 Hutchinson 理论框架上又提出了一种适用于晶体的应变梯度公式,并用来分析了强度及变形都与尺寸有关的单晶材料及复合材料的微观应变场。Gao 等(1999)在 Nix 和 Gao 的启示下,发展了一种基于位错机制的应变梯度塑性理论,简称 MSG 理论。这种应变梯度塑性理论通过一个多尺度、分层次的框架,实现了宏观塑性理论和位错理论的联系。然而上述几种理论都引入了高阶应力,比较而言本构关系及边界条件都相当复杂。Aifantis

(1984)在经典塑性理论的本构关系中引入了等效应变的一次和二次拉普拉斯算子,在他们的理论中没有定义应变梯度的功共轭量。Chen等(2000)在 J_2 形变理论增量形式的基础上,给出了一种具体的硬化关系,应变梯度已作为内变量来影响材料的切向硬化模量。随后Chen等(2002)在一般偶应力理论框架下提出了一种新的转动梯度理论,结合考虑拉伸应变梯度的增量硬化关系,形成了一种完整的应变梯度理论。为了避免引进高阶应力的复杂性,Huang于2000年提出了一种TNT理论。黄克智、余寿文等对应变梯度理论也作了系统的研究。

Muhlaus(1986)通过引入颗粒直径,采用Cosserat理论解析导出了颗粒体材料剪切带厚度。Aifanitis(1999)引入材料的内部长度参数,采用在本构关系中引入高阶梯度的方法来分析变形局部化现象,但至今还没有有效测定材料内部长度的方法,都是先假定一个参数大小,然后再进行计算。Zhu等(1992)通过屈服函数中引入二阶应变梯度的方法分别研究了绝热和一般条件下剪切带的影响因素。De Borst等(1992)采用屈服函数的应变梯度导出了一维拉压杆局部化带的宽度。岩石试件破坏常常是以狭窄剪切带形式存在的局部化变形为先导,Vardoulakis(1979)对于岩土材料采用梯度扩容导出了极为复杂的剪切带宽度公式,并对岩土材料的变形局部化进行了分叉分析。

潘一山等(2002)应用梯度塑性理论研究了煤岩单轴压缩的变形局部化,采用白光散斑相关方法全过程量化观测了煤和砂岩试件变形局部化破坏过程,并测定了局部化带的宽度,并得到了煤和砂岩材料的内部长度。

5. 复合体理论

有限元法求解应变局部化问题时经常受到单元尺寸敏感性问题的困扰,从边值问题的应变局部化数值模拟来看,大量研究工作已表明基于经典连续介质力学理论的应变局部化数值分析结果是不能令人满意的。为克服这一难题,Piertuszcak等(1993)提出应变局部化的复合体理论,之后又进一步推广到不排水饱和土体中,此理论可用于描述剪切带出现后带内土体和带外土体的平均力学性质。Piertuszcak等把剪切带看作与原土体不同的另一种材料,然后把包含剪切带的单元当做由两种材料构成的复合单元,求出其平均的模量矩阵,然后按此平均模量进行有限元应力应变分析。在推导过程中考虑了带内土和带外土的综合影响,在某种意义上也是一种非局部化理论。

Matsuzawa和Hazaika(1996)发展了上述方法,他们假定一个单元内存在相交的双剪切带,求得了相应的平均化应力应变关系,并用于挡土墙后土体渐进破坏分析。

黄茂松等(2002)给出一种基于整体坐标的应变局部化的修正复合体理论,通过对剪切带内外土体力学特性进行均一化处理对复合体理论进行了修正,并据此

研究了含剪切带土体的宏观力学特性,通过与室内平面应变试验结果的对比,验证了该理论的合理性。

6. 增量非线性理论

与通常的弹塑性模型相比,次弹性模型和次塑性模型均假定刚度或柔度矩阵不但与应力总量有关,而且也决定于应力增量,从而构成了增量非线性模型。由于增量型应力应变关系的系数矩阵本身与应变增量有关,从而增加了求解的复杂性。应当说明,严格意义上普通的弹塑性矩阵也是增量非线性的,因其与加荷-卸荷条件有关,即加荷时选用弹塑性矩阵,卸荷时选用弹性矩阵。已经证明,单屈服面的塑性柔度矩阵是不可逆的,只有加上弹性项以后形成的弹塑性矩阵才是可逆的。增量非线性模型的柔度矩阵的可逆性得到改善,因此这一类模型有一定的积极意义。

Darve(1984)应用增量非线性模型进行过应变局部化分析。后来 Teichman 和 Bauer(1996)又把 Cosserat 的力偶项引入系数矩阵 L 和 N 中,得出剪切带厚度随颗粒直径增大而增加的结果。近来 Bauer 等(1999)又应用次塑性模型推导了剪切带形成的条件。

7. 广义孔隙压力理论

以上各种理论均未涉及产生应变局部化的物理机制。前面把软化机制归纳为减压软化、剪胀软化和损伤软化三种。如果把剪胀软化理解为咬合力丧失的结果,把损伤软化理解为结构吸力丧失的结果,并把这两种力与毛管吸力一起统称为广义吸力,则所有软化均可以解释为广义孔隙压力升高引起的减压软化。

按照这一理论,如果 $\Delta \bar{u}_w$ 代表广义孔隙压力增量, $\Delta \sigma'' = \Delta \sigma - \Delta \bar{u}_w$ 为广义有效应力增量,则弹塑性应力应变关系可以写为

$$\{\Delta \sigma''\} = \{\Delta \sigma\} - \Delta \bar{u}_w \{\delta\} = [D]_{\phi} \{\Delta \epsilon\} \quad (1.7)$$

由于传统理论把屈服面看作塑性应变等值面,加荷时屈服面必须扩大。但对软化材料,塑性应变增大时应力增量指向屈服面内侧,按理应判为卸荷。为了克服这一矛盾,许多人不得不假定软化时屈服面将收缩。如果按上述广义有效应力概念定义屈服面,则对软化材料广义有效应力增量 $\Delta \sigma''$ 的作用将使屈服面扩大,从而通常的等值面理论仍可适用于软化材料。应用该模型,只需借助于常规有限元技术即可追踪剪切带形成过程。

1.2.2 变形局部化的实验研究现状

对于变形局部化的实验研究,在国外,许多研究者采用了直剪仪、三轴压缩和拉伸仪、真三轴仪、平面应变仪等多种仪器,从不同角度对变形局部化现象进行了