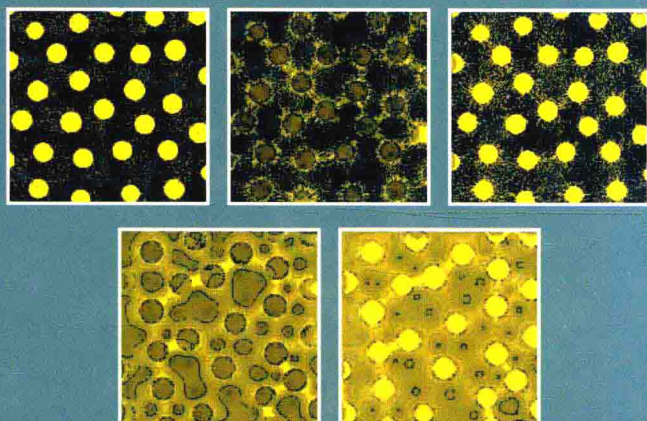


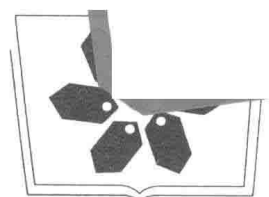
混凝土损伤与断裂 ——数值试验

唐春安 朱万成 著



科学出版社

www.sciencep.com



中国科学院科学出版基金资助出版

混凝土损伤与断裂

——数值试验

唐春安 朱万成 著

混凝土材料研究国家重点实验室访问学者基金资助项目

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室开放基金资助项目

辽宁省自然科学基金资助项目

国家杰出青年科学基金资助项目

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从混凝土的细观结构层次出发,假定混凝土是由砂浆基质、骨料以及两者黏结带组成的三相复合材料,应用弹性损伤理论建立了描述混凝土细观单元的本构关系及断裂过程分析的数值模型,并以此为基础开发了材料破坏过程分析的数值模拟软件 MFPA^{2D},给出了混凝土在静态载荷作用下断裂过程的模拟结果,为混凝土等准脆性材料的损伤与断裂研究提供了一个数值工具。

本书可供力学、材料科学以及水利、交通、采矿、岩土等工程领域的教学和科研人员参考。书中介绍的数值模拟软件 MFPA^{2D}也可供相关专业研究生辅助教学使用。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土损伤与断裂——数值试验/唐春安,朱万成著. —北京:科学出版社,2003

ISBN 7-03-010718-7

I. 混… II. ①唐…②朱… III. ①混凝土-损伤(力学)-数值模拟②混凝土-断裂力学-数值模拟 IV. TU528.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 057292 号

责任编辑:童安齐 刘剑波 / 责任校对:曹锐军
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:张 放

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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)
2003年1月第一次印刷 印张:10
印数:1—2 000 字数:195 000

定价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

材料损伤与断裂(破坏)过程的研究一直是力学界和材料科学界研究的热点和难点。混凝土作为一种工程材料,在土木工程中应用很广泛。以往有关混凝土力学特性的力学模型大多是基于对混凝土材料宏观层次的认识,其主要特点是把具有多相、非均匀性质的材料理想化为均质、连续体进行建模,这种简化尽管在一定程度上满足了工程实践的需要,但却难以用这种方法研究混凝土材料在外载荷作用下裂纹萌生、扩展及贯通而导致的由细观层次到宏观层次的损伤与断裂过程。目前,国际上已经开始注意到从混凝土细观尺度出发研究混凝土材料宏观损伤与断裂过程的许多优点,尤其是目前计算机技术的发展,为从细观层次研究宏观层次的力学问题开辟了广阔的前景。国际上在混凝土数值试验方面的研究工作刚刚开始,国内则还很少见。为此,本书的研究从混凝土材料的细观结构入手,应用弹性损伤理论建立了描述混凝土细观单元的本构关系及混凝土损伤与断裂过程分析的数值模型,为混凝土等准脆性非均匀材料的损伤与断裂的研究提供了一个数值工具。

全书共分六章。第一章回顾了以往用于研究混凝土断裂和损伤的经典力学方法、力学模型和研究尺度等问题,总结了其研究现状,介绍了国内外在这方面的一些重要数值模型及其优点和不足;第二章介绍了本文的研究思路和所使用的数值模拟工具 MFPA^{2D},给出了细观数值模拟模型的力学描述;第三章讨论了数值模型中所使用的一些力学参数对于宏观模拟结果的影响,并把该模型应用于混凝土试样在单轴和双轴载荷作用下力学特性的模拟,证明了数值模型的合理性和有效性;第四章用该数值模拟工具研究了混凝土的拉伸断裂问题及断裂的尺寸效应问题;第五章研究了混凝土的剪切断裂问题,数值模拟了几个常见剪切试样的纯剪断裂问题,证明了剪切试样的剪切断裂主要是由细观层次的拉伸损伤引起的;第六章将该数值模型与以往的类似模型进行了对比,证明了该模型模拟混凝土损伤断裂(过程)问题的有效性,最后,应用该数值模型分析了用 FRP 复合材料约束混凝土圆柱时的强度和断裂特征,并与试验结果进行了比较。

本书用数值方法对一些常规的实验结果进行了模拟,数值模拟结果与实验结果的比较贯穿其中,数值模拟结果不仅从数值上再现了混凝土试样损伤断裂的整个过程,而且发现了一些试验所不易发现的断裂现象(例如复杂的应力场的演化规律)。在数值模拟结果经得起实验结果检验的基础上,我们可以用本书的数值模拟工具,研究常规实验所不能或不适合研究的问题,这也就是数值试验(Numerical Test)的最终发展方向。

本书主要供力学、材料科学以及水利、交通、采矿等土木工程及其他工程领域

从事材料或结构破坏研究的科研、教学人员参考。本书提供的数值模拟工具 MF-PA^{2D}, 也为进行混凝土损伤与断裂的实验教学提供了一种可在很大程度上取代实验室实验的数值试验方法。

由于作者水平有限, 书中存在的错误与疏漏之处, 恭请各位专家和读者批评指正。

唐春安 朱万成
于东北大学
2001. 3. 28

作者简介

唐春安:男,1958年3月生,教授,主要从事岩石等脆性材料破裂过程失稳的应用基础理论研究,包括工程稳定性、地表沉陷、岩爆、地震等地质灾害的预测与防治理论以及脆性材料破坏机制的研究。唐春安教授先后主持国家教委跨世纪人才基金、国家杰出青年基金、国家自然科学基金和部委级研究课题10项,并与英国、加拿大、瑞典、中国香港等国家和地区的有关专家开展了多项合作,近年来在《国际工程断裂力学》、《国际岩石力学与采矿科学》、《力学学报》、《复合材料学报》、《力学进展》、《力学与实践》、《地震学报》、《岩石力学与工程学报》等多种学术刊物和会议上发表各类学术论文130多篇,出版专著两部。其主持完成的“岩石破裂过程失稳研究”获得1994年度国家教委科技进步(甲类)二等奖;所参加的“冲击凿岩的理论基础与电算方法”和“矿岩料层粉碎损伤与能耗研究”分别获得1987年度和1993年度冶金工业部科技进步二等奖;所参加的“高压辊磨机研制及应用”获得1997年度辽宁省科技进步二等奖;所参加的“重型液压凿岩机配套钎杆研制及应用”获得1997年度辽宁省教委科技进步一等奖;主持完成的“岩开采诱发岩石破裂过程失稳及其岩爆机理研究”获得高校自然科学二等奖。曾荣获第四届中国青年科技奖、辽宁省青年五四奖章、首届沈阳市青年科学家奖。分别于1994年和1995年获得“国家教委跨世纪优秀人才计划”和“国家杰出青年科学基金”的资助,首批入选“国家百千万人才工程计划”,并获聘为长江学者计划特聘教授。

朱万成:男,1974年2月12日生于新疆呼图壁县,1995年毕业于东北大学(原东北工学院),于2001年3月获得东北大学采矿工程专业博士学位。参与了国家杰出青年科学基金、自然科学基金等省部级基金课题8项。参与完成的“岩开采诱发岩石破裂过程失稳及其岩爆机理研究”获得高校自然科学二等奖,排名第三。曾于1999~2002年期间三次赴香港进行岩石及混凝土断裂的合作研究。在“Constructions and Building Materials”、“Magazine of Concrete Research”、《岩石力学与工程学报》、《岩土工程学报》、《力学进展》、《力学与实践》等杂志和会议上发表论文30余篇。现主要从事岩土工程稳定性分析以及岩石、混凝土类材料破坏过程的研究。

目 录

前言	
作者简介	
第一章 绪论	1
1.1 混凝土损伤与断裂的研究现状	1
1.1.1 混凝土的损伤与断裂过程	1
1.1.2 混凝土断裂力学的研究现状	3
1.1.3 混凝土损伤力学的研究现状	7
1.1.4 混凝土断裂的随机概率模型	10
1.2 混凝土损伤与断裂的细观研究尺度及模型	11
1.2.1 细观力学的研究尺度	11
1.2.2 混凝土的细观结构特征	12
1.2.3 研究混凝土损伤与断裂过程的细观模型	15
1.3 本书的研究工作	18
参考文献	19
第二章 混凝土损伤与断裂的数值模型	24
2.1 数值模型的基本思路	24
2.2 材料性质的赋值	25
2.3 细观单元的弹性损伤本构关系	29
2.3.1 拉伸损伤演化方程	30
2.3.2 剪切损伤演化方程	32
2.4 有限元应力分析	35
2.4.1 平面问题	35
2.4.2 轴对称问题	38
2.5 MFPA ^{2D} 数值模拟的分析过程	40
2.6 裂纹萌生扩展过程的模拟	41
2.7 声发射的数值模拟	42
参考文献	43
第三章 数值模型的参数研究及其验证	44
3.1 数值模型的参数分析	45
3.1.1 均质度、残余强度系数和极限应变系数对宏观响应的影响	45
3.1.2 单元空间随机性对宏观响应的影响	50

3.1.3 单元数目的影响	51
3.1.4 声发射特性与均质度的关系	54
3.2 混凝土弹性模量的细观力学分析.....	55
3.3 轴对称有限元程序的验证.....	60
3.4 实施混凝土断裂过程数值模拟的步骤.....	61
3.5 混凝土在单轴载荷作用下破坏过程的数值模拟	64
3.5.1 混凝土数值试样的建立	64
3.5.2 单轴压缩断裂过程的数值模拟	65
3.5.3 单轴拉伸断裂过程的数值模拟	68
3.6 混凝土在双轴载荷作用下断裂过程的数值模拟	70
3.6.1 双轴强度包络面	71
3.6.2 应力-应变曲线和破裂模式	72
3.6.3 双轴载荷作用下的应力场	74
3.7 常用强度混凝土的数值“配比方案”.....	76
参考文献	77
第四章 混凝土拉伸断裂的数值模拟	80
4.1 拉伸断裂试样.....	80
4.2 紧凑拉伸试样的断裂过程及其尺寸效应.....	81
4.3 三点弯曲梁断裂过程及其声发射特性的数值模拟	85
4.3.1 数值模拟模型	86
4.3.2 数值模拟结果	87
参考文献	94
第五章 混凝土剪切断裂的数值模拟	96
5.1 剪切断裂试样.....	96
5.2 剪切断裂的数值模拟	98
5.2.1 双边裂纹四点弯曲剪切试样的断裂过程	98
5.2.2 双中心裂纹(DCN)剪切试样的断裂过程	105
5.2.3 修正的边界双裂纹(MDEN)剪切试样的断裂过程	109
5.2.4 对剪切断裂模拟的总结	111
5.3 压剪(拉剪)复合断裂的数值模拟	111
5.3.1 单边裂纹的四点剪切试样的断裂过程	111
5.3.2 偏三点弯曲梁中预制裂纹的扩展	114
5.3.3 双边裂纹双轴受载试样的断裂过程	117
参考文献.....	122
第六章 数值模型的优点及其应用.....	125
6.1 本书的细观数值模型与其他模型的比较	125
6.2 纤维增强复合材料(FRP)用于混凝土加固的数值模拟和试验.....	131

6.2.1 FRP 用于混凝土加固的研究现状	131
6.2.2 FRP 用于混凝土圆柱加固的数值模拟	133
6.2.3 FRP 用于混凝土椭圆柱加固的试验研究	136
参考文献	143
主要参考文献	146

第一章 绪 论

1.1 混凝土损伤与断裂的研究现状

混凝土作为重要的建筑材料已有百余年的历史,当前广泛应用于各个领域,当然,在土木工程和采矿工程中也是必不可少的。在结构工程等混凝土更为广泛的应用的研究领域,人们已经对混凝土的力学特性进行了广泛的研究,但是对于混凝土损伤与断裂过程中的裂纹扩展以及损伤与断裂机制等基本问题,还需要进一步的研究。本书立足于对混凝土这个工程材料的认识,提出一个进行混凝土损伤与断裂过程模拟的数值模型,并对其在各种受力状态下的损伤与断裂(过程)及其机制进行了数值模拟研究。

1.1.1 混凝土的损伤与断裂过程

混凝土材料的性能取决于原材料的品质、组分、浇灌工艺和使用条件。混凝土的力学性能是混凝土结构设计的重要依据。如何配置满足结构要求的混凝土,充分利用混凝土的力学性能,设计和建造出经济、技术安全和结构合理的建筑物或工程结构,对于结构工程师来说是必不可少的知识。过去,人们对于混凝土力学性能的探索,在很大程度上要依靠试验技术和测试手段。随着试验技术的发展,混凝土各种力学性能被揭示出来。人们通过试验逐渐认识清楚了混凝土的压缩、拉伸和弯曲等力学性能,并在结构设计中引用,作为控制结构安全的重要指标。刚性试验机和伺服试验机的出现,以及高频响应测试系统的应用,使人们能够测定出混凝土的应力-应变全过程曲线。微型试验机和扫描电镜相结合,揭示了混凝土裂纹尖端的秘密。人们发现,混凝土在受力后要产生损伤,裂纹尖端往往通过界面微裂纹,绕过骨料,随着载荷增加逐步扩展,最后贯通,从而导致混凝土的断裂。

古典的材料力学强度理论和今天仍处于发展阶段的损伤断裂等破坏理论,都是固体力学中的重要分支。破坏的含义十分复杂,一般是指在研究对象这一量级内的材料或体系丧失承载能力。从广义上讲,材料和结构的破坏失效形式有多种,其中主要可以列举为两类:塑性流动和断裂。断裂是由于新裂纹萌生或已存在裂纹的扩展而引起的一个破坏过程^[1]。在一些文献中,也把几乎不带有塑性变形的破坏叫做脆性破坏,而把带有相当数量的塑性变形的破坏叫做延性破坏。

从国内外已有的试验资料可知:混凝土是典型的非均匀材料,其中含有微裂纹,甚至有宏观的缺陷如裂纹、夹碴、气泡、孔穴、偏析等。混凝土的强度、变形和破

坏的性能都与裂纹的扩展有关。对于混凝土内部结构的亚微观分析发现^[13],混凝土在承受载荷以前已存在裂纹,这些裂纹大致可以分为两种类型:①随机分布的微裂纹,它在一定程度上控制着混凝土的抗拉和抗压等宏观强度;②方向一定的宏观裂纹,它有时使得混凝土的力学性质呈现各向异性。混凝土类材料的断裂过程受控于其中原有的微裂纹,微裂纹一方面影响宏观裂纹的萌生过程,另一方面对主裂纹产生屏蔽与劣化的双重作用^[5]。混凝土的破坏是由于对象体系中潜在的各种缺陷引起的,其破坏过程实际上就是微裂纹萌生、扩展、贯通,直到产生宏观裂纹,导致混凝土失稳破裂的过程。

由于混凝土的损伤与断裂过程与其中含有的微裂纹有关,因此混凝土对拉应力特别敏感,是一种脆性材料。尽管如此,混凝土并不像典型的脆性材料——玻璃那么脆,其中的裂纹具有稳定扩展阶段,但混凝土又具有脆性材料的一些特征,所以把其称为准脆性材料(Quasi-brittle Material)。因此混凝土等准脆性材料在断裂前的微裂纹扩展、汇合阶段所表现的力学行为是我们进行混凝土破坏过程研究时更关心的问题。混凝土及其组成的承重结构在破坏时变形很微小,裂纹尖端几乎不产生塑性区,具有突发性,其破坏形态称为脆性破坏,所以混凝土的破坏一般可称之为断裂。由于混凝土材料本身的非均匀性,使得其损伤与断裂过程更加复杂,如何对这种复杂的损伤断裂到失稳过程进行研究,一直是固体力学家百余年为之而奋斗而尚未克服的难题^[52,53]。

混凝土的破坏实质上就是裂纹产生、扩展和失稳的过程^[55]。据此,我们可以将混凝土的破坏过程分为三个阶段,现以单轴压缩(或拉伸)应力状态为例加以说明。第一个阶段在30%~40%极限抗压强度内(60%极限抗拉强度内),此时只在试件内某些孤立的点上产生拉应力集中,这些点开裂后缓和了应力集中并恢复了平衡。这种裂纹扩展是稳定的,人们称它为起裂。此时,由于微裂纹出现产生损伤释放的能量很小,混凝土的应力-应变曲线具有较好的线性,可以认为在这个阶段材料是准弹性的。随着载荷的增加,这种裂纹不断扩展。由于砂浆和骨料沿开裂面产生了相对滑动,裂纹向砂浆中扩展,从而进入第二个阶段。此时,众多的裂纹缓慢、稳定地发展着,停止加荷,裂纹的扩展也中断,所以该阶段也叫做稳定的裂纹扩展阶段。这个阶段的长短取决于应力状态。在拉应力作用下,这个阶段较短,而在压应力作用下则长些。此后,当这些微裂纹相互贯通,形成控制强度的宏观裂纹时,裂纹进入不稳定扩展阶段,即第三个阶段。此后,应力-应变曲线还存在一个下降段,逐渐地失去承载能力。整个应力-应变曲线说明了裂纹的产生、扩展和失稳过程。混凝土试件在受载到破坏的全过程中,理论和实践都证明其内部裂纹有一个稳定的发展阶段,因此,一般认为在混凝土裂纹的端部有一个微裂纹区,绝非裂纹形成就立即扩展。

混凝土应力-应变全过程曲线清楚地解释了混凝土压缩和拉伸破坏发展的全过程。混凝土应力-应变曲线的非线性与混凝土结构中的微裂纹形成有关。

1.1.2 混凝土断裂力学的研究现状

经典的断裂力学主要研究裂纹尖端附近应力场、应变场和能量释放率等,以建立宏观裂纹起裂、裂纹的稳定扩展和失稳扩展判据。脆性断裂是由于裂纹尖端应力高度集中导致裂纹快速失稳引起的。1920年Griffith在研究玻璃等脆性材料时提出了断裂理论,经Irwin和Owen的修正和发展,20世纪50年代形成了适用于高强度钢材的线弹性断裂力学。由于线弹性断裂力学只适用于裂纹尖端处于小范围屈服状态,针对裂纹尖端的大范围屈服问题,人们又提出了弹塑性断裂力学。弹塑性断裂力学尤其适用于韧性较好的金属材料。由此可见,经典的断裂力学理论都是在研究金属材料断裂的基础上发展起来的。

线弹性断裂力学出现后,土木工程师很容易想到能否用断裂力学的概念研究混凝土的破坏机理和宏观裂纹的稳定性。Neville^[2]最先把Griffith理论应用于混凝土,他认为试件尺寸对于强度的影响与混凝土中随机分布的裂纹有关。1961年Kaplan^[6]首先将断裂力学的概念引用到混凝土中,并进行了混凝土的断裂韧度试验。此后,国内外更多的工作是进行各种断裂模式(包括拉裂模式、剪切模式和撕裂模式)的实验研究以及断裂韧度的测试,并积累了大量的测试资料,提出了一系列应力强度因子的计算方法和经验断裂判据^[3]。在此基础上,人们开始研究裂纹的存在对于断裂过程的影响。虽然这种研究仍然基于线弹性力学的基本假设(例如均匀各向同性等),并且所能考虑的裂纹数目和形态都非常有限,但是这些基础研究使我们对于这类断裂物理现象有了较为清晰的认识。同时,线弹性断裂力学在结构工程及其设计上也有成功的应用^[7,8]。1982年,岩石、混凝土断裂力学情报网制定了《混凝土断裂试验应提供的原始资料及约定条件》^[3]。国际岩石力学学会(ISRM)试验方法委员会也于1988年公布了岩石I型断裂断裂韧度测试的建议方法^[24]。此外,数值计算方法,例如有限元法、边界元法以及近年来发展起来的流形元^[25]和无单元法^[26]也用于了应力强度因子的求解,促进了线弹性断裂力学的发展。

骨料的存在使混凝土中的应力分布很不均匀,它是应力集中的主要根源。但骨料本身强度又高,因而骨料又可能起到阻止裂纹扩展的作用。但是由于线弹性断裂力学在混凝土断裂中的应用实际上是忽略了混凝土断裂破坏与金属的不同——混凝土的非均匀性,导致其结果难于很好地吻合混凝土断裂的实际现象。许多学者研究发表了混凝土断裂韧度的测定值,其可变性已经引起很多学者对线弹性断裂力学能否应用于混凝土材料的怀疑^[6]。所以,Kesler, Naus和Lott^[12]认为用于尖裂纹的经典的线弹性断裂力学不适用于混凝土,这个结论由Walsh加以证实^[10]。Glücklich^[11]证明,混凝土的临界应变能释放率要比表面能的2倍还要大很多,并认为这是由于断裂力学把混凝土断裂归结于单一裂纹的扩展所导致的错误结论,实际上,混凝土在受力后有无数的裂纹产生和扩展,所以实际的断裂面远远大于我们所能观察到的单一裂纹面。其他越来越多的试验结果也表明,混凝土的断裂韧度

和断裂能随着试样的尺寸变化而变化,并与裂纹长度和相对缺口深度有关。有人认为应该考虑骨料的形状、力学性质、砂浆基质的力学性能、骨料和砂浆结合面的力学性能等对断裂韧度的影响,而且要进行较为系统的研究,并建议应该使试件足够大才能更真实地测出混凝土的断裂韧度^[8]。所以,一些学者认为到目前为止人们进行的断裂韧度测试都是不合理的^[10]。不仅如此,断裂韧度还随骨料体积、形状、水灰比和龄期的不同而不同,甚至于有些学者开始怀疑对于混凝土来说是否真有断裂韧度这个材料参数存在^[56]。

由于混凝土材料与金属在力学性质上的差异,使得应用经典断裂力学研究混凝土材料所得到的结果往往与实际差异很大。这种差异主要表现在以下几个方面:

(1)经典的断裂力学(包括弹塑性断裂力学)研究处于均匀和各向同性体中的单个裂纹的断裂特性,而实际上混凝土表现出突出的非均匀性和非连续性,并且其中往往存在无数多个裂纹,裂纹扩展会出现分支或者相互交叉。这样一来,线弹性断裂力学的某些概念就不再适用了。

(2)线弹性断裂力学判据 $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} = K_{IC}$ 仅能作为裂纹开始失稳扩展的判据,而且认为裂纹一经开裂就立即失稳扩展,但是扩展过程的状态及其扩展路径如何,现有的断裂理论都无法作出有效的描述。因此,线弹性断裂力学只能给出断裂这个状态,无法研究整个断裂发生的全过程。

(3)混凝土的破坏一般表现为较大的脆性,在裂纹端部没有塑性区,但存在较大的微裂纹区(称为过程区),裂纹端部的亚临界扩展长度较大。这种微裂纹区的形成机理与金属的塑性区完全不同,所以不能仿效弹塑性断裂力学的研究方法来研究混凝土的断裂。

目前的材料强度设计仍然是基于传统的设计理论 $\sigma < [\sigma]$,即混凝土的应力不超过安全的允许应力,而不是建立在断裂力学理论的基础之上。混凝土断裂力学理论未能实用化的根本原因是现有的理论难以描述混凝土内部结构的极端复杂性。其内部大量的微裂纹和材料的非均匀性,使得混凝土的变形从加载一开始就表现出显著的非线性。另一方面,混凝土在开裂过程中存在具有大量微裂纹的过程区,使主裂纹产生“钝化效应”,并使混凝土的切口失去敏感性。这使线弹性断裂力学失去了应用的前提。

对于大体积混凝土来说,微裂纹区和产生的分支裂纹相对于主裂纹来说尺寸较小,可以忽略不计或者可以考虑进行微裂区的修正。应用线弹性断裂力学可进行一些实际问题的研究,这方面已有许多较为成功的应用^[3,7]。但是,当混凝土裂纹端部产生的微裂纹区和亚临界扩展长度较大而不能忽略时,用线弹性断裂力学分析混凝土构件中的裂纹扩展就不再合适了^[3]。因此,就在线弹性断裂力学开始应用于混凝土材料断裂研究的10年内,一些学者已经得出线弹性断裂力学的概念和研究方法不能应用于混凝土材料的结论^[12]。

含裂纹的混凝土试样在受载后,裂纹端部会出现一个微裂纹区(力学上的非线性区),这个微裂纹区通常被称为断裂过程区(Fracture Process Zone, 简称 FPZ)。对于跨中有切口的三点弯曲梁,在受载后,切口端产生应力集中,并在端部附近产生很多微裂纹。距切口端部越远,微裂纹的数目就越少,张开度也越小。到一定距离后,由于应力集中引起的微裂纹区消失了,该处就可以像正常的混凝土一样承受拉应力(图 1.1)。随着载

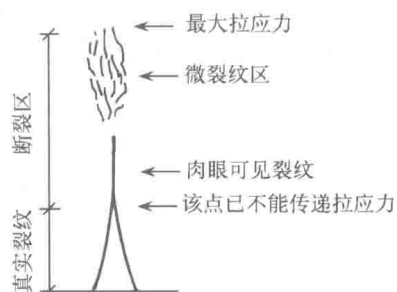


图 1.1 裂纹端部的微裂纹区

荷的增加,微裂纹区内裂纹数量增加,肉眼可见的裂纹逐渐变成真正的裂纹(通常称为微裂纹的亚临界扩展),纹端前移,又出现新的微裂纹区。这就是混凝土中裂纹的发展过程。由此可见,就物理状态而言,混凝土中的微裂纹区与金属的塑性区完全不同,应力分布规律也不同。其实 Kaplan^[6]在其后续的研究中已经注意到混凝土试件预制裂纹前端在失稳断裂前存在的断裂过程区。他当时用染色法观察了预制裂纹在发生失稳断裂前的亚临界扩展。以后许多学者分别采用漫射照明、电子显微镜和声发射技术观察和研究了混凝土中裂纹的萌生、扩展情形与特征。此后,激光散斑照像法开始应用于混凝土断裂力学的研究,并取得了某些可喜的成果。文献[14]又在前人的基础上,采用激光散斑照像法对混凝土切口梁的断裂过程进行了观察,对各个试件在各级载荷作用下的断裂过程区的形状和大小进行了跟踪扫描。Mindess^[13]对这些以往常用的观测手段的结果进行了较为全面的总结。但是由于混凝土材料的非均匀性,人们对于断裂过程区的了解仍然很模糊。

除此而外,混凝土裂纹的亚临界扩展长度和微裂纹区尺寸比金属的亚临界扩展长度和塑性区尺寸要大几个数量级,因此,一般认为塑性断裂力学的 J 积分理论和纹端张开位移理论(即 COD 理论)也不适合岩石和混凝土^[2]。

裂纹尖端非线性区的发现及对其进一步的深入研究,使人们认识到应该提出一种断裂模型,在模型中必须有效地反映这种非线性。根据混凝土的变形特点,人们提出了许多宏观断裂模型来表征混凝土断裂的非线性。在有限元的数值分析中,人们还引入了分离型裂纹模型(Discrete Crack Model)和分布型裂纹模型(Smeared Crack Model),来模拟混凝土受拉开裂后所形成的裂纹^[3]。在分离型裂纹模型中,认为裂纹在相邻单元的边界面上形成,在相邻单元的混凝土达到开裂条件后,将其共同节点断开,并在裂纹两边的混凝土单元引入各自的节点。当主应力相对于单元边界倾斜一定角度时,应调节单元边界方向,使形成的裂纹方向垂直于主应力方向。分离型裂纹模型的缺点是对于计算前裂纹未知的一般情况,开裂后需要改变节点数目和单元形状,所以计算方法复杂,计算时间较长。由于该模型很难完成自动计算,目前应用场合比较有限。近年来,随着计算技术的发展,该模型在有限元法的实施中,一些学者也提出了简化的高精度和高效率有限元网格动态重新

划分策略,使其更加容易地应用于裂纹扩展模拟^[16]。

分布型裂纹模型假定裂纹在单元内部形成。当单元内混凝土达到开裂条件后,就在垂直于主拉应力的方向产生裂纹。该模型用无数穿过开裂单元的平行裂纹表示混凝土裂纹,垂直裂纹方向不再能承受拉应力,并假定产生裂纹后的混凝土仍然保持连续,但是要把混凝土看作是正交各向异性的材料。因此,在混凝土开裂后,根据单元的受力状态要进行其材料力学性质的调整,由于上述的调整,在开裂一瞬间,单元失去了平衡。因而必须将不平衡的应力转换成节点力重新分配,使其达到新的平衡。混凝土开裂后,裂纹面材料按照相应的裂纹面本构关系来分析。

文献[17]对分布型裂纹模型与分离型裂纹模型进行了比较,发现两者所得计算结果基本相同,但后者无需进行节点的移动和分离就能考虑裂纹,且裂纹扩展方向不受网格划分的限制,可在任一方向生成和扩展,在反复加载时也容易处理。由于裂纹发生在单元体内,开裂后就不需要重新修改有限元网格,能自动连续计算,裂纹也能自动形成,而且裂纹方向也是完全自由的,不受单元形状和相邻单元边界的限制。因此,该模型适用于裂纹较多并且较难预测裂纹图形的情况,或者规模大、计算耗时较多的复杂结构物。分布型裂纹模型的缺点是裂纹的间距和宽度较难直接计算,裂纹的情况受单元大小的影响较大。此外, Bažant 认为该模型应用于有限元计算时不能模拟混凝土的尺寸效应,并且分析的结果对单元的划分很敏感,具有明显的网格依赖性(Mesh Objectivity)。

瑞典隆德工学院的 Hillerborg 教授以混凝土杆件单轴受拉时的断裂实验为基础,提出了虚拟裂纹模型(Fictitious Crack Model, 简称 FCM)^[19]。该模型属于分离型裂纹模型的范畴。当该杆件受拉、内部应力达到其抗拉强度时,在杆件的某个部位将出现含很多微裂纹的断裂区。断裂区可发生在杆件的任何部位。随着杆件变形的增长,断裂区内微裂纹不断发展,裂纹尖端应力集中开始释放,裂纹区以外的部分则同时开始卸载。通过实验可以测量断裂区域的应变软化曲线,并由此可以定义混凝土的Ⅰ型断裂能 G_F 。

在虚拟裂纹模型中,认为断裂能 G_F 是与混凝土的配合比、强度、集料种类和粒度、水泥标号等有关的材料特性常数。 G_F 要通过混凝土断裂试验确定。混凝土的断裂能可以用直接拉伸试件、三点弯曲试件或紧凑拉伸试件等进行测试。国际材料和结构试验室联合会(RILEM)的混凝土断裂力学委员会决定用三点弯曲梁试件测定混凝土的断裂能,并于 1985 年公布了测定混凝土Ⅰ型断裂能的试验标准^[20]。RILEM 委员会于 1989 年提出了一系列测试混凝土混合型断裂能的方法,建议使用四点弯曲剪切试验测定混凝土的Ⅱ型断裂能。通过对 700 个用三点弯曲梁测试断裂能的比较,Hillerborg^[21]得出混凝土的断裂能随着最大骨料粒径的增加、凝期的加长以及水灰比减小而增大的结论。但实际上各个测试试验数据的离散性较大,到底这些参数如何影响断裂能还未完全确定^[60]。

虚拟裂纹模型和钝裂纹带模型都认为断裂能 G_F 是混凝土的材料参数,但是

该参数的实验测试是与加载边界条件、试样几何尺寸等多个因素有关的^[22]。所以,有些学者对把所定义的断裂能作为材料参数的合理性表示怀疑^[23]。此外,虚拟裂纹模型还有许多缺点,例如,即使是在单轴拉伸应力状态,进行软化曲线的直接测量也是非常困难的。并且,人们对于直接拉伸实验数据的可靠性和重要性也产生了怀疑。另外,即使是在直接拉伸条件下,裂纹也不仅仅受到垂直于裂纹表面的拉应力作用,同时还受到平行于裂纹表面的剪切应力,这显然是一个复杂应力状态,不能简单地认为裂纹萌生、扩展只与拉应力有关。虚拟裂纹模型很难处理多裂纹的扩展问题。

美国西北大学Bažant教授认为,用有限单元法研究混凝土裂纹扩展时可以用一条包含密集、平行裂纹的带来模拟实际裂纹和断裂区。这条裂纹具有一定的宽度,所以裂纹尖端是钝的,因此叫做“钝裂纹带模型”(Blunt Crack Band Model)^[28]。该模型属于分布型裂纹模型的范畴,能够研究平面问题中的断裂问题。该模型初看起来似乎与普通的分散裂纹模型没有什么区别,但是Bažant和Oh认为分散裂纹模型是与单元大小相关的^[28],而钝裂纹带模型仍然应用了虚拟裂纹模型中提出的应变软化曲线和断裂能的概念,使得分析结果与有限元网格大小无关。将裂纹带看成是正交异性介质,对弹性刚度矩阵进行修正来模拟裂纹。同时该模型还提出了垂直于裂纹方向承受剪应力时类似的剪切应变软化曲线和Ⅱ型断裂能,并提出将软化带的宽度 h_c 作为材料参数。Bažant认为该宽度作为材料参数的 h_c 必须足够大,其数值为三倍的骨料尺寸,以使混凝土能够被视为均匀材料。该模型可以方便地确定裂纹带以及结构的应力和变形,具有分散裂纹模型所具有的优缺点。但是,即使采用了一些先进的微观观察技术,软化带的宽度 h_c 等参数的测量实际上很难实现。

这两个模型较好地反映了混凝土端部裂纹区的应变局部化和应变软化特征。为了计算上的简单,人们提出了一些简化的拉应变软化曲线形式,包括直线型、折线型或者曲线型等,然后与有限元等数值方法结合,进行裂纹扩展及混凝土断裂过程的数值模拟^[21]。近年来,边界元法也有成功的应用^[29]。这两个模型一般被称为混凝土的宏观非线性断裂力学模型,其共同的思想都是将裂纹端部一定区域视为非线性软化区,以便能够考虑微裂纹、骨料等因素对宏观裂纹的屏蔽作用。这两个模型中都把断裂能作为混凝土的重要材料常数。在对小尺寸试件进行断裂破坏分析时,两个模型的结果比较接近。但是对大体积混凝土试件,其结果则比较分散^[7]。

基于断裂力学的概念,人们也提出了一些断裂模型,例如文献[27]提出的模拟断裂过程的影响因子法,一般都要引入断裂韧度和断裂能等作为混凝土的基本参数,其应用往往也受到断裂力学基本理论及其假设的约束。

1.1.3 混凝土损伤力学的研究现状

材料中由于损伤形成了宏观的裂纹,在外载荷作用下,裂纹从萌生、扩展到最

后的失稳扩展,这是一个过程。对于典型的脆性断裂,起始扩展意味着失稳扩展;对宏观的韧性断裂,则存在裂纹稳定扩展的阶段。断裂力学则只研究固体中裂纹型缺陷扩展的规律,却无法研究分析宏观裂纹出现以前材料中的微缺陷或微裂纹的形成及其发展对材料力学性能的影响,而且许多微裂纹的存在并不能简化为宏观裂纹,这是断裂力学理论本身的局限性。对于混凝土来说,要研究其受力后的变形和破坏过程,不但要研究已存在裂纹(例如断裂力学试件中的预制裂纹)的扩展规律,而且往往要研究新裂纹的萌生、裂纹的扩展以及裂纹间的贯通。损伤力学的产生从某种程度上弥补了断裂力学的这种不足,它主要是在连续介质力学和热力学的基础上,用固体力学方法,研究材料宏观力学性能的演化直至破坏的全过程。20世纪70年代末,损伤力学限制在研究材料宏观裂纹出现以前的阶段,当宏观裂纹出现以后,则用断裂力学的理论和方法进行研究,这是无耦合的分析方法。此后,人们考虑到当宏观裂纹出现以后,材料的损伤对裂纹尖端附近及其他区域的应力和应变都有影响,认为合理的方法应该将损伤耦合到本构方程中进行分析 and 计算。事实上,在物体的破坏过程中,往往同时存在损伤(分布缺陷)和裂纹(奇异缺陷),而且在裂纹尖端附近的材料必然具有更严重的分布缺陷,其力学性质必然与距裂纹尖端远处不同,因此为了更切合实际,就必须把损伤力学与断裂力学结合起来研究物体的破坏过程。研究固体的破坏过程,必须研究材料的损伤过程。由此可见,借助于损伤力学研究混凝土的断裂过程是一种途径^[4]。

损伤力学的研究方法主要有两大类:

(1) 微观(细观)方法。

这种方法是根据材料的微观(或细观)成分(如基体、颗粒、空洞)单独的力学行为以及它们的相互作用来建立宏观的对象损伤的本构关系,进而给出损伤力学的完整的问题提法。对细观的方法,一般认为细观模型为损伤变量和损伤演化赋予了真实的几何形象和物理过程,深化了对损伤过程本质的认识。损伤的细观理论是一个采用多重尺度的连续介质理论,其研究方法是两(多)段式的。首先,从损伤材料中取出一个材料构元,它从试件或结构尺度上可视为无穷小,但包含了材料损伤的基本信息,无数构元之和便是损伤体的全部。然后对承受宏观应力的特定的损伤结构进行力学计算(这个计算须做各种简化假设),便可以得到宏观应力与构元总体应变的关系及损伤特征量的演化关系。这些关系即对应于特定损伤结构的本构方程,并可用它来分析结构的损伤行为。本书对于混凝土断裂过程的数值模拟所使用的模型就是该类型的损伤模型。在后面的章节中将该模型予以详细的介绍。

(2) 宏观的及唯象学的方法。

这一方法不需要直接从微观机制导出宏观量之间的理论关系式。宏观方法的共同特点是引入损伤变量作为本构关系中的内变量。不同的研究者采用不同的损伤变量。大部分损伤变量是标量,即假定材料损伤是各向同性的。例如,Lamaitre^[30]采用的损伤变量与有效应力相联系;村上澄男等^[31]从微裂纹的尺度和