

混凝土断裂损伤力学

李庆斌 著



科学出版社

混凝土断裂损伤力学

李庆斌 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了当前国内外在混凝土断裂损伤力学方面的最新成就,总结了著者多年来在混凝土断裂损伤理论、开裂判据、分析方法、工程应用等方面的研究成果,主要包括:混凝土断裂损伤本构关系与裂缝稳定性判据,混凝土断裂参数解析计算模型,裂缝前缘应变分布状况,全级配大坝混凝土断裂参数变化规律及纤维对混凝土裂缝的抑制作用机理,混凝土结构裂缝分析在实际工程中的应用。

本书可供力学、水利、土木、交通、港口、工业民用建筑等领域从事混凝土理论研究的科研工作者和工程技术人员阅读,亦可供高等院校教师、研究生以及高年级本科生教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土断裂损伤力学/李庆斌著. —北京:科学出版社,2017.9
ISBN 978-7-03-054645-6

I. ①混… II. ①李… III. ①混凝土-断裂力学-损伤(力学)
IV. ①TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 238288 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:桂伟利
责任印制:肖 兴 / 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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 9 月第一次印刷 印张:20

字数:400 000

定价:150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着经济水平的不断提高,我国已建和在建多座 300m 级拱坝和 200m 级重力坝。这些坝的基本特征是坝高库大、水推力巨大、应力水平高,温控防裂难度大,基础复杂、基础-坝体非协调变形问题突出,容易导致大坝在施工期、运行期出现裂缝,这些裂缝在不利工况下,可能导致高坝出现开裂破坏,而大坝破坏所形成的次生灾害将造成重大损失。因此,准确认识大体积混凝土的断裂损伤机理和力学特性,合理确定其断裂损伤参数,是进行大体积混凝土结构开裂风险评判、裂缝稳定性分析的重要基础。

如今,混凝土断裂损伤力学已具雏形,并在混凝土结构裂缝稳定性分析等方面得到了应用。然而,由于大体积混凝土的不均匀性和非线性行为,其断裂过程与破坏机理非常复杂,其断裂破坏机理、断裂参数变化规律等方面并未取得共识,需要更加深入、系统、精准的研究成果,以准确地指导工程实践。

本书针对混凝土断裂损伤理论、开裂判据、分析方法、工程应用等问题,进行了较为系统、深入的研究,主要包括:建立了静、动力荷载作用下混凝土损伤本构关系与裂缝稳定性判据;提出了混凝土断裂参数解析计算模型;讨论了裂缝前缘应变分布状况与裂缝张开位移的直接测量方法;揭示了全级配大坝混凝土断裂参数变化规律及纤维对混凝土裂缝的抑制作用机理;数值模拟了混凝土大坝在温度荷载作用下的开裂过程。

全书共 9 章。第 1 章介绍混凝土的破坏过程与机理,回顾混凝土断裂损伤力学的产生、发展及取得的重大成就。本章由李庆斌、米正祥执笔。第 2 章介绍混凝土断裂损伤力学的一些基本概念与原理。本章由李庆斌、米正祥执笔。第 3 章介绍混凝土在单轴与多轴受力状态下的静、动力损伤本构方程,并讨论真实水荷载下混凝土的断裂损伤性能。本章由李庆斌、陈樟福生执笔。第 4 章推导在静、动力荷载作用下裂缝尖端附近的损伤场,建立以“允许损伤尺度”为参量表征的裂缝稳定性判据。本章由李庆斌执笔。第 5 章介绍基于峰值荷载求解混凝土起裂断裂韧度的解析计算模型。本章由李庆斌、卿龙邦执笔。第 6 章介绍埋入式光纤传感器同混凝土相互作用的力学模型与裂缝尖端张开位移的直接测量技术,并讨论裂缝前缘应变分布状况。本章由李庆斌、李广执笔。第 7 章介绍大坝混凝土的真实断裂参数测试方法,包括在混凝土大坝施工现场浇筑成型的全级配大坝混凝土构件断裂试验,讨论全级配大坝混凝土断裂参数尺寸效应问题,建立全级配大坝混凝土与湿筛混凝土断裂参数间的相互换算关系。本章由李庆斌、管俊峰、赵志方执笔。第

8章介绍纤维对抑制混凝土开裂的细观作用机理,包括纤维在弹性变形、基体开裂、裂缝张开至纤维拔出等过程中纤维与混凝土材料的相互作用模型。本章由李庆斌、董振英执笔。第9章介绍有限元法分析温度裂缝的基本原理和方法,分别采用有限元法与扩展有限元法对混凝土大坝的开裂破坏过程进行数值模拟。本章由李庆斌、刘天云、刘国威执笔。全书由李庆斌统稿。

本书的研究工作先后得到了“十一五”国家科技支撑课题“复杂条件下混凝土高坝施工安全与高拱坝结构安全及运行可靠关键技术研究”(2008BAB29B05)、“973”计划项目“高碾压混凝土坝全寿命周期性能演变机理与安全控制”(2013CB035900)、国家杰出青年基金项目“智能混凝土若干基础研究”(50225927)、国家自然科学基金重点项目“高拱坝真实性能及其演变”(51339003)、教育部创新团队“大型水电枢纽灾变机理与安全极限理论”(IRT0930)等科技项目的大力支持。同时,借鉴参考了国内外有关专家的研究成果,在此一并表示致谢!

本书总结了作者在混凝土断裂损伤性能方面的研究成果,提出一些较前沿的研究思路 and 方向,其中一些观点仅代表作者当前对上述问题的认识,有待进一步补充、完善和提高。由此,本书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 混凝土的破坏过程和机理	1
1.3 混凝土断裂损伤力学研究进展	5
1.3.1 混凝土断裂损伤破坏过程理论研究进展	5
1.3.2 混凝土断裂损伤破坏过程数值研究进展	18
1.4 混凝土断裂参数试验研究与变形测试技术	22
1.4.1 光纤传感技术在混凝土结构变形测量中的应用	22
1.4.2 大坝混凝土断裂特性理论与试验研究	24
1.4.3 纤维混凝土断裂特性理论与试验研究	26
1.5 本书主要研究内容	30
参考文献	30
第 2 章 混凝土断裂损伤基础	39
2.1 概述	39
2.2 混凝土损伤力学基本概念	39
2.2.1 混凝土损伤破坏机理	40
2.2.2 混凝土损伤理论	41
2.2.3 混凝土损伤本构模型	43
2.3 线弹性断裂力学	46
2.3.1 裂缝的类型	47
2.3.2 裂缝尖端应力场与位移场	47
2.3.3 应力强度因子的计算	50
2.3.4 断裂判据	53
2.4 混凝土断裂力学模型	55

2.4.1 虚拟裂缝模型	55
2.4.2 钝裂缝带模型	58
2.4.3 尺寸效应模型	62
2.4.4 双 K 断裂模型	66
参考文献	70
第 3 章 混凝土静、动力损伤本构理论	72
3.1 概述	72
3.2 单拉状态下混凝土动力损伤本构模型	72
3.2.1 混凝土动力损伤及其演化规律	72
3.2.2 混凝土单拉动力损伤本构方程	74
3.2.3 损伤阈值应变与极限应变讨论	75
3.2.4 应用举例	76
3.3 单压状态下混凝土动力损伤本构模型	77
3.3.1 混凝土静力损伤本构方程	78
3.3.2 混凝土动力损伤本构方程	79
3.3.3 损伤阈值应变与极限应变讨论	81
3.4 考虑初始弹模变化的混凝土动力损伤本构模型	81
3.4.1 混凝土动力损伤及其演化规律	82
3.4.2 混凝土单轴动力损伤本构方程	83
3.4.3 损伤阈值应变与极限应变讨论	84
3.4.4 应用举例	85
3.5 双剪状态下混凝土静、动力损伤本构模型	86
3.5.1 混凝土静力双剪损伤本构理论	86
3.5.2 混凝土动力双剪损伤本构理论	88
3.5.3 应用举例	90
3.6 混凝土的孔隙黏塑性损伤本构模型	92
3.6.1 干燥混凝土的黏塑性损伤本构模型	92
3.6.2 饱和混凝土孔隙黏塑性损伤本构模型	97
3.6.3 真实水荷载下饱和混凝土的孔隙黏塑性损伤本构模型	103

参考文献	107
第 4 章 混凝土静、动力断裂损伤模型	110
4.1 概述	110
4.2 混凝土 I 型裂缝静、动力断裂损伤模型	110
4.2.1 混凝土 I 型裂缝静力断裂损伤判据	111
4.2.2 混凝土 I 型裂缝动力断裂损伤判据	114
4.2.3 算例分析	117
4.3 混凝土 II 型裂缝静、动力断裂损伤模型	117
4.3.1 混凝土 II 型裂缝静力断裂损伤判据	117
4.3.2 混凝土 II 型裂缝动力断裂损伤判据	120
4.3.3 允许损伤尺度 R_{IIc} 的确定	122
4.4 混凝土 III 型裂缝静、动力断裂损伤模型	123
4.4.1 混凝土 III 型裂缝静力断裂损伤判据	123
4.4.2 混凝土 III 型裂缝动力断裂损伤判据	125
4.4.3 允许损伤尺度 R_{IIIc} 的确定	126
4.5 混凝土复合型裂缝静、动力断裂损伤判据	127
4.5.1 混凝土 I、II 复合型裂缝静力断裂损伤判据	127
4.5.2 混凝土 I、II 复合型裂缝动力断裂损伤判据	130
4.5.3 允许损伤尺度 $R_{(I+II)c}$ 的确定	132
参考文献	133
第 5 章 基于峰值荷载的混凝土起裂断裂韧度的研究	134
5.1 概述	134
5.2 基于峰值荷载的混凝土起裂断裂韧度实用解析方法	135
5.2.1 混凝土起裂断裂韧度的计算模型	135
5.2.2 试验验证与分析	142
5.2.3 起裂断裂韧度对软化曲线形状的敏感性分析	147
参考文献	148
第 6 章 混凝土结构裂缝尖端变形测量	151
6.1 概述	151

6.2	光纤传感器测量混凝土变形的基本原理	151
6.2.1	光纤传输的基本原理	152
6.2.2	埋入式光纤传感器与周围介质间的相互作用机理	154
6.2.3	MC-6 型光纤应变测量仪简介	159
6.2.4	光纤传感器的制作与埋入	161
6.3	单拉状态下光纤传感器测量混凝土变形的力学模型	163
6.3.1	光纤传感器测量混凝土应变的力学模型	163
6.3.2	试验验证	173
6.4	光纤传感器测量混凝土结构裂缝尖端变形	177
6.4.1	试验概况	177
6.4.2	试验结果与分析	180
	参考文献	189
第 7 章	大坝混凝土断裂参数试验研究与分析	191
7.1	概述	191
7.2	三峡重力坝大坝混凝土断裂参数的试验测定	192
7.2.1	基于裂缝黏聚力的双 K 断裂参数的计算方法	193
7.2.2	试验概况	194
7.2.3	电测法研究混凝土裂缝扩展规律	200
7.2.4	试验结果与分析	203
7.3	溪洛渡拱坝大坝混凝土断裂参数的试验测定	210
7.3.1	试验概况	210
7.3.2	试验结果与分析	214
	参考文献	222
第 8 章	纤维对混凝土裂缝的抑制作用及机理分析	224
8.1	概述	224
8.2	纤维混凝土增强增韧机理研究进展	224
8.2.1	纤维轴向拉拔模型	225
8.2.2	纤维斜向拉拔模型	230
8.3	纤维混凝土异型纤维轴向拉拔破坏模型	232

8.3.1 异型钢纤维轴向拉拔试验	232
8.3.2 异型纤维轴向拉拔力学模型	235
8.3.3 计算结果比较与分析	244
8.4 纤维混凝土纤维斜向拉拔破坏模型	247
8.4.1 纤维斜向拉拔试验	248
8.4.2 纤维斜向拉拔力学模型	253
8.4.3 计算结果与分析	257
参考文献	262
第9章 大体积混凝土结构断裂损伤数值模拟方法及工程应用	265
9.1 概述	265
9.2 传统有限元法模拟大体积混凝土结构温度裂缝	266
9.2.1 有限元分析温度裂缝的基本原理	266
9.2.2 算例分析	277
9.3 扩展有限元法模拟大体积混凝土结构温度裂缝	296
9.3.1 扩展有限元法的基本原理	296
9.3.2 算例分析	302
参考文献	308

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

随着经济水平的不断提高,土木水利工程建设在世界范围内取得了迅猛发展。混凝土作为土木水利工程中最重要的建筑材料之一,其损伤断裂特性对工程安全起着关键作用。如何准确把握混凝土的破坏机理,确定合理的混凝土断裂参数,对评价混凝土结构的稳定性和安全性具有重大意义。

混凝土是由水泥、砂子、石子等经化学反应生成的多相复合材料,它自身的非均匀性以及复杂的内部结构,使得混凝土的断裂破坏机理也非常复杂,如何合理研究其由损伤、断裂到失稳破坏的复杂过程,一直是研究者极为关心的课题。随着研究工作的不断深入,学者舍弃或修正了经典断裂力学中不符合混凝土特性的一些假定、理论和试验方法,并不断提出了能反映混凝土特性的新假定、新理论与新试验方法,从而逐渐形成了混凝土断裂力学。

混凝土断裂力学的早期研究大都以线弹性断裂力学为基础,即认为构件在断裂前基本处于线弹性范围内,把混凝土视为带有裂缝的线弹性体,分析裂缝稳定性的方法主要有应力强度因子法与能量法。然而,大量试验研究表明,当混凝土构件受荷载后,主裂缝附近和前端将出现分支以及微裂区,使整个体系呈现出一定程度的非线性特征。因此,将线弹性断裂力学直接应用于混凝土结构断裂分析,就会忽略主裂缝失稳断裂前的缓慢扩展(亚临界扩展)和微裂区的影响,将导致所测得的断裂韧度具有明显的尺寸效应。

后来,众多学者基于混凝土的亚临界扩展特性,提出了多种非线性断裂模型,如虚拟裂缝模型(fictitious crack model,FCM)、钝裂缝带模型(crack band model,CBM)、尺寸效应模型(size effect model,SEM)、双参数模型(two parameter fracture model,TPFM)、双 K 断裂模型(double- K fracture model,DKFM)等。这些非线性模型的提出和确定对分析混凝土结构裂缝的稳定性,确定其危害性,判断工程加固的必要性以及加固效果,改进土木水利工程稳定分析方法、设计方法等具有重要作用。

本章简要回顾混凝土断裂损伤力学的产生与发展及取得的重大成就。

1.2 混凝土的破坏过程和机理

混凝土是以骨料为填料、以硬化水泥浆为母体组成的复合材料。因此,骨料和

硬化水泥浆以及它们结合面的力学特性必然会影响混凝土的力学性能。现代化测试技术和计算技术为我们观察和研究混凝土材料的破坏机理提供了方便。

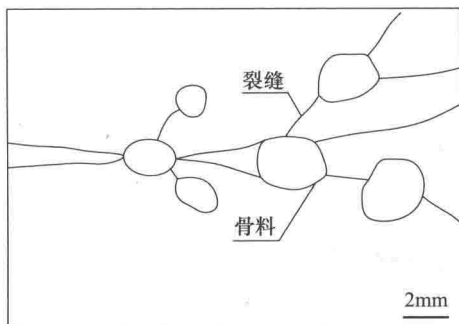
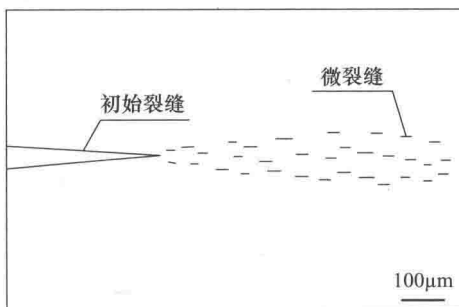
学者利用电子显微镜、X光摄影等方法观察发现,由于混凝土浇筑时的泌水作用或干燥期间水泥浆的收缩受到骨料的限制等各种原因,加载前的混凝土在粗骨料与硬化水泥浆的结合面上存在许多微裂缝,这种微裂缝被称为“结合缝”。在混凝土单轴受压应力-应变关系曲线上,靠近原点的位置常呈现轻度凹形,即是这种微裂缝存在的反映。同时,这些微裂缝的存在也使得混凝土的刚度有所减弱,但减弱程度取决于局部应力状态。这些现象说明,即使是浇筑良好的混凝土,也存在许多微裂缝和初始缺陷^[1,2]。

对外荷载作用下的混凝土而言,当外荷载较小时,混凝土表面并无肉眼可见的裂缝;当外荷载增大到一定程度后,能听到混凝土因内部破坏而产生的微弱且清晰的破裂声,直到在混凝土表面看到许多微细的裂缝;随着外荷载的继续增加,这些微裂缝会进一步蔓延并贯通;当外荷载达到极限荷载时,混凝土最终发生破坏。可见,混凝土的破坏过程与其内部裂缝的扩展有着密切的关系。

研究者最初通过分析单轴受压作用下混凝土试件体积的变化后,发现混凝土内部存在大量裂缝。即在66%的极限荷载范围内,混凝土试件的体积随外荷载的增大而逐渐减小;当超过该点后,随着外荷载的增加,混凝土的体积却逐渐增大。因此,可以推断混凝土的破坏是由遍布于试件内部与所加压力平行的拉伸裂缝逐渐扩展所造成的。后来, Jones^[2]发现,在单轴受压混凝土试件中,平行于加载方向的超声脉冲速度保持不变,但垂直于加载方向的超声脉冲速度随着荷载的增加而逐渐降低,从而证实了 Brandtzaeg 的推断。

20世纪70年代, Buyukozturk 等^[3]利用9个排成正方形的圆骨料片的混凝土模型,通过X光摄影与有限单元分析发现,在混凝土内部最早的微裂缝产生于骨料和砂浆的结合面上,并且在30%的极限荷载范围内,这种微裂缝不断地产生与闭合。后来, Liu 等^[4]采用同样的手段,对三种不同粒径的圆骨料混凝土模型进行了试验与分析,所得结论与 Buyukozturk 等^[3]的试验结果相同。这些研究证实了“结合缝”是导致混凝土的荷载-位移曲线产生非线性特性的重要原因,但并非是唯一的原因。同时,推断砂浆本身也是非线性系统。

用扫描电子显微镜追踪在外荷载作用下砂浆的开裂情况时发现,由于骨料的阻裂作用,砂浆中会产生大量的分支裂缝,裂缝路径也很曲折,如图1.1所示。散斑光弹法已经证实,即使在硬化水泥浆体中,主裂缝前沿也存在众多的微裂缝,如图1.2所示。此外,水泥浆体中裂缝的扩展路径也极其曲折^[5]。因此,无论是混凝土或砂浆,还是水泥浆体,其真实的断裂面均远大于表观断裂表面,且硬化水泥浆体、砂浆以及混凝土的真实断裂面与表观断裂表面的近似比分别为 $(1\sim 2):1$ 、 $(5\sim 10):1$ 、 $(15\sim 20):1$ ^[5]。

图 1.1 裂缝在骨料处的分叉与受阻^[5]图 1.2 硬化水泥浆体中的微裂缝^[5]

由此可见,虽然不同的学者由于所采用的观测方法与试验仪器的灵敏度、精度等不同,导致裂缝扩展过程中相应于不同阶段的应力水平并不完全一致,但是所得的结论都证实:未加荷载之前,混凝土中已经有微裂缝存在;在荷载作用下,混凝土的破坏实质上就是裂缝的产生、稳定扩展与不稳定扩展的过程,即裂缝的扩展经历了裂缝起裂、裂缝稳定扩展与裂缝失稳扩展三个阶段;而且混凝土破坏过程中并非单一裂缝在扩展,另外还有众多的次裂缝。

应力-应变关系是混凝土在外力作用下变形及破坏现象的外部表现。在单轴压缩应力状态下,砂浆、骨料以及混凝土典型的应力-应变曲线如图 1.3 所示。由图可知,对骨料而言,在达到破坏荷载前,其应力-应变曲线基本上是线性的。砂浆而言,直到破坏荷载的 90%~95%之前,其应力-应变曲线也基本上是线性的。但是,混凝土的应力-应变曲线则有明显的不同,在荷载达到抗压极限强度的 30%~40%之前,应力-应变曲线接近直线;应力超过该点之后,应力-应变曲线的曲率逐渐增加,当应力达到抗压极限强度的 70%~90%时,曲线明显弯曲;应力达到抗压极限强度后,应力-应变曲线达到峰点,可见,混凝土应力-应变曲线形状的变化与其内

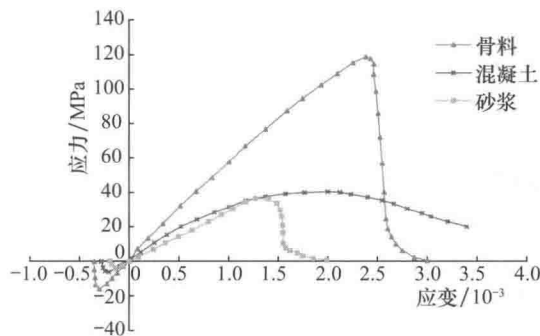


图 1.3 单轴压缩时的应力-应变曲线比较

部裂缝的扩展有着密切的关系。因此,以裂缝的扩展过程为标准,混凝土的破坏过程可分为下面三个阶段^[5]。

第一阶段,准弹性阶段。在 30%~40% 的极限抗压强度以内,该阶段应力-应变曲线基本呈直线,在施加荷载之前已有的微裂缝处于稳定状态,几乎没有扩展的趋势。除了已存在的裂缝之外,在试件内的某些孤立点上会产生应力集中,使得在应力集中的微小局部区域内也可能引发一些附加裂缝,它们也将保持稳定,并且这些裂缝的形成有助于缓和应力集中,并重新恢复到平衡状态;然而,微裂缝的出现必然会产生不可恢复的变形,这可能是在低应力下应力-应变曲线并不完全呈线性的原因,但这种不可恢复的变形量很小。

第二阶段,稳定扩展阶段。随着荷载的增加,这些微裂缝不断产生或闭合;骨料与砂浆结合面上的作用力为压-剪复合应力,且砂浆与骨料沿开裂面开始滑动,裂缝向砂浆中扩展。此时,众多的微裂缝开始缓慢、稳定地扩展,并逐渐延展到基体中,随着基体的开裂,原先孤立的微裂缝开始逐渐贯通,发展成一个更为广泛和连续的裂缝体系。若停止加载,裂缝扩展也将中断。在这个阶段,由于不可恢复的变形明显增加,应力-应变关系曲线逐渐偏离直线,且其曲率也越来越大。

第三阶段,临界应力或不稳定扩展阶段。如果将应力维持在极限抗压强度的 70%~90%,已贯通的裂缝体系将持续扩展,裂缝扩展也进入不稳定扩展阶段。此后,应力-应变关系曲线明显弯曲,基体中的裂缝扩展变得更加迅速。由于这些裂缝的延伸,裂缝体系终于变得不稳定,即混凝土发生失稳破坏。

整个应力-应变关系曲线的变化说明了裂缝的产生、扩展与失稳过程,而裂缝的发展阶段也解释了应力-应变关系曲线呈现非线性的原因。

混凝土单轴拉伸应力状态下的应力-应变关系曲线如图 1.4 所示。可以看出,图 1.3 与图 1.4 非常相似,但是两者也有一些不同之处,值得说明。

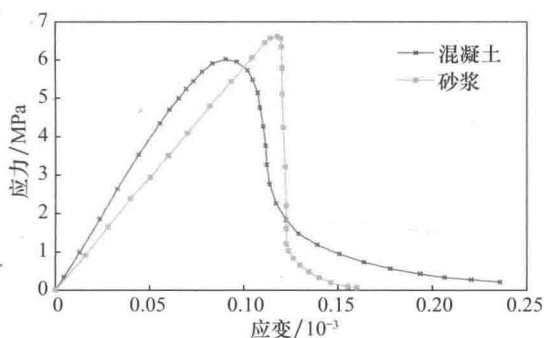


图 1.4 单轴拉伸时的应力-应变曲线比较

当应力低于极限抗拉强度的 60% 时,单轴拉伸应力状态下的应力-应变关系曲线几乎呈线性,且在这一应力水平之前,新生微裂缝的作用可以忽略不计。因此,这一应力将对应于弹性极限。超过该应力水平后,初始微裂缝开始扩展,且在单轴拉伸应力状态下抑制裂缝扩展的趋势比单轴压缩应力状态下要小得多,因此,拉伸应力状态下裂缝的稳定扩展阶段相对较短。此外,在拉伸应力状态下,裂缝的扩展方向大致垂直于应力的方向,因而任何新裂缝的产生与扩展都将减少有效承载面积。所以,在拉伸应力状态下,混凝土的破坏不是由众多裂缝引起,而是由少数几条裂缝所致。同时,由于裂缝扩展迅速,在试验中要得到应力-应变关系曲线的下降段也更加困难。

1.3 混凝土断裂损伤力学研究进展

1.3.1 混凝土断裂损伤破坏过程理论研究进展

1. 断裂力学的产生与发展

断裂力学是研究含裂纹体在不同应力状态下裂纹扩展规律与断裂机理的一门新兴学科,它起源于工程实际中材料的低应力脆性断裂。近几十年来,特别是第二次世界大战期间,焊接工艺得到了广泛应用,由此相继出现了焊接货船与焊接桥梁的严重断裂事故,如第二次世界大战期间,美国生产的大约 5000 艘全焊接自由轮货船,在使用过程中发生了 1000 多次脆性断裂事故,其中约有 250 艘发生了致命性的破坏或者损伤,10 多艘在平静的海面上突然段成两段。第二次世界大战之后,大量高强度材料的广泛使用,使得结构进一步朝着薄壳化、轻型化发展,然而也出现了一系列低应力脆断事故。著名的例子是,火箭发动机的外壳选用屈服极限为 1470MPa、强度极限为 1666MPa 的超高强钢,但进行水压试验时发现,当应力为 700MPa 时突然发生爆炸飞裂,这种低应力脆断事故按当时的强度理论根本无法

解释。并且这些事故发生前并无明显的征兆,但造成的人员伤亡和财产损失十分惨重。问题的严重性迫切要求人们对此进行深入研究,从根本上去反省传统的设计方法,认识传统强度理论的不足。事故后,力学工作者对多个从破损处切割下来的试件进行了试验分析。结果表明,事故总是由构件制造、安装过程中所产生的裂缝或焊接缺陷所引起,这使人们想起了 1920 年 Griffith 研究玻璃等脆性材料时提出的断裂理论,对 Griffith 的裂缝扩展理论进行了重新认识,对裂缝扩展问题也开始了深入而系统的研究^[5]。

Griffith 断裂理论提出约 30 年后,Orowan 于 1949 年对其能量平衡理论进行了修正,Griffith 和 Orowan 的理论是断裂力学中能量理论的基础。但是,脆性断裂理论的重大突破应该归功于 Irwin^[6],他在 1957 年提出了著名的裂缝尖端应力场、位移场的近似表达式,以及著名的应力强度因子的概念,从而使得裂缝尖端应力场、位移场的分析能够数学化;随后 Irwin^[6]在应力强度因子的基础上提出了断裂韧度的概念,并建立了材料断裂韧性的试验技术;Irwin 的应力强度因子断裂准则与 Griffith 的能量准则构成了线弹性断裂力学的核心内容。之后,各种确定应力强度因子的方法(包括解析法、数值法、实验法等)成为研究线弹性断裂力学的中心课题,颇有成效的方法已达 10 余种。1973 年,由 Tada 等^[7]主编的第一本应力强度因子手册的出版标志着线弹性断裂力学走向成熟。

和线弹性断裂力学相比,弹塑性断裂力学的研究要困难得多,但近几十年来,在这方面的研究也取得了一些重大成就。1948 年,Orowan 和 Irwin 各自独立地从能量的角度研究了弹塑性材料的裂纹扩展问题;他们认为,对于弹塑性材料,抵抗表面张力所做的功远小于抵抗塑性变形做的功,从而提出了塑性材料裂纹扩展的能量判据,这是研究弹塑性断裂问题的开端^[6]。现已公认,1963 年提出的裂缝张开位移(crack opening displacement, COD)准则,可作为弹塑性条件下裂纹的起裂判据,但这个准则的理论基础较薄弱^[7]。1968 年,Ⅰ型裂缝尖端应力应变场弹塑性解析解的发表,为 J 积分作为断裂奠定了理论基础^[8]。

2. 混凝土线弹性断裂力学

断裂力学的兴起给力学这一传统的学科带来了新的气息,它不仅成功地分析和解释了金属材料的低应力脆断事故,而且在抗断裂设计、合理取材、选择合适的热处理制度、预测构件的疲劳寿命、制定合理的度量验收标准与检测制度等方面发挥着越来越重要的作用。断裂力学兴起的最主要原因是它适应了生产的迫切需求,有着明显的使用价值,使它在短期内得到了迅猛的发展,并在金属材料中得到了广泛的应用。这也引起了非金属材料科研工作者的关注,并开始将断裂力学相继应用于岩石、混凝土、石膏等非金属材料,从而不断地开拓它的应用领域。

混凝土结构的损伤与破坏过程实质上就是裂缝的引起与发展过程。因此,运用断裂力学的观点来解释或分析混凝土结构的力学行为,改善混凝土材料的微观力学性能,无疑是行之有效的方法。1959年Neville^[9]首先将Griffith断裂理论应用于混凝土,他认为试件尺寸对混凝土强度的影响与混凝土内部随机分布的裂纹有关。1961年,Kaplan^[10]首次将断裂力学的概念引用到混凝土中,并进行了混凝土断裂韧性试验,从此混凝土断裂力学研究逐步展开。起初只是模仿研究金属材料时所采用的方法,随着研究的逐步深入,舍弃了一些不符合混凝土特性的假定、理论及试验方法,并采用了能反映混凝土本身特性的新假定,从而形成了断裂力学在非金属材料方面的又一支——混凝土断裂力学。

混凝土断裂力学早期的研究成果大都是以线弹性断裂力学为基础,分析裂缝稳定性的方法主要有应力强度因子法与能量法。应力强度因子法认为,当裂缝尖端的应力强度因子 K_I 小于材料抵抗裂缝扩展阻力 K_{Ic} 时,裂缝是稳定的。也就是说,把试验测定的最大荷载和试件初始裂缝长度代入线弹性断裂力学给出的应力强度因子计算公式中来计算混凝土材料的断裂韧性,进而评估带裂缝混凝土构件的寿命和安全性。能量法认为,若结构中裂缝扩展单位面积所消耗的能量 G_I 小于形成单位裂缝表面所需的能量 G_{Ic} ,则裂缝是稳定的。由于 K_I 和 G_I 的基础都是线弹性断裂理论,它们之间可通过一定的关系式相互转换。因此,混凝土线弹性断裂力学的任务便是通过计算和材料试验确定 K_I 与 K_{Ic} ,进而根据断裂准则判断裂缝的稳定性。

然而,大量的试验数据表明,用线弹性断裂力学方法测定的混凝土断裂韧性 K_{Ic} 具有明显的尺寸效应,即随着试件尺寸的增大,混凝土的断裂韧性也逐渐增大,这个结果并不是人们期望的稳定常数^[11]。由于当时根据线弹性断裂力学无法解释混凝土断裂韧性的尺寸效应现象,因此很多学者对线弹性断裂力学直接应用于混凝土材料的可行性产生了质疑。如1972年,Kesler等^[12]就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。Glücklich^[13]认为,临界应变能释放率要比混凝土表面能的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为单一裂缝扩展所导致的错误结论。Bazant等^[14]认为应该考虑骨料的形状、力学性能、砂浆基质的力学性能、骨料和砂浆结合面的力学性能等因素对断裂韧性的影响,而且要进行比较系统的研究,并认为在试件尺寸足够大的条件下才能真实地测出混凝土的断裂韧性,因而目前人们所做的混凝土断裂参数测定试验无法真实地反映混凝土真实的断裂特性。不仅如此,甚至有学者开始怀疑混凝土是否具有断裂韧性这个材料参数。因此,混凝土断裂力学的发展也一度陷入停滞阶段。

线弹性断裂力学理论未能实用化的根本原因是它难以描述混凝土内部结构的极端复杂性,以及它与断裂过程的关系。一方面,混凝土内部大量的微裂纹和材料