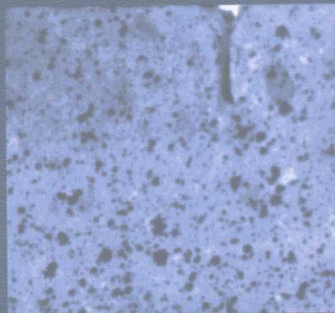
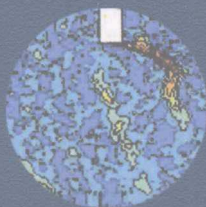


混凝土断裂的理论 与试验研究

Experimental Study and
Theory on Fracture
of Concrete

沈新普 黄志强 著
鲍文博 陈四利



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

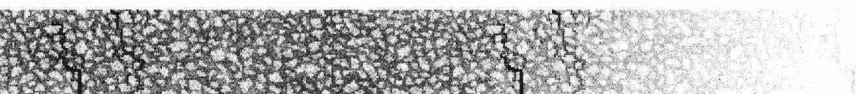
知识产权出版社
www.cnipr.com



Experimental Study and
Theory on Fracture
of Concrete

混凝土断裂的理论 与试验研究

沈新普 黄志强 著
鲍文博 陈四利



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

知识产权出版社
www.cnipr.com



内容提要

本书汇集、综合了作者多年来与国内外专家、学者共同研究取得的科研成果。书中主要利用层间界面断裂力学和连续介质的固体力学弹性理论,采用物理试验、细观力学方法、数值计算方法和有限元方法,深入研究了混凝土材料及混凝土结构的断裂失效问题。书中所述成果的理论模型、模拟及试验结果,可用于诸如混凝土大坝工程等重要的混凝土结构的力学分析中,为这类工程结构的设计、施工和维护提供有益的参考。

本书可作为材料、土木工程及相关专业高年级本科生、研究生教材,亦可供相关专业的科研人员和工程技术人员参考。

选题策划: 阳 淼 张宝林 E-mail: yangsanshui@vip.sina.com; z_baolin@263.net

责任编辑: 阳 淼 张宝林

文字编辑: 彭天放

图书在版编目(CIP)数据

混凝土断裂的理论与试验研究 / 沈新普等著. —北京:

中国水利水电出版社; 知识产权出版社, 2008

ISBN 978-7-5084-5739-0

I. 混… II. 沈… III. ①混凝土—断裂力学—理论研究
②混凝土—断裂力学—实验 IV. TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 100412 号

混凝土断裂的理论与试验研究

沈新普 黄志强 鲍文博 陈四利 著

中国水利水电出版社 出版发行 (北京市西城区三里河路 6 号; 电话: 010-68367658)
知识产权出版社 (北京市海淀区马甸南村 1 号; 电话: 010-82005070)

北京科水图书销售中心零售 (电话: 010-88383994、63202643)

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经售

中国水利水电出版社微机排版中心排版

北京市兴怀印刷厂印刷

140mm×203mm 32 开本 6 印张 162 千字

2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷

印数: 0001—4000 册

定价: 20.00 元

版权所有·侵权必究

如有印装质量问题, 可由中国水利水电出版社营销中心调换

(邮政编码 100044, 电子邮件: sales@waterpub.com.cn)

序

由 沈新普教授和黄志强副教授等所撰写的《混凝土断裂的理论与试验研究》一书是一本理论与试验并重的专著，书中介绍了利用层间界面准断裂力学和连续介质的弹性理论，采用物理试验、细观力学方法、数值计算方法和解析方法，深入研究了混凝土材料及混凝土结构的断裂失效问题。所得出的理论模型及试验结果可用于混凝土大坝等复杂且重要的混凝土结构的力学分析中，为这类工程结构的设计、施工和维护等提供参考。

本书是一本很有特色的专著，不仅具有重要的理论意义而且具有广泛的应用前景。本书主要有以下创新：

(1) 结合混凝土准脆性断裂力学和固体塑性理论，提出了一种“分段线性塑性本构模型”，建立了考虑界面裂缝中的渗透水压影响的塑性加载条件。

(2) 采用白光散斑数字成像技术，研究了混凝土试件在复合荷载作用下断裂的演化过程。

(3) 采用数值方法，研究了给定尺寸的混凝土结构中损伤过程区的长度及其演化规律。

(4) 利用多种工况模拟碾压混凝土层面成型形式及本体形式，分别对不同的碾压混凝土层面进行断裂试验，得出相应的断裂参数，并从细观

的角度模拟碾压混凝土不同层面接缝的断裂破坏过程。

本书作者长期从事固体力学的基础性研究工作，又在混凝土损伤和断裂等学科领域与欧洲著名学者和专家长期合作，取得了一系列高水平的研究成果。同时，作者又长期活跃在高等院校教学第一线，为本书的撰写提供了充分的准备和必要的第一手资料。相信本书的出版，一定会受到有关专家和工程技术人员的好评。

清华大学 教授 博士生导师

徐秉业

2008年9月

前言

随着建筑工业技术的迅速发展，大型的、复杂的混凝土结构，如混凝土大坝、核电站混凝土保护壳、地下混凝土墙和高耸混凝土建筑等不断涌现。常规的混凝土力学理论已不能满足这类混凝土结构的安全承载分析的需要，而需要利用混凝土断裂力学的有关知识分析工程中的破坏失效及稳定问题。目前混凝土断裂力学已经在国内外土木建筑类工程中得到相当广泛的应用，但是系统介绍混凝土界面断裂力学理论与试验的文献书籍却不多见。

本书汇集、综合了作者多年来与国内外专家、学者共同研究取得的相关科研成果。书中着重介绍了混凝土界面及层面断裂问题，研究手段结合了最新的数值求解方法，数值结果图形力求新颖、细致，理论也力求更加先进。本书介绍的碾压混凝土层面Ⅰ-Ⅱ复合型断裂试验及细观数值模拟计算都是作者最新的研究成果。书中介绍的白光数字散斑试验方法是目前有关研究中常用的先进试验技术，比较适合研究人员参考。

希望本书的出版，能为相关工程技术人员和高年级本科生、研究生提供一份较为有价值的混凝土界面断裂力学参考文献。

本书各章均为共同执笔。

感谢国家自然科学基金委（项目 10672106、50179002）、辽宁省自然科学基金委（项目 20071025）和沈阳工业大学对本书出版给予的资助。感谢大连理工大学宋玉普教授、吴智敏教授和唐春安教授对书中的部分试验工作和细观数值模拟计算工作给予的指导和帮助；感谢沈阳工业大学计算力学所的硕士生冯金龙同学在本书试验部分写作过程中提供的帮助。

作 者

2008 年 8 月

目 录

序

前言

第 1 章 混凝土断裂力学概况 1

1.1 断裂力学发展概况 /1

1.2 混凝土断裂力学模型 /2

参考文献 /8

第 2 章 混凝土准脆性界面断裂本构模型

数值验证 10

2.1 引言 /10

2.2 I 型界面断裂的黏性裂缝模型 /12

2.3 复合型界面断裂的黏性

裂缝模型 /17

2.4 结论 /55

参考文献 /57

第 3 章 混凝土坝体与岩基界面的断裂

力学分析 61

3.1 引言 /61

3.2	坝体与岩基间界面变量定义	/62
3.3	水压对屈服条件的影响	/63
3.4	分段线性界面裂缝模型离散描述	/65
3.5	混凝土重力坝界面断裂计算	/66
3.6	结论	/68
	参考文献	/69

第4章 混凝土局部变形位移场、应变场及其演化过程的试验 70

4.1	引言	/70
4.2	数字散斑相关方法原理和数据处理	/71
4.3	试验装置	/72
4.4	试验结果	/73
4.5	结论	/89
	参考文献	/90

第5章 碾压混凝土层面Ⅰ型断裂的试验与数值模拟 92

5.1	引言	/92
5.2	碾压混凝土层面Ⅰ型断裂破坏的 试验研究	/93
5.3	碾压混凝土层面Ⅰ型断裂破坏的 数值模拟研究	/107
5.4	结论	/120
	参考文献	/122

第6章 碾压混凝土层面Ⅰ-Ⅱ复合型断裂的试验与数值模拟 124

6.1	引言	/124
-----	----	------

6.2	碾压混凝土层面 I-II 复合型 断裂破坏的试验研究	/125
6.3	碾压混凝土层面 I-II 复合型 断裂破坏的数值模拟研究	/140
6.4	碾压混凝土层面 I-II 复合型断裂 判据	/153
6.5	结论	/154
	参考文献	/155

第 7 章 高碾压混凝土重力坝层面失稳破坏过程的数值模拟 158

7.1	引言	/158
7.2	数值模拟模型	/159
7.3	数值模拟结果	/161
7.4	结论	/164
	参考文献	/164

第 8 章 求解准脆性结构反平面剪切问题的 剪切梁模型 166

8.1	引言	/166
8.2	卸载过程的剪应力及位移解	/166
8.3	再加载过程分析	/171
8.4	关于综合响应的分析	/176
8.5	结论	/178
	参考文献	/179

第 1 章 混凝土断裂力学概况

1.1 断裂力学发展概况

断裂力学早年用于比较脆的超高强材料，由于传统的强度理论计算在工程设计中的不足，研究者们逐步认识到所谓的低应力脆性破坏主要原因是由于实际材料中存在各种缺陷和裂缝，导致材料内部局部应力重新分布，尽管整个截面上的平均应力低于材料强度，但局部应力却可能远远超过材料强度。所以，应用弹塑性理论和新的试验技术，研究材料或结构中裂缝产生和扩展的条件及规律，这就产生了新的力学分支——断裂力学。近年来，断裂力学获得空前的发展，研究范围也由金属断裂逐步拓展到其他材料，例如陶瓷、混凝土等非金属等的断裂问题，同时，断裂力学的发展还呈现出由宏观到细观^[1]，再由细观到纳观的势头^[2]。

1961 年，M. F. Kaplan^[3]首次将断裂力学概念应用于混凝土，并进行了断裂韧性试验，引起当时学术界的注意和重视。此后 30 多年，针对混凝土断裂性能的研究，有关学者进行了大量的试验研究工作。随着研究工作的不断深入，舍弃一些不符合混凝土特点的假定、理论和试验方法，采用能反映混凝土本身特点的新假定、新理论和新试验方法，从而逐渐形成了断裂力学的一个新的分支——混凝土断裂力学。

断裂力学在混凝土结构中的应用大致有以下三个方面^[4]：

- (1) 研究混凝土的断裂机理。
- (2) 判断在混凝土结构中某些严重裂缝的危害程度，例如

对闸墩裂缝、大头坝劈头缝和原子能电站预应力混凝土压力容器裂缝等进行稳定性分析。

(3) 改进混凝土结构的设计方法, 例如判定混凝土浇筑块的各种贯穿缝的稳定性和计算钢筋混凝土的对角线方向的拉裂荷载等。

此外, 人们还期望能采用断裂力学方法改进重力坝和拱坝的设计方法。

1.2 混凝土断裂力学模型

针对 J 积分等金属弹塑性断裂力学模型不适于混凝土等非金属材料, 国内外不少研究者提出许多描述混凝土断裂的非线性模型。其中有虚拟裂缝模型 (Fictitious Crack Model, 简称 FCM)^[5]、钝裂缝带模型 (Blund Crack Band Model, 简称 BCBM)、双参数断裂模型 (Two Parameters Fracture Model, 简称 TPFM)、尺寸效应模型 (Size Effect Model, 简称 SEM)、等效裂缝模型 (Effective Cracks Model, 简称 ECM)、双 K 模型 (Double-K Model) 和 K_R 曲线模型 (K_R -Curve Model), 这些混凝土非线性断裂模型基本上可以分为三种。

(1) 以线弹性断裂力学为基础, 引进通过引入某些符合混凝土非线性假设而建立的断裂模型, 如 R 阻力曲线、等效裂缝扩展长度的概念以及由 S. P. Shah 等人提出的双参数断裂模型^[6,7], 这类模型均可被称为修正的线弹性断裂力学模型。这些模型中的断裂参数, 例如等效断裂韧性、临界裂缝尖端的张开位移等, 主要是通过从试件加载断裂过程中的非线性关系, 例如 P -CMOD 曲线、 P - δ 曲线等, 利用线弹性断裂力学的计算公式, 并借助于等效裂缝长度的概念加以确定。

在这些模型中, 最典型的即是双参数断裂模型 (TPFM) 和等效裂缝模型 (ECM)。其中, 双参数断裂模型是将真实裂缝与微裂区结合起来考虑, 化作一有效裂缝, 即 $a_c = a + \Delta a$ 。然后用线弹性断裂力学的理论求解, 并与数值计算方法相结合, 其

实质在于利用有效裂缝尖端张开位移达到临界有效裂缝尖端张开位移为开裂准则。但是，闭合力的大小与应变软化曲线无关，不能探讨应变软化曲线与材料性能的影响关系。其中的主要参数是临界应力强度因子 K_{IC} 和临界裂缝尖端张开位移 $CTOD_C$ 。但是，该模型计算有效裂缝长度时仅考虑位移中的弹性部分，即按 A 处（最大荷载 P_{max} ）的柔度 C_A 来计算有效裂缝长度（见图 1.1）。没有考虑不可恢复变形对裂缝长度的贡献，因此按照该方法计算的有效裂缝长度可能偏低。为消除这一影响，TPFM 模型提出按荷载-变形曲线下降段上的 95% 最大荷载 B 处的柔度 C_B 计算有效裂缝长度 a_e 。但这一方法对试验设备要求较高。该类模型仍然以线弹性断裂力学的解析表达为目的，没有考虑 FPZ（Fracture Process Zone）上黏聚力的作用。

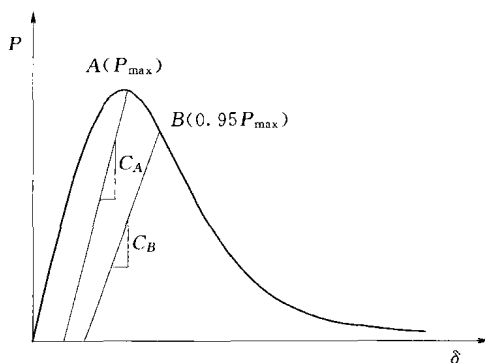


图 1.1 临界裂缝长度 a_e 计算简图

(2) 断裂模型是以 A. Hillerborg 等人为代表提出的描述混凝土断裂过程区开裂过程的缝面软化模型。这一类模型放弃了经典线弹性断裂力学中的某些基本概念，而采用混凝土断裂过程中材料的软化关系和引入该区域应变集中的某些假设来模拟混凝土裂缝的断裂过程。其中最典型的两个模型为虚拟裂缝模型 (FCM) 和钝裂缝带模型 (BCBM)。

在分析混凝土 I 型裂缝扩展时，人们不难发现，在混凝土

裂缝失稳扩展前其裂缝前缘已经出现了大量的微裂区，如图 1.2 所示。

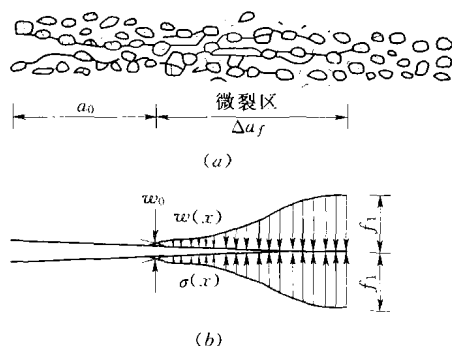


图 1.2 微裂区和虚拟裂缝模型

试验表明，该微裂区是一条带状区，混凝土裂缝的扩展总是以该微裂区为“先导”。因此，如何描述微裂区中混凝土材料的力学行为对研究混凝土裂缝的扩展规律将是十分重要的。FCM 认为，裂缝的扩展是以裂缝前端形成的微裂区为先导，在该区域内混凝土的刚度降低，裂缝前端传递应力的能力部分降低。但是该区域内由于混凝土若干骨料相连或基底黏结等原因，造成该区域传递应力能力并未消失，这部分传递的应力称为黏聚力 (cohesive force)，黏聚力有将裂缝闭合的趋势，是一种抗拉作用力。故而 FCM 又称为黏聚力模型。黏聚力与微裂区内的变形在一定程度上存在反比的关系，即微裂区变形发展越充分其传递应力的能力越弱。当微裂区发展到材料极限宽度 w_0 时，传递应力为零，微裂区成为真实的宏观裂缝，如图 1.3 所示。用 FCM 不能求出裂缝扩展的亚临界扩展长度的解析解，需要有限元法联合使用求得数值解。

图 1.4 所示的虚裂缝面上某一点所传递的软化应力 $\sigma(x)$ 与该点虚裂缝面的张开宽度 $w(x)$ 之间的关系称为材料软化曲线。通过这一曲线引进一个重要的概念断裂能 G_F ，含义为单位面积

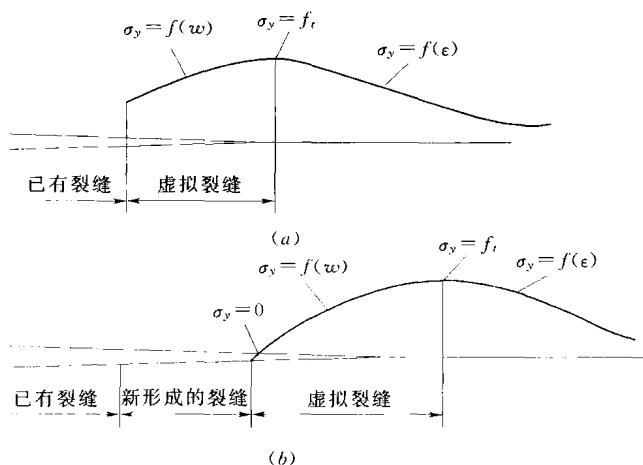


图 1.3 缝端的应力分布

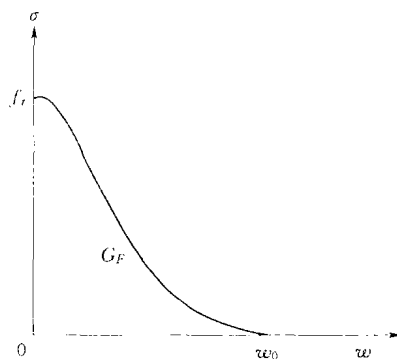


图 1.4 断裂能的含义

裂缝完全断开所吸收的能量，也就是软化曲线所包围的面积。混凝土断裂能 G_F 是描述混凝土非线性断裂的重要参数，与材料的配合比、强度和集料的特性有关。对于断裂能的求法需要采用三点弯曲梁法、紧凑拉伸法和楔入劈拉法等试验获得。对于这类模型中典型的是虚拟裂缝模型 FCM，该模型所需参数为断裂能 G_F 、抗拉强度 f_t 及应变软化曲线 ($\sigma-w$ 曲线)。

(3) 以线弹性断裂力学为基础, 考虑断裂过程区 FPZ 上黏聚力的影响而建立的混凝土非线性断裂模型。这类模型中以我国学者徐世烺^[8]教授于 1999 年提出一个简单适用的裂缝扩展断裂模型——双 K 断裂模型最具代表性。该模型吸取以往众多混凝土断裂模型的优点, 考虑各自的局限性, 是修正了的线弹性断裂力学模型。该模型具有较为完备的理论基础, 并可以借助简单的试验方法确定其断裂参数, 可望在实际工程中被推广和应用。该模型中引入了两个断裂参数: 起裂断裂韧度 K_{IC}^{mi} 和失稳断裂韧度 K_{IC}^{m} 。试验证明, 在一定尺寸条件下这两个参数没有尺寸效应, 可以很好地作为断裂参数应用于混凝土结构裂缝扩展的分析中, 已得到了广泛的关注和研究。

双 K 断裂模型可叙述为: 当缝端应力强度因子 K 达到材料的起裂断裂韧度 K_{IC}^{mi} 时, 裂缝起裂; 当应力强度因子 K 大于材料的起裂断裂韧度 K_{IC}^{mi} 且小于材料的失稳断裂韧度 K_{IC}^{m} 时, 裂缝处于稳定扩展阶段; 而当应力强度因子 K 达到或大于材料的失稳断裂韧度 K_{IC}^{m} 时, 裂缝处于临界状态并进入不稳定扩展, 即结构发生失稳断裂。其数学表达式意义如下:

当 $K = K_{IC}^{mi}$ 时, 裂缝起裂;

当 $K_{IC}^{mi} < K < K_{IC}^{m}$ 时, 裂缝稳定扩展;

当 $K \geq K_{IC}^{m}$ 时, 裂缝处于临界状态并进入失稳扩展。

对于任何形状的结构, 总可以借助与解析解和有限元以及其他数值方法求出缝端的应力强度因子 K , 根据裂缝扩展的双 K 断裂准则判断该裂缝是处于尚未起裂, 或是稳定扩展, 亦或是将要失稳的任何一种状态。这种方法可使计算分析得到简化。起裂断裂韧度 K_{IC}^{mi} 对应于起裂荷载 P_{mi} 和初始裂缝长度 a_0 , 失稳断裂韧度 K_{IC}^{m} 对应于极值荷载 P_{max} 和临界裂缝长度 a_c 。实际计算中, 可以将 (P_{mi}, a_0) 和 (P_{max}, a_c) 代入应力强度因子公式中, 计算获得起裂断裂韧度 K_{IC}^{mi} 和失稳断裂韧度 K_{IC}^{m} 。但是实际上, 起裂荷载 P_{mi} 不易获得, 因此, 起裂断裂韧度 K_{IC}^{mi} 不能直接通过计算得出。双 K 断裂模型考虑到裂缝前端断裂过程区

黏聚力的影响,认为起裂断裂韧度 K_{IC}^{ni} 和失稳断裂韧度 K_{IC}^{st} 并不是孤立存在的,它们与黏聚力引起的断裂韧度 K_{IC}^c 有如下的关系:

$$K_{IC}^{ni} = K_{IC}^{st} - K_{IC}^c \quad (1.1)$$

尽管黏聚力引起的断裂韧度 K_{IC}^c 可以从黏聚力在断裂过程区的分布通过相关手册获得计算公式,但是公式具有计算复杂性和积分的不可积性。双 K 断裂模型提出一个比较实用的简化计算公式,通过这一简化公式可以较方便地计算 K_{IC}^c , 具有较高的精度,同时避免了因为复杂的数值积分带来的误差。

以上涉及的混凝土断裂模型都是参量型的,无论是 TPFM、FCM、ECM 还是双 K 断裂模型都是一确定性参量来描述混凝土断裂特性的。另一类描述混凝土非线性断裂特性的方法认为,混凝土这类准脆性材料的断裂韧度并非常量,而是随裂缝的扩展而变化,这种变化关系即 R 阻力曲线,裂缝扩展阻力(裂缝扩展所需要的能量释放率及应力强度因子)与裂缝扩展量 Δa 的变化趋势。许多研究者如 Wecharatana 和 Shah, Hilsdorf 和 Brameshuber, Bazant, 以及 Ellices 和 Planas 都曾采用上述方法计算混凝土的 R_R 阻力曲线,用以描述混凝土结构中的裂缝扩展机理。混凝土的 K_R 阻力曲线表达式如下:

$$R = R(\Delta a) \quad (1.2)$$

式中 R ——结构在某一外荷载状态下的应力强度因子。

对于任何形状的结构,总可以借助解析解以及有限元或其他数值方法求出相应的缝端应力强度因子 R 值。 R 值可以通过试验获得。因此,混凝土试件的裂缝扩展状态可通过比较应力强度因子 K 值及 R 阻力曲线得出:当 K 值位于 R 曲线下侧时,裂缝处于稳定扩展状态,反之则裂缝失稳扩展。

通常,在计算混凝土 R 阻力曲线时,均采用裂缝扩展长度和其相应的荷载计算出各时刻对应的应力强度因子,得出阻力曲线。计算混凝土 K_R 阻力曲线目前存在两种思路,现简要介绍如下。