

341

*Fracture Mechanics of Concrete:
Material Characterization
and Testing*

混凝土断裂力学

——材料特性与试验

A. Carpinteri & A. R. Ingraffea 编
杨煜惠 黄政宇 万良芬 等译

湖南大学出版社

113197

TU37
4795

混凝土断裂力学

—材料特性与试验

A. Carpinteri A. R. Ingraffea 编

杨煜惠 黄政宇 万良芬 等译

湖南大学出版社

内 容 简 介

本丛书是混凝土断裂力学学科于1981年基本肯定之后论述最完备的专著。本卷书着重讨论混凝土的断裂力学特性和试验方法。它总结了过去500多篇有关试验方法的文献,介绍了用相干光、x射线和超声等技术检测的方法,指出了本学科还存在的问题和今后发展的方向。内容周详新颖、可供混凝土理论研究人员、大专院校师生和混凝土技术人员参考。

Fracture mechanics of concrete:

Material characterization and testing

Edited by A.Carpinteri A.R.Ingraffea

混 凝 土 断 裂 力 学

—材料特性与试验

杨煜惠 黄政宇 迈良芬等译

责任编辑:黄伯瑜

☆

湖南大学出版社出版发行

(长沙岳麓山)

湖南省新华书店经销

湖南大学印刷厂印刷

☆

787×1092 32开 9.25印张 207千字

1988年11月第1版 1988年11月第1次印刷

印数:0001—2000册

ISBN 7-314-00290-8/TU·7

定价:3.30元

前 言

本丛书是混凝土断裂力学学科于1961年被基本肯定之后论述最完备的专著。丛书现已出版五卷，即：

第一卷 断裂力学方法论：结构部件完整性的评定；

第二卷 混合式裂缝开展的问题；

第三卷 混凝土断裂力学：材料特性与试验；

第四卷 混凝土断裂力学：结构应用和数字计算；

第五卷 混凝土的力学损伤和裂缝扩展：从塑性崩溃到脆性断裂。

本书为第三卷，分为六章，都是由国际上的权威学者所撰写。

第一章由美国利哈伊大学G.C.Sih(薛昌明)教授、第二章由意大利波隆那大学A.DiTommaso教授、第三章由加拿大不列颠哥伦比亚大学S.Mindess教授、第四章由美国西北大学S.P.Shah教授、第五章由美国康乃尔大学F.O.Slate教授和K.C.Hover、第六章由瑞士联邦技术学院P.Jacquot博士撰写。

本书由杨煜惠组织翻译，参加人员有黄政宇(第一章)、万良芬(第五、六章)等。审校第一章为陈铸曾，第二至五章为涂传林，第六章为陈长熊，序言为韦怀义、陈铸曾等，最后由杨煜惠定稿。在审校工作中，杨秉章、陈明彻、范诚、朱梦良等都提过许多宝贵的意见。交稿后，由黄伯瑜任责任编辑。本书对我国混凝土断裂力学学科发展如稍有裨益，我们将感到很大的欣慰。

译文中可能有错误和不妥之处，热忱欢迎读者批评指正。

序 言

本卷讨论波特兰水泥混凝土断裂力学方面的问题。总课题是微观结构现象与宏观模型之间的关系，涉及的问题包括在广泛的尺度范围内进行观测的技术；微开裂对常规强度与变形测度的影响。最后是混凝土在荷载下的微观结构变化与其开裂抗力的关系。

现在，人们普遍地承认：以前试图把混凝土的性能强行塞入线弹性断裂力学的法则之中，而对尺度效应没有给予足够的注意。显然，比起金属、陶瓷与石料中的相应情况来说，试件尺寸、裂缝长度和张开度、与材料的特征构造尺寸之间的关系，在混凝土中是被滥用了。由于对这些关系没有根本的了解，使更多的、旨在探求难以捉摸的、单纯的断裂韧性测试，产生了更多的混乱与落空。

对这些现象的观察方面，没有人比 Mindess 教授引证得更好。他最近引用近 500 篇有关混凝土断裂的简介文献，其中大部分是有关物理试验方面的。对他的艰巨工作的报酬中谅必有冷笑和善意的指责。Mindess 教授把这些文献尽量精简地列入他所写的一章，特别侧重于用经典的线性与非线性方法处理硬化水泥浆、砂浆、混凝土、及其纤维增强材料与聚合物浸渍材料断裂的发展趋势。文章在此严肃地提出：为什么这么多人在这么长的时间内做了这么多的工作，而只拿出这么点实用的成果呢？人们有这样感觉，如果所有实验者的平均高度曾经是 6 米左右，而他们的试件也相应地变大，这

样，在如何测定韧性方面，也许会有更多一点的一致性。Mindess教授就象一个出色的律师一样，在总结，综合与修改着。其方向是明确的，即我们应正视面临的局部损伤问题，而不是将它掩埋在更多试件的砾堆之中。通过首先考查混凝土对普通加载形式的响应特点后，Sih与Di Tommaso两位教授在所撰写的章节里都提到，混凝土如果不发生通常与金属断裂相伴而来的塑性带、剪切口、表面波纹或其它局部失效现象时，那么在混凝土内会发生怎样的损伤机制与局部能量耗散呢？他们推断在许多不同尺度上见到的微开裂现象可能是非线性响应的根源。

Di Tommaso教授用分步的方法处理在非匀质材料中的积累损伤问题。第一步，研究单个微裂缝在无限砂浆基体中对混合型加载的响应。第二步是计入在砂浆与骨料的界面上或附近出现某些裂缝的必然性。显然，基体中含有很多任意分布和取向的微裂缝又是更为现实的一步。最后，Di Tommaso教授运用蒙特卡罗 (Montecarlo) 法把它们结合在一起，用一个含有砂浆与骨料分布的模型模拟积累损伤，而每个骨料都有各自的初始粘结微裂缝。

Sih教授的积累损伤方案的推动力是临界应变能密度，在一次分析研究中，运用上述通用方法，他绘制出了受弯混凝土梁的荷载——位移全曲线，请读者将它与Bazant、Hillerborg与Ingraffea等教授的方法相比较（见本丛书第四卷）。读者应该清楚地找出临界应变能密度方法中的最大容许应变、虚裂缝模型中的最大裂缝张开位移 (COD) 与Bazant模型中的钝裂缝带宽度之间的关系。Sih教授的方法成功地抓住了试件尺寸对荷载——位移响应的影响，他还对不同临界应变能密度的许多材料作出了各别的裂缝增长

抗力曲线。

上述后面的两项成就也是 Shah 教授所写的一章的目标。采用修正的虚裂缝模型，而且不用有限元模拟，他预测了试件的几何形状对裂缝尖端损伤带大小的影响。在研究这种影响和绘制裂缝增长抗力曲线时，分析了双扭曲、斜双悬臂、单边缺口弯曲梁等形状的试件，预估与量测得出的关系吻合良好。

本卷的最后两章与其它各章的侧重面不同，彼此的方向也不同。虽然两者都论述物理测试技术。Slate 教授写的是窥测混凝土内部的技术，而 Jacquot 博士的是表面观测的初阶。

由于微开裂引起的内部损伤，在前几章的宏观模型中起着重大作用。显然，这些探测技术必须适合于对内部损伤的观察与定量。为此目的，Slate 教授与 Hover 记述了X射线照相、显微镜法与染色法的发展。他们还进一步把其观测结果与微开裂对各种常规测定性质的影响联系起来，还与不同加载状态和加载速率对损伤过程的影响联系起来。

还要提醒读者，本卷所述的宏观模型都需要某些特征长度参数，以便使模型对尺度的影响敏感。由 Jacquot 博士首创的现代干涉测量技术，有希望适用于直接测量诸如最大裂缝张开位移 (COD)、 r_0 等。Jacquot 博士详述了可用于混凝土中开裂过程全场表面测量的各类光学方法，并就灵敏度、量程、误差影响和视场面积对各种方法进行了比较。最后，Jacquot 博士叙述了每一种方法用于断裂力学研究的最新经验，有些情况是首次，大多数是关于混凝土的。

本书的编者们在着手初期，从未想到需要成为如此的大册，这是对于撰写者卓越工作的致敬，也是出于题材重要性

的需要，有这么多篇幅。请读者细细品评吧！

1983年4月

Cornell University A.R. Ingraffea

University of Bologna A. Carpinteri

目 录

序言

第一章 混凝土的材料损伤力学

- 1.1 引言..... (1)
- 1.2 混凝土的强度..... (4)
- 1.3 应力和断裂分析..... (9)
- 1.4 受弯混凝土梁的损伤分析:
 软化和加载速率的影响..... (12)
- 1.5 试件尺寸的换算..... (25)
- 1.6 混凝土的长期性能和破坏..... (28)
- 1.7 应变能密度函数的局部稳定值和整体
 稳定值..... (30)
- 1.8 总论..... (35)

第二章 混凝土断裂的评定

- 2.1 引言..... (41)
- 2.2 混凝土破坏机理..... (41)
- 2.3 混凝土在荷载作用下的行为与破坏机
 理的关系..... (44)
- 2.4 用断裂力学方法所表达的混凝土力学
 模型..... (55)

第三章 水泥和混凝土的断裂韧度试验

- 3.1 引言..... (87)
- 3.2 与断裂有关的物理现象..... (87)
- 3.3 加载速率的效应..... (97)

3.4 缺口敏感性·····	(98)
3.5 对胶凝材料应用断裂力学的历史考察·····	(102)
3.6 断裂韧性参数和测试方法·····	(104)
3.7 正确的试件尺寸·····	(138)
3.8 结论·····	(141)

第四章 混凝土断裂韧性对试件几何形状及其成分的依存关系

4.1 引言·····	(163)
4.2 阻力 (R) 曲线·····	(171)
4.3 理论模型·····	(174)
4.4 单轴拉伸应力-位移关系·····	(178)
4.5 试验研究·····	(179)
4.6 试验数据的比较·····	(184)
4.7 组成的影响·····	(189)

第五章 混凝土中的微开裂

5.1 引言·····	(197)
5.2 混凝土的微开裂·····	(200)
5.3 微开裂的研究方法·····	(204)
5.4 微裂缝对混凝土性能的影响·····	(215)
5.5 较高强度混凝土开裂与较低强度混凝土开裂的比较·····	(221)
5.6 小结·····	(223)

第六章 散射相干光干涉法在混凝土断裂分析中的应用

6.1 引言·····	(232)
6.2 散射相干光干涉法在混凝土断裂分析中的适用性·····	(233)

6.3 散射相干光干涉法中条纹的含义及其 质量.....	(239)
6.4 对比性概要.....	(257)
6.5 散射相干光干涉法在混凝土断裂分析 中的应用.....	(258)
6.6 结论.....	(266)

第一章 混凝土的材料损伤力学

1.1 引言

由于开裂使混凝土失去结构完整性的现象，近年来引起了工程师和科研人员的广泛关注。在这方面的研究中，一个重大进展是断裂力学的应用。混凝土强度受内部缺陷和骨料组成的影响，如果在分析模型中考虑这些因素，混凝土强度还与尺寸大小有关。此外，混凝土强度也同其他材料一样，与加荷速度有关。但是，要确定材料损伤的阈值，先决条件是必需选择适当的断裂或破坏准则。

目前，对用哪种断裂准则描述混凝土的性能最好还存在争论，一些以变形、应力和能量为参数的现行概念尚不明确，并且常常引起互相矛盾。要考虑到表征材料的性能以及将实验数据转换到足尺结构的设计，都要求正确地了解每种理论的基本假定。特别是应在适当的尺度下，用材料损伤表示材料的不均匀性与加载速率间的相互作用，才能根据试验数据评定分析结果。大多数断裂力学理论都用断裂韧性表示匀质的各向同性的合金的断裂特性。这些假定能否原封不动地照搬到不均匀的混凝土结构中，还值得研究。

文献〔1〕已全面收集了有关混凝土开裂和断裂的文献，本书在此不再作评述。看来以往的研究可分为两类：一类是用线弹性断裂力学理论（LEFM）中的参数，表示混凝土的断裂韧性特性；另一类则着重研究裂缝形态和断裂表面，以了解材料的不均匀性对开裂的影响。骨料大小、形状和含量

不同的混凝土抵抗断裂的能力，是以往许多研究的主题。总的趋势是借用研究合金的断裂力学技术，直接应用于混凝土。纤维增强复合材料的研究中也是如此〔2〕，经常测定的是临界应变能释放率 G_c 或临界应力强度因子 K_{Ic} ，并有大量报道。但是，这些参数对荷载方向和纤维方向之间的相对方位敏感；因此，它们的意义和实用性还值得怀疑〔3〕。对于能量释放率与单个裂缝失稳不一致的体系，材料在毁坏前，缓慢的裂缝增长和局部材料损伤都会消耗额外的能量；线弹性断裂力学 (LEFM) 中的参数 G_c 或 K_{Ic} 的意义还值得推敲。严格地说，线弹性断裂力学 (LEFM) 中的断裂韧性 K_{Ic} 〔4〕应理解为材料的性能参数**，而不是材料常数。它只表示均匀各向同性材料整体失稳时单位体积突然释放的能量。材料常数应该对试样大小、加载速率比较不敏感。对于合金材料，ASTM 已明确制定了应用线弹性断裂力学 (LEFM) 的标准和方法。在有其它类型的材料损伤和缓慢裂缝增长时，应将概念、分析方法和实验技术作显著的修改。对于混凝土来说，在复合体系整体失稳发生之前，骨料的碎裂、砂浆开裂以及砂浆与骨料间的脱粘都会发生。应该指出这些不同类型破坏的次序和损伤程度与受荷历史有关。

一种采用连续介质力学模拟材料损伤的方法，是将屈服作为微观开裂引起的损伤，将断裂作为宏观开裂引起的破坏。这两种破坏形式的综合作用，会引起荷载和变形间的非线性响应；而且，局部破坏和整体失稳不再一致，而在描述

* 这里记为 K_{Ic} ，以区别于 ASTM 所定义的 K_{Ic} 〔5〕， K_{Ic} 适用于直到断裂都为线弹性的体系，而混凝土不满足这一要求。

** 其它一些材料性能参数有描述弹——塑性材料非线性性能的应变硬化系数。

混凝土的破坏中，它们之间的区别是很重要的。这就牵涉到选择一个合适的断裂判据。采用 G_c 或 K_{Ic} 和路径无关积分概念的线弹性理论基本上不适用，因为它不能区分亚临界材料损伤*的中间阶段。局部破坏和整体失稳同时发生，意味着所有存储能会像理想的脆性断裂那样突然释放。

对于三点弯曲的混凝土试件，文献〔6〕给出了分析伴有局部材料损伤的亚临界裂缝增长的方法。假设混凝土材料的应力和应变之间，具有双线性软化关系；而且假设：在局部应变能密度函数达到临界值 $(dw/dv)_c$ 时，裂缝开始缓慢增长；在达到临界应变能密度系数 S_c 时，裂缝停止增长。关系式 $r_c = S_c / (dw/dv)_c$ 给出了最后破坏净距的大小。按照应变能密度准则〔7，8〕，将系数 S 对裂缝增量作图，可生动形象地反映荷载增量、试件尺寸和断裂韧性的综合影响。用 $dw/dv = s/r$ 作为单值的破坏准则，可将塑性破坏和脆性断裂两种典型的破坏形式作为特例；这样，就可定量地分析包括屈服和断裂的一系列破坏形式。只要有一组荷载增量和已知尺寸试件的数据，由 S 与 a 的关系曲线，可得到其他荷载增量和试件尺寸时的结果。

虽然关于材料的不匀性对结构性能的影响已有广泛的研究；但是，普遍感到这一问题仍然没有研究清楚。对不均匀材料的基本分析进展缓慢，无疑，部分原因是有关微观组织与宏观参数之间的联系缺乏理论基础。未受损伤的多相体的性能，可以直接分析；例如含有球形包体或空隙的物体〔9，10〕。但是，混凝土的特点是局部的骨料和砂浆破坏，对其承

* 用一些彼此无关的破坏准则描述同一物理过程缺乏一致性，也易出现任意性；因此，迫切需要能说明亚临界裂缝增长或损伤的补充破坏准则。

载能力影响不大。因此,最重要的是了解局部已受损伤的混凝土性能以及损伤累积的机理。这方面发展的主要障碍并不是应力分析带来的复杂性,而是如何确定材料亚临界损伤对整个结构性能的影响。因此,提出了应变能密度函数 dw/dv 的局部稳定值和整体稳定值的概念,并可计算出一个长度参数“ l ”,以反映荷载、几何尺寸和材料性能的综合影响,来估计构件的稳定性能。材料和结构都应进行优化设计,使得在灾难性破坏发生之前,能够探测到亚临界损伤,并加以修补。

1.2 混凝土的强度

混凝土的性能取决于水泥、砂子和粗骨料或小石子的配合比。通常,将水泥凝胶和砂子组成的砂浆作为均匀各向同性的连续介质;但另一方面,整个混凝土则必须作为两相复合材料。当水加入混合物后,随其硬化成混凝土,内部发生着缓慢而复杂的化学反应。最终的力学性质不仅与组成有关,而且还与混凝土硬化时的环境有关。

两相体系

混凝土的弹性模量 E_c 可用简单的混合规则估计:

$$E_c = E_m V_m + E_a V_a \quad (1.1)$$

这时假设骨料与砂浆或基体粘结完好。这种理想情况在实际中不可能遇到,因为在干燥期间骨料砂浆的界面会出现裂缝。方程(1.1)中 E_m 和 E_a 为弹性模量, V_m 和 V_a 为体积率;下标 m 和 a 分别表示砂浆和骨料。 E_a 和 E_m 的实测值分布较广,在 $3E_c < E_a < 10E_c$ 和 $0.5E_c < E_m < E_c$ 范围内变化,而 V_a 则在0.5到0.7间变化。方程(1.1)可表

示为下面的经验式：

$$E_c = E_m(1 + \varepsilon V_a) \quad (1.2)$$

常数 ε 取决于骨料的大小、形状和弹性模量 E_a 。 V_a 等于 0.6 时， ε 约等于 4.0。当取 $E_m = 9000 \text{ MN/m}^2$ 、 $V_a = 0.6$ 这样一组典型值时，由方程 (1.2) 得 $E_c = 30600 \text{ MN/m}^2$ 。混凝土的弹性模量为砂浆弹性模量的三倍多。

应力应变性能

由于混凝土的抗拉强度低，大部分是做抗压试验。如图 1.1(a) 所示，在混凝土的应力——应变曲线中，没有线弹性段，从开始直到断裂，其斜率一直在不断减小；加载和卸载时，也不按同一路径变化。如图 1.1(b) 所示，当控制应

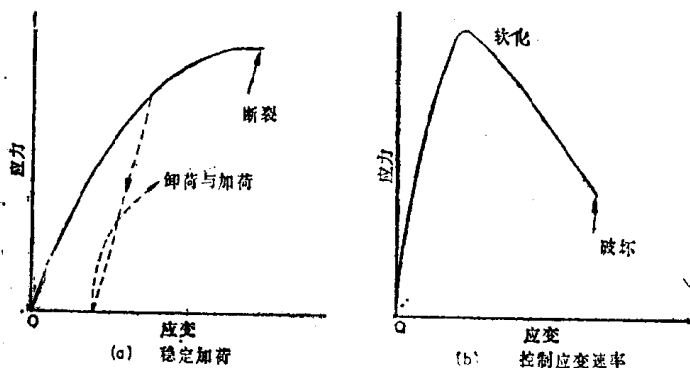


图1.1 混凝土的应力应变曲线

变速率加载时，在达到峰值应力后，应力——应变曲线会迅速下降。虽然在应力达到峰值后，试样很快出现表面裂缝，但在破坏前，试样仍能承受荷载直到很大的变形。在峰值应力附近，定义为 $\Delta V/V$ 的体积应变也达到最大值，可是，一旦出现裂缝，这个参数的意义就不明确了。同样也做了抗拉试验，经常用三点或四点弯曲的混凝土梁，以破坏时计算的

最大纤维应力作为抗拉强度。另一种方法是将正圆柱体沿直径方向劈裂，在圆柱体将要断裂的水平面上，作用有一主拉应力。

强度问题

混凝土的抗拉强度值小，但也不很小，其大小约为 $\sigma_c^{(t)} = 3.4 \text{ MN/m}^2$ (11)，比砂浆 ($\sigma_m^{(t)} = 6.87 \text{ MN/m}^2$) (12, 13) 和粗骨料的抗拉强度低。与抗拉强度相反，混凝土的抗压强度 ($\sigma_c^{(c)} = 274 \text{ MN/m}^2$) 比砂浆的抗压强度 ($\sigma_m^{(c)} = 103 \text{ MN/m}^2$) 高，这里用上标 t 和 c 来区别抗拉和抗压。过去曾做过许多尝试来解释强度间的这些差异，一般认为是加载前存在的骨料——砂浆界面间的裂缝造成的；这些裂缝是在混凝土干燥期间砂浆基体收缩产生的。界面之间的粘结较弱，在骨料的界面处常常开裂。显然，要了解混凝土的性能，应该综合考虑下列强度不等式：

$$\begin{aligned} \sigma_c^{(t)} &< \sigma_m^{(t)}; & \sigma_c^{(c)} &> \sigma_m^{(t)} \\ \sigma_c^{(t)} &< \sigma_c^{(c)}; & \sigma_m^{(t)} &< \sigma_m^{(c)} \end{aligned} \quad (1.3)$$

图1.2(a)和1.2(b)分别表示受拉和受压时的不同断裂形式。

混凝土强度的变异性与初始缺陷和裂缝增长密切相关。在图1.2(a)和1.2(b)中，砂浆基体中存在的内部缺陷称为次裂缝，其取向假设是随机的，与荷载轴的平均夹角为 $\bar{\beta}$ 。如图1.2(a)和图1.2(b)所示，在混凝土试件受单轴拉伸时，界面裂缝会沿水平方向闭合，垂直于拉力的界面裂缝则会张开。随着荷载的增加，这种作用越来越显著，直到在界面处引发裂缝。这些裂缝称为主裂缝^{*}，其取向趋于垂直拉力

* 这里骨料只起裂缝引发点的作用，忽略了骨料的碎裂，但不影响这部分定性讨论的结果。