

混凝土等 脆性材料 裂缝控制

HUNNINGTU DENG
CUIXING CAILIAO
LIEFENG KONGZHI

何 伟 著

中国环境出版社

混凝土等脆性材料裂缝控制

何 伟 著

中国环境出版社 · 北京

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土等脆性材料裂缝控制 / 何伟著.

—北京: 中国环境出版社, 2017.8

ISBN 978-7-5111-3232-1

I. ①混… II. ①何… III. ①混凝土—脆性材料—
裂缝—控制 IV. ①TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 148558 号

出 版 人 王新程
责任编辑 张于嫣
责任校对 尹 芳
封面设计 彭 杉

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67150545 (建筑分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷: 北京中献拓方科技发展有限公司
经 销: 各地新华书店
版 次: 2017 年 8 月第 1 版
印 次: 2017 年 8 月第 1 次印刷
开 本: 850×1168 1/32
印 张: 8.375
字 数: 201 千字
定 价: 28.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

混凝土作为目前应用最为广泛的工程材料之一，在建筑物建设和使用过程中均出现了不同程度、不同形式的裂纹。由于其组成结构、材料特性以及受力机理的复杂性，使得在断裂过程中表现出与金属材料截然不同的性质。一般地裂缝的扩展是结构物破坏的初始阶段，一些裂纹使结构物的强度破坏，承载力降低。同时，裂缝可以引起结构物渗漏、保护层脱落、钢筋锈蚀、混凝土碳化等，既影响了结构物的强度，又影响了建筑物的耐久性。因此，如何避免和控制混凝土结构物裂缝的产生与发展便成为工程上的技术难题。

本书主要研究了混凝土等脆性材料裂纹附近的塑性区的范围并给出了相应的表达式；运用在一定外力作用下物体内存效应力作为断裂判据推测了含复合裂纹的脆性材料的裂纹扩展时临界条件和扩展方向，并计算了试件在不同裂纹角时断裂角的大小，其结果与最大周向正应力理论判据、最小应变能密度理论判据及实验结果进行了比较。结果显示最小等效应力作为含Ⅰ—Ⅱ型复合裂纹的脆性材料的裂纹断裂判据在一定程度上是可行的。

在现有的断裂判据中，其判断参数基本上都与混凝土裂纹的应

力强度因子及断裂韧度有关，因此准确且简便地确定混凝土裂纹的应力强度因子及断裂韧度等参数就显得比较重要。根据概率断裂力学，在实际工作中只要能确定混凝土小尺寸试件的裂纹的应力强度因子及断裂韧度等，就可以比较方便地推求相应试件的裂纹的断裂参数。通过研究运用计算机模拟含裂纹混凝土试件的断裂来获得试件的断裂韧度及临界等效应力等断裂参数并与试验测定所得到的结果作了一定的比较，结果显示，这种研究可行的，这也说明研究将等效应力作为含复合裂纹混凝土试件的断裂判据在一定程度上是可行的。

本书作者为华北水利水电大学何伟博士。在项目研究与书稿完成过程中，得到了李宏魁、肖保辉的指导与帮助，特别感谢！此外，何容、余建民、郭术义、邓建绵等也参加了部分研究工作，在此一并表示感谢。

本书可供土木、水利、力学等工程领域的科技人员参考，也可作为相关专业的学生学习参考。

由于作者水平有限，本书的错误和不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2016年5月

目 录

1 绪论	1
1.1 概 述	1
1.2 发展及研究现状	4
2 混凝土裂缝与质量控制	16
2.1 混凝土的收缩	16
2.2 混凝土裂缝	20
2.3 混凝土裂缝产生原因	23
2.4 混凝土工程裂缝质量控制	28
3 混凝土等脆性材料 I—II 型复合裂纹断裂研究	34
3.1 混凝土等脆性材料复合裂纹塑性区边界	35
3.2 混凝土等脆性材料的 I—II 型复合裂纹 断裂判据研究	41
3.3 算例	48
4 混凝土裂缝断裂参数的确定	52
4.1 混凝土裂纹断裂参数的确定方法	53

4.2	混凝土试件断裂能及断裂韧度的测定实例	59
4.3	混凝土试件断裂韧度及临界等效应力的计 算机模拟实现	71
4.4	试验结果对比分析	84
5	混凝土等结构计算机分析	86
5.1	ANSYS 简介	86
5.2	网格划分的基本原则	94
5.3	结构静力分析	105
5.4	结构模态分析	153
5.5	结构稳定性分析	180
5.6	ANSYS 常用命令流	207
6	大体积混凝土温度裂缝控制方法	235
6.1	大体积混凝土结构主要特点	236
6.2	大体积混凝土结构温度裂缝研究现状	237
6.3	大体积混凝土温控措施	246
7	结论与设想	251
7.1	结论	251
7.2	研究的设想	252
	参考文献	254

1 绪 论

1.1 概 述

混凝土材料自发明以来，在现代工程中已成为最主要的工程结构材料之一。目前，广泛地使用钢筋混凝土结构的工程领域包括：建筑工程（各类民用和公共建筑，单层和多层工业厂房，高层和大跨度建筑），桥梁和交通工程（板式、梁式、拱形和桁架式等上部结构、墩台和基础、护坡、公路路面、铁道枕轨），水利工程（大坝、水电站、港口和码头、海洋平台、蓄水池和输水管道），地下工程（隧道、地铁、矿井、巷道、基础、沉井、沉箱、军用防御工事），特殊结构（电视塔、电线杆、筒仓、烟囱、机场、核反应堆压力容器）等。同时，许多混凝土结构在建筑物建设和使用过程中均出现了不同程度、不同形式的裂纹。因此，如何避免和控制结构物裂缝的产生与发展成为长期困扰工程技术人员的技术难题。建筑物的破坏一般是从裂缝的扩展开始的。如事故后建筑物上出现各种各样的裂缝，这样人们对裂缝的产生一种破坏前兆的预感。近代固体强度理论认为裂缝的扩展是结构物破坏的初始阶段，一些裂纹是使结构物的强度破坏，承载力下降。同时，结构物裂缝可以引起渗漏、保护层脱落、钢筋锈蚀、混凝土碳化等，既影响了结构物的承

载力，又影响了建筑物的耐久性。

从组成上看混凝土是由水泥和粗、细骨料及各种掺合料组成的多相复合材料，是一种典型的非均匀材料，其内部多含有微裂缝，甚至有宏观的缺陷如裂纹、偏析、夹渣、孔穴、气泡等存在。混凝土内部的这些缺陷，对混凝土结构的整体性有很大影响，降低了混凝土强度，并可能导致混凝土结构在建设使用过程中出现不同程度、不同形式的裂缝。因此研究混凝土中裂缝发生的原因和扩展规律是十分重要的，也是进行混凝土结构裂缝控制的基础。寻找避免和控制混凝土结构中裂缝的产生和发展的工程措施对工程技术人员是非常重要的。

一般来说，裂缝是指固体材料中的某种不连续现象，在学术上属于结构材料强度理论范畴。近代科学关于混凝土强度的微观研究以及大量的工程实践所提供的经验表明“裂缝是一种人们可以接收的材料特征。”建筑物的裂缝是不可避免的，但是可以控制的，可将其有害程度控制在允许的范围内。如果对建筑物的抗裂要求过严，必将付出更大的经济代价，这在大多数情况下是不必要的，也是得不偿失的。科学的要求应是将其有害程度控制在允许范围之内。而要达到这一目的，必须先深入了解混凝土的物理力学性质，探索裂缝产生的原因。由于混凝土开裂后其结构性能力学性质发生了较大的变化，裂缝的出现有一定的随机性，在裂纹的尖端存在应力释放，其分布极其不规则，这些都给裂缝的计算处理带来极大的困难。而且在研究与应用中，人们发现混凝土材料具有非常复杂的性质。如多轴应力状态下的非线性应力——应变特性；应变软化；各向异性；裂缝的发展与失稳；钢筋和混

混凝土的黏结滑动；骨料的连锁作用；钢筋的咬合作用；混凝土的徐变收缩及与时间的关系……这些都决定了建立一个能适应所有条件下混凝土特性的合适的本构模型是极其困难的。为了描述混凝土特性人们运用连续介质力学原理，而不考虑混凝土材料的微观结构，建立了非线性弹性、塑性、损伤理论、内时理论等。目前，在计算处理裂缝上主要有两种方法，一种是处理单个裂缝，有裂缝就设为单元边界；另一种是弥散裂纹，用单元开裂来代替单独裂纹。

裂缝控制的理论研究是随着科学计算水平的提高和试验技术的完善而逐步发展的。早在 19 世纪各国科学家就从结构材料强度理论的角度出发，探索混凝土开裂的基本原理，最早提出的唯象理论建立在简单基本试验的基础上，在均质、弹性、连续的假定前提下推导出材料强度的各种计算公式，后期又引进了塑性理论，为解决实际问题提供了理论依据。随着对材料微观结构的认识，又提出了混凝土结构的构造理论和分子强度理论，但这两方面的研究还远未成熟。在国际上有许多国家都有专门的研究机构从事钢筋混凝土在荷载作用下裂缝的研究工作，编制了规范如：美国混凝土协会 ACI224 委员会；英国水泥与混凝土协会 C&CA 及其规范 BS8110，BS8001；德国钢筋混凝土协会及规范 DIN1045—1972；法国规范 CCBA；欧洲混凝土 CEB；欧洲混凝土协会—国际预应力混凝土协会（CEB—FIP）。在我国一些大专院校及研究机构都做了大量的研究并编制了钢筋混凝土规范有关裂缝方面的设计规定，在工程设计中发挥了重要的作用。

1.2 发展及研究现状

混凝土作为当今社会应用比较广泛的一种建筑材料，因此对它的断裂和破坏的研究也是一个热点问题。对混凝土结构中的裂缝问题的研究主要集中在两个方面：开裂的本构模型和它们的数值方法。本构模型主要建立在拉伸强度、断裂力学、损伤力学、塑性理论或粘弹性理论的基础上。数值方法主要采用有限元方法。在应用有限元法时，裂缝的模式主要有离散裂缝模式（Discrete Cracking Model）和片状裂缝模式（Smeared Cracking Model）。

1.2.1 断裂力学方法

断裂力学是在生产实践中产生和发展起来的。断裂力学的基本概念最早是由英国物理学家 Griffith 于 1920 年在对玻璃、陶瓷等脆性材料的断裂研究中提出来的。他提出由于材料内部存在缺陷，在一定条件下，这些缺陷会发生失稳扩展，从而导致材料或结构发生破坏。但是由于这一观点不够完善并且具有它的局限性，并没有得到推广。但是随着高强度钢的广泛应用和焊接技术的发展，出现了焊接结构，导致一些低应力脆断事故的发生。断裂力学是一门主要研究含裂纹构件的裂纹平衡、稳定扩展和失稳扩展的学科，它的主要任务是研究构件裂缝尖端附近应力应变情况，掌握裂缝在荷载作用下的扩展规律，它是对经典连续介质力学的又一个重要贡献。

20 世纪四五十年代，断裂力学在金属脆断研究工作中得到了广泛和系统的应用。后来随着混凝土材料在实际工程的普遍使用，而混凝土本身是一种由集料和硬化水泥合成的非匀质复合材料，在

制作、施工以及使用等一系列过程中不可避免地会出现一些微小的裂缝或其他缺陷,这些裂缝或缺陷会在某种应力状态下逐渐扩展造成构件的断裂破坏。1959年, Neville 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 M. F. Kaplan 首先将断裂力学概念用于混凝土并进行了混凝土断裂韧性实验。此后 20 多年研究人员进行了大量的研究工作。目前已形成了一整套的研究混凝土裂缝的稳定性的方法,这就是混凝土断裂力学。在混凝土材料结构裂缝中利用最多的是线弹性断裂力学方法。线弹性断裂力学基本理论包括 Inglis 断裂理论和 Griffith 脆断理论, Irwin-Orowan 对 Griffith 理论的修正及 Irwin 断裂理论。经研究发现,裂纹尖端附近各点的应力、应变和位移均由应力强度因子 K 值唯一决定, K 值越大则裂纹尖端附近的应力、应变就越大。线弹性断裂力学已成功地运用到了分析金属材料的脆性断裂。如分析裂缝的稳定性的判据,对 I 型裂缝为: $K_I = K_{IC}$ 。对复合型裂缝, 1963 年 Erqogau 和 Sih 提出最大周向正应力理论 [$(\sigma_\theta)_{\max}$ 判据], 1977 年 Sih 提出最小应变能密度因子理论 [S 判据], 1974 年 K. Palaniswamy 提出最大能量释放率理论 [G 判据]。Nuismer 利用连续性假定了能量释放率理论同最大周向正应力理论之间的关系,结果发现最大能量释放率的方向就是出现最大周向正应力的方向。中国科学院力学研究所的同志们在分析了现有的几种复合断裂判据后指出:最大正应力判据和应变能密度因子判据的共同点在于两者都是以裂纹顶端为中心的同心圆上比较有关的力学量。这种比较的优点是具有明显的几何意义,因为所比较

的点到裂纹顶端是等距离的。但这些点在力学上并不处于相同的状态，因此单纯的比较这些点的某个力学量，缺乏明确的力学意义。他们提出了等应变能密度线上的最大正应力理论。从现有的实验资料上看，这些判据理论在预测断裂角方面是比较成功的。近 20 多年来，线弹性断裂力学的理论与试验技术方法都有了比较充分的发展，形成了较为完整的体系，并且在对有缺陷构件的脆性破坏、疲劳裂纹的扩展寿命估算和应力腐蚀等方面都得到了成功的运用，而且在裂纹尖端附近有尺寸较小的塑性区时，也可通过塑性区修正方法进行修正计算，但对于一些塑性区尺寸较大的弹塑性材料，对于大范围屈服，则需要 C. O. D（即 Crack Opening Displacement，裂缝张开位移）、 J 积分和阻力曲线等来描述断裂特性，这就是弹塑性断裂力学。C. O. D 理论是 Wells 根据裂纹尖端附近产生大范围屈服时，在裂纹尖端钝化，裂纹侧面随着外载增加逐渐张开的现象，提出来用裂纹尖端的张开位移作为控制裂纹失稳扩展的参量。为解决弹塑性条件下如何找到 C. O. D、构件工作应力和裂纹尺寸之间的关系，1960 年 Dugdale 再用 Muskhelishvili 方法对带有穿透裂纹的薄板进行拉伸试验时，发现裂纹尖端的塑性区具有扁平带状特征，从而提出了所谓的 D-M 模型，以解决具有穿透性裂纹的无限宽板的弹塑性问题。D-M 模型根据试验假定的条件是：

- 1) 具有穿透性裂纹的无限宽薄板，受单向拉伸应力的作用；
- 2) 裂纹尖端的塑性区呈尖劈形或扁平带状；
- 3) 塑性区上作用有均匀的分布力 σ_s （即塑性区上下不是自由平面， σ_s 防止两个面分开，而且在塑性区均匀分布着 σ_s 也是近似的，因为实际上在塑性区内的应力并不是常数，这里是略去了材料

硬化对应力的影响)；

4) 在塑性区的断点应力无奇异性，即应力是有限值，也即在端点的应力强度因子为零。

上述假设的 D-M 模型，相当于把裂纹长度由原来的 $2a$ 扩展到 $2a+2R$ ，而在 $2a+2R$ 以外，材料仍处于弹性状态。这样就把平面应力条件下的弹塑性裂纹问题，转化为求解在远方应力 σ 和带状区内应力 σ_s 作用下，具有 $2a+2R=2c$ 长度的裂纹的线弹性断裂力学问题。这是一个弹性化的过程，利用 D-M 模型可解决两个问题：

1) 塑性区的尺寸，即

$$R = c - a = a \left(\frac{c}{a} - 1 \right) = a \left(\sec \frac{\pi\sigma}{2\sigma_s} - 1 \right) = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{\sigma_s} \right)^2 \quad (1-1)$$

2) 张开位移 C. O. D，即

$$\delta = \frac{8\sigma_s a}{\pi E} \ln \sec \left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_s} \right) \quad (1-2)$$

裂纹尖端的张开位移 C. O. D 方法的缺陷是它不是一个严格的应力应变场变量，同时 $\bar{\delta} = \delta_c$ 盘据只有在 δ 是起裂时的 C. O. D 才有效，而起裂点和裂纹失稳扩展对于弹塑性材料是不一样的，这中间要经过一个亚临界扩展后才达到失稳点。因而 C. O. D 判据 $\bar{\delta} = \delta_c$ 不能用来预测起裂后亚临界扩展和最后失稳扩展的规律性。为解决这一问题，1968 年赖斯 (J. R. RICE) 提出了一个围绕裂纹尖端的围线积分，这个积分值与积分路径无关，为一常数，并认为这一常数的数值就反映了裂纹尖端应力场的强度，描述了这一应力应变场的特征，这就是 J 积分，它避开了求解裂纹尖端应变场的难点。 J 积分实质就是结构势能 U 对裂缝长度 a 的一阶偏导数，在小变形且

是单调加载（无卸载条件）积分回路所包围的面积 S 中没有体力时具有守恒性（积分值与路径无关）。这样我们可不用直接研究裂纹尖端复杂应力和应变场而是沿着远离裂纹尖端沿着只有弹性变形的回路上确定 J 积分。当裂纹尖端应力和应变场的强度达到裂缝扩展的临界状态时， J 积分也达到了临界值 J_c ，这样 J 积分的断裂判据为 $J = J_c$ 。由于 J 积分与路径无关，而和应力强度因子有关，故实际工作中可先用有限元法求出裂纹尖端附近各应力分量、应变分量和位移分量，然后可以入选一个便于计算线积分的回路 Γ ，计算 J 积分值，然后根据 J 积分值与 K_I ， G_I 关系计算 K_I ， G_I 的值。在大范围屈服或弹塑性条件下， K_I 已不能描述裂纹尖端附近应力场的强度， $K_I = K_{IC}$ 也不能作为断裂判据。1968 年 Hutchinson 和 Rice，Rosengren 差不多同时用全量理论，在小应变条件下证明：这时仍可以用 J 积分来作为裂纹尖端应力应变场奇异性的强度度量，这就是 HRR 奇异性理论。他们对带裂纹的幂硬化材料，用全量理论讨论了平面问题裂纹尖端附近的渐近近似解。由以上可看出， J 积分有一些明显的优点：

1) J 积分判据与其他判据（如 K 判据， δ 判据）有内在联系和一致性；

2) J 积分计算简单，也较为准确，且不需要对裂纹尖端附近进行仔细分析，仅要求确定远离尖端的弹塑性总的特性（能量），实验工作也只是测定 $P-\Delta$ 曲线，不像 C. O. D 方法必须通过几何换算而带来误差；

3) 利用 $J_K = \frac{K_K^2}{E}$ ，可以用小试样测得的 J_K 换算成 K_{IC} ，而不像线弹性中测 K 时要用大试件；

4) J 积分的理论基础比 C. O. D 判据要严格得多。

但是, J 积分也有明显的局限性和存在的问题, 主要有:

1) J 积分目前只适用平面问题, 对三维问题还不太适用;

2) 由于 J 积分是建立在塑性变形为前提的全量理论基础上的,

因此能证明其守恒性和 $J = -\frac{\partial U}{\partial a}$, 二者只有在单调加载的条件下才能满足。这样, 就把所有不是单调加载的加载方式都排除在外了。而且, 在大范围屈服条件下 (平面应力状态), 断裂前总是伴随着亚临界裂纹扩展阶段, 往往会发生瞬时卸载现象, 这是 J 积分不允许的, 故 J 积分判据只能用于属于脆性断裂的平面应变状态, 而不能用来研究先缓慢扩展 (即亚临界状态) 而后失稳扩展的平面应力状态。

3) 变形条件的限制:

在公式的推导中, 用了小变形条件, 即:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1-3)$$

而在实际结构的弹塑性断裂分析中, 裂纹尖端总是存在高应变区的。

4) J 积分的物理含义还不明确, 有人认为它代表裂纹前缘应力应变场强度; 有人认为它代表裂纹前缘的一种能量, 都有一定的道理。这反映了人们对 J 积分物理意义存在不同的看法。

混凝土是一种多相复合材料, 由于在裂缝尖端存在相对较明显的微裂纹区, 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, 传统意义上的线弹性断裂力学和适用于金属材料的断裂模型并不适合混凝土

材料, 导致其结果难以很好地吻合混凝土断裂的实际现象, 断裂力学中发展较为完善的线弹性理论不能直接应用到混凝土材料中。

近几年在研究混凝土等脆性材料的断裂现象时, 逐渐发展形成了概率断裂力学。Hunt、Jayatilaka、徐世烺等所采用的基本假设仍是“最弱环假设”。1981年 Hunt 和徐世烺分别研究了混凝土结构的裂缝及其断裂韧度 K_{IC} 的统计分布, 为研究混凝土构件的断裂概率和大型结构的可靠性打下了一定的基础。混凝土断裂韧度的尺寸效应非常明显, 对此徐世烺采用其提出的统计断裂理论作出了较好的解释, 这样就可以根据小尺寸试件的 K_{IC} 的统计分布, 去估计大尺寸结构的 K_{IC} 的统计分布, 进而计算出带裂缝的结构发生脆性断裂的相对失效概率。

根据混凝土变形的特点, 瑞典隆德工学院的 Hillerborg 教授提出了“虚拟裂缝模型”(Fictitious Crack Model, FCM), 在 Hillerborg 研究的基础上, 美国西北大学 Bazant 教授提出了“钝裂缝带模型”(Blunt Crack Band Model)。这两个模型较好地反映了混凝土裂缝端微裂区的应力和应变特点, 但两个模型都得不出解析解, 只能用数值法求解, 目前主要用有限元法求解。虽然目前这两个模型只是能计算简单构件的断裂问题, 但其广阔的应用前景已经十分明显。虚拟裂缝模型假设断裂区的宽度为零, 这样变形后断裂区的宽度等于附加变形 ω 。因此可将断裂区视为宽度为 ω 的约束裂缝。所谓约束裂缝就是该裂缝可以传递拉应力, 拉应力的数值根据裂缝的宽度按拉应变软化曲线 $\sigma-\omega$ 确定。由于断裂区均有一定的宽度, 约束裂缝并不是实际裂缝, 因而称为虚拟裂缝。虚拟裂缝模型与钢筋混凝土力学中的分离裂缝模型(Discrete Crack Model)区别就在