

混凝土
阻裂理论与试验研究

范向前 张 雷 胡少伟 陆 俊 著

科学出版社

混凝土阻裂理论与试验研究

范向前　张　雷　胡少伟　陆　俊　著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍当前国内外在混凝土断裂与阻裂方面研究的最新成果，针对混凝土断裂破坏过程，将钢筋和 FRP 布作为阻裂介质，开展钢筋混凝土与 FRP 加固混凝土断裂破坏试验与理论研究工作。本书主要内容包括标准钢筋混凝土弯曲梁阻裂特性试验与理论，非标准弯曲梁阻裂特性试验与理论，FRP-混凝土黏结界面可变形双层梁理论模型，不同胶层厚度的 FRP-混凝土黏结界面节点模型，FRP 加固混凝土结构的应力-滑移黏聚本构模型，初始缝高比对 FRP 加固混凝土阻裂特性影响的试验与理论，FRP 加固混凝土最佳阻裂长度和层数试验与理论，不同 FRP 类型加固混凝土阻裂试验与理论，以及 FRP 加固混凝土黏结界面混合型断裂试验。

本书可供水利、力学、土木、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使用，也可为相关专业的高等院校教师、研究生及高年级本科生提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土阻裂理论与试验研究/范向前等著. —北京：科学出版社, 2020.2
ISBN 978-7-03-064368-1

Ⅰ. ①混… Ⅱ. ①范… Ⅲ. ①纤维增强混凝土-研究 Ⅳ. ①TU528.572

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 021889 号

责任编辑：惠 雪 张 湾 曾佳佳 / 责任校对：杨聪敏
责任印制：张 伟 / 封面设计：许 瑞

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

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2020 年 2 月第 一 版 开本：720 × 1000 1/16
2020 年 2 月第一次印刷 印张：12 1/2
字数：250 000

定价：99.00 元
(如有印装质量问题，我社负责调换)

前　言

近年来，我国大型建设项目日益增多，以三峡大坝、东海大桥、上海洋山港和南水北调等为代表的大型工程更是标志着我国基础设施建设已经进入全新的发展阶段。混凝土作为近现代最广泛使用的建筑材料，由于其非均匀多相性，内部不可避免存在空隙、微裂缝等缺陷。另外，混凝土在浇筑过程中存在泌水作用，干燥期间水泥浆收缩受到粗骨料的限制，进一步加剧了水泥砂浆与骨料之间微裂缝的产生。但与此同时必须注意的是，混凝土材料具有抗拉强度低、韧性差、可靠性低和开裂后裂缝宽度难以控制等缺点，使许多混凝土结构在使用过程中，甚至是建设过程中出现众多不同程度、不同形式的裂缝。大坝中常见的温度裂缝若未得到有效控制，不仅会造成人们心理上的恐慌，严重的还将影响大坝的蓄水安全，渡槽中的收缩裂缝会影响结构的输水效率甚至输水安全，近海及跨海大桥中的裂缝会加速二氧化碳和氯离子等有害物质向混凝土内部的侵入，将极大危害这些结构的耐久性及使用寿命。在现有的经济和技术基础下，科学的要求是将混凝土的裂缝控制在允许的有害程度范围内，因此，从全球低碳经济的要求出发，对现有带裂缝混凝土结构工程的修复加固工作已成为建设领域的重要组成部分。

本书针对混凝土的开裂问题，开展钢筋混凝土与 FRP 加固混凝土断裂试验，得到 FRP 加固带裂缝混凝土的最佳黏结长度和最佳黏结层数，提出钢筋与 FRP 对混凝土的阻裂理论，构建 FRP 加固混凝土黏结界面滑移模型，揭示 FRP 加固混凝土损伤断裂界面的剥离规律，并结合双 K 断裂理论建立 FRP 加固混凝土荷载、有效裂缝长度及 FRP 参数间的等量关系式。

本书共 11 章，第 1 章为绪论，第 2 章为标准钢筋混凝土弯曲梁阻裂特性试验与理论，第 3 章为非标准弯曲梁阻裂特性试验与理论，第 4 章为 FRP–混凝土黏结界面可变形双层梁理论模型，第 5 章为不同胶层厚度的 FRP–混凝土黏结界面节点模型，第 6 章为 FRP 加固混凝土结构的应力–滑移黏聚本构模型，第 7 章为初始缝高比对 FRP 加固混凝土阻裂特性影响的试验与理论，第 8 章为 FRP 加固混凝土最佳阻裂长度试验与理论，第 9 章为 FRP 加固混凝土最佳阻裂层数试验与理论，第 10 章为不同 FRP 类型加固混凝土阻裂试验与理论，第 11 章为 FRP 加固混凝土黏结界面混合型断裂试验。

本书的研究工作先后得到了江苏省优秀青年科学基金项目 “CFRP 加固腐蚀混凝土缺口梁断裂理论与试验研究”(BK20180051)，国家自然科学基金项目 “FRP 加固混凝土动态断裂及其声发射特性研究”(51679150)、“FRP 加固水工混凝土结构

的界面断裂及粘聚本构关系研究”(51209102)、“基于 AE 技术的 FRP 增强混凝土缺口梁损伤断裂机理研究”(51409162)，中央级公益性科研院所南京水利科学研究院重点领域科研创新团队 “水工结构服役安全与性能提升创新团队”(Y417015)，南京水利科学研究院基金重大项目 “水工混凝土疲劳裂缝扩展机理及多尺度预测模型构建”(Y419003)，中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 “水工泄水建筑物新老混凝土粘结 II 型断裂性能研究”(HKY-JBYW-2013-04)，南京水利科学研究院出版基金的大力资助。同时，本书借鉴了国内外有关专家的研究成果，在此一并表示感谢。

本书总结作者在混凝土断裂与阻裂方面的研究成果，提出一些作者的观点和想法，这些观点和想法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。虽然作者在书稿的写作过程中付出了很多努力，但书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

范向前

2019 年 8 月 15 日

目　录

前言
第 1 章　绪论 ····· 1
1.1　概述 ····· 1
1.2　混凝土断裂力学基本理论和研究进展 ····· 2
1.3　混凝土阻裂方法及研究概况 ····· 10
1.3.1　钢筋加固混凝土断裂研究概况 ····· 11
1.3.2　纤维加固混凝土断裂研究概况 ····· 12
1.3.3　UHTCC 加固混凝土断裂研究概况 ····· 13
1.3.4　FRP 加固混凝土断裂研究概况 ····· 15
1.4　各种加固阻裂方法之间的比较 ····· 16
1.5　FRP 加固混凝土阻裂研究进展 ····· 17
1.5.1　国内研究进展 ····· 17
1.5.2　国外研究进展 ····· 19
1.6　本书主要研究内容 ····· 21
参考文献 ····· 23
第 2 章　标准钢筋混凝土弯曲梁阻裂特性试验与理论 ····· 33
2.1　钢筋混凝土断裂参数计算模型 ····· 33
2.1.1　断裂参数的计算公式 ····· 33
2.1.2　荷载产生的应力强度因子 ····· 34
2.1.3　钢筋产生的应力强度因子 ····· 35
2.1.4　临界有效裂缝长度的确定 ····· 36
2.2　试验概况 ····· 36
2.2.1　试件设计 ····· 36
2.2.2　试验材料 ····· 38
2.3　试验结果与影响参数分析 ····· 38
2.3.1　试验现象 ····· 38
2.3.2　初始缝高比对标准钢筋混凝土三点弯曲梁断裂特性的影响 ····· 40
2.3.3　配筋率对标准钢筋混凝土三点弯曲梁断裂特性的影响 ····· 44
2.3.4　钢筋–裂缝位置对标准钢筋混凝土三点弯曲梁断裂特性的影响 ····· 49
2.4　本章小结 ····· 53

参考文献 ····· 54
第 3 章　非标准弯曲梁阻裂特性试验与理论 ····· 56
3.1　试件设计 ····· 57
3.2　非标准混凝土三点弯曲梁 ····· 58
3.2.1　非标准混凝土三点弯曲梁断裂参数计算模型 ····· 58
3.2.2　非标准混凝土三点弯曲梁断裂特性 ····· 59
3.3　非标准钢筋混凝土三点弯曲梁 ····· 63
3.3.1　非标准钢筋混凝土三点弯曲梁断裂参数计算模型 ····· 63
3.3.2　非标准钢筋混凝土三点弯曲梁断裂特性 ····· 65
3.4　本章小结 ····· 69
参考文献 ····· 70
第 4 章　FRP-混凝土黏结界面可变形双层梁理论模型 ····· 72
4.1　FRP–混凝土黏结界面剪切应力分布及应力集中对黏结界面的影响 ··· 79
4.1.1　计算模型及方法 ····· 79
4.1.2　有限元模型 ····· 80
4.1.3　FRP–混凝土黏结界面应力分布 ····· 81
4.1.4　参数分析 ····· 82
4.2　黏结界面可变形双层梁模型验证 ····· 88
4.2.1　竖向荷载作用下的界面断裂试件 ····· 89
4.2.2　等效弯矩作用下的界面断裂试件 ····· 90
4.3　本章小结 ····· 90
参考文献 ····· 91
第 5 章　不同胶层厚度的 FRP-混凝土黏结界面节点模型 ····· 92
5.1　考虑胶层厚度的界面可变形节点模型的建立 ····· 92
5.1.1　平衡方程及本构方程的建立 ····· 93
5.1.2　胶层平衡微分方程建立 ····· 94
5.1.3　沿着胶层的界面相容方程 ····· 95
5.1.4　微分控制方程的建立 ····· 96
5.2　胶层厚度的界面可变形节点模型的计算 ····· 97
5.2.1　沿着胶层界面的内力分布 ····· 97
5.2.2　沿着胶层界面的应力分布 ····· 99
5.2.3　胶层应力分布 ····· 100
5.3　数值验证与比较 ····· 100
5.4　本章小结 ····· 104
参考文献 ····· 104

第 6 章　FRP 加固混凝土结构的应力-滑移黏聚本构模型……105
6.1　混合型荷载下 FRP–混凝土黏结界面断裂的新试验装置……106
6.2　FRP–混凝土单面搭接剪切试验研究……108
6.2.1　试件制作……108
6.2.2　试验方案……108
6.2.3　试验结果及分析……108
6.2.4　试验数据分析……110
6.2.5　FRP 板–混凝土的应力–滑移模型……112
6.3　FRP–混凝土单面搭接混合型试验研究……114
6.3.1　试验现象……114
6.3.2　试验数据分析……117
6.4　本章小结……119
参考文献……120
第 7 章　初始缝高比对 FRP 加固混凝土阻裂特性影响的试验与理论……121
7.1　理论分析……122
7.1.1　基本假定……122
7.1.2　FRP 应力变化方程……122
7.1.3　FRP 作用产生的应力强度因子……125
7.1.4　荷载产生的应力强度因子……125
7.1.5　断裂韧度计算公式……126
7.1.6　临界有效裂缝长度的确定……126
7.2　试验概况……127
7.2.1　试验设计……127
7.2.2　试验过程及测试内容……127
7.3　试验结果分析……128
7.3.1　初始缝高比对 F-CMOD 曲线的影响……128
7.3.2　初始缝高比对断裂参数的影响……129
7.3.3　初始缝高比对试件变形能力的影响……130
7.4　本章小结……131
参考文献……131
第 8 章　FRP 加固混凝土最佳阻裂长度试验与理论……134
8.1　试验概况……135
8.1.1　试验设计……135
8.1.2　试验测试内容……135
8.2　试验结果……136

8.3 试验结果分析 ····· 137
8.3.1 FRP 黏结长度对混凝土三点弯曲梁试件峰值荷载的影响 ····· 137
8.3.2 FRP 黏结长度对混凝土三点弯曲梁试件失稳断裂韧度的影响 ····· 138
8.3.3 FRP 黏结长度对混凝土三点弯曲梁试件起裂断裂韧度的影响 ····· 140
8.3.4 不同 FRP 黏结长度声发射特性研究 ····· 141
8.4 本章小结 ····· 142
参考文献 ····· 142
第 9 章 FRP 加固混凝土最佳阻裂层数试验与理论 ····· 145
9.1 试验概况 ····· 146
9.1.1 试验设计 ····· 146
9.1.2 试验测试内容 ····· 146
9.1.3 失稳断裂韧度的确定 ····· 147
9.2 试验结果 ····· 149
9.3 试验结果分析 ····· 150
9.3.1 FRP 黏结层数对混凝土三点弯曲梁试件峰值荷载的影响 ····· 150
9.3.2 FRP 黏结层数对混凝土三点弯曲梁试件断裂韧度的影响 ····· 150
9.3.3 FRP 黏结层数对声发射参数的影响 ····· 151
9.4 本章小结 ····· 152
参考文献 ····· 153
第 10 章 不同 FRP 类型加固混凝土阻裂试验与理论 ····· 155
10.1 试验概况 ····· 155
10.1.1 试验设计 ····· 155
10.1.2 试验测试内容 ····· 156
10.2 试验结果 ····· 157
10.2.1 起裂荷载和极限荷载的对比 ····· 157
10.2.2 破坏形式的对比 ····· 158
10.3 FRP 加固混凝土梁的阻裂加固机理 ····· 158
10.3.1 基本假定 ····· 158
10.3.2 缝尖端闭合力阻裂模型 ····· 159
10.3.3 裂缝扩展状态的判定准则 ····· 159
10.3.4 计算结果分析 ····· 160
10.4 本章小结 ····· 161
参考文献 ····· 161
第 11 章 FRP 加固混凝土黏结界面混合型断裂试验 ····· 163
11.1 4-ENF 理论分析 ····· 165

11.1.1　基于刚性节点模型……166
11.1.2　基于柔性节点模型……169
11.1.3　不同计算方法比较……170
11.2　4-ENF 试验研究……172
11.2.1　4-ENF 试验介绍……172
11.2.2　材料……174
11.2.3　4-ENF 设计……175
11.2.4　4-ENF 的界面断裂试验……175
11.3　试验结果分析与比较……183
11.4　本章小结……186
参考文献……187

第1章 绪 论

1.1 概 述

混凝土结构经历了百余年的发展，已经成为结构工程领域最为常见的结构形式之一。它具有造价低廉，受力性能好，可塑性强，施工方便等特点。即便在新型结构和新型材料蓬勃发展的今天，混凝土结构仍能以其无可替代的优势，被广泛采用。但混凝土结构也存在许多不可避免的缺陷，如混凝土的质量受施工和环境因素影响较大，这成为制约混凝土结构应用的主要因素。很多混凝土结构如住宅、桥梁、海港码头等在浇筑养护过程中的振捣不足或者温度突变，服役期间经受冻融循环等诸多因素都可能造成结构中混凝土的薄弱，从而削弱结构的抗力，尤其对于长期暴露在氯离子环境下的结构，这种现象更为普遍[1−4]。有资料显示，美国 1975 年由混凝土的各种腐蚀引起的损失达 700 亿美元，英国英格兰岛中部环形快车道上 11 座混凝土高架桥，10 年间对混凝土的修缮费达到了造价的 1.6 倍[5]。近年来，各地地震频发，震级之大，造成的财产损失和人员伤亡程度之严重令人触目惊心。为了保证混凝土结构服役期间的抗震安全，延长其有效服役寿命，人们急需通过有效的措施对既有混凝土结构进行加固处理。

早期由于纤维增强聚合材料 (fiber reinforced polymer, FRP) 造价昂贵，刚问世时仅在航空航天和汽车工业上有所应用。FRP 加固混凝土结构技术的研究始于瑞士联邦材料测试与研究实验室于 1984 年进行的碳纤维增强聚合材料 (carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 板加固钢筋混凝土梁的试验[6]。从 20 世纪 90 年代起，FRP 在土木工程中的应用一直是国内外研究的热点，其在混凝土结构加固领域的效果也被越来越多的学者所认知[7]。随着科技的进步和社会的发展，FRP 的生产成本大幅度降低，这也使 FRP 能够作为一款高性价比的加固材料出现在建筑结构加固领域。1990 年，美国国家科学基金会 (National Science Foundation, NSF) 资助了有关玻璃纤维增强聚合材料 (glass fiber reinforced polymer, GFRP) 产品的研发项目，美国混凝土协会 (American Concrete Institute, ACI) 编制并发布了 FRP 加固钢筋混凝土结构指导测试方法等规范规程[8]。与此同时，加拿大也针对 FRP 加固混凝土在干湿交替和冻融循环状态下的加固效果展开了较为长期的研究。日本在 1995 年阪神大地震后也开始了 FRP 加固钢筋混凝土结构的研究，并制定了相关规范规程。

我国对 FRP 加固钢筋混凝土结构的研究大约开始于 20 世纪 80 年代末期，清

华大学、同济大学、香港理工大学、东南大学、大连理工大学等多所高校和研究机构都对 FRP 加固钢筋混凝土结构进行了研究，并取得了很多宝贵的科研成果。我国已经编制了《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS146: 2003)[9] 等一批关于 FRP 加固钢筋混凝土结构的技术规程，并且在《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)[10] 中将“粘贴纤维复合材料加固法”作为重要的一章。目前有很多钢筋混凝土结构都采用 FRP 法进行加固 [11]，如美国 Bergstroms 机场的 Hilton 饭店，还有我国湖南溆浦、上海宝山、韶关等地的桥和引桥等，都获得了良好的加固效果。在日本的加固工程中，FRP 加固工程占到总数的 45%。在我国也有越来越多的钢筋混凝土结构采用 FRP 进行加固 [12]。可见 FRP 加固技术已经在国内外都得到了广泛的研究与应用。相信随着技术的进步和 FRP 加固理论的日趋完善，FRP 会在钢筋混凝土加固领域发挥越来越大的作用。

实际工程中对混凝土结构的加固方法有很多 [13–18]，传统的方法如增大混凝土截面法、粘贴钢板法、预应力加固法、改变结构法等都已广泛地应用于工程之中。但是传统方法存在施工周期长、耗时费力、抗锈抗腐蚀能力差等缺陷，这些都会对加固效果产生不良影响。随着科技的进步和经济的发展，一种曾经价格高昂的 FRP 悄然进入了建筑结构加固领域，以其特有的优势逐渐取代了传统加固方法，成为结构工程领域重要的加固材料之一。FRP 是多股连续纤维，采用基底材料 (如聚酰胺树脂、聚乙烯树脂、环氧树脂) 胶合后，经过特制的模具挤压成型材或将纤维编织成布，用黏结剂制成的不同形状的材料 [19]。按照纤维种类的不同，目前常见的 FRP 包括 CFRP、GFRP、芳纶纤维增强聚合材料 (aramid fiber reinforced polymer, AFRP) 和玄武岩纤维增强聚合材料 (basalt fiber reinforced polymer, BFRP) 等。与传统加固方法相比，FRP 加固法有以下优点。

(1) 轻质高强。FRP 的拉伸强度最大可以达到钢材强度的十倍以上，而重量约为钢材重量的五分之一。

(2) 施工方便。FRP 加固施工流程简单，现场无湿作业，施工周期短。

(3) 防腐性好。FRP 具有良好的化学稳定性，其加固的钢筋混凝土结构具有卓越的抗酸、碱和盐的能力，增强了结构对外界的适应能力。

(4) 使用范围广泛。FRP 可以制成片材、型材和板材，因此可以根据混凝土构件的形状和样式选择加固材料。

(5) 热膨胀系数与混凝土相近，不会由于温度改变在界面之间产生较大的黏结应力，影响加固效果。

1.2　混凝土断裂力学基本理论和研究进展

按照力学理论和材料强度进行设计的材料，计算时只要工作应力不超过材料

的允许应力就认为结构或构件是安全的[20]，而实际构件却往往会在低于设计荷载情况下发生低应力脆断现象，甚至造成灾难性事故。断裂力学正是为了弥补传统设计思想的这一严重不足而产生的。通过大量的观察和研究发现，低应力脆断事故的发生大都是因为存在于材料内原有的微小裂缝和缺陷。人们越来越认识到必须进一步研究含裂缝材料的性能，弄清裂缝尖端附近应力-应变情况，掌握裂缝在荷载作用下的扩展规律，进而提出抗断设计的方法。断裂力学就是在这种背景下产生和发展起来的。由于断裂力学能把含裂缝构件的断裂应力、裂缝大小及材料抵抗裂缝扩展的能力定量地联系在一起，它不仅能圆满解释传统力学不能解释的低应力脆断事故，而且也为避免这类事故的发生找到了解决的办法，为发展新材料、新工艺指明了方向。

早在 1920 年，Griffith 就在关于玻璃脆断的论文中建立了脆性断裂理论的基本框架，同时清楚地表述了弹性理论解析关于含椭圆孔无限平面介质的弹性解的模糊性。在 Griffith 之后的二十余年间，诸多科学家在这一学科领域播下了对断裂力学发展有启蒙作用的种子，但均没有上升到 20 世纪 40 年代末 50 年代初 Irwin 等所达到的高度。Irwin 和 Orowan 分别在同一时期内独立地将 Griffith 理论扩展到金属材料[21]，同时 Irwin 将 Griffith 理论的整体概念与一个更容易计算的裂缝尖端的应力参数联系起来。因为这两个贡献在断裂力学的发展中起着决定作用，所以线弹性断裂力学也称为 Griffith-Irwin 断裂力学。1981 年，我国编纂的第一本应力强度因子手册[22]问世，标志着线弹性断裂力学趋于成熟。

1961 年，Kaplan[23] 首先将线弹性断裂力学理论应用于混凝土构件，从此开始了广泛的混凝土断裂试验研究工作，并引起了当时学术界的广泛关注和重视[24]。此后三十多年，针对混凝土断裂性能，有关学者进行了大量的试验研究工作[25]。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、理论和试验方法，从而逐渐形成了断裂力学的一个新分支 —— 混凝土断裂力学。

混凝土在承受荷载前，内部就存在微孔穴和微裂缝。在受载后，新裂缝可能在原有裂缝基础上发展，也可能以骨料破坏形式出现，还可能是在骨料间与水泥浆基体的黏结部位产生，或是上述三种情况同时出现。因此对混凝土裂缝产生的原因、裂缝的特性、裂缝的发展过程、裂缝危害性的评估及防止裂缝的对策进行研究是相当必要和紧迫的，并且得到学术界的极大关注。对混凝土裂缝特性的研究，始于 1976 年 Hillerborg 及其同事提出的虚拟裂缝模型 (fictitious crack model, FCM)[26]，这也是混凝土断裂力学成熟的起点，之后被众多学者不断完善。混凝土自身存在不可避免的微裂缝，使混凝土裂缝前缘部分传递应力的能力削弱，这一现象称为混凝土材料的软化。材料软化后其传递应力的能力与微裂区的“宏观”变形之间存在一种反比关系，即微裂区发展越充分，其所传递的应力越小，当微裂区扩展宽度达到

材料的极限宽度 W_0 时，所传递的应力为零，并同时出现宏观裂缝。根据混凝土裂缝扩展的上述特点，FCM 认为可以将微裂区简化成一条“虚裂缝”，该虚裂缝的张开宽度 (w) 代表微裂区变形量的大小，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 $W(x)$ 之间的关系称为软化曲线。

国际断裂力学会议最早于 1965 年在日本举行，但直到 1973 年在联邦德国举办的第 3 届国际断裂力学会议，混凝土断裂力学才被设为专题研究，此后每届国际断裂力学会议都发表有关于混凝土断裂力学的文章。

国际材料与结构研究实验联合会 (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, RILEM) 于 1979 年举行了第一次混凝土断裂力学专题讨论会，各国学者就混凝土断裂力学方面的研究成果和最新进展展开交流。之后，RILEM 几乎每年举行一次混凝土断裂力学学术讨论会。特别是 1992 年，国际混凝土及混凝土结构断裂力学协会在瑞士成立，将各种混凝土断裂力学国际研讨会统一起来，并举办了首届国际混凝土和混凝土结构断裂力学学术大会，之后每三年召开一次，并遵循欧洲 — 美国 — 欧洲 — 亚洲的循环模式，目前已召开了十届。第 10 届国际混凝土和混凝土结构断裂力学学术大会于 2019 年在法国召开。

我国 20 世纪 70 年代的河南板桥水库、石漫滩水库，20 世纪 90 年代的青海沟后面板砂砾坝等相继发生溃坝，引起国内学者对断裂力学这一问题的高度重视 [27]，国内学者也开始了对混凝土断裂力学的研究。章佺等 [28]、潘家铮 [29]、于骁中和居襄 [30] 等在我国重要期刊上发表了一系列有关混凝土断裂力学的研究成果。这些论文的发表对于我国混凝土断裂力学的研究起到了很好的推动作用。随后在各单位的共同努力下，国内在混凝土断裂力学方面取得了一批有价值的研究成果。我国第 1 届全国岩土、混凝土断裂力学会议于 1981 年在湖南柘溪举行，到目前已成功举办了 16 届。

混凝土断裂力学发展到现在已经取得了很大的进展，有关混凝土断裂力学的文献逐年增加，取得了一批重要成果。早期，有关学者主要围绕混凝土断裂韧度 $K_{\mathrm{I}c}$ 进行研究。从 1961 年 Kaplan 研究这一问题开始，国内外很多学者探讨了混凝土配合比 [31,32]、龄期 [33,34]、骨料种类 [35] 和尺寸 [36,37] 等变量对混凝土断裂韧度的影响 [38,39]。

混凝土在发生失稳断裂前存在裂缝缓慢而稳定的增长阶段，Kaplan 采用染色法测量了失稳前裂缝的扩展情况，徐世烺 [40] 和田明伦等 [41] 也都分别在试验中予以证实，因而人们设想混凝土裂缝端部会形成一个微裂缝区，而不像某些金属材料那样在裂缝端部形成塑性区。混凝土裂缝端部微裂缝区的特性对于深入探讨混凝土的断裂机理、建立混凝土断裂物理模型是有重要意义的。为此，于骁中和居襄 [42] 就混凝土裂缝端部的微裂缝区进行了探讨。受裂缝端部的微裂缝区的影响，

混凝土的应力–应变曲线、荷载–位移曲线和荷载–裂缝张口位移曲线都不同程度地显示了混凝土具有一定程度的非线性。裂缝端部微裂缝区的影响应当作为混凝土裂缝端部的特性加以考虑，同时，其他部位的微裂缝改变了材料的结构，消耗了部分外力功也应考虑进去。

混凝土断裂韧度测试技术也是人们长期以来研究的课题之一。首先对于试件的形状和尺寸进行了较为深入的探讨。从 Kaplan 采用三点弯曲梁和纯弯曲梁试件以来，人们在试验中还先后采用了紧凑拉伸试件、板型试件、双扭转梁试件和双悬臂试件，现在较为一致的看法是采用三点弯曲梁试件比较简便易行，所以目前采用三点弯曲梁试件的试验居多。RILEM 于 1982 年 3 月在巴黎召开的混凝土断裂力学会议上已推荐了采用三点弯曲梁试件测定混凝土断裂韧度和断裂能的试验方法。上述研究工作为建立混凝土断裂韧度的试验规程打下了良好的基础。

在早期的研究中，人们主要采用线弹性断裂力学理论来测定混凝土材料的断裂韧度。把试验测定的最大荷载和试件的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 [式 (1-1)] 中来计算混凝土材料的断裂韧度，并应用式 (1-2) 来评估带裂缝混凝土构件的寿命和安全性。

$$K_{\mathrm{I}} = y\sigma\sqrt{a} \tag{1-1}$$

$$K_{\mathrm{I}} = K_{\mathrm{Ic}}, \qquad K_{\mathrm{I}} = y\sigma\sqrt{a} \tag{1-2}$$

式中，K_{I} 为 I 型裂缝缝端应力场的强度因子，它反映裂缝端部局部区域内应力场的强弱情况；K_{Ic} 为材料的断裂韧度，即材料发生脆性断裂破坏时应力场强度因子 K_{I} 的临界值；a 为裂缝长度；σ 为拉应力；y 为反映构件几何的几何因子。

然而，大量的试验数据显示 [43,44]，采用式 (1-1) 测得的断裂韧度存在明显的尺寸效应，表现出随尺寸增大而增大的递增关系，而不是人们期望的稳定常数 [45,46]。由于当时根据线弹性断裂力学无法解释混凝土断裂韧度的尺寸效应现象，很多学者对线弹性断裂力学移植于混凝土材料的可行性产生了质疑，混凝土断裂力学的发展也一度处于停滞阶段。随着试验测量和观察技术的发展，人们发现在混凝土裂缝的发展历程中，并不像理想均质材料一样裂缝的起裂就意味着裂缝开始失稳扩展，它们响应于两个不同的加载历史，在这期间裂缝发展要经历一个较长的稳定亚临界扩展阶段，通常把该稳定的裂缝扩展区称为断裂过程区，它是混凝土材料固有的断裂属性。事实上，线弹性断裂力学主要用来解决理想脆性材料和构件存在裂缝型缺陷时裂缝的扩展规律。实际上，裂缝尖端附近总是存在塑性区，若塑性区很小(如远小于裂缝长度)，则可采用线弹性断裂力学方法进行分析。但线弹性断裂理论不同于传统的强度理论，后者把材料看成均匀、连续的理想固体，忽略材料内部可能存在的缺陷，而前者正是把材料本身的缺陷作为前提，因此更符合材料的实际情

况。若裂缝体内裂缝尖端附近有较大范围的塑性区，就需用弹塑性断裂力学方法，即采用弹性力学、塑性力学研究物体裂缝扩展规律和断裂准则 [47]。

混凝土断裂力学从它问世以来就有着鲜明的实用目的，实际工程的迫切需要促使混凝土断裂力学研究工作蓬勃兴起。混凝土断裂力学的发展又可以不断解决工程中的实际问题，促进生产的发展。但是，混凝土作为一个多相复合材料，其断裂机理非常复杂，它的断裂过程不仅是一个力学问题，还将包括热力学、物理学、化学等问题。由于混凝土材料的复杂性，混凝土断裂力学研究中的每一步都颇为困难。然而，混凝土材料在生产中日益广泛的应用，使这项研究工作正处在异军突起、方兴未艾的阶段。随着研究工作的深入开展，许多新兴的边缘学科也在不断开拓，同时也将促进混凝土断裂力学及其应用的更大发展。

到目前为止，混凝土断裂研究大致可分为两类 [48]，一类是建立在 Griffith 理论基础上的线弹性断裂力学参数所表示的混凝土断裂特性，另一类则着重研究裂缝形态和断裂表面，以了解材料不均匀性对裂缝的影响。从本质上来讲，混凝土材料从起裂到断裂始终都不是线弹性的，也不是真正意义上的均质各向同性的。因此，线弹性混凝土断裂力学的发展遇到了不少困难。为此，人们提出了以下几种混凝土断裂破坏的非线性分析方法和模型。

1) FCM

Hillerborg 提出的 FCM 从概念上基本摆脱了金属断裂力学的影响，开创了混凝土非线性断裂研究的新思路 [29]。Hillerborg 认为裂缝的扩展以裂缝前形成的微裂区为先导，将微裂区视为一条虚拟裂缝，随着外荷载的增加，此区域内材料的刚度降低，使裂缝前端部分传递应力的能力降低。但由于骨料和基体的桥接作用，在虚拟裂缝面上作用着能使裂缝有闭合趋势的黏聚力，裂缝前端仍有传递应力的能力。黏聚力与虚拟裂缝宽度存在一定的反比关系，即黏聚力随虚拟裂缝宽度的增加而降低。当虚拟裂缝宽度达到某一极限值时，黏聚力变为零，此时宏观裂缝出现。虚拟裂缝上传递应力和虚拟裂缝宽度 (张口位移) 之间的关系为材料的软化本构关系，它反映材料上一点的应力状态，无论采用何种测试方法，其值均应相同。然而 FCM 不能直接求出裂缝扩展的亚临界扩展长度的解析解，需要与有限元相结合。尽管该模型广泛用于非线性断裂力学有限元分析中，但因其计算复杂，难以应用到实际的工程问题分析中。

2) 钝裂缝带模型

在 Hillerborg 研究的基础上，Bazant 于 1983 年提出了钝裂缝带模型 (blunt crack band model, BCBM)[49]。BCBM 将裂缝的断裂过程区看作一些密集平行的微裂缝组成的裂缝带，这些裂缝带具有一定的宽度。对于混凝土材料，裂缝带的宽度取为最大骨料粒径的 3 倍。由于裂缝带有一定的宽度，缝端也有一定的宽度，即缝端并非尖状的，而是钝状的。由于该模型将裂缝带看作正交各向异性介质，可以很

方便地确定裂缝带及结构的应力和变形。该模型能自动形成新的裂缝，而不必改变网格图，还能表示任何方向的裂缝，在使用方面比 FCM 要方便。

20 世纪 80 年代以来，以 FCM 和 BCBM 为基础的混凝土非线性断裂力学取得了迅速的发展，许多反映裂缝扩展及断裂过程区的模型也相继建立起来，主要有双参数断裂模型 (two parameter fracture model, TPFM)、等效裂缝模型 (effective crack model, ECM)、尺寸效应模型 (size effect model, SEM)。

3) TPFM

Jenq 和 Shah 通过进行线弹性断裂模型的修正，提出了 TPFM[50,51]，该模型以线弹性断裂力学为基础，引入一些符合混凝土非线性特性的假设。Jenq 和 Shah 提出了两个断裂控制参数，即临界失稳韧度 K^{s}_{Ic} 和临界裂缝尖端张口位移 $\mathrm{CTOD_c}$，并使用它们建立了断裂准则。TPFM 采用 0.95 倍最大荷载处的卸载韧度计算临界有效裂缝长度 a_c，弥补了不可恢复变形对计算裂缝长度 a 的影响；在断裂参数测试方法上，TPFM 需要复杂的加卸载过程，并需要统计回归，且其经验公式在应用上多受限制；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；该模型以线弹性断裂力学中的应力强度因子的解析表达为目的，没有考虑分布在断裂过程区内的黏聚力作用。

1990 年 RILEM 建议了 TPFM 中采用的两个断裂控制参数的测定方法 [52]。在此之后，RILEM 组织进行了大量系统的试验，结果发现控制参数 K^{s}_{Ic} 可视为材料的参数，与几何尺寸无关，但另一控制参数 $\mathrm{CTOD_c}$ 计算的结果偏差甚大，关于它是否可认为是材料参数没有给出结论。

4) ECM

最经典的两个 ECM 是 Karihaloo 和 Nallathambi 的 ECM[53,54] 与 Swartz 等的 ECM[55,56]。

Karihaloo 和 Nallathambi 的 ECM 研究的对象是三点弯曲梁，使用的是荷载–加载点位移，而不是荷载–裂缝张口位移，并采用在最大荷载时对应的割线柔度，这就意味着 ECM 考虑了塑性变形对临界等效裂缝长度的贡献，所得到的临界等效裂缝长度大于 TPFM 中线弹性等效的临界等效裂缝长度。使用临界弹性等效裂缝长度可以得到模型的等效断裂失稳韧度。

而 Swartz 等的 ECM 主要依赖于试验的观察。该模型指出，就三点弯曲梁而言，当梁高大于 203mm 且缝高比小于 0.65 时，断裂过程区就能充分发展且形状保持不变。因此，当试件破坏时，断裂过程区的长度实质上就是一条应力自由的宏观弹性裂缝。根据这一假设他们通过染色法试验测定了缝高比从 0.2 到 0.8 不同试件破坏时的平均裂缝长度，得到了破坏时裂缝长度与最大荷载的变化曲线，称其为标定曲线。