



混凝土断裂力学

徐世焯 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

混凝土断裂力学

徐世烺 著

科学出版社

北京

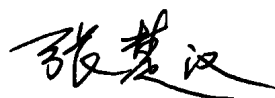
序

自从 Kaplan 于 1961 年采用 Griffith 理论研究混凝土断裂特性以来,混凝土断裂力学研究已经走过了 50 年的历程。目前,在国际上已经形成了不同的断裂模型,包括 Hillerborg 提出的虚拟裂缝模型(fictitious crack model, FCM), Bažant 提出的裂缝带模型(crack band model, CBM)和尺寸效应模型(size effect model, SEM), Jenq 和 Shah 提出的两参数断裂模型(two parameter fracture model, TPFM), Karihaloo 与 Swartz 分别提出的等效裂缝模型(effective crack model, ECM), 徐世烺和 Reinhardt 提出的双 K 断裂模型(double- K fracture model, DKFM)、基于裂缝黏聚力的 K_R 阻力曲线理论(the K_R curve based on the cohesive stress distribution in the fracture process zone)以及双 G 断裂模型(double- G fracture model, DGM)。目前,混凝土断裂力学已被用于描述混凝土断裂特性、评价混凝土结构裂缝稳定性和安全性。

该书作者徐世烺教授结合国家建设需要,为建立系统的混凝土断裂力学基础理论,长期潜心研究混凝土断裂问题,至今已经 30 余年。他的研究工作特点主要有三点:第一,开展了大量实验研究,进行了大量技术难度很大的混凝土断裂力学试验。在他完成的紧凑拉伸断裂试验中,最大试件尺寸高 3.6m、长 3.0m、厚 0.2m,由试验发现当试件尺寸高度超过 2m 时, K_{Ic} 与试件尺寸无关。该系列实验证实大体积混凝土结构的裂缝评定可适用 K 准则,线弹性断裂力学适用于大坝结构。在系统性的实验中他发现了混凝土断裂韧度尺寸效应的规律与影响机理。第二,深入开展理论分析,给出了断裂理论分析的公式,建立了具有科学原创性的理论模型。第三,开展了混凝土结构断裂过程数值仿真分析,并为实验所验证。徐世烺教授提出了在国际上具有一定影响的、基于裂缝黏聚力的新 K_R 阻力曲线和双 K 断裂模型,并提出了两端切口半边承载的纯 II 型断裂试验新方法。这些理论和试验方法近年得到美国、德国、西班牙、印度等国家学者的关注和引用。这些研究成果为混凝土断裂力学应用于工程实际和我国水工混凝土断裂试验规程的制定提供了技术基础,被我国有关单位用来作为混凝土大坝以及大体积混凝土结构裂缝的安全性评价的理论工具,在混凝土大坝的裂缝评定和控制中发挥了重要作用。

该书共 12 章,是一部系统反映混凝土断裂力学基础理论的专著。该书的出版对于运用混凝土断裂力学理论进行大体积混凝土结构裂缝控制和安全性评价,保

证大型工程安全具有重要的推动作用;对于水利、土木、交通、铁路、工业民用建筑等领域的研究、设计、施工和教学人员具有重要的指导价值和参考意义,对相关专业的大学本科高年级学生、研究生和研究人员无疑也是一本很有价值的学习参考书。



中国科学院院士

2011年2月于清华园

前 言

(一)

20 世纪 70 年代后期中国连续发生了几件事,这些事应该会被载入史书:

1975 年 8 月,河南大水,多座大坝垮塌,无数生命逝去。

1976 年 7 月,唐山大地震,又是无数生命逝去。

1976 年 1 月至 10 月,共和国三位缔造者,朱德、周恩来、毛泽东相继逝去。

1976 年 10 月,“四人帮”被抓,长达十年的“文革”结束,共和国的历史翻开了新的一页。

1977 年,高考制度恢复,各新华书店门口排起了购书的长龙,中华大地出现了学习文化科学知识、追求科学、探索真理的新风。

1978 年 1 月,徐迟在《人民文学》上发表了报告文学《哥德巴赫猜想》。

1978 年 3 月,全国科学大会召开,中国科学院院长郭沫若先生发表了《科学的春天》书面讲话。

1978 年 3 月,国家投巨资在上海建设宝钢。

1978 年 5 月,中央党校刊物《理论动态》上发表的《实践是检验真理的唯一标准》一文,引发了真理检验标准的大讨论。

1978 年 5 月,教育部恢复了研究生招生。

共和国中断了的现代化历程就在这样的背景下又重新开始了。很多人的命运也因此开始相继发生了新的转折。

(二)

在这种历史大转折的背景下,我开始了我的学术生涯。而我的学术生涯竟然和本书的书名连在了一起,这一连就是 30 年。

20 世纪 70 年代末,我国湖南柘溪混凝土大头坝出现了严重的断裂事故,为了给大坝的安全评估和修复提供科学依据,国内学术界开始了混凝土断裂力学研究。我当时茅庐未出,趁着读研究生的机会,开始了混凝土断裂力学的研究生涯。记得那时看到的论文有:《冶金建筑》杂志 1979 年第 1 期发表的章全、许念增和龚安特的论文《混凝土坝坝墩的断裂力学分析》;《水利学报》1980 年第 1 期发表的潘家铮先生的论文《断裂力学方法在水工结构设计中的应用》;《力学与实践》1980 年第 4 期发表的于晓中和居襄的论文《混凝土的断裂韧度》。这几篇论文是当时国内刚发

表的几篇很有些影响的论文。

1981年11月,我国第一届岩石混凝土断裂与强度学术会议在湖南柘溪水电站召开。那时,参会的有50多人,每个人都在会议上宣讲了自己的论文。我当时在会上宣读的论文是《混凝土断裂韧度的概率统计分析》,文中提出了目前许多学者还在使用的混凝土断裂韧度尺寸效应公式。参加会议的单位现在还能记得的有北京水利水电科学研究院、大连工学院(现大连理工大学)、中南水电勘测设计研究院(现中国水电工程顾问集团公司中南勘测设计研究院)、湖南省水利水电勘测设计研究院、华东水利学院(现河海大学)、清华大学、陕西机械学院(现西安理工大学)、武汉水电学院(现武汉大学)等。参加的学者中我依然还记得的名字有:于晓中、谯常忻、周群力、涂传林、陈德培、姚敬之、冯乃谦、徐道远、钱济成、徐世焯、章定国、田明伦、黄松梅等。《水利学报》编辑部的编辑陈凤鸣同志、《冶金建筑》编辑部的编辑陈世铭同志也都参加了会议。会后,《水利学报》杂志社编辑出版了混凝土断裂力学论文专辑,《冶金建筑》也发表了一些论文,这对于推动混凝土断裂力学的发展起了很好的推动作用。随后,研究工作的不断深入开展,对于柘溪大坝裂缝的稳定性与安全性分析以及加固修复方案的制订都发挥出关键作用。柘溪大坝裂缝的稳定性与安全性问题的解决,对国内混凝土断裂力学的研究是一个很大的鼓舞。

1982年,我编写了一本《混凝土断裂力学》研究生教材。1983年3月该教材由大连工学院(现大连理工大学)教材科印刷供学校内部学生使用。从1983年3月开始我一直为大连工学院(现大连理工大学)结构工程专业硕士研究生讲授,直到1992年出国后,该课程开始由其他老师接着讲授。由于当时还有许多学术问题没有研究清楚,这本教材就未交出版社正式出版,我一直希望等理论体系较为系统后再正式出版,结果这一等用了将近30年。目前,读者读到的这本书中还能看到30年前的书稿中部分内容的痕迹。

当时国内外所有的试验结果都表明,采用实验室常规试件尺寸,按照线弹性断裂力学的公式用最大荷载和初始缝长求得的断裂韧度值不是一个材料常数,有着明显的尺寸效应。为回答线弹性断裂力学能否直接应用于混凝土大坝结构裂缝分析这样的国家工程建设急需解决的问题,在水利水电科学基金的资助下我完成了国际上最大规模最大试件尺寸高度为3.6m、长度为3.0m、厚度为0.2m的混凝土断裂力学系列实验,我发现当试件尺寸高度超过2m时,由线弹性断裂力学方法确定的混凝土断裂韧度 K_{Ic} 没有尺寸效应,线弹性断裂力学的 K 准则可适用于混凝土大坝结构。

尽管混凝土双 K 断裂理论的成熟是在1999年,但是其基本概念是我们于1987年在我国核反应堆安全壳学术会议上提出的。1986年,我前往贵阳水电勘测设计研究院参加国家七五重点科技攻关项目“高混凝土坝裂缝评定与防治技术”的公开招标,经过公开答辩,专家评审,一举中标。在研究该项目中,将100多吨的乌

江东风拱坝的混凝土材料从贵阳运到大连,采用紧凑拉伸、三点弯曲、楔入劈拉、直接拉伸试件试验进行了断裂韧度实验,通过试验直接测定高坝混凝土双 K 断裂参数,针对东风拱坝混凝土采用光弹性贴片技术和激光散斑技术观测了混凝土裂缝失稳前裂缝扩展过程,提出混凝土起裂断裂韧度和失稳断裂韧度等相关参数,供评定裂缝稳定性时应用,并尝试应用于乌江东风高混凝土薄拱坝裂缝安全评定与防治,接着对东风高混凝土薄拱坝施工全过程进行了仿真分析。分析结果表明,坝踵和左拱端 $1/3$ 至 $1/2$ 坝高下游面存在高拉应力,容易出现裂缝。但是,进一步采用混凝土断裂理论进行裂缝稳定性评定,发现其裂缝深度扩展至 7m 时即趋于稳定,不超过防渗帷幕线,不危及大坝防渗体系。此类裂缝可以不作修复处理,拱坝可以安全运行。现东风拱坝已在正常蓄水位下安全运行 18 年,说明所采用双 K 断裂准则对大坝裂缝进行的安全评定是可信的。

国际上最早开始混凝土断裂力学研究的是南非的南安普敦大学的 Kaplan 教授,在 1961 年他开始采用断裂力学方法测定混凝土断裂韧度参数。但是,到 20 世纪 70 年代,国际上许多学者的试验结果都表明,混凝土断裂韧度存在着明显的尺寸效应,认为线弹性断裂力学不能直接应用于混凝土结构。于是,在 1976 年,瑞典 Lund 大学的 Hillerborg 教授绕开线弹性断裂力学的概念,假定混凝土裂缝的断裂不是由于裂缝尖端的应力奇异性引起的,而是引进了混凝土裂缝断裂过程区长度、混凝土直接拉伸软化特性曲线与混凝土断裂能三个新概念,从而提出了著名的虚拟裂缝模型(fictitious crack model,FCM)。虚拟裂缝模型的显著优点是可以直接应用有限单元法对混凝土非线性特性进行数值模拟,在混凝土断裂过程的研究领域获得了广泛应用。但由于该模型没能给出解析解,实际应用中工程师会觉得很不方便。与虚拟裂缝的思路和做法相近,1983 年美国 Bazant 教授提出了裂缝带模型(CBM),他假定混凝土的裂缝不是数学意义上的一条线,而是有着一定几何宽度的裂缝带,这种模型更便于有限单元法的实施,因而很多有限单元程序采用了裂缝带模型。它们的出现对于混凝土结构开裂过程的有限元法数值模拟的发展起到了很好的促进作用。这两种模型所采用的参数都需要通过断裂过程区消耗的能量,即断裂能作为表征材料特性的基本参量,然而大量实验研究结果表明,混凝土断裂能存在明显的尺寸效应。随后,国际上又有学者陆续提出了两参数断裂模型(TPFM)、等效裂缝模型(ECM)和尺寸效应模型(SEM),试图采用解析方法考虑混凝土非线性特性。这些模型的共同特点是只考虑混凝土临界断裂特性,没有考虑混凝土断裂的全过程特性,与大量试验观测到的混凝土裂缝前缘存在着的断裂过程区及裂缝断裂过程的特点不尽相符。

随着研究工作的深入和观测分析手段的进步,大量试验发现,混凝土的断裂特性表现出具有时效历程的断裂过程,而不是集中在一个瞬时状态发生的。混凝土断裂过程区可分为起裂、稳定扩展和失稳断裂三个不同阶段,由于骨料齿合作用断

裂过程区上存在着阻止裂缝扩展的黏聚力,其可使裂缝尖端应力强度因子值显著减小,但不能使裂缝尖端的应力奇异性消失。为了能够正确地描述混凝土断裂性能,我和 Reinhardt 于 1998 年在国际上提出了一个可以表征混凝土裂缝扩展全过程的新断裂理论——基于裂缝黏聚力的 K_R 阻力曲线。由于新 K_R 阻力曲线上存在两个显著的特征点,一个与混凝土裂缝起裂状态相对应,另一个与裂缝临界失稳状态相对应,作为便于工程应用的解析分析工具和新 K_R 阻力曲线理论的简化应用,可演化出混凝土双 K 断裂准则,对我们早期提出的混凝土双 K 断裂准则提供了很好的理论支撑和佐证。1999 年和 2000 年我们在国际上正式提出了混凝土双 K 断裂模型及其一套较为完整的双 K 断裂参数计算理论。此后,为了使得结构工程师在分析中也可以应用能量释放率参量,并且作为双 K 断裂模型与新 K_R 阻力曲线理论的完善和补充,我们提出了混凝土双 G 断裂模型与新 G_R 阻力曲线理论。由此,我国学者自己提出的混凝土断裂模型在国际混凝土断裂力学领域也有了一席之地。经过我们自己的对比研究以及国际同行学者后来对我们提出的理论模型进行的跟踪研究表明,双 K 断裂模型与双 G 断裂模型,新 K_R 阻力曲线理论与新 G_R 阻力曲线理论存在等价性。同时经过理论分析发现,影响混凝土断裂韧度尺寸效应的机理是混凝土宏观裂缝前缘存在的断裂过程区以及其上作用的黏聚力。由于双 K 断裂参数与新 K_R 阻力曲线的计算正确地考虑宏观裂缝前缘存在的断裂过程区以及其上作用的黏聚力,因而当试件高度大于 200mm 时,所获得的双 K 断裂参数与新 K_R 阻力曲线从工程意义上认为基本上不存在明显的尺寸效应,其参量可以正确反映材料的断裂性能。这样,从理论和试验两个方面较好解决了通过实验室常规试件尺度测量混凝土材料断裂性能的技术“瓶颈”。因而,2005 年我国出版制定了我国第一部混凝土断裂试验规程——《水工混凝土断裂韧度试验规程》(DL/T 5332—2005),该规程以双 K 断裂模型作为理论基础和制定依据。随着混凝土断裂力学基础理论的逐步发展和成熟,双 K 断裂模型在工程中的应用也逐步取得成效。

本书的目的在于尽可能反映混凝土断裂力学的基础理论,特别是各种在国际上有一定影响的断裂模型。混凝土断裂力学已经历了 50 年的发展历程,各国学者在这段艰辛的研究历程中取得了许多可喜的研究成果。我在这个领域艰苦地跋涉了 30 余年,觉得有义务对本领域的主要成果作一个较为系统的总结,这就是本书写作的一个主要动力。

在本书就要付梓之际,我首先想到的是感谢。感谢我在硕士和博士期间的导师赵国藩院士。老先生在 20 世纪 80 年代经常出国交流,带回许多国外学者的研究资料和报告,使得当时很难有出国交流机会的我得以及时了解国际最新发展动态,同时老先生对我给予了很大的信任和积极支持,使得我能够把自己的一些自认为新颖的设想付诸实践,从而使自己体会到了研究工作中的快乐和喜悦。同时,也

非常感谢德国斯图加特大学的 Hans W Reinhardt 教授, 他为我 在斯图加特大学工作期间提供了优良的工作条件, 使得我在风景秀丽、绿茵如毡、森林密布的德国工业和经济最发达城市, 度过了较长的在国外研究工作的美好时光, 在自由而宽松的研究环境里得以潜心研究, 提出了本书里所描述的相关理论和试验方法。还要感谢的是本领域早期的组织者于晓中老先生, 他对我真诚的关心与培养、指点与帮助, 使我感受到了研究集体的温暖。

在研究中, 钱令希老先生也给予了我大力鼓励和关心, 使我感受到老一辈长者的风范; 在英国威尔斯大学卡迪夫学院作高级访问学者期间, 巴尔教授给予了我真诚的帮助, 感谢他们, 愿他们安宁。

我还要感谢我的学生, 同他们在一起, 教学相长, 在我的研究工作中有他们的辛劳和贡献。在本书的形成过程中, 张秀芳博士、赵艳华博士、王建敏博士、朱榆博士、卜丹硕士、吴瑶博士参与了资料收集整理工作; 王巍硕士参与了本书部分稿件打字描图工作; 李庆华博士、董丽欣博士、曾璐硕士、张力硕士、刘金涛硕士、戴清如硕士参与了书稿格式统一、文字订正、插图修改和参考文献校核工作, 在此对他们表示深深的感谢。

当然在过去多年工作中, 许多同事也给予了我很多帮助, 在此也对他们表示由衷的感谢。

此外, 我还要感谢国家自然科学基金委员会为本人提供的国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金重点项目和面上项目; 感谢水利水电基金会为本人早期研究工作提供的基金; 感谢德国科学基金会(DFG)、德国洪堡基金会、霍英东教育基金会、教育部长江学者奖励计划对本书成果所提供的支持与资助; 感谢科技部国家科学技术学术著作出版基金对本书的资助。

最后, 特别感谢中国科学院院士张楚汉院士欣然为本书作序。

徐世焱

2011年1月于杭州西子湖畔

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 混凝土的基本特性和破坏机理	1
1.1.1 混凝土的基本特性	1
1.1.2 混凝土的破坏过程和机理	3
1.2 传统强度理论同断裂力学的关系	6
1.2.1 传统强度理论的基本假定和应用范围	6
1.2.2 断裂力学的基本假定和应用范围	6
1.2.3 传统强度理论与断裂力学的互补关系	7
1.3 混凝土断裂力学研究历史简介	8
参考文献	20
第 2 章 线弹性断裂力学	26
2.1 应力强度因子和断裂韧度的概念	26
2.2 裂缝开展的三种基本类型	27
2.2.1 张开型裂缝(Ⅰ型)	27
2.2.2 滑开型裂缝(Ⅱ型)	27
2.2.3 撕开型裂缝(Ⅲ型)	28
2.3 Ⅰ型裂缝的应力、位移场	28
2.3.1 平面问题的弹性方程	28
2.3.2 复变函数	29
2.3.3 Westergaard 应力函数	32
2.3.4 双向拉伸Ⅰ型裂缝的应力、位移场及应力强度因子的计算	34
2.4 Ⅱ、Ⅲ型裂缝前端的应力、位移场	40
2.4.1 Ⅱ型裂缝问题(滑开型)	40
2.4.2 Ⅲ型裂缝问题(撕开型)	42
2.5 复合型裂缝应力场强度因子计算	43
2.6 能量释放率	47
2.6.1 能量释放率 G 的定义	47
2.6.2 能量释放率 G 和应力强度因子 K 的关系	48

2.6.3	能量释放率 G 的可测性	51
2.7	复合型断裂判据	52
2.7.1	最大拉应力判据 ($\sigma_{0\max}$ 判据)	52
2.7.2	最大能量释放率判据 (G 判据)	55
2.7.3	应变能密度因子判据 (S 判据)	57
	参考文献	62
第3章	弹塑性断裂力学	63
3.1	裂缝尖端的塑性区	63
3.2	裂缝张开位移	66
3.2.1	小范围屈服条件下的裂缝张开位移	66
3.2.2	大范围屈服条件下的裂缝张开位移	67
3.2.3	用带状模型求裂缝张开位移	68
3.3	J 积分	70
3.3.1	J 积分的定义	70
3.3.2	J 积分的积分路径无关性	71
3.3.3	线弹性范围内 J 积分与 G_I 和 K_I 的关系	73
3.3.4	J 积分的实验测定	75
3.4	非线性能量法	77
3.5	等效能量法	82
	参考文献	83
第4章	混凝土断裂过程区及其软化特性	85
4.1	混凝土的微结构	85
4.1.1	硬化水泥浆体	86
4.1.2	水化产物对水泥浆体性能的影响	89
4.1.3	集料	90
4.1.4	水泥浆体-集料界面与界面过渡区	91
4.2	混凝土断裂的机理	94
4.2.1	激光散斑法研究混凝土裂缝的稳定扩展过程	95
4.2.2	光弹贴片法研究混凝土裂缝扩展过程	100
4.3	混凝土断裂过程区的试验观察	102
4.3.1	激光散斑法	103
4.3.2	光弹贴片法	105
4.3.3	扫描电子显微镜	106
4.3.4	X射线法	107
4.3.5	云纹干涉法	109

4.3.6 声发射技术	109
4.4 断裂过程区的软化关系	111
4.4.1 直线型	112
4.4.2 折线型	113
4.4.3 曲线型	116
4.4.4 软化关系的比较	117
4.4.5 软化关系对断裂参数的影响	122
4.4.6 结论	126
参考文献	126
第5章 混凝土非线性断裂力学研究的若干早期模型	129
5.1 黏聚裂缝模型	130
5.1.1 虚拟裂缝模型	131
5.1.2 裂缝带模型	152
5.2 等效弹性裂缝模型	170
5.2.1 两参数断裂模型	171
5.2.2 尺寸效应模型	192
5.2.3 等效裂缝模型	207
参考文献	217
第6章 混凝土双K断裂模型	224
6.1 引言	224
6.2 裂缝的扩展过程	225
6.2.1 电阻应变片法	225
6.2.2 光弹贴片法	227
6.2.3 激光散斑法	228
6.2.4 声发射法	231
6.3 混凝土双K断裂准则	232
6.4 混凝土双K断裂参数的直接测试方法	232
6.4.1 起裂荷载的确定	233
6.4.2 起裂断裂韧度的确定	235
6.4.3 试件弹性模量的确定	235
6.4.4 临界等效裂缝长度的确定	236
6.4.5 失稳断裂韧度的确定	237
6.5 混凝土双K断裂参数的计算理论	237
6.5.1 应力强度因子的叠加计算及黏聚韧度的计算	237
6.5.2 混凝土双K断裂参数的确定	240

6.6	混凝土双 K 断裂参数的简化计算	241
6.6.1	简化的计算三点弯曲梁等效裂缝长度的经验公式	241
6.6.2	简化的计算三点弯曲梁 K_{Ic} 的经验公式	242
6.6.3	简化公式的试验验证和比较	244
6.7	混凝土双 K 断裂参数的权函数计算方法	246
6.7.1	权函数方法	246
6.7.2	单边切口有限宽板的权函数	247
6.7.3	黏聚断裂韧度的确定	250
6.7.4	权函数方法的验证	250
6.8	混凝土双 K 断裂模型与两参数断裂模型比较	258
6.9	尺寸效应预测分析	259
6.10	混凝土双 K 断裂参数的影响因素分析	262
6.10.1	试件尺寸对混凝土双 K 断裂参数的影响	262
6.10.2	试件强度对混凝土双 K 断裂参数的影响	263
6.10.3	骨料粒径对混凝土双 K 断裂参数的影响	264
6.10.4	初始缝高比对混凝土双 K 断裂参数的影响	265
6.10.5	软化曲线形状对混凝土起裂断裂韧度的影响	265
6.10.6	混凝土基体材料的双 K 断裂参数	267
	参考文献	268
第7章	混凝土坝静水压力下双 K 断裂参数研究	271
7.1	水力劈裂的概念及研究意义	271
7.2	水压下楔入式紧凑拉伸试验研究	273
7.2.1	楔入式紧凑拉伸试验原理	273
7.2.2	试件制作工艺	276
7.2.3	水压密封装置	279
7.2.4	试验过程	281
7.2.5	试验加载方式	284
7.3	水力劈裂下缝内水压力分布扩展研究	287
7.3.1	静水压力下裂缝扩展的介绍	287
7.3.2	水压施加曲线和裂缝内水压分布图	288
7.3.3	扩展规律模拟	289
7.4	静水压力下双 K 断裂参数的计算	296
7.4.1	试验现象	297
7.4.2	起裂荷载韧度的确定	298
7.4.3	失稳断裂韧度的确定	302

7.4.4 结果分析	307
参考文献	309
第 8 章 混凝土类准脆性软化材料断裂全过程的裂缝扩展 K_R 阻力曲线	312
8.1 基于虚拟黏聚力模型的裂缝扩展 K_R 阻力曲线基本模型	312
8.2 K_R 阻力曲线计算理论	313
8.2.1 无限长条板 K_R 阻力曲线确定的积分解析法	313
8.2.2 无限长条板 K_R 阻力曲线确定的权函数法	317
8.2.3 线性渐进叠加假定	319
8.2.4 等效裂缝长度的确定	323
8.2.5 计算 $\sigma(w)$ 与 $\sigma_s(\text{CTOD}_c)$	323
8.2.6 标准三点弯曲梁的应力强度因子曲线	324
8.3 K_R 阻力曲线的计算与分析	324
8.3.1 算例	324
8.3.2 解析法计算裂缝扩展阻力曲线(K_R 阻力曲线)	328
8.3.3 权函数法计算裂缝扩展阻力曲线(K_R 阻力曲线)	332
8.4 判定裂缝扩展稳定性的 K_R 阻力曲线法	334
8.5 裂缝的非正常扩展对 K_R 阻力曲线尾部形状的修正	341
参考文献	346
第 9 章 混凝土双 G 断裂模型	349
9.1 模型的提出	350
9.1.1 线弹性断裂力学中的能量释放率	350
9.1.2 线性渐进叠加假定(linear asymptotic superposition)	352
9.1.3 混凝土断裂能量判据模型的建立	353
9.2 双 G 断裂参数公式的推导	354
9.2.1 双 G 断裂参数的确定	354
9.2.2 断裂过程区上黏聚力软化分布模型	355
9.2.3 断裂过程区的能量消耗	356
9.3 双 G 断裂参数和双 K 断裂参数的比较	358
9.3.1 三点弯曲梁试件双 K 参数的确定	358
9.3.2 三点弯曲梁试件双 G 参数的确定	361
9.3.3 三点弯曲梁试件双 K 参数与双 G 参数的比较	364
9.3.4 楔入劈拉试件双 K 参数的确定	366
9.3.5 楔入劈拉试件双 G 参数的确定	370
9.3.6 楔入劈拉试件双 K 参数与双 G 参数的比较	373
参考文献	374

第 10 章 混凝土准脆性软化材料断裂全过程的裂缝扩展 G_R 阻力曲线	377
10.1 混凝土 R 阻力曲线的确定方法	378
10.1.1 Irwin 的 R 阻力曲线理论	378
10.1.2 R 阻力曲线确定方法	381
10.2 基于裂缝黏聚力的 G_R 阻力曲线理论	383
10.2.1 G_R 阻力曲线模型构建的理论依据	383
10.2.2 基本假设	385
10.2.3 G_R 阻力曲线模型的理论框架	386
10.2.4 各部分消耗能量的确定	386
10.3 G_R 阻力曲线的试验分析	392
10.3.1 试验算例	392
10.3.2 G_R 阻力曲线的计算与分析	393
10.3.3 G_R 阻力曲线与软化曲线的相关性	396
10.3.4 软化曲线形状对 G_R 阻力曲线的影响	397
参考文献	403
第 11 章 混凝土 I 型断裂参数的测定	406
11.1 Hillerborg 断裂能的测定	406
11.1.1 试件制作和测试过程	406
11.1.2 断裂能的确定	407
11.1.3 讨论	408
11.2 两参数断裂模型 K_{Ic}^* 和 $CTOD_c$ 两参数的确定	410
11.2.1 试件制作和测试过程	410
11.2.2 两参数 K_{Ic}^* 和 $CTOD_c$ 的计算	411
11.2.3 讨论	412
11.2.4 两参数 K_{Ic}^* 和 $CTOD_c$ 确定的峰值荷载法	415
11.3 尺寸效应模型 G_f 和 c_f 两参数的确定	417
11.3.1 试件制作和测试过程	417
11.3.2 两参数 G_f 和 c_f 的计算	418
11.3.3 讨论	419
11.4 等效裂缝模型两参数 K_{Ic}^* 和 a^e 的确定	421
11.4.1 试件制作和测试过程	421
11.4.2 两参数 K_{Ic}^* 和 a^e 的计算	422
11.4.3 讨论	424
11.5 σ - w 曲线的测定	427
11.5.1 直接法	427

11.5.2 间接法	429
11.6 楔入劈拉试件确定断裂能	431
参考文献	433
第 12 章 混凝土 II 型断裂及应用	436
12.1 混凝土 II 型断裂几何形式	437
12.2 混凝土 II 型断裂韧度的确定	439
12.2.1 双边缺口单边对称加载试件形式	439
12.2.2 数值模拟	440
12.2.3 II 型应力强度因子	448
12.2.4 混凝土 II 型断裂韧度试验	452
12.3 混凝土 II 型断裂能	474
12.3.1 混凝土 II 型断裂能的测定试验	474
12.3.2 剪切裂缝发展过程的观察	475
12.3.3 混凝土 II 型断裂能的确定	479
12.4 混凝土 II 型断裂韧度在钢筋混凝土梁中的应用	481
12.4.1 无腹筋大剪跨比 RC 梁的抗剪机理	483
12.4.2 无腹筋大剪跨比 RC 梁剪切强度的计算公式	485
12.4.3 无腹筋大剪跨比 RC 梁的剪切强度	489
参考文献	495
附录 A 黏聚韧度 K_{Ic}^c 数值积分与解析公式计算的无量纲结果比较	502
A1 积分式(6.12)与式(6.20)计算 $K = -K_{I1}^c / f_t \sqrt{D}$ 结果的比较表 $V_0 = 0.2, \beta = 0.1 \sim 0.5$	502
A2 积分式(6.12)与式(6.20)计算 $K = -K_{I1}^c / f_t \sqrt{D}$ 结果的比较表 $V_0 = 0.3, \beta = 0.1 \sim 0.5$	504
A3 积分式(6.12)与式(6.20)计算 $K = -K_{I1}^c / f_t \sqrt{D}$ 结果的比较表 $V_0 = 0.4, \beta = 0.1 \sim 0.5$	506
A4 积分式(6.12)与式(6.20)计算 $K = -K_{I1}^c / f_t \sqrt{D}$ 结果的比较表 $V_0 = 0.5, \beta = 0.1 \sim 0.5$	508
A5 积分式(6.12)与式(6.20)计算 $K = -K_{I1}^c / f_t \sqrt{D}$ 结果的比较表 $V_0 = 0.6, \beta = 0.1 \sim 0.5$	510
A6 积分式(6.12)与式(6.20)计算 $K = -K_{I1}^c / f_t \sqrt{D}$ 结果的比较表 $V_0 = 0.7, \beta = 0.1 \sim 0.5$	512
A7 积分式(6.12)与式(6.20)计算 $K = -K_{I1}^c / f_t \sqrt{D}$ 结果的比较表 $V_0 = 0.8, \beta = 0.1 \sim 0.5$	512

A8	当 $a_0/D=0.4, \beta=0.275$ 时应力-裂缝宽度软化关系中的材料常数 c_1 、 c_2 和 w_0 对采用式(6.12)和式(6.20)计算的无量纲应力强度因子 K 的影响	514
A9	式(6.17)预测的 B、C 系列预裂梁的初始裂缝长度与 Refai 和 Swartz 测量和计算结果的比较	515
A9.1	B 系列($E=38.3\text{GPa}, S=762\text{mm}, B=76\text{mm}, D=203\text{mm}, H_0=3.2\text{mm}$)	515
A9.2	C 系列($E=39.3\text{GPa}, S=1143\text{mm}, B=76\text{mm}, D=305\text{mm}, H_0=3.2\text{mm}$)	516
A10	式(6.17)预测的切口深度与试验所测得结果的比较($H_0=3.5\text{mm}$)	517
A11	式(6.17)预测的临界有效裂缝长度与采用两参数模型和等效裂缝模型计算的结果的比较	518
A12	试验的临界状态后的裂缝长度的预测	519
A13	由式(6.20)计算的梁的双 K 断裂参数 K_{Ic}^{ini} 和 K_{Ic}^{un} (列于第 8 和 9 列) 和由式(6.12)计算的结果的比较(列于第 11 和 9 列)	520
A13.1	B 系列梁	520
A13.2	C 系列梁	521
A14	三点弯曲梁试件计算结果	523
A15	楔入紧凑拉伸式试件试验结果	523
附录 B	G_R 阻力曲线和基于能量法的断裂参数计算结果	525
B1	不同三点弯曲梁试件的 G_R 及动力 G_I 值	525
B2	不同软化本构关系确定的等效起裂韧度和等效失稳韧度表	537
B3	根据双 K 断裂模型确定的起裂韧度和失稳韧度表	538