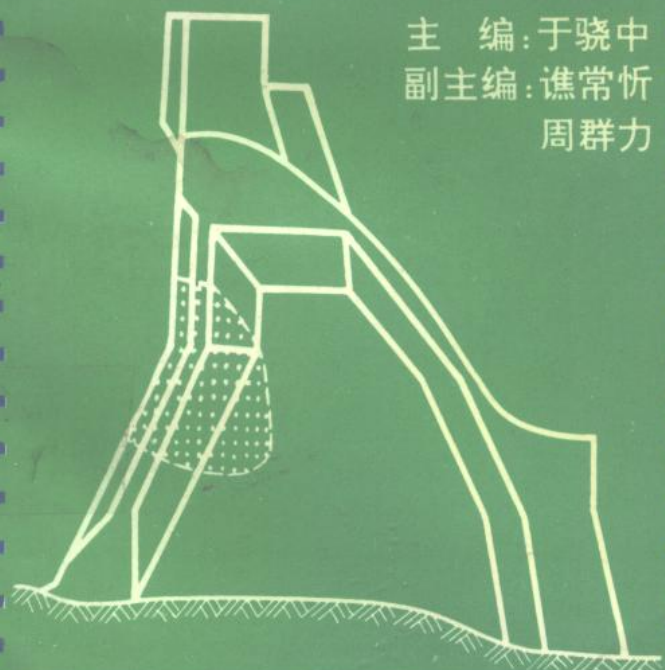


岩石和混凝土断裂力学

FRACTURE MECHANICS OF ROCK AND CONCRETE

主 编:于晓中
副主编:譙常忻
周群力



中南工业大学出版社

岩石和混凝土断裂力学

主 编 于晓中

副主编 譙常忻

周群力

中南工业大学出版社

湘新登字 010 号

岩石和混凝土断裂力学

主 编: 于晓中

副 主 编: 谯常忻 周群力

责任编辑: 张国祥

插图编辑: 刘楷英

*

中南工业大学出版社出版发行

中南工业大学出版社电脑排版

湖南省地质测绘印刷厂印装

湖 南 省 新 华 书 店 经 销

*

开本: 850×1168/32 印张: 20.75 字数: 520 千字 插页: 2

1991 年 12 月第 1 版

1991 年 12 月第 1 次印刷

印数: 0001-2000

*

ISBN 7-81020-431-9/O·059

定价: 12 元

序

由于饶中，谯常忻，周群力三位同志主编，十多位专家执笔写成的《岩石和混凝土断裂力学》即将出版。主编同志约我写篇序言，我在粗读了这本专著后，觉得这是件不容推卸的义务。

断裂力学是门年轻的学科，在短短数十年的发展中，它已给许多工程部门带来重大影响，尤其在航空、机械、造船、桥梁等领域中应用更广，这是众所周知的事。然而它是否也适用于混凝土结构及岩石地基中，却是个深邃之谜。因为混凝土，尤其是基岩的性质和金属材料的区别实在太大了，在后者中行之有效的理论、试验和分析设计方法不一定能照搬到前者中去，而且显然，对前者的研究难度和复杂性也将远大于后者。十年前，笔者曾对这个问题作过些初步探索和提出过一些设想，但对断裂力学在混凝土和基岩中的应用前景没有多少把握。

读过本书后，我们可以欣慰地认识到，断裂力学的理论和方法是可以应用到混凝土及基岩上去的，至少是有前途的，但又有其特殊的规律和困难，有大量工作尚待深入去做。包括作者们在内的本学科所有研究同志所作的工作范围和深度，已远远超过笔者在十年前的期望。笔者对国外新技术的发展现况所知不多，但深信：我国研究人员在本领域中所作的努力，所发展的许多理论、方法、规律，所获得的数据和在实践上的应用，与国外先进水平相比，是毫无逊色的。我们应当感谢他们为国家填补了空白，取得了成就。这是我最感欣慰的一点，也是想在序言中着重说明的第一点。

从事本项研究要走一条崎岖困难的路，作者们没有知难而退，而是锲而不舍地进行研究工作——一种要冒可能得不出成果

EW72/3210

风险的探索工作。他们不搞短期行为，不追求单纯的经济效益，脚踏实地地为发展一种应用基础科学而不倦地努力。搞这项研究又非个人或少数人力所能及，而需要数理学家、力学家、岩石力学家、土木工程师、地质师、光测电测专家、计算机软件专家等各行业同志的协作努力。在作者们的工作中，我们看到的是周密的计划、和谐的步调和合理的分工，群策群力完成任务，这里没有任何“文人相轻”或“窝里斗”的迹象。上面所说的不搞短期行为搞基础研究，不搞“窝里斗”搞团结协作这两种作风是我们进行科学研究的传家宝，而在日前充满“商品意识”的社会中尤其可贵，这是我感受至深不能已于言表的第二点。

作者们为了普及和推广这门较尖端的科学，联合举办了讲座。本书就是在讲稿的基础上修订而成。全书五篇二十章。第一篇介绍线性和弹塑性断裂力学及损伤力学的基本概念；第二篇介绍计算或测定应力强度因子的方法，其中包括一些作者们的贡献；第三、四篇分别将断裂力学引入混凝土结构和基岩中去；第五篇论述断裂力学在上述领域中的应用和实践。通读全书后，不仅可以知道断裂力学的基本概念、现状和发展趋势，而且能掌握断裂力学在水工及地基工程中的应用和最新成果。全书的后半部分正是本书精华所在，也是作者们心血倾注之处。

当然，我们也不难指出本书的一些不足之处，例如全书是在研讨班讲稿的基础上增订而成，由十多位作者执笔，因此文章的语气、文风难求一致，内容的取舍、安排、详略以及某些论述也都有可改进或商榷之处。但是瑕不掩瑜，本书是科技出版园地中一朵有特色的鲜花，笔者深愿在本书出版后，作者们能继续他们的研究工作，并吸取读者意见和国内外其它学者所发表的更多更新成果，加以提高，精益求精，使本书成为本领域中一本有份量的专著。

作为一名普通读者，我还要感谢水利水电规划设计院(管理

局)重视科研，推动和举办这类研讨班，感谢中南工业大学出版社能在当前科技出版事业处于困难的条件下乐意接受出版本书，使我们能享受到阅读这本专著的乐趣。

潘家铮

1989年4月25日

北京

前 言

近二十年来, 岩石断裂力学和混凝土断裂力学迅速发展。1984 年水利电力部规划管理局组织过专门的研讨班, 聘请国内专家讲述这方面的现状和发展趋势。在该研讨班讲稿的基础上又增补了近年来国内外在岩石、混凝土断裂力学及其工程应用方面的新成果, 并增加了一些章节, 组成了这本书。本书编写人员有: 第一、二章, 湘潭大学张淳源教授; 第三章, 海南大学尹双增教授 (余天庆教授审定); 第四章, 河海大学姚敬之教授; 第五章, 能源部、水利部中南勘测设计院涂传林高级工程师; 第六章, 厦门鹭江大学李伯芹教授; 第七章, 华北水电学院张镜剑教授; 第八章, 同济大学吴科如教授; 第九、十一章, 水利水电科学研究院于晓中高级工程师; 第十、十八章, 大连理工大学徐世烺博士; 第十二章, 湖北工业大学余天庆教授; 第十三章, 武汉水利电力学院陶振宇教授、中南工业大学孙宗颀教授; 第十四章, 孙宗颀教授; 第十五、十七章, 湖南省水利水电勘测设计院周群力高级工程师; 第十六章, 能源部、水利部中南勘测设计院谯常忻高级工程师; 第十九章, 东北工学院郑雨天教授; 第二十章, 国家地震局地球物理研究所郑捷博士、陈颀研究员。

由于水平所限, 谬误在所难免, 欢迎批评指导。

编者

1988 年 12 月 9 日

于长沙

FORWARD

Rock and concrete fracture mechanics has greatly developed in the last two decades. In 1984, the Planning Management Bureau of the Ministry of Water Resources and Electric Power sponsored a special workshop and invited many specialists to give lectures on the present status and future development in this field. This book has been written mainly based on the lecture notes as well as the latest results of rock and concrete fracture mechanics and its engineering application. The book is the joint efforts of the following contributors: Prof. Zhang Chunyuan of Xiangtan University, Chapters 1 and 2; Prof. Yin Shuangzhen of Hainan University, Chapter 3; Prof. Yao Jingzhi of Hehai University, Chapter 4; Senior engr. Tu Chuanlin of Mid-South Design Institute of the Ministry of Energy Resources and the Ministry of Water Conservancy, Chapter 5; Prof. Li Boqin of Xiamen Lujiang University, Chapter 6; Prof. Zhang Jingjiang of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Chapter 7; Prof. Wu Kuru of Tongji University, Chapter 8; Senior engr. Yu Yaozhong of Research Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Chapters 9 and 11; Dr. Xu Shilang of Dalian University of Technology, Chapters 10 and 18; Prof. Yu Tianqing of Hubei University of Technology, Chapter 12; Prof. Tao Zhenyu of Wuhan University of

Hydraulic and Electric Engineering and Prof. Sun Zongqi of Central-South University of Technology, Chapter 13; Prof. Sun Zongqi, Chapter 14; Senior engr. Zhou Qunli of Hunan Hydro and Power Design Institute, Chapters 15 and 17; Senior engr. Qiao Changxin of Mid-South Design Institute of the Ministry of Energy Resources and the Ministry of Water Conservancy, Chapter 16; Prof. Zheng Yutian of Northeast University of Technology, Chapter 19; Dr. Zheng Jie and Researchist Chen Yong of Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Chapter 20.

The Editor

Changsha

Dec. 9, 1988

目 录

序	(I)
前 言	(IV)
第一篇 断裂力学原理	(1)
第一章 线弹性断裂力学基础	(1)
§ 1-1 引言	(1)
§ 1-2 裂缝前缘的应力、位移场	(4)
§ 1-3 应力强度因子 K	(15)
§ 1-4 能量释放率 G	(20)
§ 1-5 线弹性断裂力学应用于小范围屈服情况	(26)
§ 1-6 复合型裂缝	(33)
§ 1-7 线粘弹性断裂力学简介	(41)
参考文献	(48)
第二章 弹塑性断裂力学基础	(51)
§ 2-1 引言	(51)
§ 2-2 裂缝尖端模型	(53)
§ 2-3 裂缝顶端张开位移(COD)理论	(55)
§ 2-4 J 积分理论	(58)
§ 2-5 积分变分原理及其应用	(65)
§ 2-6 断裂韧度 $\tilde{G}$	(80)
参考文献	(84)
第三章 损伤力学基础	(85)
§ 3-1 引言	(85)
§ 3-2 损伤机制概述	(86)
§ 3-3 损伤力学的研究方法	(88)

§ 3-4 损伤变量与损伤模型	(90)
参考文献	(99)
第二篇 应力强度因子的计算和试验方法	(101)
第四章 有限单元法	(101)
§ 4-1 引言	(101)
§ 4-2 求应力强度因子的位移法与应力法	(105)
§ 4-3 能量释放率法	(111)
§ 4-4 围绕裂缝尖端的奇应变三角形单元	(122)
§ 4-5 内嵌裂缝尖端的奇应变圆单元	(134)
参考文献	(141)
第五章 边界配置法	(142)
§ 5-1 边界配置法的基本原理及某些常用 试样的应力强度因子计算	(142)
§ 5-2 V型缺口试样的应力强度因子计算	(152)
参考文献	(157)
第六章 光测试验方法	(158)
§ 6-1 引言	(158)
§ 6-2 光弹性法	(159)
§ 6-3 全息干涉法	(176)
§ 6-4 散斑干涉法	(184)
参考文献	(193)
第七章 电测试验方法	(195)
§ 7-1 概述	(195)
§ 7-2 电阻应变测试及其在断裂力学试验中 的应用	(196)
§ 7-3 声发射测试技术及其应用	(203)
§ 7-4 脆型材料断裂模型试验	(208)

参考文献	(213)
第三篇 混凝土断裂力学	(215)
第八章 混凝土破坏机理概论	(215)
§ 8-1 混凝土破坏现象的观测	
§ 8-2 分析混凝土破坏机理的几个基本观点	(223)
§ 8-3 与混凝土破坏有关的内部结构	(229)
§ 8-4 混凝土裂缝扩展分析	(247)
参考文献	(252)
第九章 混凝土线弹性断裂力学	(255)
§ 9-1 引言	(255)
§ 9-2 混凝土裂缝端部的微裂缝区 和亚临界扩展长度	(259)
§ 9-3 混凝土断裂韧度 K_{IC}	(270)
§ 9-4 阻力曲线	(284)
§ 9-5 混凝土复合型裂缝和断裂判据	(295)
附录 混凝土断裂试验应提供的原始资料 及约定条件	(303)
参考文献	(304)
第十章 混凝土概率断裂力学	(309)
§ 10-1 引言	(309)
§ 10-2 Weibull 脆性破坏统计理论	(310)
§ 10-3 混凝土断裂韧度观测值的统计分布	(313)
§ 10-4 混凝土 K_{IC} 的尺寸效应及对大尺寸 混凝土试件 K_{IC} 统计分布的推断	(324)
§ 10-5 讨论	(332)
参考文献	(333)
第十一章 混凝土非线性断裂力学	(335)

§ 11-1	引言	(335)
§ 11-2	虚拟裂缝模型	(336)
§ 11-3	钝裂缝带模型	(346)
§ 11-4	拉应变软化曲线	(355)
§ 11-5	混凝土断裂能 G_F	(364)
附录	用带切口的三点弯曲梁确定砂浆和混凝土 的断裂能(RILEM 试验标准)	(374)
	参考文献	(379)
第十二章	混凝土损伤力学	(382)
§ 12-1	损伤现象和损伤机制	(382)
§ 12-2	能量损伤理论的基本原理	(387)
§ 12-3	混凝土的损伤模型	(395)
	参考文献	(415)
第四篇	岩石断裂力学	(417)
第十三章	岩石的破坏机理	(417)
§ 13-1	概述	(417)
§ 13-2	岩石的变形过程	(419)
§ 13-3	岩石的破坏机理	(429)
	参考文献	(437)
第十四章	岩石断裂韧度	(439)
§ 14-1	岩石断裂的微裂隙模型	(439)
§ 14-2	岩石断裂韧度 K_{IC}	(442)
§ 14-3	影响岩石断裂韧度 K_{IC} 的因素	(467)
§ 14-4	讨论	(469)
§ 14-5	岩石复合断裂试验	(472)
附录	岩石断裂韧度测试(直切口三点弯曲梁) 建议方法	(475)

参考文献	(481)
第十五章 岩石压剪断裂	(483)
§ 15-1 引言	(483)
§ 15-2 压剪断裂试验方法与成果	(487)
§ 15-3 岩石压剪断裂机理	(497)
§ 15-4 压剪断裂判据的应用前景	(504)
§ 15-5 讨论	(507)
参考文献	(508)
第五篇 混凝土和岩石断裂力学的应用	(510)
第十六章 混凝土坝裂缝分析	(510)
§ 16-1 引言	(510)
§ 16-2 浇筑块的裂缝	(511)
§ 16-3 大头坝的裂缝分析	(521)
§ 16-4 裂缝修补及大头坝的处理和加固	(535)
§ 16-5 裂缝稳定性的讨论	(541)
参考文献	(543)
第十七章 混凝土坝坝基抗裂稳定分析	(545)
§ 17-1 引言	(545)
§ 17-2 坝基裂缝的扩展过程	(546)
§ 17-3 用断裂力学方法进行混凝土坝 坝基稳定分析的成果	(549)
§ 17-4 讨论	(557)
参考文献	(558)
第十八章 断裂力学在钢筋混凝土中的应用	(559)
§ 18-1 引言	(559)
§ 18-2 钢筋混凝土轴心受拉构件的抗裂度计算	(560)
§ 18-3 钢筋混凝土受弯构件的抗裂度计算	(563)

§ 18-4	钢筋混凝土偏心受拉构件的抗裂度计算 …	(566)
§ 18-5	钢筋混凝土偏心受压构件的抗裂度计算 …	(570)
§ 18-6	预应力钢筋混凝土构件的抗裂度计算 ……	(572)
§ 18-7	钢筋混凝土梁抗剪强度计算 ……………	(578)
§ 18-8	讨论 ……………	(584)
	参考文献 ……………	(585)
第十九章	断裂力学在地下岩体工程中的应用 ……	(587)
§ 19-1	引言 ……………	(587)
§ 19-2	刀具破岩石机理的断裂力学研究 ……	(588)
§ 19-3	爆炸破岩石机理的断裂力学研究 ……	(593)
§ 19-4	巷洞围岩稳定性的断裂力学分析 ……	(599)
§ 19-5	喷锚机理的断裂力学分析 ……………	(605)
§ 19-6	水力压裂法的断裂力学分析 ……………	(611)
	参考文献 ……………	(615)
第二十章	断裂力学在地震中的应用 ……	(617)
§ 20-1	引言 ……………	(617)
§ 20-2	震源的静止剪切裂纹理论模式 ……	(618)
§ 20-3	震源破裂过程的剪切裂纹动力扩展模型 …	(626)
§ 20-4	时间有关地震现象的剪切裂纹 亚临界扩展模型 ……………	(634)
§ 20-5	地震的破坏能 ……………	(637)
§ 20-6	结论 ……………	(640)
	参考文献 ……………	(641)

Contents

Preface	(I)
Forward	(IV)
<i>Part 1: Fundamentals of fracture mechanics</i>	(1)
Chapter 1: Linear-elastic fracture mechanics basis	(1)
1.1 Introduction	(1)
1.2 Stress, displacement field at crack front-edge	(4)
1.3 Stress-intensity factor K	(15)
1.4 Energy release rate G	(20)
1.5 Application of linear-elastic fracture mechanics to yielding conditions of small ranges	(26)
1.6 Multiple cracks	(33)
1.7 Summary of linear-elastic fracture mechanics	(41)
References	(48)
Chapter 2: Basis of elasto-plastic fracture mechanics	(51)
2.1 Introduction	(51)
2.2 Crack-tip model	(53)
2.3 Theory of crack surface open displacement (COD)	(55)
2.4 J -integral theory	(58)
2.5 Principle of calculus of integral and variations and its application	(65)
2.6 Fracture toughness $\tilde{G}$	(80)
References	(84)
Chapter 3: Basis of damage mechanics	(85)
3.1 Introduction	(85)
3.2 Brief description of damage mechanism	(86)
3.3 Research method of damage mechanics	(88)
3.4 Damage variable and damage model	(90)
References	(99)

<i>Part 2: Calculations and testing methods of</i>	
<i> stress-intensity factor</i>	(101)
Chapter 4: Finite element approach.....	(101)
4.1 Introduction	(101)
4.2 Displacement method and stress method for obtaining stress-intensity factor	(105)
4.3 Method of energy release rate	(111)
4.4 Odd-strain triangular element around crack-tip	(122)
4.5 Odd-strain circular element of internally embed crack-tip	(134)
References	(141)
Chapter 5: Boundary disposition method	(142)
5.1 Fundamentals of boundary disposition method and calculation of stress-intensity factor of certain specimens in common use	(142)
5.2 Calculation of stress intensity factor of V-notch specimens	(152)
References	(157)
Chapter 6: Photometric testing methods	(158)
6.1 Introduction	(158)
6.2 Photoelastic method	(159)
6.3 Holographic interferometry	(176)
6.4 Scatter speckle interferometry	(184)
References	(193)
Chapter 7: Electrometric testing methods	(195)
7.1 General discription	(195)
7.2 Resistance-strain testing and its application to fracture mechanics testing	(196)
7.3 Acoustic emission testing technique and its application	(203)