

混凝土断裂试验与断裂韧度 测定标准 **方法**

HUNNINGTU DUANLIE SHIYAN YU DUANLIE KENDU CEDING BIAOZHUN FANGFA

徐世琅 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

DL/T 5332—2005《水工混凝土断裂试验规程》宣贯教材

混凝土断裂试验与断裂 韧度测定标准方法

The Standard Methods of Fracture
Toughness Measurement and Fracture
Test of Concrete

主 编 徐世焯
副主编 郑 治 徐道远
参 编 宋玉普 赵艳华 姚武 朱为玄 王向东

机械工业出版社

前 言

目前我国土木、水利、能源、交通运输等工程方兴未艾，从大型水利水电工程、港口工程、海洋工程、桥梁工程、地下工程、城市建筑工程到核电站工程乃至机械制造业的基础工程，大型建设项目日益增多，基本建设如火如荼，城市面貌日新月异。近年来，我国每年混凝土用量约 40 亿 m^3 。由于混凝土材料的脆性易损特征，在水利水电行业，“无坝不裂，无洞不裂”的局面一直未能有效改观。大坝开裂导致大坝耐久性和抗震性能严重降低，缩短大坝使用寿命，影响工程正常运行和工程效益发挥，严重开裂的大坝在各种极端条件综合作用下如果发生溃坝的极端情况，则会造成重大的社会灾难，危及生命财产安全。对钢筋混凝土结构破坏倒塌的工程质量事故调查发现，这些事故绝大多数是由于裂缝的扩展引起的。裂缝的存在和发展，是造成钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀和结构耐久性降低的重要原因，使得我国海港码头、水利枢纽、交通枢纽、民用建筑、军用设施与桥梁、道路、工业等构筑物，大多数达不到设计寿命，需要重建或加固维修，浪费大量维修费用和重建费用，造成进一步的环境污染和资源浪费。

以往在混凝土结构设计和施工中主要关心混凝土结构的强度问题，即便进行裂缝控制和限裂验算，也只是主要使用描述单点应力状态的材料指标，即混凝土抗拉强度。这一指标难以真实反映混凝土的抗裂能力，不能有效用于混凝土结构的裂缝控制。实际上，材料的破坏和开裂不仅仅和单点状态的应力水平有关，更取决于某局部区域的应力集中程度和该材料的变形能力。而断裂力学的参数恰恰是具备了可同时反映材料某局部区域的应力集中程度及其变形能力这样一个综合指标。

从 1961 年 Kaplan 第一次尝试性工作，混凝土断裂力学已经历了近半个世纪的发展，各国学者在这段艰辛的研究历程中取得了诸多可喜的研究成果。混凝土断裂力学可作为研究混凝土裂缝发展机理及其定量描述的有效工具。早在 1989 年，美国土木工程学会 ACI446 委员会预测，近十几年形成的这些理论将面临最终的突破，并导致以引进断裂力学方法进行结构设计为标志的第三次重大革命。国际上很多国家均已制订了混凝土断裂参数的标准试验方法。国际材料与结构试验室联合会 (RILEM) 于 1985 年正式推出《用带切口的三点弯曲梁测定砂浆和混凝土的断裂能》试验标准，随后又于 1991 年推出《用三点弯

曲梁测试普通混凝土断裂参数 (K_{Ic}^S 和 $CTOD_c$)》试验标准, 为混凝土断裂力学的发展做出了有益的推动。

我国从 20 世纪 70 年代开始进行混凝土断裂力学的研究工作, 取得了一批有价值的研究成果, 推动了混凝土断裂力学学科的发展, 并为水利水电工程混凝土坝裂缝扩展的稳定性评价提供了断裂参数。其起始性研究发源于 1980 年潘家铮先生在《水利学报》上对水工结构裂缝的断裂力学分析及于晓中和居襄在《水利学报》上发表的混凝土断裂韧度的试验研究成果。1981 年岩石混凝土断裂力学情报网在湖南柘溪电站举办了我国第一届混凝土断裂力学学术会议。在会议举办期间, 正逢我国女排为第一次登上世界冠军领奖台而艰苦搏杀, 并终于取得了历史性的突破。当天晚上大家看电视观战女排, 很多与会代表欢呼雀跃, 并从中感受到了我国当时蓬勃发展时期所需要的一种时代鼓舞精神。仍记得的参加会议代表有北京水利科学研究院的于晓中, 清华大学的冯乃谦, 华东水利学院的陈德培、姚敬之、徐道远、钱济成、章定国, 中南建筑设计研究院的樵常忻、涂传林、蔡延义, 大连工学院的徐世焱, 陕西机械学院的田明伦、黄松梅等 50 余人。

在混凝土断裂力学研究的早期, 除了重视基本断裂机理和基本理论外, 也非常注重用混凝土断裂力学理论解决实际工程, 特别是湖南柘溪大坝出现的断裂事故, 同时也注重断裂韧度标准试验方法的制定和断裂力学知识的普及推广工作。1982 年在华东水利学院由岩石、混凝土断裂力学信息网召开专门会议制定了三点弯曲梁测试混凝土断裂韧度的若干约定。1984 年, 混凝土断裂力学情报网在湖南洞庭湖之滨的岳阳市为我国水利水电行业工程师举办了岩石混凝土断裂力学研讨班, 参加学习的水利界工程师都是水利水电行业各大设计院、工程局和科研院所的业务骨干, 并由当时在本领域研究中具有一定造诣的科研工作者担纲授课, 为我国岩石混凝土断裂力学的研究与工程应用培养了一大批宝贵人才。“七·五”国家重点科技攻关研究课题就包括了“混凝土断裂能和断裂韧度标准测试方法的研究”的子题。1987 年, 结合国内已有的研究成果和国际上断裂试验研究的进展动向, 就提出了“用楔入劈拉切口试件测定混凝土断裂能 G_f 和断裂韧度 K_{Ic} 标准试验方法 (建议草案)”, 由于种种原因, 该草案未能进一步推行。

混凝土结构的开裂问题虽然有可能是强度问题引起的, 但按照断裂力学观点来分析, 则主要是由于其断裂韧度不足而导致的脆性开裂。对新建的混凝土结构, 包括混凝土大坝, 为防止危害性裂缝发生, 需要将断裂韧度作为抗裂、防裂设计中混凝土性能指标。因此, 需要制定一个可统一执行的混凝土材料断裂韧度标准试验测定方法, 测定不同等级混凝土的断裂韧度, 以便在新建混凝

土结构设计和已开裂的现有混凝土结构加固评估中作为表征材料抗裂的基本参数。在上届和本届混凝土断裂力学分会的共同努力和领导下,国内许多单位经过多年辛苦工作,终于制定出我国第一部混凝土断裂试验的行业标准,并由国家发展和改革委员会于2005年11月28日颁布,2006年6月起执行。

鉴于目前我国高校在本科生教育的课程设置中还没有开设混凝土断裂力学课程,许多在一线工作的设计、科研、施工和试验室工作人员对混凝土断裂力学具体内容还不够熟悉,所以对该规程的内容理解存在一定难度并需要一个过程。混凝土断裂力学专委会在该规程审查通过后开会讨论决定,组织本领域相关专家配合该规程的学习实施编写一部配套教材,并陆续主办系列的《水工混凝土试验规程》专业工程师培训班或研讨班。

本书第1章1~4节由大连理工大学宋玉普教授编写;第1章5、6节和第2章由大连理工大学赵艳华副教授、徐世焯教授编写;第3章由同济大学姚武教授编写;第4章由河海大学朱为玄教授、徐道远教授编写;第5章由河海大学王向东教授、徐道远教授编写;第6章由中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院郑治副总工程师(教授级高工)编写。全书由大连理工大学徐世焯教授统一定稿。

由于编者水平所限,本书难免存在一定的疏漏甚至错误,欢迎各位读者在使用过程中及时告知,以利更正。

徐世焯

2009年7月于大连凌水河畔

目 录

前言

| | |
|---|----|
| 第 1 章 绪论及预备知识 | 1 |
| 1.1 《水工混凝土断裂试验规程》(简称《规程》)编制的目的、意义、作用 | 1 |
| 1.2 《规程》的编写过程 | 2 |
| 1.3 混凝土断裂破坏的基本现象 | 7 |
| 1.4 线弹性断裂力学基本概念 | 11 |
| 1.5 双 K 断裂准则介绍 | 18 |
| 1.6 主要术语、符号和应用范围 | 21 |
| 参考文献 | 23 |
| 第 2 章 楔入劈拉法测混凝土 K_{IC} | 24 |
| 2.1 概述 | 24 |
| 2.2 试件、试模、预制裂缝及原型取样 | 25 |
| 2.3 试验装置及设备 | 28 |
| 2.4 试验过程及数据采集 | 32 |
| 2.5 试验结果的计算、整理、分析 | 33 |
| 2.6 试验报告 | 37 |
| 参考文献 | 39 |
| 第 3 章 用带切口的三点弯曲梁确定混凝土的断裂韧性 K_{IC} | 41 |
| 3.1 试件、试模、预制裂缝及原型取样 | 41 |
| 3.2 试验装置及设备(含夹式引伸计、数据自动采集系统) | 43 |
| 3.3 试验步骤及数据测试记录 | 44 |
| 3.4 试验成果的计算、整理、分析(计算弹性模量 E 、起裂荷载 F_Q) | 45 |
| 3.5 试验报告 | 47 |
| 3.6 计算例题 | 47 |
| 第 4 章 《规程》的相关条文解释与说明 | 52 |
| 4.1 两种计算 K_{IC} 的公式选用问题 | 52 |
| 4.2 楔入劈拉试件单、双支座问题 | 59 |
| 4.3 K_{IC}^Q 与 K_{IC}^S 的关系及应用 | 65 |
| 4.4 两种试验方法的 K_{IC} 成果对比和换算 | 69 |
| 4.5 尺寸效应 | 74 |
| 第 5 章 应力强度因子的有限元计算 | 80 |
| 5.1 裂缝扩展基本形式 | 80 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 5.2 应力强度因子和断裂判据 | 80 |
| 5.3 断裂有限元法 | 83 |
| 5.4 计算 K_I 的算例 | 93 |
| 5.5 工程结构中裂缝缝端 K 因子的计算 | 103 |
| 第 6 章 水工混凝土裂缝类型及实例 | 104 |
| 6.1 变形裂缝 | 104 |
| 6.2 结构裂缝 | 115 |

第 1 章 绪论及预备知识

1.1 《水工混凝土断裂试验规程》(简称《规程》)编制的目的、意义、作用

我国已建混凝土坝很多,有重力坝、拱坝、支墩坝等类型,均已不同程度地出现裂缝,可谓“无坝不裂”,其中有强度和刚度的问题,从混凝土断裂力学的观点分析,则是其断裂韧度不足所致。对拟建的混凝土坝,为防止危害性开裂,亦应将断裂韧度作为抗裂、防裂设计中混凝土性能指标之一。但迄今为止,国内尚无混凝土断裂韧度的标准试验方法,因此各单位即使对同一个混凝土坝的裂缝进行断裂试验,由于采用的试验方法不同,所得结果也无法进行比较和判断。从而影响了断裂力学对混凝土坝的分析。《水工混凝土断裂试验规程》(以下简称《规程》)的目的就是统一测定混凝土断裂韧度的测试方法,为混凝土坝的断裂试验提供统一的标准,从而推动断裂力学在水工混凝土坝中的应用。

《规程》规定了楔入劈拉法和三点弯曲梁法测定水工混凝土 I 型断裂韧度试验的标准测试方法,适用于大中型水利水电工程常态混凝土和碾压混凝土,其他工程也可参照使用。

混凝土断裂力学是近 50 年发展起来的学科,我国从 20 世纪 70 年代开始进行大量的试验研究,取得了一批有价值的研究成果,从而推动了混凝土断裂力学学科的发展,并为水利水电工程混凝土坝裂缝扩展的稳定性评价提供了断裂参数。1982 年由岩石、混凝土断裂力学信息网制定了三点弯曲梁测试混凝土断裂韧度的若干约定。“七·五”国家重点科技攻关将“混凝土断裂能和断裂韧度标准测试方法的研究”列为子题。“八·五”国家重点科技攻关又进行了有关研究工作。先后进行了紧凑拉伸、直接拉伸、三点弯曲梁和楔入劈拉方法的断裂参数测试研究,试件多达 600 个,混凝土约 80m^3 ,试件最大尺寸为 $3.6\text{m} \times 3.0\text{m} \times 0.2\text{m}$ (紧凑拉伸)和 $4.2\text{m} \times 0.9\text{m} \times 0.45\text{m}$ (三点弯曲),最小尺寸为 $0.15\text{m} \times 0.15\text{m} \times 0.15\text{m}$ (楔入劈拉)和 $0.515\text{m} \times 0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ (三点弯曲)。1985 年,结合国内已有的研究成果和国际上断裂试验研究的动向,曾提出“用楔入劈拉切口试件测定混凝土断裂能 G_f 和断裂韧度 K_{Ic} 标准试验方法(建议草案)”,由于种种原因,该草案未能推行。

国际上发达国家均已制定了混凝土断裂参数的标准试验方法,如国际材料与结构试验室联合会(RILEM)于 1985 年正式推出《用带切口的三点弯曲梁测定砂浆

和混凝土的断裂能》试验标准，又于1991年正式推出《用三点弯曲梁测试普通混凝土断裂参数（ K_{Ic}^s 和 $CTOD_c$ ）》试验标准，已为国内有关单位参照、引用。因此，国内各单位较熟知三点弯曲梁测试方法。楔入劈拉法和三点弯曲梁法相比，具有可克服试件自重的影响、可加速加载、试件尺寸小、试验简便且易于操作、适用于普通结构材料试验室应用等优点。为此，本规程列入该两种断裂韧度测试方法，各单位可根据工程需要和试验能力选用。国内外大量试验表明，在试件高度及初始缝长相同时，两种试验方法所测得的 K_{Ic}^s 结果差异甚小。如有差异，以三点弯曲梁法测试结果为准。

《规程》是在国内外大量混凝土断裂试验的基础上，并参照“虚拟裂缝模型”、“双参数模型”、“有效裂缝模型”、“双 K 断裂模型”等理论体系制定的。本规程的所有计算公式则按“双 K 断裂模型”的理论所引用或推导。本规程和上述国外通行的断裂试验标准充分衔接，并和国内高校、科研、设计和施工单位试验水平相结合。

1.2 《规程》的编写过程

1. 编写缘由

国内自20世纪70年代中期以来，混凝土断裂力学已逐渐应用于水工建筑物，混凝土断裂参数的试验研究在国内很多高等院校、科研院所和工程单位进行，有不少成果已被水利水电工程应用。但是，由于测定混凝土断裂参数方法和标准的不统一，影响了测试成果的可信度及其应用效果。为此，在20世纪90年代后期，国内水工界各有关单位就纷纷提出，希望编制一个统一的试验规程，以便各单位参照执行，并作为相应的规范基础。由36家有关高校、设计院、科研院所和工程单位参加的“岩石、混凝土断裂力学信息网”汇总了大家的意见，并经过多次研究，决定由信息网出面组织编写《水工混凝土断裂试验规程》，向各有关上级部门提出申请。几经努力，2001年10月，由原国家经济贸易委员会在“关于下达2001年度电力行业标准编制修订计划的通知”（电力（2001）44号文）中，正式将《水工混凝土断裂试验规程》列入制定计划，并以中国电力企业联合会标准化中心为委托方，岩石、混凝土断裂力学信息网为承担方，于2002年10月正式签订了项目合同（合同编号：01SB92-23）。

2. 编制工作启动及《规程》征求意见稿的形成

在原国家经济贸易委员会“电力（2001）44号”文件下达后，信息网即于2001年1月在南京河海大学召开了《规程》编制工作讨论会，讨论并拟定了编制计划和大纲，落实了编写单位（原为河海大学、大连理工大学、中国水电贵阳勘测设计研究院、同济大学等4家，后在编制过程中，因需要又增加了葛洲坝集团公

司和长江水利委员会设计院,共6家)、主要参编人员和分工,组建了编制组。并确定出信息网理事长、大连理工大学宋玉普教授为项目负责人,河海大学徐道远教授和贵阳勘测设计研究院郑治任《规程》的正、副主编。

2002年10月项目合同签订后,《规程》编写正式启动,并于2002年12月底,提出了《规程》征求意见初稿。原拟于2003年5月底召开信息网第8次学术讨论会进行讨论,因“非典”影响,会议推迟至10月,在此期间,通过网上通信,对初稿进行了修改,在会前形成了《规程》征求意见稿。

《规程》征求意见稿的主要内容涵盖了楔入劈拉和三点弯曲梁两种方法测试混凝土I型断裂韧度 K_{IC} 和 G_F 的有关内容。标准试件的尺寸为:楔入劈拉法用 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 、上端中间含预制裂缝的立方体;三点弯曲梁法断面为 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 、跨度为 400mm 、跨中有预制裂缝的梁。用两种方法中的任一种测定 K_{IC} 和 G_F ,两个断裂参数虽均可在同一试件中完成,但由于计算 G_F 的需要,必须在试验中得出荷载 F —裂缝口张开位移 V 的全曲线或荷载 F —加力点位移 Δ 的全曲线。在该稿的条文说明中,提到起裂韧度 K_{IC}^0 和失稳韧度 K_{IC}^s 两个概念,但如何测定 K_{IC}^0 ,在正文和条文说明中均未具体述及。

3. 《规程》第一次讨论会议——烟台会议

2003年10月,在烟台大学召开了信息网第8次学术会议,讨论了《规程》征求意见稿。参加会议的有来自全国20个高等院校、科研院所、工程单位的38位专家、教授和相关人员。经过一天多的热烈讨论,达成了一些共识、提出了一些问题,但有些工作还需再深入地研究。归纳起来,有如下几点:

(1) 肯定了《规程》编制工作的必要性。国内水电水利行业有此实际需要,国际上如美国、欧洲、日本、俄罗斯等发达国家早已有了相关的规程或规范,而我国尽管混凝土断裂参数试验工作起步并不算晚,30年来,也开展了大量的工作,并取得了不少有国际影响的成果,但至今尚无有关混凝土断裂参数的试验规程。所以应有紧迫感,尽早编好并颁布执行,以利于与国际接轨。正因为如此,《规程》应尽量反映国内外成熟的成果,同时又要考虑到我国水利水电部门及有关人员对混凝土断裂力学的认识程度、大多数单位的试验条件和试验水平的实际情况,作为我国第一部相关《规程》,起点要合适,且要具有很强的可操作性和可执行性。

(2) 《规程》的框架是合适的,但测试 G_F 难度较大,且楔入劈拉法是通过 F — $CMOD$ 曲线测定,而三点弯曲梁法是通过 F — Δ 曲线测定,两者不统一,能否通过 K_{IC} 换算得到 G_F 。

(3) 两种测试方法所规定的试件尺寸,几乎是最小的尺寸,能否用其他更大尺寸的试件测试,而尺寸增大后是否会产生尺寸效应。按《规程》的测试结果用于大体积水工混凝土结构时,如何应用。

(4) 《规程》提出了楔入劈拉和三点弯曲梁两种试验方法,采用了不同的试件

形式,其结果是否一致,如不一致,如何作相应换算,以何者为准。

(5) 近年来,我国学者徐世烺教授与国外学者合作提出了“混凝土双 K 断裂准则”,认为袭用的以最大荷载 F_{\max} 和初始裂缝长度 a_0 计算 K_{Ic} 是不合理的,应采用起裂韧度 K_{Ic}^0 和失稳韧度 K_{Ic}^s 分别作为裂缝起裂扩展和失稳扩展的判据。并已有一套完整的理论和计算方法,但《规程》搞得有些复杂。对拟采用的两个韧度,应明确其计算方法及公式。

(6) 《规程》似只涉及普通混凝土,由于目前各种类型的碾压混凝土坝越来越多,对碾压混凝土相应的断裂参数测试是否也应一并考虑。

(7) 对上述2、3、4、5点应再深入地做些研讨,有必要时,应再做些试验,再据此对征求意见稿作出修改。此外,征求意见稿中,有些语句表述不够确切或不完整,均应在修改稿中一一仔细推敲。

4. 烟台会议后的工作及《规程》送审讨论稿的形成

烟台会议后,结合代表们对《规程》征求意见稿提出的意见,进行了以下几方面的研究工作。

(1) 同济大学对国际上的有关规范或规程进行了对比分析研究,分析其长处和不足,为本《规程》既能符合我国国情,又能与国际接轨提供了参考依据。

(2) 大连理工大学、河海大学和同济大学对楔入劈拉法和三点弯曲梁法的计算公式的选用、试件的标准尺寸及尺寸效应、两种试件测试结果的对比换算等问题进行了分析研究和讨论,以期对这些问题能有明确的认识。

(3) 葛洲坝集团公司、大连理工大学和中国水电贵阳设计院均进行了包括楔入劈拉和三点弯曲梁两种类型、多种试件尺寸和混凝土配比的试验工作。葛洲坝集团公司共用了40种、131个试件,其中楔入劈拉60个,试件高度从200~1200mm;三点弯曲梁71个,试件高度从150~500mm;大连理工大学共进行了12种、44个试件,其中楔入劈拉25个,试件高度从150~1200mm,三点弯曲梁19个,试件高度从150~500mm。中国水电贵阳设计院共用了5种、70个试件,其中楔入劈拉60个,试件高度为150mm和200mm;三点弯曲梁10个,高度为200mm。此外,河海大学也进行了一组(6个)高为100mm的小尺寸三点弯曲梁试验。这些试验的目的很明确,就是研究两种试验方法的差异及尺寸效应问题,其成果将为讨论《规程》中若干重大、疑难问题提供依据。

(4) 对《规程》文字作了全面的修改和增删,写出了《规程》送审讨论稿。

鉴于以上工作过程中,各编写单位对《规程》中一些重大问题仍有不同的认识,因此,编制组决定于2004年6月底在大连理工大学召开编制组扩大会议,对送审讨论稿再行讨论。

5. 《规程》第二次讨论会——大连会议

2004年6月底的大连会议,6个参编单位有11位参编人员(或其他代表)出

席，赵国藩院士也到会听取了前阶段工作汇报并发表了重要意见。会议肯定了前阶段的编制工作及其进展，并进行了两天的讨论，对《规程》送审讨论稿的初稿提出了如下重大的修改意见。

(1) 由于 G_F 测试要测全曲线是相当困难的，且 G_F 虽可作为一种反映混凝土的断裂韧度指标，但至今国内外尚未提出合适的有关判据，工程上无法应用。建议本《规程》的断裂参数仅指 K_{Ic} ，不再包括 G_F 的测试内容。如需测 G_F ，可参照国外有关规定（如国内较为熟悉的由 RILEM 于 1985 年颁布的“用带切口的三点弯曲梁确定砂浆和混凝土的断裂能”试验标准）执行。

(2) 从水工混凝土的实用角度，建议《规程》所规定的标准试件以湿筛混凝土浇筑，楔入劈拉试件主体尺寸为 200mm 的立方体，三点弯曲梁试件主体尺寸为 200mm（高）×120mm（厚）×800mm（跨长）的梁。但考虑到有可能直接按三级配或四级配混凝土浇筑试件进行测试或其他研究工作的需要，以及从已建结构中取样测试之需，试件尺寸可以大于或小于标准试件，但试件的最小尺寸不得小于最大骨料粒径的 3 倍。

(3) 同意将碾压混凝土的断裂试验也纳入本《规程》并按同样方法进行，但其试件浇筑必须按《SL48 水工碾压混凝土试验规程》的规定执行。

(4) 鉴于以“混凝土双 K 断裂准则”的相关理论为主要内容的大连理工大学徐世烺教授的课题组所承担的国家杰出青年科学基金“混凝土裂缝扩展的断裂理论和分析方法”（编号：59625814）项目，已通过教育部组织的专家委员会的鉴定，因此，双 K 准则可以作为本《规程》的理论背景，并将有关起裂韧度 K_{Ic}^0 和失稳韧度 K_{Ic}^s 的计算方法和公式引入本《规程》，重新编写《规程》的有关内容。

会议决定：

(1) 由于葛洲坝集团公司的试验虽已做完，但成果尚未整理分析，大连理工大学的试验正在进行，因此，两种试件结果对比、尺寸效应等重要问题尚无法作出定论。除两单位应加快进度、尽快拿出成果外，对《规程》中所涉及的有关问题还应从理论上加以分析论证，以便与试验结果相统一。

(2) 按此次会议精神，写出以“混凝土双 K 断裂准则”原理、方法和计算公式为基础的《规程》送审稿第二稿，并在适当时间再进行讨论、修改。

6. 《规程》送审稿二稿的形成及第 3 次讨论会——南京会议

2004 年 9 月，按大连会议要求的《规程》送审稿第二稿已完成，随即发给各个参编单位传阅、磋商，根据反馈信息，似有再讨论的必要。为此，在大连理工大学试验结果已整理完毕、葛洲坝集团公司试验结果开始整理之际，编制组于 2004 年 10 月中旬，在南京河海大学召开了由河海大学、中国水电贵阳设计院、大连理工大学和同济大学 4 家单位的 8 位参编人员参加的讨论会，对《规程》送审稿第二稿及《规程》所涉及的若干重大问题进行了深入的讨论。这次会议取得了以下

共识。

(1) “混凝土双 K 断裂准则”有先进之处,例如计算 K_{1c}^S 是取临界裂缝长度 a_c ,从概念上更为合理,两种试件临界缝长的简化计算公式也是合适、可取的,但按双 K 断裂准则计算 K_{1c}^Q 不仅过于繁琐,也有不确定的因素,似以试验的 F_0 值直接计算为好。但如何在试验记录曲线上准确确定 F_0 又有困难,但可根据经验大致判定。当然,由此计算的 K_{1c}^Q 的可信度就远不如 K_{1c}^S 高。

(2) 由大连理工大学及河海大学的试验资料看出, F_0 约为 $(0.6 \sim 0.9) F_{\max}$, 相应算得的 K_{1c}^Q 仅为 $(0.4 \sim 0.7) K_{1c}^S$, 若以 K_{1c}^Q 作为重要结构的裂缝扩展控制参数,工程上似难以接受。若从重要结构控制参数更为严格的角度出发,重要结构可取 cK_{1c}^S (c 为小于 1 的系数) 作为控制指标,且 c 的取值大小可按结构的重要程度由工程单位确定。

(3) 从大连理工大学的试验成果可看出,无论是楔入劈拉试件或三点弯曲梁试件, K_{1c}^S 仍是随试件高度的加大而增大的,且大致符合国内习惯上采用的按 Weibull 脆性破坏统计理论所导出的尺寸效应换算式的计算结果。也就是说,用不同尺寸试件所测得的混凝土断裂韧度与强度一样,仍是有尺寸效应的,且可按上述尺寸效应公式近似推算。但这种推算只限于不同尺寸的试件间,如何推算至大尺寸的原体,应另行研究。

(4) 从大连理工大学的试验结果还可看出,用相同高度的楔入劈拉试件和三点弯曲梁试件测得的 K_{1c}^S 值并不相同,三点弯曲梁测得的 K_{1c}^S 与楔入劈拉试件测得的 K_{1c}^S 相差在 50% 以内,似可不必进行换算,但按国际上的习惯,可以三点弯曲梁的结果为准。

(5) 关于楔入劈拉法中试件的支座,国外多用单支座,但单支座情况下,试件自重的影响就必须在断裂韧度的计算公式中有所反映。国内多用双支座,试件自重可不计,且测试操作方便。但三点弯曲梁中试件自重的附加影响应考虑(如自重附加影响相对甚小时,则可忽略不计)。

(6) 以上所涉及的若干问题,待葛洲坝集团公司试验成果整理完毕后,一并考虑再作定论。

7. 《规程》送审的定稿

2004 年 12 月,葛洲坝集团公司试验成果正式提交编制组,同时在大连会议后,河海大学和大连理工大学对若干重大问题所作的理论上的探讨和论证也对这些看法作出了较明确的结论。在这个基础上,才写出了《规程》送审稿的初定稿,并已于 2004 年 12 月下旬上报中国电力企业联合会标准化委员会备案。

经对上述论证作了反复推敲,又对送审稿的初定稿作了修改,提出了《规程》送审稿的定稿,并于 2005 年 2 月再次上报。2005 年 4 月由电力行业水电施工标准化技术委员会主持,在武汉召开了《规程》(送审稿)审查会。

综上所述,《规程》(送审稿)从开始编制已历时3年多,前后经三次会议讨论和广泛征求国内同行意见。各参编单位在此期间花费了大量的人力、物力、财力,进行了艰苦的工作。本《规程》的编制成功也是各参编单位和参编人员团结协作,共同努力的结果。《规程》的编制也促进了各有关单位混凝土断裂力学的学术研究,对我国混凝土断裂力学学科的发展作出了贡献。

1.3 混凝土断裂破坏的基本现象

为了研究实际的混凝土断裂破坏机理,必须认识清楚与裂缝扩展有关的物理过程。这要求在两个不同层次上了解材料特性:微观上,穿过水化水泥浆生成裂缝的机理;宏观上,某一系统内产生的裂缝,在水化水泥浆连续基体中的哪些骨料颗粒上扩散,也可能在哪些纤维上扩散。

1. 硬化水泥浆中的裂缝

在硬化水泥浆养护早期,也许是几个星期内,裂缝似乎穿过高孔隙C-S-H(硅酸钙水化物)相首先扩展。因为在水化早期,未水化的水泥颗粒和氢氧化钙(早期反应产物之一),两者相当于低孔隙区,其作用与坚硬的包体一样。未水化的水泥颗粒和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的作用常常甚至象阻裂物一样。然而在成熟浆体中,这点就辨别不出来,因为机体的孔隙较少、较均匀,且断裂的路径变得较直。也有资料表明,甚至在硬化的水泥浆体中,断裂首先沿 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的弱粘介面出现。这一点,也许是由于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的抗拉强度仅为1MPa,远小于普通水泥浆的抗拉强度所致。

当裂缝趋于相当直时,实际上它们可以看作是一串连接着的短线段,这些线段围绕扩展方向一前一后成锯齿形。这些裂缝的边近似平行,但不完全平行。在可以看到的表面上,这些裂缝有时也是不连续的。特别是靠近表面裂缝的尖端,还可以看到一些裂缝分叉。进一步加载时,在裂缝分叉出现的地方,只有一个分叉保持“活动”。

在受压时,观察到很多相同的特征,裂缝的走向往往大体上与加载轴平行,而且有一定数量的裂缝分叉出现。裂缝一般沿未水化的水泥颗粒周围出现。不过,偶然也有裂缝穿过这些颗粒。

2. 砂浆和混凝土中的裂缝

由于有骨料颗粒存在,在砂浆和混凝土中的开裂过程比在硬化水泥浆中更复杂。对于普通骨料和硬化水泥浆, $\sigma-\epsilon$ 曲线几乎在破坏点以前都呈线性,而混凝土的 $\sigma-\epsilon$ 曲线却完全是非线性。这种非线性主要是由于水泥和骨料之间的粘结强度较低,还由于荷载增大时,原来在水泥—骨料界面上发生的微开裂逐渐发展。此外,已经证明在较软的水泥浆基体中,有硬骨料颗粒存在将改变局部应变与应力分布,导致裂缝扩展以致破坏。

通常认为水泥—骨料界面是混凝土的最薄弱区，甚至在加载以前，由于泌水，水化时体积变化和干缩，在水泥—骨料界面上就已经观察到裂缝。大约在极限应力 (σ_{ult}) 的 30% 以下，对于正常加载速率，这些裂缝很少扩大，而且 σ - ε 曲线基本是线性的。在 $0.3\sigma_{ult}$ 以上，荷载增大，裂缝开始增长， σ - ε 曲线变为非线性，这是由于骨料和水化水泥浆的弹性模量有差别，还由于水泥—骨料界面上的应力高度集中，所以使 σ - ε 曲线的非线性越来越大。在约 $0.6\sigma_{ult}$ 以上，界面裂缝也开始扩大，穿过整个硬化水泥浆基体，在粗大的骨料颗粒之间跨接，但仍然是稳定的形式。最后，在约 $0.75\sigma_{ult}$ 以上，基体的裂缝开始形成更广泛的网格，但是系统内仍然有足够的超静定力使网格在短期加载下保持适当的稳定。甚至在极限应力 σ_{ult} 下，裂缝形式仍然允许结构保持少许承载能力，但上述裂缝网格还是出现了破坏。如果试验机有足够的刚度，则受拉和受压两种 σ - ε 曲线都呈现相当明显的下降段。对于约 $0.75\sigma_{ult}$ 以下的持续应力，受压时不发生延迟破坏，这可能是由于不论任何裂缝缓慢出现时，都由于荷载压实的加强作用而得到补偿。

3. 加载速率的效应

硬化水泥浆和混凝土的 σ - ε 特性和强度对加载速率是敏感的。当加载速率增加时， σ - ε 曲线的线性提高，而且 E 值增大。当应变速率增加 6 个数量级时，混凝土的抗压强度大约将增加一倍，而砂浆的抗弯强度可能增加 30%。然而，在该弯曲试验中，直至破坏，总应变基本不变。其原因可能是由于较低的加载速率允许产生较多的亚临界裂缝，从而形成较大的缺陷，因此断裂荷载较小。所以，这些现象可以用断裂力学的概念来解释。另一方面，也许是较慢的加载速率允许产生较多的徐变，在给定荷载下，它使总应变增大。上述现象可以用引起破坏的极限应变值来解释，这需要应用混凝土的最大应变破坏判据，以及断裂力学判据。

4. 缺口敏感性

如果缺口改变了材料的净截面强度 σ_{net} (按剩余的截面积计算，但是缺口的应力集中效应忽略不计)，则可以认为该材料是缺口敏感的。对金属来说，在高延展性材料上加缺口，由于塑性限制作用提高，可能使缺口强化；或者由于缺口的应力集中效应，对变形能力有限的材料来说，可能导致缺口弱化。然而，对胶凝材料来说，没有发现过缺口强化效应。因此，缺口敏感性这个术语仅仅指由于缺口存在，可能降低 σ_{net} 值。于是假定，缺口不敏感的材料，或材料内的最大裂缝长度小于临界裂缝长度，则该材料可以用古典力学分析；缺口敏感的材料，必须用断裂力学的原理分析。因此，Ziegeldorf 等人已经证明，缺口敏感性是应用线弹性断裂力学的必要条件 (虽然不是充分条件)，他们为缺口敏感性 (就弯曲来说) 推导出下列公式：

$$\frac{\sigma_{net}}{\sigma} = \frac{K_{IC}}{\sigma} \frac{1}{\sqrt{a\left(1 - \frac{a}{b}\right)^2} F\left(\frac{a}{b}\right)} \leq 1 \quad (1-1)$$

式中 σ ——无缺口试件的强度；

a ——裂缝长度；

b ——梁高度；

$F\left(\frac{a}{b}\right)$ ——取决于试件几何条件和加载方法的参数。

该式预示缺口敏感性随试件尺寸增大而增加，也随比值 σ/K_{Ic} 的增大而增加。

关于胶凝材料是否真正对缺口敏感仍然存在以下不确定性：

(1) 硬化水泥浆或混凝土的强度能不能由人工引入缺口加以控制？

(2) 如果人工做出的缺陷能够控制这些材料断裂，那么需要不需要控制试件尺寸，或者缺陷尺寸与试件尺寸之比？

对缺口敏感性已经进行过大量试验研究，大部分试验使用相当小的试件。

对硬化水泥浆本身来说，通常认为是缺口敏感的材料。

就砂浆和混凝土来说，其试验结果的矛盾很多。在受拉试件中，对各种形状的大孔隙的效应进行过研究。结论是直径大到约 140mm 的孔隙对混凝土强度没有可测出的影响，部分原因是由于靠近孔隙边缘的应力重分布。也曾经证明，在混凝土结构内的固有缺陷所引起的应力集中，不能由人工引入的缺陷所抵消。大量其他研究已经证明，对长达 50mm 的缺口来说，砂浆和混凝土是不敏感的。另一方面，有些研究已经证明，砂浆和混凝土是缺口敏感的，尽管在程度上不如水泥。

其中有些矛盾可以用试件大小来解释。Walsh 证明，如果受弯混凝土试件太小，则似乎是缺口不敏感的；他还建议，梁的最小高度约为 230mm。Kishitani 和 Maeda 已经证明，对于有斜向裂缝的混凝土受压构件，其材料对于 20mm 裂缝是缺口不敏感的，但是对于 40mm 裂缝，它却变得缺口敏感了，同时，强度降低了 10% ~ 20%。同样，Mai 等人发现石棉—纤维素纤维增强水泥梁的高度在 25mm 以下时是缺口不敏感的，还发现只有当试件梁高度大于 50mm 时才可能进行正确的断裂韧度测量。Carpinteri 也证明，试件太小会使缺口不敏感。

总之，胶凝材料的缺口敏感性仍然是一个没有解决的问题。几乎所有研究者都同意硬化水泥砂浆是缺口敏感的。然而，混凝土和纤维增强混凝土的试验结果却是矛盾的，尽管认定这些材料的试件足够大时是缺口敏感的。

5. 胶凝材料应用断裂力学的历史

Griffith 提出的断裂能量平衡概念，应用于水泥和混凝土的过程几乎经历了 60 多年。Neville 在 1959 年提出，混凝土试件大小对强度的影响也许能与 Griffith 缺陷的随机分布联系起来。Kaplan 在 1961 年进行了试验研究，他的结论是：“临界应变能释放率的 Griffith 概念是裂缝迅速扩展以致必然破坏的一个条件，可应用于混凝土”。自 Kaplan 的首创工作以来，在这个领域内进行了大量研究。把 Griffith 原理应用于混凝土，曾经由 Grucklich 进行了详细的阐述，并证明临界应变能释放率

(G_c) 比混凝土表面能的 2 倍 ($2r$) 还大。因为混凝土的断裂不只是单个裂缝的生长, 而是靠近表面裂缝尖端产生的微开裂区, 由此生成的断裂表面比根据试件截面尺寸简单计算出来的断裂表面要大得多。试验还证明, 混凝土内的高强度区, 例如骨料颗粒, 其作用可能增加能量的需要量, 因为要想使裂缝穿过比较坚固的区域, 这需要较多的能量; 另外围绕该区域形成裂缝, 这增加了裂缝路径长度, 也需要较多的能量。

随后的工作集中在各种混凝土参数对断裂韧度 K_{Ic} 或断裂能 G_f 的影响。人们发现, K_{Ic} 随骨料体积、骨料粒径和骨料的粗糙度增大而增加, 随水灰比和空气含量增大而减小, 随龄期增加而增加, 大约在一个月內达到最大值, 并已经证明, K_{Ic} 随加载速率增大而稍微增加。此外, 对水泥、混凝土和纤维增强混凝土内亚临界裂缝的生长进行了大量研究, 以测定开裂速度与 K_{Ic} 之间的关系。然而, 关于分析这些数据的最佳方法还没有取得一致。

另外一系列试验试图确定试件大小和几何条件对断裂参数的影响。这些试验的结果有很大矛盾。许多研究发表的 K_{Ic} 测定值, 其可变性已经引起很多研究者对线弹性断裂力学能不能应用于胶凝材料提出了怀疑。然而, 大多数研究者仍然相信线弹性断裂力学能够应用于上述材料。

为了克服将线弹性断裂力学应用于混凝土材料所遇到的困难, 也提出过很多非线性断裂判据, 如 J -积分、 R -曲线分析和临界裂缝张开位移 (CMOD) 的概念。此外, 还提出过“模糊”裂缝模型, 假定其中的裂缝前沿包含微裂缝扩散区, 它的大小与最大骨料大小有关。还有“虚”裂缝模型, 它是一种裂缝联结的模型, 只要裂缝张开很窄, 就可以假定在模型内应力的作用跨过裂缝。

6. 断裂韧度参数和测试方法

多年来, 已经使用许多不同方法来测定胶凝材料的断裂性质。但水泥和混凝土的测试方法至今还没有标准化。因此, 很难比较不同研究者所取得的试验结果。因为这些结果是在不同形式和不同大小的试件上, 并在不同类型的试验机上使用一般方法得到的, 养护条件也没有标准化, 所以试验数值离散性很大。

目前测试断裂韧度 K_{Ic} 和断裂能 G_f 的方法主要有: 单边缺口梁 3 点或 4 点弯曲、紧凑拉伸、楔入劈拉、双悬臂架、双扭曲、有中心缝的径向压缩、有中心缝的受拉伸板、有棱柱的斜缝受压等。

7. 正确的试件尺寸

上述断裂参数在试验中有很大的可变性 (甚至不一致), 其原因有些已在第 6 节中讨论过。然而, 比上述问题更为基本的一个问题是规定足够大的试件尺寸, 以供正确试验。就是说, 选定的试件尺寸, 与裂缝尖端前面的微开裂区比较起来, 必须很大。该裂缝尖端前面微开裂区尺寸可能很宽, 估计范围为 30mm ~ 500mm。此外, 各种试验已经证明, 只有在裂缝从 75mm 扩大到 1000mm 的范围以后, 才能测