

河北省自然科学基金资助项目

# 混凝土 II 型断裂韧度与断裂机理研究

## 鉴定材料

完成单位：燕山大学

研究期间：1998.1 ~ 2001.12

主研人员：黎振兹、周洪彬、李慧剑等

主持鉴定：河北省自然科学基金委员会

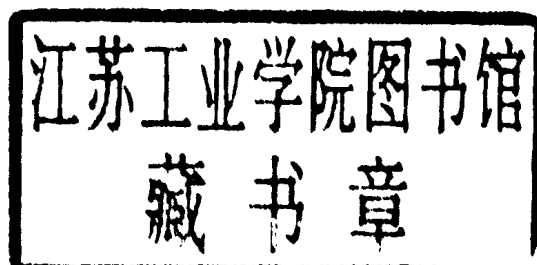
组织鉴定：河北省科技厅

2001 年 12 月

河北省自然科学基金资助项目  
混凝土 II 型断裂韧度与断裂机理研究

鉴 定 材 料

完成单位:燕山大学  
研究期间:1998.1~2001.12  
主研人员:黎振兹、周洪彬、李慧剑 等  
主持鉴定:河北省自然科学基金委员会  
组织鉴定:河北省科技厅



2001 年 12 月

# 目 录

鉴定大纲.....	1
研究工作报告.....	2
研究技术报告.....	10
混凝土 II 型断裂的研究现状与存在问题.....	11
应力强度因子 $K_{II}$ 的计算.....	16
砼 II 型断裂的实验研究.....	28
中心巴西圆盘(Brazilian disk)实验方法.....	44
压模剪切加载下混凝土断裂的研究.....	57
最大双剪应力因子滑开起裂准则.....	72
发表论文.....	83
科技成果项目查新报告.....	84

# 鉴定大纲

## 混凝土 II 型断裂韧度与断裂机理研究

1. 项目名称：混凝土 II 型断裂韧度与断裂机理研究（编号：598270）
2. 项目概况：本项目为河北省自然科学基金资助项目，1998 年 1 月~2001 年 12 月期间完成，现已完成项目所规定的研究内容，由河北省科技厅组织，河北省自然科学基金委员会主持项目的鉴定。
3. 鉴定类型：应用基础
4. 鉴定形式：函审鉴定
5. 鉴定目的与内容：
  - 5.1 对本项目的学术价值、成果创新点及所达到的国内外实际水平做出评价；
  - 5.2 对本项目提出不足与改进建议。
6. 鉴定依据：河北省自然科学基金资助项目任务书
7. 鉴定的组织：由河北省科技厅组织，省科技厅基金办主持，聘请 7 名同行专家组成评审组，设正副组长各一名。
8. 鉴定程序：
  - 8.1 将全套鉴定材料寄给省基金委指定的函评专家，写出评审意见，由正副组长综合形成鉴定结论，报主持鉴定单位审核，组织鉴定单位审批盖章。
  - 8.2 主要技术文件及提供单位
    1. 河北省自然科学基金资助项目任务书，河北省基金委
    2. 鉴定大纲，燕山大学 598270 课题组
    3. 研究工作报告，燕山大学 598270 课题组
    4. 研究技术报告，燕山大学 598270 课题组
    5. 论文复印件，燕山大学 598270 课题组
    6. 查新报告，中国科学技术信息研究所

河北省科技厅

2002 年 5 月

混凝土 II 型断裂韧度与断裂机理研究  
(河北省自然科学基金资助项目)

研 究 工 作 报 告

燕 山 大 学

2001 年 12 月

## 1. 课题概述

混凝土断裂力学是一门新发展起来的边缘学科。在混凝土 I 型断裂的试验与理论研究方面,已经取得了大量的研究成果。然而,在土木、水利和采矿等部门的混凝土工程中,广泛存在着砼承受剪切加载和发生剪切断裂的现象。人们早就认识到研究混凝土 II 型断裂的极其重要性,但由于砼 II 型断裂实验工作的高难性与剪切断裂机理的复杂性,致使混凝土 II 型断裂的研究至今仍是混凝土断裂力学基本问题和主要难题之一。

20 世纪 80 年代中期以来,人们设计了各式各样的 II 型试件与加载方式来进行砼的 II 型断裂试验,但最常用的是四点剪切试件,将切口置于弯矩为零、剪力不为零的纯剪截面上进行 II 型断裂试验;结果表明,II 型裂纹总是偏离原裂纹平面扩展,难以实现沿原裂纹平面的 II 型断裂,由此测得砼的 II 型断裂韧度往往低于 I 型断裂韧度,这就与砼抗剪强度高于抗拉强度的力学性能互相矛盾。

理论和数值分析均表明,在纯剪加载下砼试件偏离原裂纹面所产生的断裂是属于张拉型断裂;因为拉、剪应力同时存在于裂纹尖端,且拉应力大于剪应力,由于砼抗拉强度低于抗剪强度, I 型断裂往往先于 II 型断裂发生;因而,所测得的 II 型断裂韧度值难以反映混凝土材料真正的剪切特性。

为了弄清楚纯剪加载实验中所发生的问题和原因,为了进一步探索砼能否实现 II 型断裂以及 II 型断裂的实质,在河北省自然科学基金会的大力支持下,我们对砼 II 型断裂问题正式立项进行深入研究。历经三年多的研究与探索,取得了相应的成果。完成了课题的预定任务。

本项河北省自然科学基金资助课题正式立项时间为 1998 年 1 月 1 日,计划完成时间为 2000 年 12 月 31 日。由于实验工作难度大等原因使得课题延期完成。

本项课题由燕山大学完成,参加课题研究的主要人员有黎振兹教授、周洪彬教授、李慧剑教授、赵庆新、郝圣旺、任兴利等

## 2. 课题的研究内容

砼承受剪切加载和发生剪切断裂的现象广泛存在于土木、水利和采矿等部门的混凝土工程中,为了探索砼能否实现 II 型断裂以及 II 型断裂的实质,本项

目的研究内容为:

II型裂纹发生不同断裂形式的条件;

不同断裂形式对应的断裂韧度值有何差别? 它们的值应采用何种试件和实验装置才能测定出来;

不同断裂形式的应力强度因子计算方法、断裂准则和断裂机理。

这些内容是传统断裂学科中未曾遇到的问题, 其中重点需要解决的难题, 是II型裂纹发生II型断裂时断裂韧度的测定方法, 试件的形式及尺寸的确定, 有限尺寸试件II型裂纹应力强度因子的计算方法。

本项目的成果对于非金属材料断裂学科的发展及其在工程中的实际应用都有着举足轻重的作用, 问题的解决将大大促进非金属材料断裂学科的发展。

### 3. 课题的研究过程和取得的成果

#### 3.1 国内外相关资料的检索

本课题自1998年3月签定项目任务书开始正式启动。首先在原有的研究基础上对课题做了进一步的调研, 通过计算机检索查阅了《EI》收录的相关资料, 调研结果表明尽管混凝土断裂力学在I型断裂研究方面取得了大量的成果, 但混凝土的II型(剪切)断裂是一个极不完善而有待发展的领域, 混凝土II型断裂的研究迄今仍是国际混凝土断裂力学学术界和混凝土工程界的难题之一。由此可见, 本课题的选题方向正好切入国际混凝土断裂力学的研究前沿和热点方向, 意味课题的研究过程将是艰难和复杂的。

针对混凝土II型断裂的研究, 人们设计了各种各样的实验方法, 但至今最流行的一种观点是纯剪加载必将导致混凝土II型断裂。因此, 近10余年来, 最常用的混凝土II型断裂实验方法都是基于沿裂缝面施加纯剪荷载。然而实验结果却不完全支持这一观点, 从而在国际上引起了混凝土材料的II型裂缝能否发生除I型断裂以外的其他断裂形式的争论。为了弄清楚混凝土II型断裂实验中的一系列理论和实际问题, 我们把下列问题:

- ★ 纯剪加载实验方法能实现砼II型断裂? 原因何在? 断裂机理如何?
- ★ 采用何种试件才能实现砼的II型断裂? 怎样才能实现砼的II型断裂?
- ★ 能否建立一种正确测定砼II型断裂韧度的有效实验方法?
- ★ 如何建立混凝土II型断裂准则?

等问题作为我们的研究方向。

### 3.2 混凝土 II 型断裂的理论及实验研究

在本课题的研究过程,按照先后顺序我们选用了直剪式试件、双剪式试件、四点剪切试件(包括单边、双边切口试件和带导向槽的双边切口试件)、中心巴西圆盘试件、压模剪切试件等,由于直剪式试件和双剪式试件的加载难以控制而被淘汰,其余试件均做了详细的理论分析,四点剪切双边切口高窄剪力区试件、带导向槽的四点剪切双边切口高窄剪力区试件、中心巴西圆盘试件、压模剪切试件作了实验研究。

#### 3.2.1 四点剪切试件纯剪加载 II 型断裂的理论和实验研究

由于实验室试件均为有限几何体,用解析法求解有限尺寸裂纹试件的应力强度因子极为困难,因此借助数值方法或半解析方法从理论上建立试件 II 型应力强度因子的计算公式是至关重要的。

对于四点剪切试件,当  $S_1/W < 0.33$  时(称紧凑四点剪切试件),可以在裂纹所在截面形成高窄剪力区,有利于裂纹发生 II 型断裂。但此种情形,目前尚无应力强度因子  $K_{II}$  的计算公式,我们分别应用边界配位法和有限单元位移法建立了四点剪切单边切口试件应力强度因子  $K_{II}$  的计算公式,给出了四点剪切双边切口试件和带导向槽四点剪切双边裂纹试件 II 型断裂应力强度因子的计算公式。

四点剪切双边切口试件在 10t 液压万能试验机上进行纯剪加载 II 型断裂实验,实验表明,在纯剪加载下,无论荷载从两侧多么靠近裂纹面,都不能实现纯 II 型断裂;有限元法数值计算结果表明,对于双边深裂纹( $a = 30mm$ ),当  $S_1 = 5mm$  与  $S_2 = 10mm$  时,裂纹尖端和韧带上最大剪应力与最大主应力之比为 1.81,但由于砼的抗剪强度比其抗拉强度要高出几倍,因此,纯剪加载下的砼紧凑四点剪切试件无论加载点位置怎样靠近裂纹面,均不能实现纯的 II 型断裂,而不可避免地将发生张拉破坏,即使是裂纹尖端间距很小时也不会例外。

带导向槽四点剪切双边切口试件纯剪加载实验结果表明,当导向槽深度达到一定值时,试件发生了沿导向槽方向的破坏,而并未出现偏离裂纹的破坏。但此时裂纹面的韧带有效面积较小,断裂破坏的性质还有待于商定。

#### 3.2.2 中心巴西圆盘 II 型断裂的理论和实验研究



线弹性断裂力学中应力强度因子的解法是该领域内一项重要的研究内容。在众多的解法中,权函数法由于把裂纹问题的几何与荷载因素作了分离,因而该法是一种高效灵活、使用方便、准确可靠的求解应力强度因子的解析方法,受到国内外学者的重视,它在二维和三维裂纹体的分析中有着广泛的应用。

在本项目的研究中,我们采用半解析权函数法求解了中心巴西圆盘试件的无量纲Ⅱ型应力强度因子的计算公式。

对含有不同裂纹长度的中心巴西圆盘试件,在裂纹倾角 $\theta=15^\circ$ 的情况下,采用对径压缩加载的方法进行了实验,实验结果表明不能实现混凝土的Ⅱ型断裂。

### 3.2.3 压模剪切试件Ⅱ型断裂的理论和实验研究

为了实现混凝土的Ⅱ型断裂,我们已试用过多种方法。四点剪切是对砧试件的原裂纹平面施加纯剪荷载的方法,不能实现Ⅱ型断裂;中心巴西圆盘是对砧试件施加对径压缩荷载的方法,也难以实现混凝土的Ⅱ型断裂。理论分析表明,这些试件的裂纹尖端往往存在有较高的周向拉应力,从而导致纯剪加载下裂纹偏离原裂纹平面起裂扩展,难以实现沿原裂纹平面的剪切断裂。要获得Ⅱ型裂纹的剪切断裂,必须有效地抑制裂纹尖端的拉应力,产生有利于Ⅱ型断裂的应力条件。研究发现,抑制这一拉应力的有效方法,就是沿与裂纹平面相垂直的方向施加一定大小的压应力,形成以压促剪,压剪联合,实现砧Ⅱ型断裂的非纯剪加载。

压模剪切实验方法是对试件同时施加与裂纹平面平行和正交的压应力,产生有利于混凝土实现Ⅱ型断裂的应力条件,即裂纹尖端的拉应力受到抑制,并能产生较高的剪应力。有限元分析表明压剪荷载作用下裂纹尖端最大剪应力比最大周向应力大得多,能够有效地抑制裂纹尖端的拉应力,产生较高的剪应力,即产生有利于混凝土Ⅱ型断裂的应力条件。

对于有限尺寸压模剪切加载下任意切深比双边裂纹试件,迄今尚无Ⅱ型应力强度因子的计算公式。本项目采用有限单元位移法推得计算 $K_{II}$ 的表达式。

压模剪切试件Ⅱ型断裂试验表明,在双边裂纹尖端起裂后,当模板倾角 $\alpha \geq 55^\circ$ 时,后继扩展是沿着原裂纹平面,因此发生的断裂为剪切断裂。数值分

析表明,此时试件双边裂纹尖端受到压、剪应力作用,试件韧带上的正应力为均匀分布压应力;故在压模剪切试验条件下,双边裂纹试件韧带上基本处于均匀压、剪应力作用之下,而没有拉应力。因此,这样的断裂是真正不包含  $K_I$  影响的剪切断裂,由此测得的 II 型断裂韧度  $K_{IIc}$  能够真实地反映混凝土剪切断裂的特性。

### 3. 3 最大双剪应力因子复合滑开型起裂准则的理论研究

在 I-II 复合型变形条件下,裂纹尖端的起裂准则一直是混凝土断裂力学研究的一个重要问题。迄今为止,研究得最多的是张开型变形问题,相应的实验研究也是围绕纯 I 型变形。对复合型变形来说,现有的断裂准则虽从不同角度定义了广义的裂纹扩展力,但对于裂纹扩展阻力,这些准则都假定复合型变形的裂纹扩展阻力就等于这种材料的纯 I 型裂纹扩展阻力,这表明现有的复合型断裂准则都是张开型断裂准则。然而,在土木、水利等工程中,广泛存在着剪切断裂现象,我们的实验研究表明,砵 II 型裂纹的起裂可以有张开型与滑开型两种形式。前者已有不少的研究报道,而后者则不能用现有的复合型张开断裂准则进行解释。为此,我们建立了一个最大双剪应力因子复合滑开型起裂准则(简称 Ts 准则)。实验表明,砵压模剪切试件 II 型裂纹开裂角的实验值与 Ts 准则的理论预示值相吻合。

### 3. 4 混凝土 II 型断裂研究所取得的结果

● 通过对四点剪切试件、巴西圆盘(Brazilian)试件的理论研究和实验分析表明,长期以来一直认为纯剪加载必将导致 II 型断裂的观点是不符合事实的。理论分析与数值计算均表明,在纯剪加载下,裂纹尖端同时存在拉应力与剪应力,且拉应力大于剪应力,由于砵的抗剪强度大于抗拉强度,导致 I 型断裂先于 II 型断裂发生。因此,在纯剪加载下,无论加载点位置如何变化,都不可能实现 II 型断裂,只能发生 I 型断裂。至此,本研究从理论到实验分析了纯剪加载不可能实现 II 型断裂的原因,澄清了长期以来认为纯剪加载必将导致砵 II 型断裂的不正确观点,这种观点既不符合实验事实,理论上也是行不通的。

● 应力强度因子计算是砵断裂力学中一项极为重要的内容;在砵 II 型断裂实验中,试件尺寸都是有限的,目前尚无应力强度因子计算公式,求其解析解

中心巴西圆盘试件、压模剪切试件 II 型断裂应力强度因子和断裂韧度计算公式, 从而为开展砼 II 型断裂试验扫除了理论上的障碍。

● 采用压模剪切加载实验方法能实现混凝土沿裂纹平面发生剪切断裂, 因而从实验上肯定了要实现砼的 II 型断裂其前提必须是非纯剪加载, 这就解决了长期以来一直采用对试件原裂纹平面施加纯剪荷载的实验方法而难以实现砼 II 型断裂的问题。这种实验方法能对砼试件同时施加与裂纹平面正交和平行的压应力; 理论分析与数值计算均指出, 这不同方向的压应力在裂纹尖端产生较高剪应力的同时, 又能有效抑制裂纹尖端的拉应力, 创造砼 II 型断裂的有利条件, 从而引发裂纹沿原裂纹平面开裂扩展, 导致砼发生 II 型断裂。砼 II 型断裂韧度  $K_{IIc}$  是混凝土工程中一个很重要的参数, 它表征砼抵抗剪切 (II 型) 裂纹扩展的能力, 是剪切 (II 型) 裂纹尖端应力场极限强度的度量。关于混凝土  $K_{IIc}$  的测试, 目前尚无统一的测试规范可循, 我们认为压模剪切加载实验方法是测定混凝土 II 型断裂韧度的一种有效而又可行的方法, 为今后混凝土  $K_{IIc}$  测试建议方法 (包括试件几何、测试方法、 $K_{IIc}$  计算公式等) 的建立, 提供了理论与实验依据。

● 迄今国内外尚无测定砼  $K_{IIc}$  的统一规范, 这种现状的存在和现有复合型断裂准则密切相关。如最大拉应力准则、最大拉应变准则、最小应变能密度因子准则与最大应变能释放率准则予示的 II 型裂纹开裂角  $\theta_c$  分别为  $-70.5^\circ$ 、 $-67^\circ$ 、 $-75.6^\circ$ , 因而, 至今仍把纯剪加载下发生偏离原裂纹平面的扩展断裂视为 II 型断裂, 这严重地阻碍了砼 II 型断裂研究的发展。摆在我们面前的任务是, 对于砼的 II 型断裂, 现有的复合型张开断裂准失效, 因此, 迫切需要建立一个新的复合滑开型断裂准则, 以便能解释砼发生沿原裂纹平面的 II 型断裂现象。对此, 本研究提出了一个最大双剪应力因子复合型滑开断裂准则 (简称  $T_s$  准则), 该准则对  $\theta_c$  的予示值与压模剪切加载下裂纹发生沿原裂纹平面扩展的实验值  $\theta_c = 0$  是相一致的, 这一准则的提出是对混凝土断裂力学理论的一个补充。由此可知, 从实验到理论准确判断 II 型裂纹的 I 型断裂形式有纯剪加载四点剪切实验和最大拉应力理论; 而准确判断 II 型裂纹的 II 型断裂型式则有压模剪切加载实验和最大双剪应力因子理论。

#### 4. 存在的问题及努力方向

#### 4. 存在的问题及努力方向

本研究从理论到实验回答了混凝土II型断裂中的一些问题，这些问题的解决，对今后混凝土断裂力学的发展以及对混凝土工程II型断裂的强度设计与安全评估都将具有十分重要的理论价值和实际意义。关于压模剪切加载下砼  $K_{IIc}$  的尺寸效应问题以及不同试件的微观分析，如断口形貌研究，电子显微镜下的断口分析等，尚待今后作进一步的探索。

#### 5. 经费使用情况

支出项目	金额(万元)	
1 科研业务费	1.4	旅差费: 资料费: 论文发表费:
实验材料费	1.5	材料费:
仪器设备费	0.2	传感器:
实验室改装费	0.5	加载装置: 试模制作:
5 协作费	0.2	
6 管理费	0.2	
合计	4.0	

#### 6. 主要研究人员名单

姓名	性别	年龄	技术职称	文化程度	工作单位	对成果创造性贡献
黎振兹	男	64	教授	大学	燕山大学	课题负责人
周洪彬	男	48	教授	研究生	燕山大学	主要参加人, 实验研究
李慧剑	男	43	教授	研究生	燕山大学	主要参加人, 数值分析
赵庆新	男	30	讲师	研究生	燕山大学	实验研究
郝圣旺	男	28	助教	研究生	燕山大学	数值分析
任兴利	男	49	高级工程师	大学	燕山大学	实验研究
王金成	男	34	工程师	大学	秦市二建公司	实验研究
曹云龙	男	64	高级工程师	大学	秦市二建建研所	实验研究

混凝土 II 型断裂韧度与断裂机理研究  
(河北省自然科学基金资助项目)

研究技术报告

燕山大学  
2001 年 12 月

# 混凝土 II 型（剪切型）断裂的 实验探索与理论研究

(河北省自然科学基金资助项目技术报告)

## 第一部分 混凝土 II 型断裂的研究现状与存在问题

混凝土断裂力学是一门新发展起来的边缘学科。由于受金属断裂力学发展的影响，从一开始就以混凝土 I 型（张开型）断裂为主要研究对象<sup>[1-1, 1-2]</sup>。迄今为止，在混凝土 I 型断裂的试验与理论研究方面，已经取得了大量的研究成果<sup>[1-3, 1-4]</sup>。

然而，在土木、水利和采矿等部门的混凝土工程中，广泛存在着砼承受剪切加载和发生剪切断裂的现象。人们早就认识到研究混凝土 II 型断裂的极其重要性，它是剪切断裂与 I-II 复合型滑开断裂研究的关键。但由于砼 II 型断裂实验工作的高难性与剪切断裂机理的复杂性，致使混凝土 II 型断裂的研究至今仍是混凝土断裂力学基本问题和主要难题之一，很少有人涉足这一领域，II 型断裂只是作为一个验证现有复合型断裂准则的实验点进行研究，由此提出混凝土 I-II 复合型裂纹与 II 型裂纹的最终断裂形式为张拉型，而其理论基础是断裂力学中的最大拉应力准则、最大拉应变准则、最小应变能密度因子准则和最大能量释放率准则等。从而在国际上引起了混凝土类脆性材料的 II 型裂纹能否产生除 I 型断裂以外的其它断裂型式的争论<sup>[1-5]</sup>。

20 世纪 80 年代中期以来，人们设计了多种各式各样的 II 型试件与加载方式来进行砼的 II 型断裂试验，但最常用的是四点剪切试件，将切口置于弯矩为零、剪力不为零的纯剪截面上进行 II 型断裂试验；结果表明，II 型裂纹总是偏离原裂纹平面扩展，难以实现沿原裂纹平面的 II 型断裂，由此测得砼的 II 型断裂韧度往往低于 I 型断裂韧度，这就同砼抗剪强度高于抗拉强度的力学性能互相矛盾。

理论和数值分析均表明，在纯剪加载下砼试件偏离原裂纹面所产生的断裂是属于张拉型断裂；因为拉、剪应力同时存在于裂纹尖端，且拉应力大于剪应

力, 由于砼抗拉强度低于抗剪强度, I型断裂往往先于II型断裂发生; 因而, 所测得的II型断裂韧度值难以反映混凝土材料真正的剪切特性。

其它剪切试件如紧凑剪切试件<sup>[1-6]</sup> (compact shear test specimen)、边裂纹阿康试件<sup>[1-7]</sup> (Edge crack Arcan test specimen)、冲穿剪切试件 (Punch-through shear test specimen) 等都和四点剪切试件一样存在相同的问题。目前, 国际混凝土断裂力学学术界和国际混凝土工程界都十分重视这个问题, 但至今尚未解决好。为此, 文[1-8]首先提出用高窄剪力区四点剪切试件的实验方法能够实现混凝土的II型断裂; 文[1-9]采用文[1-8]的方法得到了用高窄剪力区四点剪切砼试件能实现II型断裂的结论, 并测得了砼的II型断裂能为I型断裂能的20倍。文[1-10]在分析了混凝土II型断裂实验结果后认为, 采用紧凑四点剪切实验方法比高窄剪力区四点剪切实验方法更易于消除拉应力的影响而实现纯II型断裂。但文[1-11]对这种纯剪加载下的断裂是否为纯II型断裂发生了疑问; 随后, 文[1-12]指出, 在实验室条件下, 实现II型裂纹的II型断裂是很困难的。1986年, 美国著名学者博雷西和史密斯在其著作[1-13]中强调指出“由II型和III型引起的断裂确实存在”。为了弄清楚纯剪加载实验中所发生的问题和原因, 为了进一步探索砼能否实现II型断裂以及II型断裂的实质, 在河北省自然科学基金会的大力支持资助下, 我们着手深入研究砼II型断裂测试中一系列理论与实际问题。在研究方法上采取理论研究(数值计算, 半解析方法等)和实验分析紧密结合, 互相促进, 以解决砼II型断裂过程中的理论与实际问题。下面将本项目的主要研究成果总结、综合如下:

● 八十年代中期以来, 国内外使用纯剪加载进行砼II型断裂实验均产生了以下几个问题:

- (a) 实验时裂纹偏离原裂纹平面扩展;
- (b) 实验测出的II型断裂韧度  $K_{IIc}$  小于I型断裂韧度  $K_{Ic}$ ;
- (c) 在力学性能上,  $K_{IIc} < K_{Ic}$  与  $\tau_c > \sigma_t$  相互矛盾;
- (d) 砼II型断裂到底能不能实现? 怎样测得砼真正的II型断裂韧度。

长期以来, 产生上述问题的原因至今尚不清楚; 为此, 本研究针对下列几种纯剪加载下的砼试件能否实现II型断裂进行了对比研究, 这些试件是: (a) 高窄剪力区四点剪切试件; (b) 紧凑四点剪切试件; (c) 巴西圆盘 (Brazilian) 试件。

实验结果均表明,在纯剪加载下,裂纹往往偏离原裂纹平面扩展,最终发生张拉断裂;所测得的 $K_{IIc}$ 小于或接近于 $K_{Ic}$ 。由此可见,过去一直认为纯剪加载必将导致II型断裂的观点是不符合实验事实的。我们所作的理论分析与数值计算均表明,在纯剪加载下,裂纹尖端同时存在拉应力与剪应力,且拉应力大于剪应力,由于砧的抗剪强度大于抗拉强度,导致I型断裂先于II型断裂发生。因此,在纯剪加载下,无论加载点位置如何变化,都不可能实现II型断裂,只能发生I型断裂。至此,本研究从实验到理论分析了纯剪加载不可能实现II型断裂的原因,澄清了长期以来认为纯剪加载必将导致砧II型断裂的不正确观点,这种观点既不符合实验事实,理论上也是行不通的。

● 紧凑四点剪切砧试件实验表明,纯剪加载下,始终未能发生近似沿裂纹平面的II型断裂。所测得的砧II型断裂韧度与I型断裂韧度之比值 $K_{IIc}/K_{Ic}$ 随加载点离裂纹平面间距的缩小而增大,逐步偏离于现有复合型断裂准则的唯一予示值,比如最大周向拉应力准则 $K_{IIc}/K_{Ic}=0.866$ ,最大拉应变准则为0.750,最小应变能密度因子准则为0.900,最大应变能释放率准则为0.820;而相应地,所测得的开裂角 $\theta_c$ 则随加载点离裂纹平面间距的缩短而减小,逐步偏离了理论予示值分别为 $-70.5^\circ$ 、 $-67^\circ$ 、 $-70^\circ$ 与 $-75.6^\circ$ 。

● 高窄剪力区四点剪切砧试件的实验结果指出,这类砧试件也不能实现II型断裂。高窄剪力区是实现II型断裂的必要条件,为了更好地满足这一条件,同时又使压头不会压坏砧试件,我们采用了沿裂纹面设置导向槽的方法,但当导向槽深度达一定值时,尽管宏观上能得到近似沿裂纹面的II型断裂,但从试件断口呈锯齿状来看,仍属于张拉微裂纹扩展、贯通,导致宏观剪切断裂的结果,因此,能否真正反映砧剪切断裂的特性仍值得怀疑;这种断裂是否称得上是真正不含 $K_I$ 成份影响的II型断裂也是值得怀疑的。由于导向槽试件能制约裂纹不沿阻力最小的方向扩展,相当于人为的给裂纹的II型断裂增加了阻力,所以使导向槽试件测出的砧II型断裂韧度 $K_{IIc}$ 大于无导向槽试件。实验还表明,导向槽试件的II型断裂韧度随试件净厚度增大而减小。

● 应力强度因子计算是砧断裂力学中一项极为重要的内容;在砧II型断裂实验中,试件尺寸都是有限的,目前尚无应力强度因子计算公式,求其解析解又十分困难,因此,借助数值计算方法和半解析方法建立下列试件II型断裂韧



度计算公式是至关重要的。这些试件有：(a) 高窄剪力区四点剪切试件；(b) 紧凑四点剪切试件；(c) 压模剪切试件；(d) 中心巴西盘试件（我们采用半解析权函数法获得的结果与 Fett, T. 最近用权函数法得到的结果相当一致）。从而为开展砼 II 型断裂试验扫除了理论上的障碍。

● 采用压模剪切加载实验方法能实现混凝土沿裂纹平面发生剪切断裂，因而从实验上肯定了要实现砼的 II 型断裂其前提必须是非纯剪加载，这就解决了长期以来一直采用对试件原裂纹平面施加纯剪荷载的实验方法而难以实现砼 II 型断裂的问题。这种实验方法能对砼试件同时施加与裂纹平面正交和平行的压应力；理论分析与数值计算均指出，这不同方向的压应力在产生较高剪应力的同时，又能有效抑制裂纹尖端的拉应力，创造砼 II 型断裂的有利条件，从而引发裂纹沿原裂纹平面开裂扩展，导致砼发生 II 型断裂。砼 II 型断裂韧度  $K_{IIc}$  是混凝土工程中一个很重要的参数，它表征砼抵抗剪切（II 型）裂纹扩展的能力，是剪切（II 型）裂纹尖端应力场极限强度的度量。关于混凝土  $K_{IIc}$  的测试，目前尚无统一的测试规范可循 [1-4]，我们认为压模剪切加载实验方法是测定混凝土 II 型断裂韧度的一种有效而又可行的方法，为今后混凝土  $K_{IIc}$  测试建议方法（包括试件几何、测试方法、 $K_{IIc}$  计算公式等）的问世，提供了理论与实验依据。

● 如上所述，迄今国内外尚无测定砼  $K_{IIc}$  的统一规范，这种现状的存在和现有复合型断裂准则密切相关。如最大拉应力准则、最大拉应变准则、最小应变能密度因子准则与最大应变能释放率准则予示的 II 型裂纹开裂角  $\theta_c$  分别为  $-70.5^\circ$ 、 $-67^\circ$ 、 $-75.6^\circ$ ，因而，至今仍把纯剪加载下发生偏离原裂纹平面的扩展断裂视为 II 型断裂，这严重地阻碍了砼 II 型断裂研究的发展。摆在我们面前的任务是，对于砼的 II 型断裂，现有的复合型张开断裂准失效，因此，迫切需要建立一个新的复合型滑开断裂准则，以便能解释砼发生沿原裂纹平面的 II 型断裂现象。对此，本研究提出了一个最大双剪应力因子复合型滑开断裂准则（简称  $T_s$  准则），该准则对  $\theta_c$  的予示值与压模剪切加载下裂纹发生沿原裂纹平面扩展的实验值  $\theta_c = 0$  是相一致的，这一准则的提出是对混凝土断裂力学理论的一个补充。由此可知，从实验到理论准确判断 II 型裂纹的 I 型断裂形式有纯剪加载四点剪切实验和最大拉应力理论；而准确判断 II 型裂纹的 II 型断裂型