

ICS 93.020

P 59

备案号: J493—2006

DL

中华人民共和国电力行业标准

P

DL/T 5332—2005

水工混凝土断裂试验规程

Norm for fracture test of hydraulic concrete

2005-11-28 发布

2006-06-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

目 次

| | |
|-------------------------------|----|
| 前言 | II |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 2 |
| 3 术语和符号 | 3 |
| 3.1 术语 | 3 |
| 3.2 符号 | 4 |
| 4 总则 | 5 |
| 5 楔入劈拉法测定混凝土断裂韧度 | 6 |
| 5.1 试件 | 6 |
| 5.2 试验装置 | 8 |
| 5.3 试验 | 9 |
| 5.4 试验结果计算 | 9 |
| 5.5 试验报告 | 11 |
| 6 三点弯曲梁法测定混凝土断裂韧度 | 13 |
| 6.1 试件 | 13 |
| 6.2 试验装置 | 14 |
| 6.3 试验 | 14 |
| 6.4 试验结果计算 | 14 |
| 6.5 试验报告 | 16 |
| 附录 A (资料性附录) 楔入劈拉试件试模 | 18 |
| 附录 B (资料性附录) 预制裂缝钢板 | 19 |
| 附录 C (资料性附录) 楔入劈拉试验传力装置 | 20 |
| 附录 D (规范性附录) 断裂韧度试验记录表 | 24 |
| 附录 E (资料性附录) 三点弯曲梁试件试模 | 25 |
| 条文说明 | 27 |

前 言

本标准是根据国家发展和改革委员会《国家发改委办公厅关于印发 2005 年行业标准项目计划的通知》（发改办工业〔2005〕739 号文）的要求制定的。

在对水工混凝土建筑物裂缝扩展的稳定性进行评价和水工混凝土建筑物的抗裂、防裂设计中，均需提供混凝土断裂韧度参数，为统一测定混凝土断裂韧度的测试方法，特制定本标准。

本标准是在广泛收集了国内外混凝土断裂试验资料，参考了国际上发达国家断裂试验标准，进行了大量的平行试验，并多次召集专家进行专题讨论和理论计算分析的基础上制定的。

本标准规定了楔入劈拉法和三点弯曲梁法测定水工混凝土断裂韧度的要求。同时进行两种方法的试验，测试结果有差异时，以三点弯曲梁法为准。

本标准附录 D 为规范性附录，附录 A、附录 B、附录 C 和附录 E 为资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业水电施工标准化技术委员会归口并负责解释。

本标准负责起草单位：河海大学。

本标准参加起草单位：大连理工大学、中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院、同济大学、中国葛洲坝集团公司、长江勘测规划设计研究院。

本标准主要起草人：徐道远、郑治、徐世烺、宋玉普、吴科如、姚武、朱为玄、何金荣、周厚贵、钮新强、吴智敏、王向东。

1 范 围

本标准规定了水工混凝土Ⅰ型断裂韧度试验的标准测试方法。

本标准适用于大中型水电水利工程常态混凝土和碾压混凝土，其他工程可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

DL/T 5150 水工混凝土试验规程

SL 48 水工碾压混凝土试验规程

3 术 语 和 符 号

3.1 术 语

下列术语适用于本标准。

3.1.1

I 型断裂 mode I fracture

在外力作用下裂缝呈张开型扩展的断裂形态。

3.1.2

混凝土断裂韧度 fracture toughness of concrete

混凝土抵抗裂缝扩展的能力。

3.1.3

起裂韧度 initiation toughness

裂缝开始扩展时的断裂韧度。

3.1.4

失稳韧度 unstable toughness

裂缝失稳扩展时的断裂韧度。

3.1.5

楔入劈拉法 wedge splitting method

用楔入劈拉试件进行断裂试验的方法。

3.1.6

三点弯曲梁法 three-point bending beam method

用三点弯曲切口梁试件进行断裂试验的方法。

3.1.7

预制裂缝 precast crack

断裂试验试件中人为制造的裂缝。

3.1.8

临界裂缝 critical crack

裂缝发生失稳扩展时的有效裂缝。

3.1.9

裂缝口张开位移 crack mouth opening displacement

试件在外力作用下裂缝口两侧的相对张开位移。

3.2 符 号

下列符号适用于本标准。

a_0 ——初始裂缝长度，预制裂缝长度。

a_c ——临界裂缝长度，有效裂缝长度。

b ——试件宽度。

c_i ——试件初始 V/F 值。

E ——计算弹性模量。

F_Q ——起裂荷载。

F_{\max} ——最大荷载。

F_{HQ} ——起裂水平荷载。

$F_{H\max}$ ——最大水平荷载。

g ——重力加速度。

h ——试件高度。

K_{IC} ——断裂韧度。

K_{IC}^Q ——起裂韧度。

K_{IC}^S ——失稳韧度。

L ——三点弯曲梁试件长度。

m ——质量。

S ——三点弯曲梁试件跨度。

t ——试件厚度。

V ——裂缝口张开位移。

V_c ——裂缝口临界张开位移。

α ——缝高比。

4 总 则

4.0.1 混凝土断裂韧度是水电水利工程抗裂、防裂设计及裂缝评定中分析混凝土抗裂能力和建筑物裂缝扩展稳定性的重要依据，应按本标准进行混凝土断裂韧度测试。

4.0.2 在进行混凝土断裂韧度试验时，宜进行同类混凝土立方体抗压强度、极限抗拉强度和弹性模量的测定，以便综合评定混凝土质量。

4.0.3 所有试验设备应按规定进行率定。

5 楔入劈拉法测定混凝土断裂韧度

5.1 试 件

5.1.1 一般规定：

- 1 试件的成型和养护应按 DL/T5150 或 SL48 执行。
- 2 当现场取样或进行对比试验时也可采用加工试件。
- 3 每组合格试件数不得少于 5 个。

5.1.2 成型试件。

- 1 试件尺寸及试模。试件尺寸为 $230\text{mm} \times 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ ，见图 5.1.2。试模的要求参见附录 A。

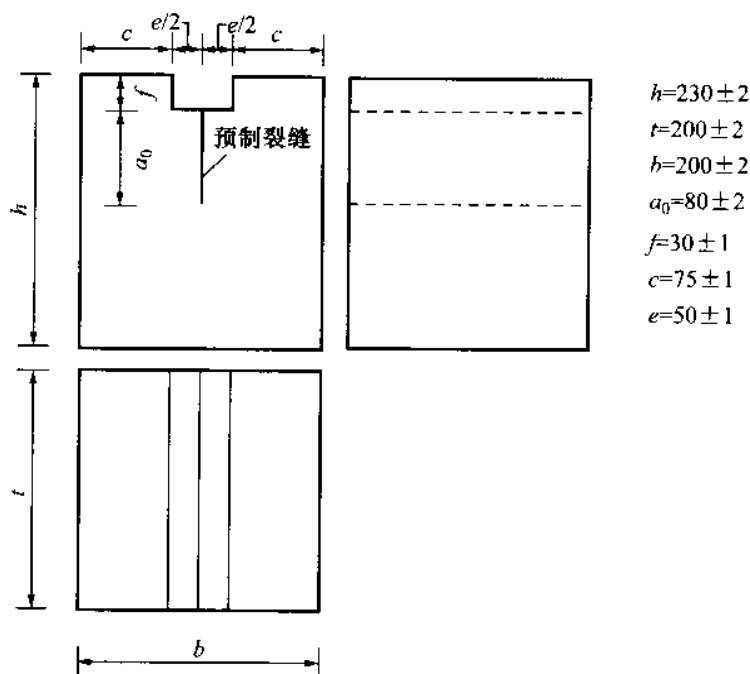


图 5.1.2 试件尺寸（尺寸单位：mm）

2 预制裂缝。用钢板预埋生成，钢板要求及放置位置参见附录 B。预制裂缝缝长 $80\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 。

在混凝土浇筑前，钢板两面涂上脱模剂，待混凝土初凝后 3h 内将钢板拔出，即形成一条预制裂缝。拔出钢板时不得损坏试件裂缝尖端部位。

5.1.3 加工试件。

1 试件尺寸。试件尺寸为 $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ ，见图 5.1.3。

2 裂缝生成。在试件侧面切割生成，缝宽控制在 $3\text{mm} \pm 1\text{mm}$ ，缝长控制在 $80\text{mm} \pm 2\text{mm}$ ，缝面与试件表面夹角为 $90^\circ \pm 0.5^\circ$ 。

3 粘贴钢块。钢块厚度为 $30\text{mm} \pm 1\text{mm}$ ，宽度为 $75\text{mm} \pm 1\text{mm}$ ，长度为 $200\text{mm} \pm 2\text{mm}$ ，表面光洁度为 M1。粘贴位置见图 5.1.3。粘贴钢块前对试件粘贴面进行打磨处理，使表面不平整度小于 0.5%。清洁后，用环氧类结构胶粘贴牢固。

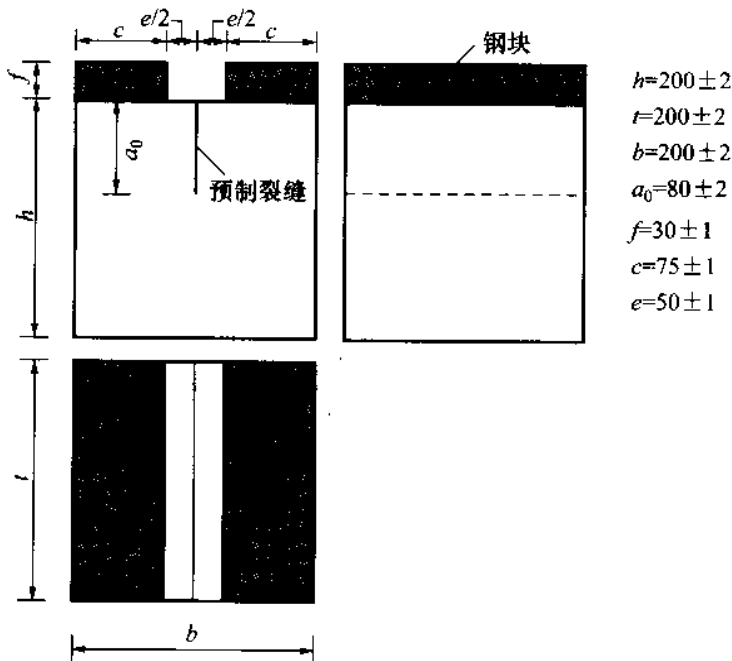


图 5.1.3 试件尺寸及钢块粘贴位置（尺寸单位：mm）

5.2 试 验 装 置

5.2.1 试验装置。试验装置见图 5.2.1。

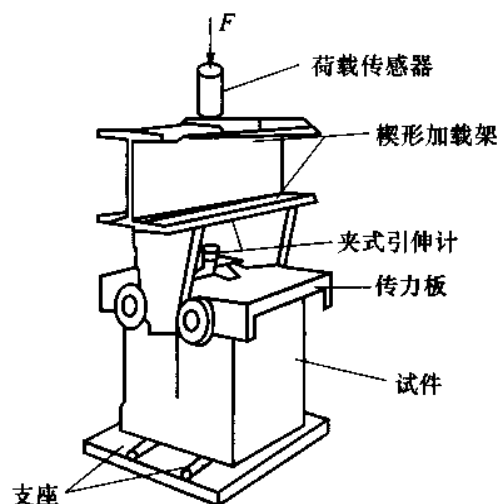


图 5.2.1 试验装置

5.2.2 加载装置。加载装置应满足下列要求：

- 1 刚度不小于 100kN/mm 。
- 2 最低加载速率不大于 80N/s ，最高加载速率不大于 120N/s 。

5.2.3 传力装置。

- 1 楔形加载架，由两块楔形加载钢板及型钢焊制，要求参见附录 C。
- 2 传力板，用钢板焊制，要求参见附录 C。
- 3 支座，用圆钢及钢板焊制，要求见附录 C。支座位置在试件底部的两个四分点上。
- 4 传力装置系统的刚度不小于 100kN/mm 。

5.2.4 量测装量。

- 1 荷载量测装量：采用荷载传感器，最大量程 50kN ，精度不低于 1% 。
- 2 位移量测装置：宜采用夹式引伸计，精度不低于 0.5% 。

嵌在粘贴于裂缝口两侧的刀口薄钢板间。

3 数据自动采集系统。

5.3 试 验

5.3.1 试验步骤：

- 1 量测试件外形尺寸和预制裂缝的长度。
- 2 安装试件。
- 3 在预制裂缝中间安装刀口薄钢板。
- 4 安装夹式引伸计。
- 5 安装传力装置及荷载传感器。
- 6 启动加载装置，在荷载传感器、传力装置及试件即将接触时，开启数据采集系统并采集零点。
- 7 加载并进行量测，加载应均匀，速率宜控制在 80N/s～120N/s，直至试件破坏。

每根试件的试验均按上述步骤进行，同一组试件的试验应在 24h 内连续完成。

5.3.2 量测与记录。

量测项目包括试件尺寸、预制裂缝长度、竖向荷载和裂缝口张开位移。荷载的量测分辨率不低于 20N，位移的量测分辨率不低于 0.5μm。记录格式见附录 D。

5.4 试 验 结 果 计 算

5.4.1 断裂韧度计算。

- 1 失稳韧度 K_{IC}^S 应按式 (5.4.1-1) 计算：

$$K_{IC}^S = \frac{F_{Hmax} \times 10^{-3}}{th^{1/2}} f(\alpha) \quad (5.4.1-1)$$

其中，
$$f(\alpha) = \frac{3.675[1 - 0.12(\alpha - 0.45)]}{(1 - \alpha)^{3/2}}, \alpha = \frac{a_c}{h} \quad (5.4.1-2)$$

式中:

K_{IC}^S ——失稳韧度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;

$F_{H\max}$ ——最大水平荷载, kN ;

t ——试件厚度, m ;

h ——试件高度, m ;

a_c ——有效裂缝长度, m 。

其中, $F_{H\max}$ 应按式 (5.4.1-3) 计算:

$$F_{H\max} = \frac{(F_{\max} + mg \times 10^{-2})}{2 \tan 15^\circ} \quad (5.4.1-3)$$

式中:

F_{\max} ——最大荷载, kN ;

m ——楔形加载架的质量, kg , 若楔形加载架固定在试验机上则不计入;

g ——重力加速度, 取 9.81m/s^2 。

a_c 应按式 (5.4.1-4) 计算:

$$a_c = (h + h_0) \left[1 - \left(\frac{13.18}{\frac{V_c \cdot E \cdot t}{F_{H\max}} + 9.16} \right)^{1/2} \right] - h_0 \quad (5.4.1-4)$$

式中:

h_0 ——装置夹式引伸计刀口薄钢板的厚度, m ;

V_c ——裂缝口张开位移临界值, μm ;

E ——计算弹性模量, GPa 。

其中, E 应按式 (5.4.1-5) 计算:

$$E = \frac{1}{tc_i} \left[13.18 \left(1 - \frac{a_0 + h_0}{h + h_0} \right)^{-2} - 9.16 \right] \quad (5.4.1-5)$$

式中:

a_0 ——初始裂缝长度, m;

c_i ——试件的初始 V/F 值, $\mu\text{m}/\text{kN}$, 由试件 $F-V$ 曲线的上升段之直线段上任一点的 V 、 F 计算, $c_i = \frac{V_i}{F_i}$ 。

2 起裂韧度 K_{IC}^Q 应按式 (5.4.1-6) 计算:

$$K_{\text{IC}}^Q = \frac{F_{\text{HQ}} \times 10^{-3}}{th^{1/2}} f(\alpha) \quad (5.4.1-6)$$

$$\text{其中, } f(\alpha) = \frac{3.675[1 - 0.12(\alpha - 0.45)]}{(1 - \alpha)^{3/2}}, \alpha = \frac{a_0}{h} \quad (5.4.1-7)$$

式中:

K_{IC}^Q ——起裂韧度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;

F_{HQ} ——起裂水平荷载, kN。

其中, F_{HQ} 应按式 (5.4.1-8) 计算:

$$F_{\text{HQ}} = \frac{(F_Q + mg \times 10^{-2})}{2 \tan 15^\circ} \quad (5.4.1-8)$$

式中:

F_Q ——起裂荷载, kN, 即试件 $F-V$ 曲线的上升段中从直线段转变为曲线段的转折点所对应的荷载。

5.4.2 断裂韧度以每组 5 个试件测得的算术平均值作为试验结果, 如单个测值与平均值之差超过平均值的 15% 时, 该测值应予以剔除, 按余下测值的平均值作为试验结果。如可用的测值少于 3 个时, 则该组试验失败, 应重做试验。

5.5 试 验 报 告

5.5.1 基本内容:

- 1 试件数、龄期。
- 2 试件尺寸。

- 3 楔形加载架的质量。
- 4 预制裂缝制作方法。
- 5 加载设备。
- 6 量测仪器与精度。
- 7 试验过程描述。
- 8 $F-V$ 曲线。
- 9 F_{\max} 、 V_c 的数值。
- 10 计算弹性模量 E 。
- 11 断裂韧性 K_{IC} 实测值。
- 12 断裂韧性 K_{IC} 的均值。

5.5.2 附加说明：

- 1 混凝土原材料。
- 2 混凝土配合比。
- 3 试验现象与分析。
- 4 其他需要说明的情况。

6 三点弯曲梁法测定混凝土断裂韧度

6.1 试 件

6.1.1 一般规定。见 5.1.1 的规定。

6.1.2 成型试件。

1 试件尺寸及试模。试件尺寸为 $200\text{mm} \times 120\text{mm} \times 1000\text{mm}$ ，见图 6.1.2。试模的要求参见附录 E。

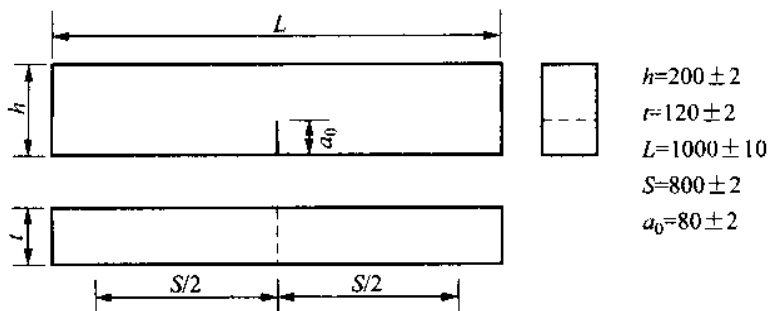


图 6.1.2 试件尺寸（尺寸单位：mm）

2 预制裂缝。用钢板预埋生成，钢板要求及放置位置参见附录 B。预制裂缝缝长控制在 $80\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 。

在混凝土浇筑前，钢板两面涂上脱模剂，待混凝土初凝后 3h 内将钢板拔出，即形成一条预制裂缝。拔出钢板时不得损坏试件裂缝尖端部位。

6.1.3 加工试件。

1 试件尺寸。同成型试件。

2 裂缝生成。见 5.1.3 中 2 款的规定。

6.2 试 验 装 置

6.2.1 试验装置。试验装置见图 6.2.1。

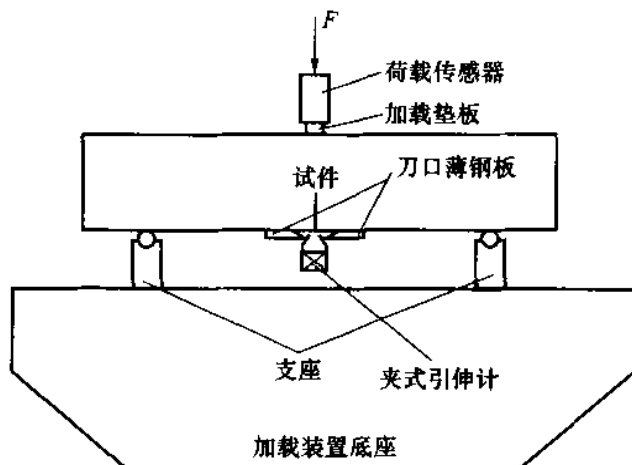


图 6.2.1 试验装置

6.2.2 加载装置。加载装置见 5.2.2 的规定。

6.2.3 传力装置。

1 加载垫板。宽度为 10mm、厚度为 5mm、长度不得小于 120mm 的钢板。

2 支座。支座应能稳定地传力，可采用加载装置配置的滚动支座或另行制作。支座长度不得小于试件厚度，高度应满足安装夹式引伸计的要求。

6.2.4 量测装置。量测装置见 5.2.4 的规定。

6.3 试 验

6.3.1 试验步骤。见 5.3.1 的规定。

6.3.2 量测与记录。见 5.3.2 的规定。

6.4 试 验 结 果 计 算

6.4.1 断裂韧度计算。

1 失稳韧度 K_{IC}^S 应按式 (6.4.1-1) 计算:

$$K_{IC}^S = \frac{1.5(F_{\max} + \frac{mg}{2} \times 10^{-2}) \times 10^{-3} \cdot S \cdot a_c^{1/2}}{th^2} f(\alpha) \quad (6.4.1-1)$$

$$\text{其中, } f(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}}, \alpha = \frac{a_c}{h} \quad (6.4.1-2)$$

式中:

K_{IC}^S ——失稳韧度, MPa · m^{1/2};

F_{\max} ——最大荷载, kN;

m ——试件支座间的质量, kg, 用试件总质量按 S/L 比折算;

g ——重力加速度, 取 9.81m/s²;

S ——试件两支座间的跨度, m;

a_c ——有效裂缝长度, m;

t ——试件厚度, m;

h ——试件高度, m。

其中, a_c 应按式 (6.4.1-3) 计算:

$$a_c = \frac{2}{\pi} (h + h_0) \arctan \left(\frac{tEV_c}{32.6F_{\max}} - 0.1135 \right)^{1/2} - h_0 \quad (6.4.1-3)$$

式中:

h_0 ——装置夹式引伸计刀口薄钢板的厚度, m;

V_c ——裂缝口张开位移临界值, μm;

E ——计算弹性模量, GPa。

其中, E 按式 (6.4.1-4) 计算:

$$E = \frac{1}{tc_i} \left[3.70 + 32.60 \tan^2 \left(\frac{\pi a_0 + h_0}{2 h + h_0} \right) \right] \quad (6.4.1-4)$$

式中:

a_0 ——初始裂缝长度, m;

c_i ——试件的初始 V/F 值, $\mu\text{m}/\text{kN}$, 由试件 F — V 曲线的上升段之直线段上任一点的 V 、 F 计算, $c_i = \frac{V_i}{F_i}$ 。

2 起裂韧度 K_{IC}^Q 应按式 (6.4.2-5) 计算:

$$K_{\text{IC}}^Q = \frac{1.5(F_Q + \frac{mg}{2} \times 10^{-2}) \times 10^{-3} \cdot S \cdot a_0^{1/2}}{th^2} f(\alpha) \quad (6.4.1-5)$$

$$\text{其中, } f(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}}, \alpha = \frac{a_0}{h} \quad (6.4.1-6)$$

式中:

K_{IC}^Q ——起裂韧度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;

F_Q ——起裂荷载, kN, 即试件 F — V 曲线的上升段中从直线段转变为曲线段的转折点所对应的荷载。

6.4.2 断裂韧度测值要求见 5.4.2 的规定。

6.5 试 验 报 告

6.5.1 基本内容。

- 1 试件数、龄期。
- 2 试件尺寸、质量。
- 3 预制裂缝制作方法。
- 4 加载设备。
- 5 量测仪器与精度。
- 6 试验过程描述。
- 7 F — V 曲线。
- 8 F_{max} 、 V_c 的数值。
- 9 混凝土的立方体抗压强度 f_{cu} 、计算弹性模量 E 。

10 断裂韧度 K_{IC} 实测值。

11 断裂韧度 K_{IC} 的均值。

6.5.2 附加说明：

- 1 混凝土原材料。
- 2 混凝土配合比。
- 3 试验现象与分析。
- 4 其他需要说明的情况。

附 录 A
(资料性附录)
楔入劈拉试件试模

A.1 试模由底板、前侧板、后侧板、左侧板、右侧板及凸块 6 部分构成,各板及凸块均应用钢材制作,并用螺栓组装而成,组装后不得有变形和漏水现象。

A.2 组装后的试模及净空尺寸见图 A.1。其净空尺寸应与试件尺寸相同,各板具体尺寸可视加工及组装需要确定。

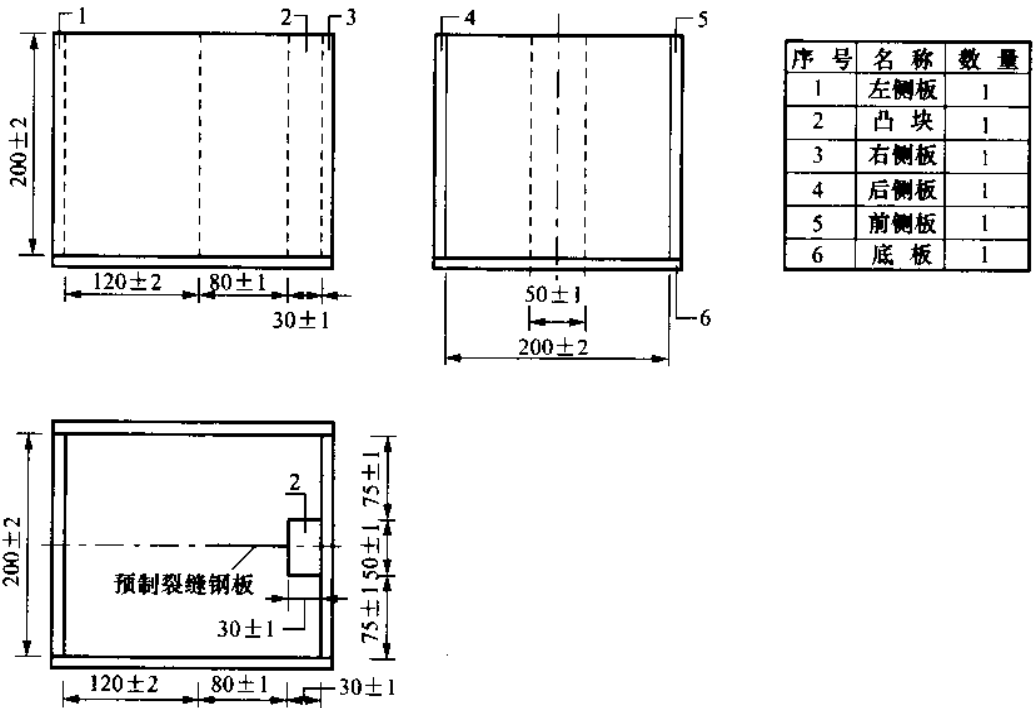


图 A.1 试模及净空尺寸 (尺寸单位: mm)

A.3 凸块置放于右侧板正中,用适当方式与右侧板连接。

附录 B

(资料性附录)

预制裂缝钢板

B.1 为预制裂缝的需要, 钢板形状和有效尺寸见图 B.1。

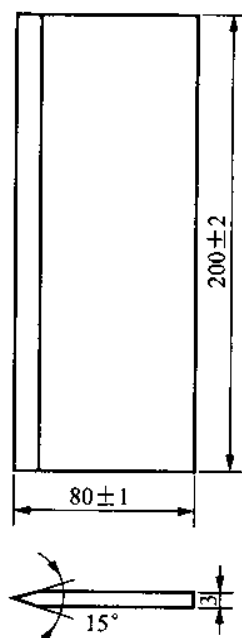
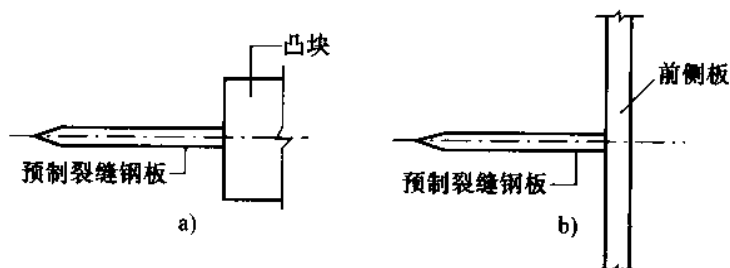


图 B.1 预制裂缝钢板

(尺寸单位: mm)



a) 楔入劈拉; b) 三点弯曲

图 B.2 钢板放置位置

B.2 楔入劈拉试件的预制裂缝钢板应置于试模凸块外侧正中外, 见图 B.2 a); 三点弯曲梁试件的预制裂缝钢板应置于试模侧板内侧正中处, 见图 B.2 b)。

B.3 钢板应用适当方式与试模牢固连接, 浇筑试件时不得松动、脱落或偏转, 并应便于拆模前从试件中拔出。

B.4 为便于与试模连接, 钢板在必需之有效尺寸以外, 可以加长、加高, 或钻孔、弯折; 相应的试模凸块或长边板也可锯缝、局部加厚或钻孔。

附录 C

(资料性附录)

楔入劈拉试验传力装置

C.1 楔入劈拉试验的传力装置包括楔形加载架、传力板和支座三部分。

C.2 楔形加载架由两根槽钢及两块钢板焊接而成。其装配及尺寸见图 C.1。

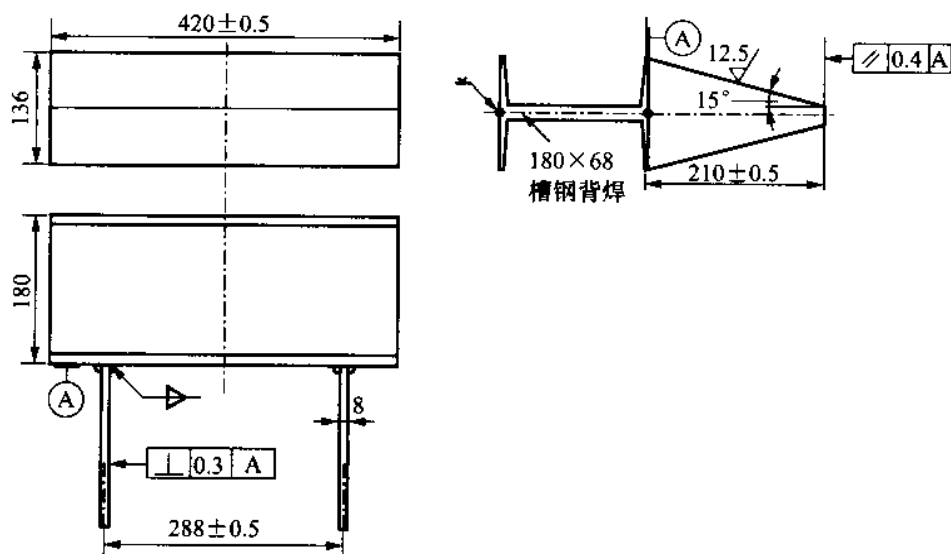


图 C.1 楔形加载架 (尺寸单位: mm)

C.3 传力板为对称的两块,用钢材制作。盖板由钢板焊制,每块传力板的两端各装一个内嵌滚柱轴承的圆轮,圆轮用轴与盖板的竖向板连接。传力板的装配及尺寸见图 C.2。各零件见图 C.3~图 C.5。各尺寸公差视加工需要确定。

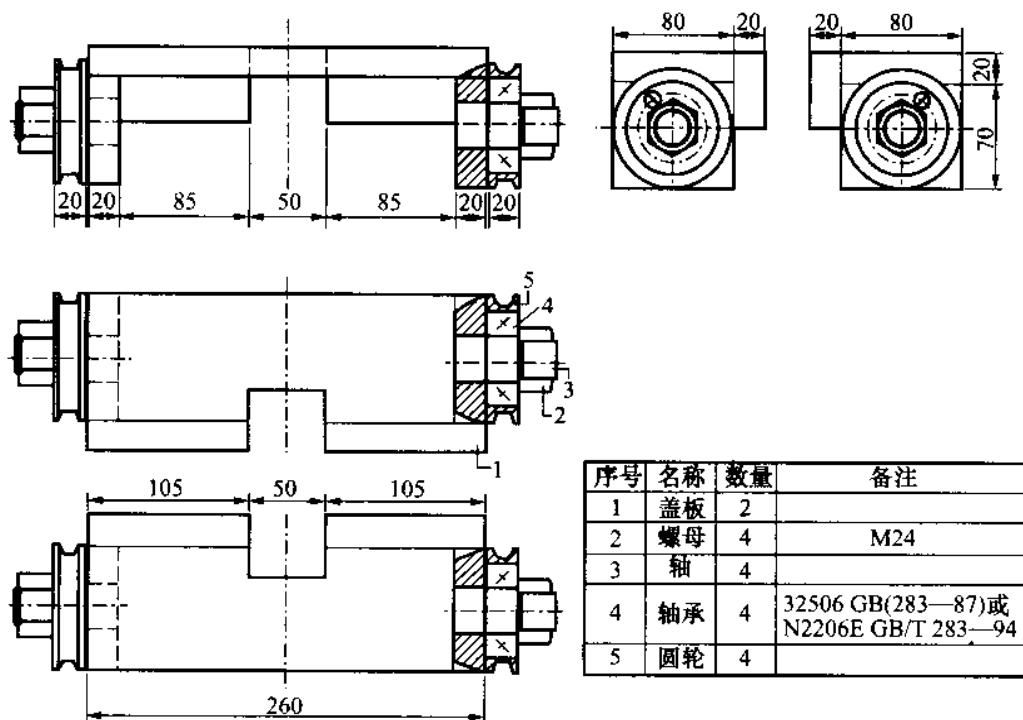


图 C.2 传力板 (尺寸单位: mm)

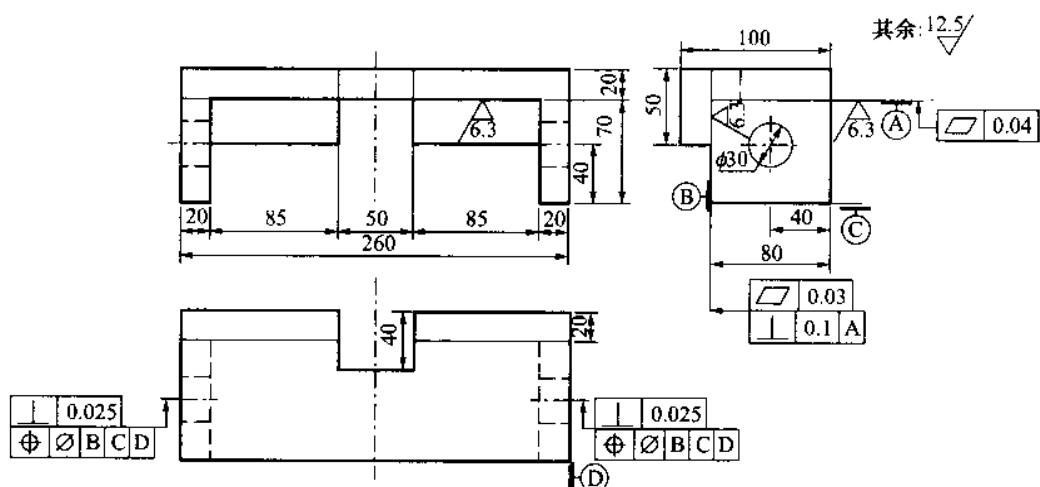


图 C.3 盖板 (尺寸单位: mm)

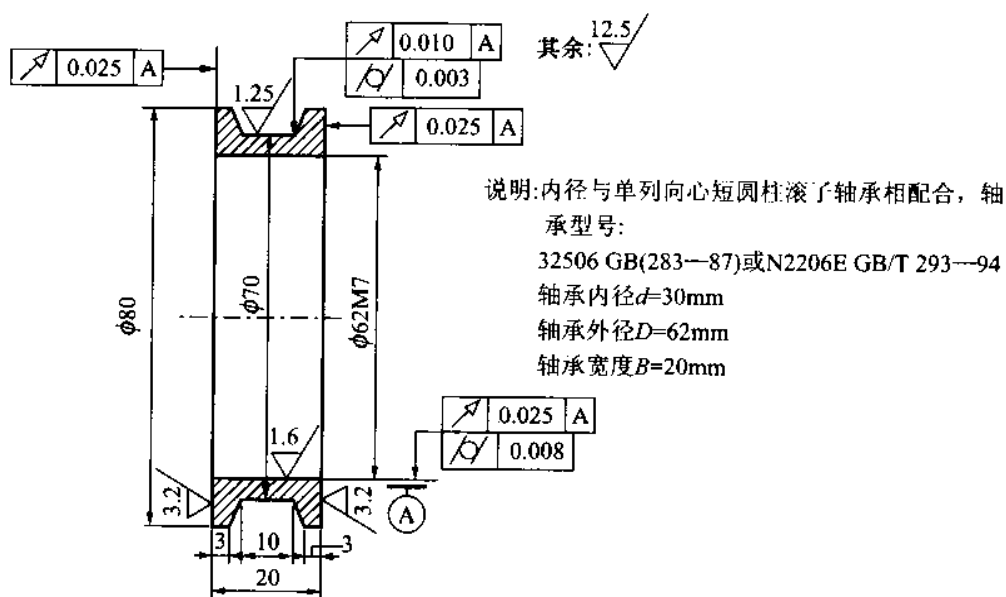


图 C.4 圆轮 (尺寸单位: mm)

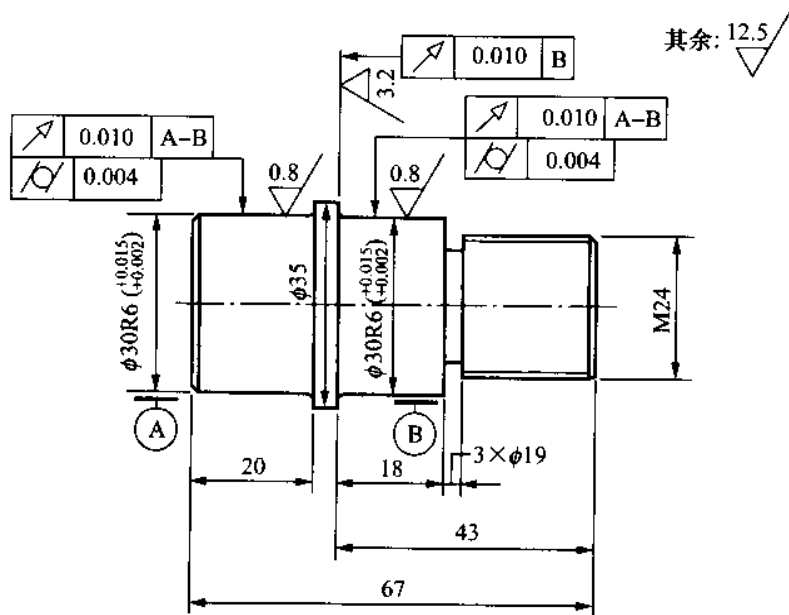


图 C.5 轴 (尺寸单位: mm)

C.4 支座由圆钢及钢板制成，其中一根圆钢焊在钢板上，另一根自由滚动，外形及尺寸见图 C.6。

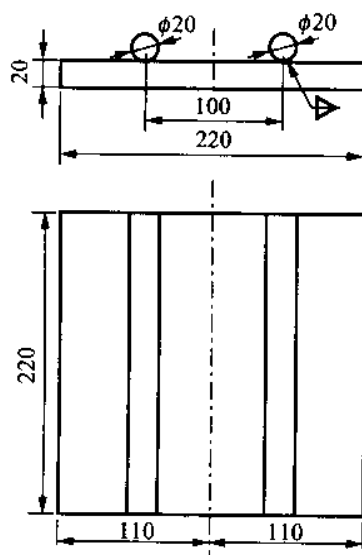


图 C.6 支座（尺寸单位：mm）

附 录 D
(规范性附录)
断裂韧度试验记录表

混凝土断裂韧度 K_{IC} 试验记录表

试验人员：_____ 记录：_____ 校核：_____

试验方法：① 楔入劈拉法 () 试验日期：_____

 ② 三点弯曲梁法 ()

①楔形加载架重量 (kN)：_____ ②试件重量 (kN)：_____

| 试验 组别 | 试件 编号 | 龄期 d | 试件尺寸 (实测) | | | | 刀口薄 钢板厚 度 h_0 mm | 竖向荷载 F kN | | 裂缝口张开 位移临界值 V_c μm |
|----------|----------|-----------|-----------|----------|--------|---------|-----------------------------|----------------|--------------------|--|
| | | | 高 h | 厚 t | ①宽 b | ②跨度 S | | 起裂荷 载 F_0 | 最大荷 载 F_{max} | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

注 1：本次试验采用的方法在对应括号中打“√”；
注 2：文字前注有角码①者，楔入劈拉法填写；有②者，三点弯曲梁法填写；未注角
码则均需填写。

附录 E

(资料性附录)

三点弯曲梁试件试模

E.1 试模由底板、前侧板、后侧板、左侧板、右侧板 5 部分构成，均可用钢材制作，并用适当的方法组装而成；或由符合要求的其他材料模板组装。组装后不得有变形和漏浆现象。

E.2 组装后的试模及净空尺寸见图 E.1。其净空尺寸应与试件尺寸相同，各板具体尺寸可视加工及组装需要决定。

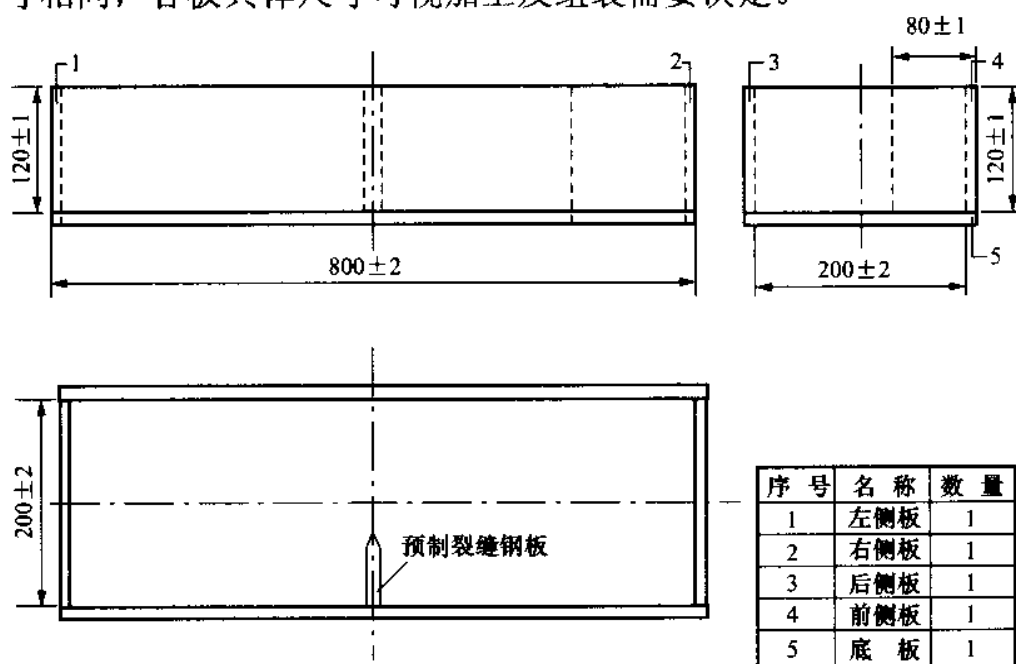


图 E.1 试模及净空尺寸 (尺寸单位: mm)

水工混凝土断裂试验规程

条 文 说 明

目 录

1 范围 29

4 总则 30

5 楔入劈拉法测定混凝土断裂韧度 31

 5.1 试件 31

 5.2 试验装置 32

 5.3 试验 32

 5.4 试验结果计算 33

 5.5 试验报告 33

6 三点弯曲梁法测定混凝土断裂韧度 34

 6.1 试件 34

 6.2 试验装置 35

 6.3 试验 35

 6.4 试验结果计算 35

 6.5 试验报告 35

1 范 围

I 型断裂是混凝土断裂中最重要和最危险的断裂形态，I 型断裂韧度是混凝土最基本和最常用的断裂参数。

鉴于大中型水电水利工程的重要性，当其混凝土结构物出现裂缝时，需进行断裂韧度测试，以提供评价裂缝稳定性的依据；在拟建工程中，断裂韧度又是抗裂、防裂设计中必需的混凝土性能参数。断裂韧度只能通过试验确定，本规程则提供了混凝土断裂韧度的标准测试方法。

从国内外进行过的试验来看，碾压混凝土与常态混凝土除试件成型上有所不同外，其测试方法是相同的，故本规程不仅适用于常态混凝土，也适用于碾压混凝土。

4 总 则

4.0.1 混凝土的受力特性与裂缝的发展有密切的关系，裂缝的扩展机理及其定量描述，受到国内外学术界普遍重视。在水电水利工程中，避免出现混凝土危害性裂缝是重要的质量目标，混凝土裂缝扩展稳定性评价是定期安全鉴定的重要内容之一。水电水利工程中 1、2、3 级大坝混凝土防裂要求较高时应进行断裂韧度测试，选取断裂韧度值高的混凝土配合比。对已建的大坝出现裂缝时，应按原配合比浇筑试件或从原体取样进行断裂韧度测试，作为评定裂缝扩展稳定性的标准。

混凝土断裂试验实践结果表明，裂缝扩展过程分为三个阶段：初始起裂、稳定扩展、失稳破坏，对应起裂时的断裂韧度称为起裂韧度 K_{IC}^0 ，对应失稳时的断裂韧度称为失稳韧度 K_{IC}^S 。一般结构可以 $K_I \leq K_{IC}^S$ 作为裂缝扩展稳定性的判断准则，对于重要结构应采用 $K_{IC}^0 < K_I < K_{IC}^S$ 作为裂缝扩展稳定性的判断准则，或以 $K_I \leq cK_{IC}^S$ 作为裂缝扩展稳定性的判断准则， c 为小于 1 的系数，具体取值由工程单位确定。

混凝土断裂力学是一门新兴学科，制定混凝土断裂韧度标准测试方法，是为了满足工程需要，并为进一步制定断裂参数的取值标准打下基础，以便工程应用。

4.0.2 混凝土的断裂韧度、抗压强度、抗拉强度、弹性模量试验应在设计龄期时进行，水工混凝土一般都取用 90d 龄期。

混凝土的质量应以上述指标作综合评定。

实测弹性模量和计算弹性模量相比，总体上其平均值相差不大，但各个试件测值与计算值仍有较大差异。从 K_{IC}^S 的准确性来讲，采用计算弹性模量为好。

5 楔入劈拉法测定混凝土断裂韧度

5.1 试 件

5.1.1 进行混凝土断裂韧度测试的试件，其原材料应和工程实际应用的原材料一致，不得用其他工程材料代替。

5.1.2 所规定的试件尺寸为标准试件尺寸，试验也可采用如 150mm×150mm×150mm 或其他尺寸的非标准试件，但试件最小尺寸不得小于最大骨料粒径的 3 倍。

对于非标准试件的测试结果，可按基于 Weibull 脆性破坏统计理论所导出的尺寸效应公式，进行标准试件与非标准试件断裂韧度间的互相近似换算：

$$K_{IC}^{\text{标准}} = \left(\frac{V_{\text{非标准}}}{V_{\text{标准}}} \right)^{1/\alpha} \left(\frac{h_{\text{标准}}}{h_{\text{非标准}}} \right)^{1/2} \cdot K_{IC}^{\text{非标准}} \quad (h \leq 750\text{mm})$$

式中：

$K_{IC}^{\text{标准}}$ 、 $K_{IC}^{\text{非标准}}$ ——标准试件与非标准试件的混凝土断裂韧度，
MPa $\sqrt{\text{m}}$ ；

$h_{\text{标准}}$ 、 $h_{\text{非标准}}$ ——标准试件与非标准试件的高度，m；

$V_{\text{标准}}$ 、 $V_{\text{非标准}}$ ——标准试件与非标准试件的体积，m³；

α ——Weibull 参数，对混凝土一般可取 7~13。

试件数 5 个，是考虑试件制作误差和试验成果的离散性，为保证试验的准确性规定的。

成型试件采用原体工程的混凝土配合比湿筛后成型。

试件拆模应认真细致，尽量不损伤韧带，以免影响试验结果的稳定性。

采用 200mm×200mm×200mm 钢模成型的试件需在试件上端

粘贴两块钢块，使试件形成凹槽。粘贴剂为强度高、低毒性的环氧类结构胶。在粘贴前应先将粘贴面打磨，使表面不平整度小于0.5%。再将粘贴剂均匀地涂在粘贴面上，但不宜过厚，粘贴牢固后即可进行试验。试验后经高温烘烤，可剔除粘结胶。

对于从岩芯切取的试件，高径比为2:1，锯出各个平面及预制裂缝，然后粘贴两块钢块。

5.2 试 验 装 置

5.2.2 加载装置可用材料试验机或其他稳定的加载设备。

楔形加载架，除必需满足刚度要求外，其整体及任一局部均不得失稳。考虑到工字钢腹板易失稳，推荐采用两槽钢背焊。

传力板是两块对称的装有滚柱轴承的装置，滚柱轴承的直径和承载力应满足要求。在板的上表面中间部位开有缺口，以便安装夹式引伸计。在滚柱轴承外装有带凹槽的钢轮，已进行过的试验表明，轴承采用3182106型号是可行的。

支座也可用同直径的钢筋代替圆钢，焊在钢板上制成，钢筋表面要保持平整光洁。

传力装置应随试件尺寸作相应的增大或缩小。

位移量测可采用其他形式的位移传感器，但不得降低精度和分辨率。其装置要便于试验的操作，必要时可适当加大试件顶部凹槽的宽度。

5.3 试 验

5.3.1 试验需连续均匀地加载，过快加载将影响试验成果。

楔形加载架，传力钢板都是有一定重量的钢制件，一定要用可靠的方式将其固定或悬挂在试验机上，以防止试件破坏后钢制件掉下伤人或损伤仪器设备，但采用的固定或悬挂方式不得影响试验的正常进行。

5.4 试验结果计算

5.4.1 试验中实测得到的是试件的竖向荷载，在作水平荷载计算时，必须考虑楔形加载架的本身重量在水平方向的分力。若楔形加载架固定在加载设备上则不计入。如位移量测采用其他形式的位移传感器，规程式（5.4.2-3）和式（5.4.2-4）中 h_0 按实际情况取值。

起裂荷载 F_Q 是 F — V 曲线上升段中之线性段（或近似线性段）和曲线段转折点所对应的荷载，可直接判读或用从线性弹模转为非线性弹模的方法确定，大量试验表明，该转折点多在 $(0.6 \sim 0.9) F_{\max}$ 。

5.5 试验报告

5.5.1 试验记录按附录 D 的统一格式，试验报告除所含基本内容外，还需满足委托方的要求提供相应的内容。

6 三点弯曲梁法测定混凝土断裂韧度

6.1 试 件

6.1.1 进行混凝土断裂参数测试的试件，其原材料应和工程实际应用的原材料一致，不得用其他工程材料代替。

所规定的试件尺寸为标准试件尺寸，试验也可采用如 100mm×100mm×515mm 或其他尺寸的非标准试件，但试件最小尺寸不得小于最大骨料粒径的 3 倍。

对于非标准试件的测试结果，可按基于 Weibull 脆性破坏统计理论所导出的尺寸效应公式，进行标准试件与非标准试件断裂韧度间的互相近似换算：

$$K_{IC}^{\text{标准}} = \left(\frac{V_{\text{非标准}}}{V_{\text{标准}}} \right)^{1/\alpha} \left(\frac{h_{\text{标准}}}{h_{\text{非标准}}} \right)^{1/2} \cdot K_{IC}^{\text{非标准}} \quad (h \leq 750\text{mm})$$

式中：

$K_{IC}^{\text{标准}}$ 、 $K_{IC}^{\text{非标准}}$ ——标准试件与非标准试件的混凝土断裂韧度，
MPa $\sqrt{\text{m}}$ ；

$h_{\text{标准}}$ 、 $h_{\text{非标准}}$ ——标准试件与非标准试件的高度，m；

$V_{\text{标准}}$ 、 $V_{\text{非标准}}$ ——标准试件与非标准试件支座间的体积，m³；

α ——Weibull 参数，对混凝土一般可取 7~13。

试件数 5 个，是考虑试件制作误差和试验成果的离散性，为保证试验的准确性规定的。

成型试件采用原体工程的混凝土配合比湿筛后成型。

试件拆模应认真细致，尽量不损伤韧带，以免影响试验结果的稳定性。

三点弯曲梁试件重量较大，拆模时不可拆除底模，移动时应连同底模，以免损伤韧带。

6.2 试 验 装 置

6.2.1 三点弯曲梁法测定混凝土断裂韧度是将一个跨中有预制裂缝的简支梁，用跨中加载进行断裂破坏试验，并同时量测裂缝口张开位移。

6.2.2 加载装置可用材料试验机或其他稳定的加载设备。

6.2.4 位移量测可采用其他形式的位移传感器，但不得降低精度和分辨率。其装置要便于试验的操作。

6.3 试 验

6.3.1 试验需连续均匀地加载，过快加载将影响试验成果。

6.4 试 验 结 果 计 算

6.4.1 三点弯曲梁试件相对较大，试验成果计算中应计及试件自重的影响。

如位移量测采用其他形式的位移传感器，规程式（6.4.1-3）和式（6.4.1-4）中 h_0 按实际情况取值。

起裂荷载 F_Q 是 $F-V$ 曲线上升段中之线性段（或近似线性段）和曲线段转折点所对应的荷载，可直接判读或用从线性弹模转为非线性弹模的方法确定，大量试验表明，该转折点多在 $(0.6 \sim 0.9) F_{\max}$ 。

6.5 试 验 报 告

6.5.1 试验记录按附录 D 的统一格式，试验报告除所含基本内容外，还需满足委托方的要求提供相应的内容。