

# 钢纤维混凝土抗拉性能的试验研究\*

高丹盈 黄承逵\*\*

(郑州工学院水利系)

(大连理工大学)

**摘 要:** 本文首先讨论了影响劈拉试验的因素和劈拉试验对钢纤维混凝土的适用性。在此基础上,通过试验研究和理论分析,研究钢纤维混凝土抗拉性能与纤维体积率、长径比的关系,给出钢纤维混凝土抗拉强度的计算公式。

**关键词:** 钢纤维混凝土, 抗拉强度, 试验

**中国图书分类号:** TU317

抗拉强度是混凝土的基本力学性能之一,是确定混凝土抗裂度的重要指标,也是间接地衡量其它力学性能,诸如混凝土的抗剪强度、冲切强度、混凝土与钢筋的粘结强度等的指标。我国钢筋混凝土结构设计规范规定轴向抗拉强度作为设计指标,但是采用直接受拉试验确定混凝土的抗拉强度较为困难,难以保证试件的几何对中及物理对中,以及可能出现偏拉破坏,影响试验结果。因而大多数学者主张采用抗折试验和圆柱体或立方体的劈拉试验间接确定混凝土的抗拉强度。然而,这两种测定混凝土抗拉强度的方法又难以摆脱试件尺寸效应的影响,对劈拉试验,劈条的形状和尺寸也是不可忽略的影响因素。

## 1 劈拉试验的影响因素及对钢纤维混凝土的适用性

劈拉强度不但与垫条尺寸、形状以及试件尺寸有关,而且与加载速度有一定关系。在此着重分析垫条断面形状和尺寸以及试件尺寸对劈拉强度的影响,讨论劈拉试验对钢纤维混凝土的适用性问题。

### 1.1 试件尺寸对混凝土劈拉强度的影响

对混凝土试件作劈拉试验时,与垫条相接触的混凝土处于压缩状态,即垫条对周围混凝土有接触性约束的影响,称为“夹箍效应”<sup>[3]</sup>。随着距垫条端距离增大,夹箍效应逐渐减弱,裂缝首先由试件中心出现。因此,试件尺寸越小,接触性约束的影响就越大,测得的抗拉强度亦越大,这已由以往的试验结果所证实,见图1<sup>[2]</sup>。

\* 河南省自然科学基金资助项目

\*\* 收稿日期: 1990.06.23

对于钢纤维混凝土来说, 上述的尺寸效应可能更严重些, 受边壁的影响, 钢纤维在试模边壁附近将改变其乱向分布状态而产生平行边壁分布和取向的趋势, 这样就提高了试件边壁附近的抗拉强度和对整个试件的约束作用, 即产生所谓“边壁效应”。随着试件尺寸的减小, 产生边壁效应的范围占总体积的比例愈大, 抗拉强度提高的越大, 可以推断钢纤维混凝土劈拉强度的尺寸效应将比普通混凝土更大。关于钢纤维混凝土劈拉强度尺寸效应的定量关系应进一步深入研究。

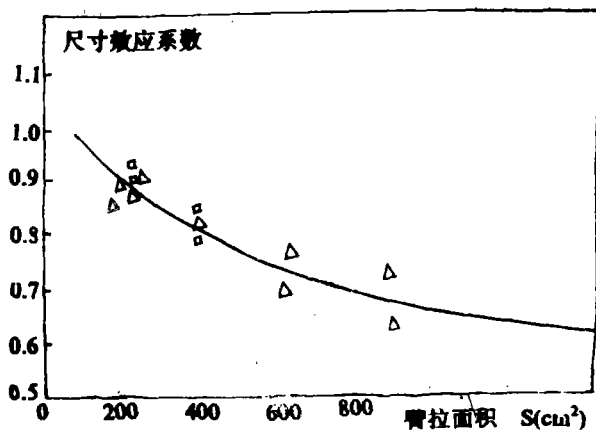


图 1 劈拉试验的尺寸效应

### 1.2 垫条断面形状和尺寸对劈拉强度的影响

如上所述, 在作劈拉试验时, 与垫条相接触的混凝土处于受压状态, 垫条对混凝土起“楔”的作用, 产生应力集中。垫条直径越大, 承压面越大, 尤其是方垫条时, “楔”的作用不易发挥, 试件需要在较大的荷载时才能破坏。所以方垫条测得的劈拉强度较圆垫条大; 断面形状相同的垫条, 尺寸越大, 劈拉强度亦越高, 这同样已由以往的试验结果所证实<sup>(3)</sup>。

### 1.3 劈拉试验对钢纤维混凝土的适用性

普通混凝土的劈拉强度与轴心抗拉强度之间的关系, 由于轴拉试验的困难性和影响两者关系因素的复杂性, 至今没有完全搞清, 但是在常用强度范围内 (C20 到 C60), 轴心抗拉强度大约是劈拉强度的 0.9 倍<sup>(4)</sup>。一般认为普通混凝土在轴心受拉情况下的初裂强度和极限强度是趋于一致的, 即所谓一裂即断, 两者可近似用一个轴心抗拉强度描述。但对于钢纤维混凝土, 初裂强度和极限强度之间的差异随着纤维体积率和纤维长径比的增大而增大, 对于能否用劈拉试验测定钢纤维混凝土的抗拉强度, 国内外还没有定论。

众所周知, 劈拉试验方法的应力分析基础是弹性理论。对如图 2 所示沿圆柱体直径上下条形加载, 使圆柱体产生沿直径垂直的劈拉破坏, 在此条件下, 试件直径截面上的水平拉应力  $\sigma_t$  和纵向压应力  $\sigma_c$  为<sup>(7)</sup>:

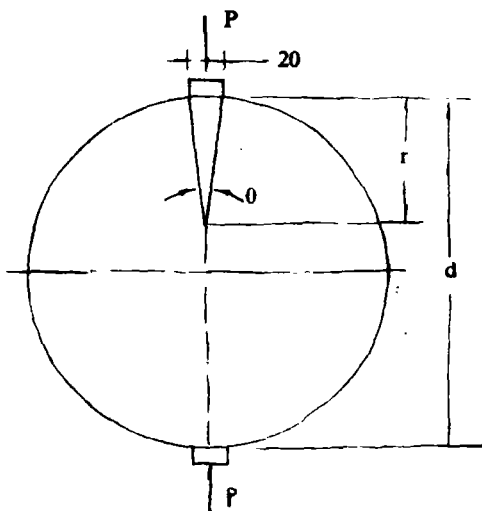


图 2

$$\sigma_t = \sigma_c = \frac{2P}{\pi LD} \left[ 1 - \left( \frac{D}{4a} \right) \cdot (\theta - \sin \theta) \right] \quad (1a)$$

$$\sigma_c = \sigma_t = - \left( \frac{2P}{\pi LD} \right) \cdot \left[ \left( \frac{D}{4a} \right) \cdot (\theta + \sin\theta) + \frac{D}{D-R} - 1 \right] \quad (1b)$$

因为垫条宽度 $2a$ 一般较小, 因而除加载点附近外, 水平拉应力基本均匀, 即:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2)$$

当 $P$ 达到试件破坏荷载时, 由(2)式计算的强度即为劈拉强度。对立方体劈拉试件, $L$ 、 $D$ 分别代表试件的长度和宽度。

由于混凝土不是真正的弹材材料, 近年来用塑性理论为依据求得劈拉强度计算公式的计算结果以及以材料的弹塑性本构模型为基础的有限元非线性分析的结果, 都与弹性公式(2)的结果相似<sup>[4, 7]</sup>。这表明目前广泛采用的弹性公式可以较好地给出非弹性混凝土材料的抗拉强度。笔者认为, 既然弹性公式能较好地反映混凝土材料的抗拉强度, 把弹性公式用于计算具有假塑性的钢纤维混凝土材料的抗拉强度无疑与塑性理论的计算结果更接近, 同时又考虑到劈拉试验结果的变异系数小, 试件与确定混凝土立方体强度的试件相同, 试验方法简便易行, 而所得的劈拉强度值又比较接近轴拉强度, 所以应该推荐为钢纤维混凝土的标准试验方法, 劈拉强度即为钢纤维混凝土的抗拉强度。

## 2 试件制作及试验方法

### 2.1 试件制作

钢纤维体积率为主要变量, 按 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5% 分为六组, 每组三个试块, 其尺寸为  $150 \times 150 \times 150 \text{mm}$ 。

水泥为五羊牌 425 号普通硅酸盐水泥, 河砂, 细度模数为 2.61, 粗骨料为碎石, 最大粒径为 15mm。采用两种钢纤维, 一种是庆安钢铁厂生产的熔抽钢纤维, 等效直径 0.5mm, 长度为 25mm, 长径比为 50; 另一种是云南省建筑技术开发中心用废钢丝切断生产的钢纤维, 直径 0.5mm, 长度 37.5mm, 长径比为 75。第三种为云南省建筑技术开发中心提供的圆直钢纤维, 长径比为 80。

试件基体配合比及搅拌成型方法参见文献[5]。

### 2.2 试验方法

劈拉试验参照《普通混凝土性能试验方法》的规定进行。即在劈拉试验中采用直径为 150mm 的弧形钢垫条, 并用 200mm 长, 宽 20mm 的三合板作为垫层, 三合板不重复使用。劈拉试验在 600KN 万能试验机上进行, 加载速度为  $0.3 \sim 0.5 \text{MPa/秒}$ 。

## 3 钢纤维混凝土劈拉强度的试验结果及理论分析

虽然钢纤维混凝土的劈拉强度受水灰比、骨料最大粒径、纤维的分布和取向等各种因素影响, 但当基体的水灰比及骨料最大粒径变化范围不大时, 对乱向分布的钢纤维混凝土, 其劈拉强度主要受纤维含量特征参数  $V_f \frac{1}{d}$  的影响。

### 3.1 钢纤维混凝土劈拉试验结果

#### 3.1.1 纤维体积率对劈拉强度的影响

为研究不同纤维体积率的钢纤维混凝土的劈拉性能,文献[7]进行圆柱体试件的劈拉试验,同时量测了荷载位移(沿圆柱体中心与劈拉面垂直方向的位移)关系曲线,见图3.

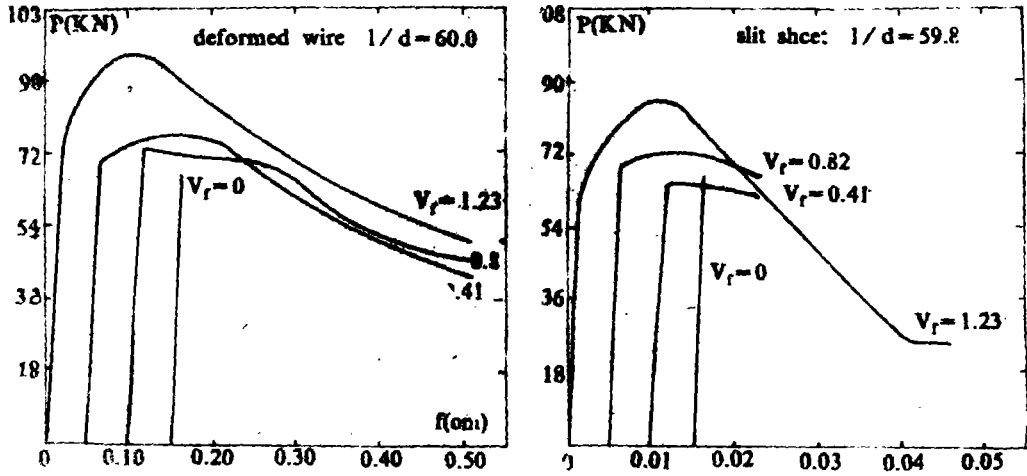
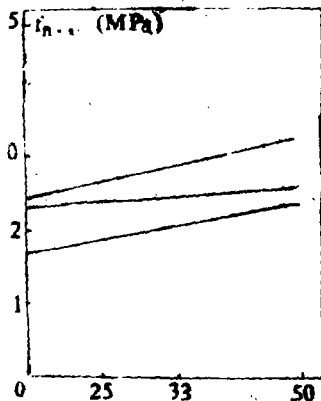


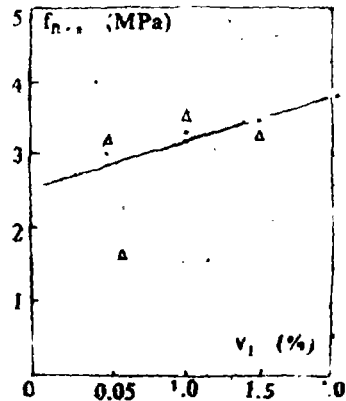
图3 钢纤维混凝土劈拉试件的荷载变形关系

在本文试验结果中,取同一组三个试件数据的平均值作为纤维体积率  $V_f$  下的抗拉强度,  $f_{nt}$  与  $V_f$  的关系见图4(b).由图可见钢纤维混凝土的劈拉强度以及在劈拉试验中所表现的韧性都随纤维体积率的增大而增加.



1.  $d=0.6\text{mm}$ ; 2.  $d=0.5\text{mm}$ ; 3.  $d=0.4\text{mm}$

(a) 劈拉强度与纤维长度的关系



• 庆安纤维 △圆弯纤维

(b) 劈拉强度与纤维体积率关系

图4

#### 3.1.2 纤维长径比对劈拉强度的影响

文献[6]的试验表明(见图4(a)), 在相同纤维体积率情况下, 劈拉强度随纤维长度的增大而提高; 在纤维体积率及纤维长度相同时, 纤维直径越小, 劈拉强度越高。

钢纤维含量特征参数作为一个综合参数反映了纤维体积率和长径比对劈拉强度的影响,  $f_{n..}$  随  $V_f \frac{l}{d}$  的增大而提高, 见图5<sup>(7)</sup>。

### 3.2 钢纤维混凝土劈拉强度的计算公式

纤维间距理论常用来解释纤维的增强作用。这一理论以断裂力学理论为基础, 认为要增强象混凝土这样本身带有内部缺陷的脆性材料的强度, 首先必须增强这一材料的破坏韧性, 即减小内部缺陷的尺寸, 降低裂缝尖端的应力强度因子, 而钢纤维的加入正是起到了抵消应力场强度因子, 减缓裂缝尖端应力集中的作用。

理论分析表明, 对于劈拉试验, 在劈拉面上离开劈拉端一定距离的范围内, 水平拉应力均匀分布, 随着拉应力的逐渐增大, 裂缝尖端的应力场强度因子达到材料的断裂韧性, 裂缝失稳扩展, 产生劈拉破坏。可用图6所示的力学模型研究钢纤维混凝土

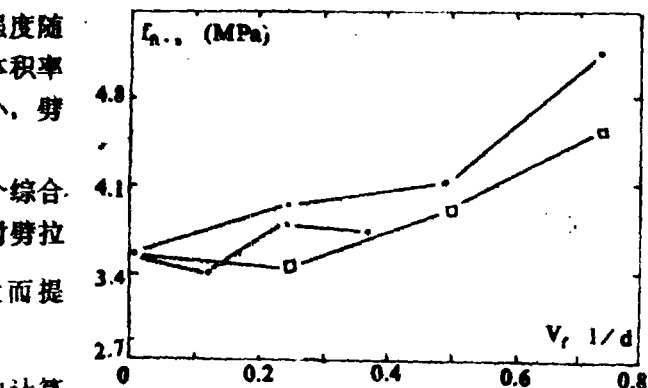


图5 劈拉强度与钢纤维含量特征参数的关系

劈拉强度的计算模式, 即钢纤维混凝土基体裂缝尖端的应力场强度因子  $k$  等于同样外应力下没有钢纤维时的强度因子  $K_0$  与钢纤维所施加的反强度因子  $K_x$  的迭加。用公式表示为:

$$K = K_0 - K_x$$

由此得到钢纤维混凝土劈拉强度的计算模式为<sup>[1]</sup>:

$$f_{n..} = f_t(1 - V_f) + B \frac{1}{d} \cdot V_f \quad (3)$$

式中:  $f_{n..}$  — 钢纤维混凝土的劈拉强度(MPa);

$f_t$  — 混凝土基体的劈拉强度(MPa)。

考虑到钢纤维的体积率一般较小, 式中  $1 - V_f$  可近似地取为1, 公式(3)可改写为:

$$f_{n..} = f_t + B \frac{1}{d} V_f$$

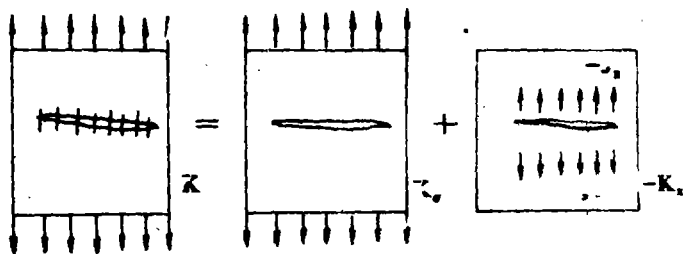


图6 劈拉力学模型

或 
$$f_{n.s}/f_t = 1 + B \frac{1}{d} \cdot \frac{V_f}{f_t}$$

利用本文熔抽纤维增强混凝土劈拉试验结果和本文圆直纤维的试验资料, 经综合分析得下列抗拉强度的经验公式:

$$\begin{cases} \text{对熔抽纤维} & f_{n.s} = f_t + 1.25V_f \frac{1}{d} \\ \text{对圆直纤维} & f_{n.s} = f_t + 0.625V_f \frac{1}{d} \end{cases}$$

式中:  $f_{n.s}$ 、 $f_t$  的单位为 MPa.

式(4)与试验结果的符合程度见图 7.

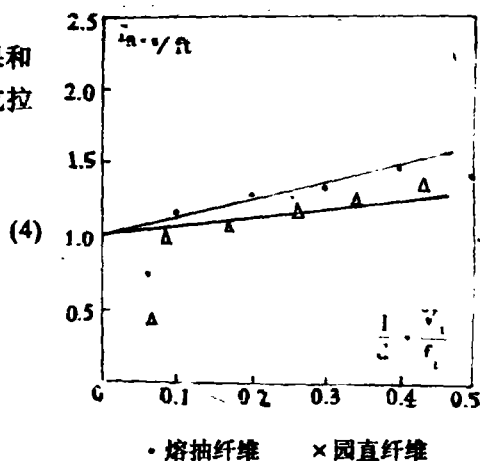


图 7 抗拉强度公式的试验验证

## 4 结 论

本文通过劈拉试验和理论分析, 对钢纤维混凝土的抗拉性能有如下主要认识和结论:

- 4.1 用于普通混凝土劈拉试验的方法完全适用于钢纤维混凝土, 并能较好地反映钢纤维混凝土的抗拉性能。
- 4.2 钢纤维体积率、长径比以及钢纤维的形状是影响劈拉强度的因素。劈拉强度随纤维含量特征参数的增大而提高, 随纤维外形的变化而不同。
- 4.3 由于钢纤维的边壁效应, 钢纤维混凝土劈拉试验的尺寸效应比普通混凝土更加显著。钢纤维混凝土劈拉试验的尺寸效应以及劈拉强度与轴心受拉初裂强度和极限强度的定量关系是有待于进一步研究的问题。

## 参 考 文 献

- (1) 关丽秋, 赵国藩. 钢纤维混凝土在单向拉伸时的增强机理与破坏形态的分析. 水利学报, 1986.9
- (2) 宣国良, 谢年祥. 混凝土抗拉强度的尺寸效应与石子粒径效应. 约束混凝土强度理论及应用学术讨论会论文集, 1987.10
- (3) 王宝鑫, 俞润贤. 混凝土劈拉强度试验中几个参数的研究
- (4) 王传志, 滕智明. 钢筋混凝土结构理论. 清华大学工程结构教研组, 1983
- (5) 高丹盈. 钢纤维混凝土及其配筋构件力学性能的研究. 大连理工大学博士学位论文, 1989.5
- (6) 姚庭舟等. 钢纤维混凝土复合材料力学性能的研究. 太原工学院学报, 1984.2
- (7) Antonio Nanni. Splitting Tension for Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal/ July-August 1988

(下转第 36 页)

