

钢纤维混凝土与钢筋的粘结强度*

高丹盈

(郑州工学院水环系)

摘 要: 本文通过对拔出试验结果的分析, 研究钢纤维混凝土与钢筋粘结滑移性能, 在此基础上提出用初始滑移粘结强度和极限粘结强度这两个强度指标, 反映钢纤维混凝土与钢筋的粘结性能, 文中的建议和结论已列入我国的《钢纤维混凝土试验方法标准》。

关键词: 钢纤维混凝土, 粘结强度

钢筋与混凝土这两种性质不同的材料之所以能够共同工作, 对于变形钢筋主要是由于其界面上存在着粘结力; 对于光圆钢筋除了端部弯钩的锚固作用外, 也依赖于界面上的粘结作用。所谓“粘结应力”实际上是指钢筋与混凝土接触面上的剪应力, 粘结应力在钢筋和混凝土之间传递, 从而使钢筋应力发生变化。对于一般的钢筋混凝土结构, 粘结应力主要由三部分组成: ①胶结力, 接触面上的化学吸附作用; ②摩阻力, 因在已发生滑移的表面上混凝土收缩将钢筋紧紧握裹而产生的; ③咬合力, 变形钢筋横肋与混凝土齿之间的机械咬合作用。构成粘结力的三个来源除在很大程度上取决于钢筋的外形和表面状态外, 混凝土本身的性质也是主要的影响因素。对于钢纤维混凝土, 由于钢纤维的加入改善了混凝土基体抗拉强度先天不足的弱点, 对钢筋和混凝土之间的粘结强度有直接影响, 因而研究钢纤维混凝土与钢筋之间的粘结强度具有实际意义。

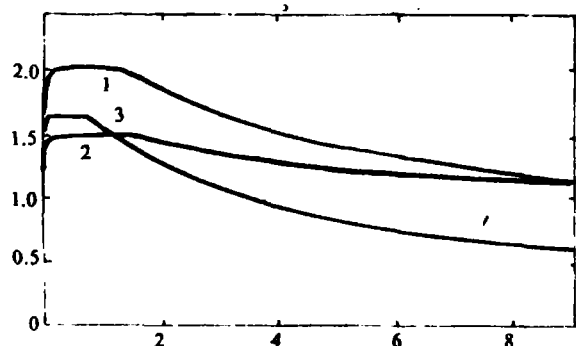
1 钢纤维混凝土与钢筋粘结滑移的特点

钢纤维混凝土与普通混凝土的区别在于钢纤维的增强作用, 钢纤维混凝土与钢筋的粘结滑移同样受纤维增强的影响, 本文的分析由此入手。

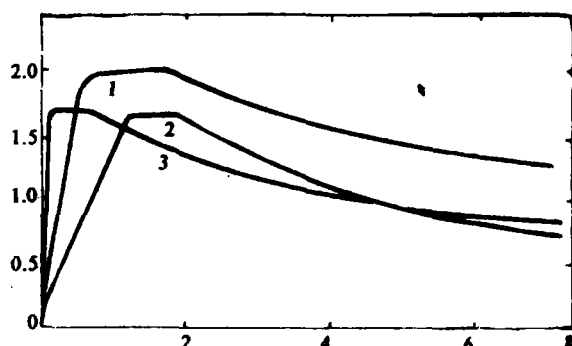
1.1 光圆钢筋与钢纤维混凝土的粘结性能

光圆钢筋的特点是表面光滑无凹凸起伏, 粘结力主要由胶结力与摩阻力组成。加载之初胶结力起主要作用, 钢筋无明显滑移。由于胶结力只存在于局部区域且数值很小, 因而经短暂的无滑移后即有滑移产生。胶结力被克服后, 转由摩阻力承载。在自由端开始滑移后, 钢筋周围混凝土中的裂缝几乎没有发展, 钢纤维的阻裂作用得不到发挥, 因而荷载保持不变而自由端位移增大, 自由端和加载端的粘结滑移曲线出现水平段, 初始滑移粘结强度与极限粘结强度相同, 且都基本上不受钢纤维加入的影响, 见图 1 和图 2。最后由于混凝土颗粒磨细使摩阻力衰减, 发生钢筋自混凝土中拔出的剪切破坏。

* 收稿日期: 1990.04

1. $V_f = 1.0\%$; 2. $V_f = 0.0\%$; 3. $V_f = 1.5\%$, $l/d = 80$

(a) 光圆钢筋与纤维混凝土自由端粘结滑移关系

1. $V_f = 1.0\%$; 2. $V_f = 0.0\%$; 3. $V_f = 1.5\%$, $l/d = 80$

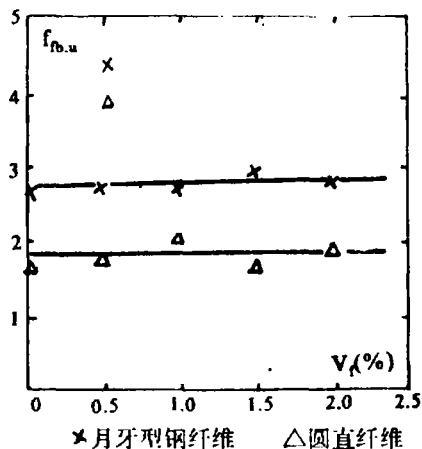
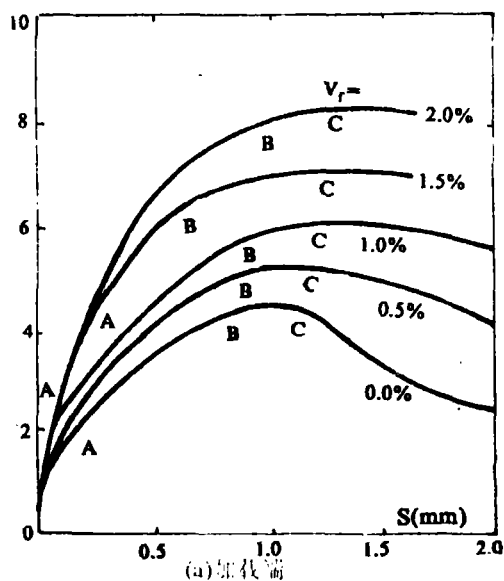
(b) 光圆钢筋与纤维混凝土加载端粘结滑移关系

图 1

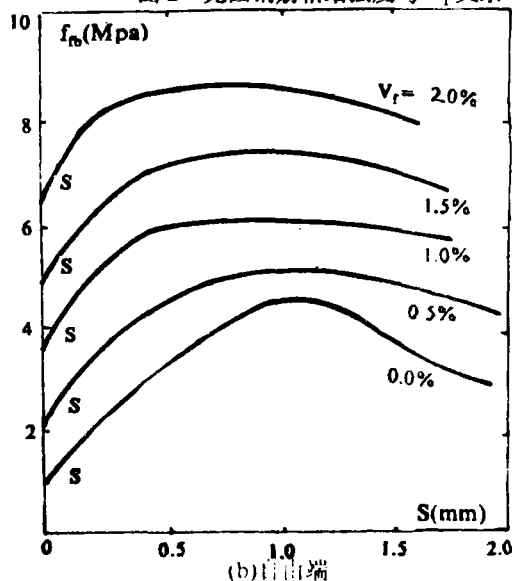
1.2 变形钢筋与钢纤维混凝土的粘结性能

变形钢筋改变了钢筋与混凝土间相互作用的方式, 极大地改善了粘结作用, 其粘结强度除包括胶结力和摩擦力外, 更主要的是钢筋表面凸出的肋与混凝土的机械咬合力以及钢纤维的阻裂增强作用。

实测不同钢纤维含量下月牙型钢纤维增强的钢纤维混凝土与变形钢筋粘结性能试验的典型荷载与加载端粘结滑移关系见图 3a、荷载与自由端的粘结滑移关系见图 3b。不同受力阶段的粘结性能可结合图 3和图 4 进行分析。

图 2 光圆钢筋粘结强度与 V_f 关系

(a) 加载端



(b) 自由端

图 3 变形钢筋与钢纤维混凝土粘结滑移关系

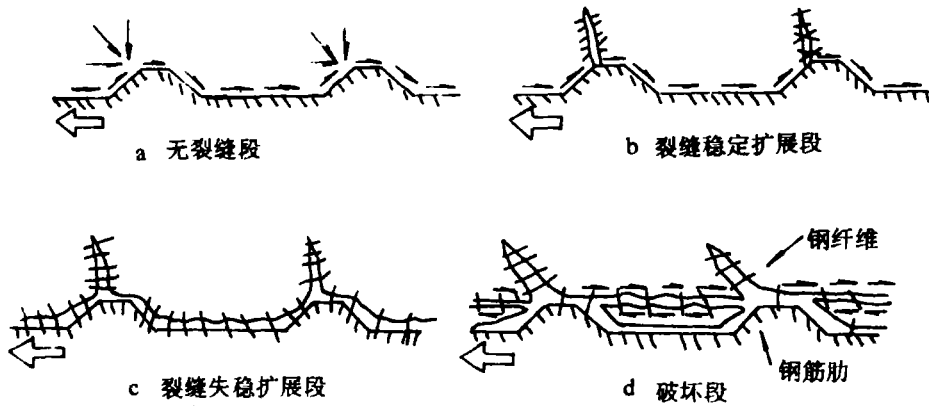


图4 主要受力阶段

1.2.1 无裂缝阶段 (OA):

初加载时, 与光圆钢筋一样胶结力在起作用, 随着荷载的增大胶结力破坏后钢筋开始滑移, 肋对混凝土的挤压力以及钢筋与周围混凝土的摩阻力构成滑动阻力。尽管肋的斜向挤压力产生楔的作用, 挤压力的径向分力使外围混凝土环向受拉,

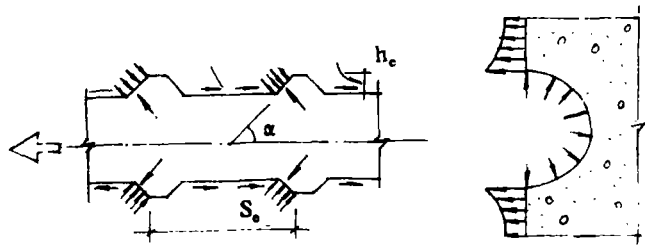


图5 肋对混凝土挤压力的楔的作用

见图5所示, 但在到达A点之前, 这种环向作用还不足以使原来存在于混凝土中的粘结裂缝稳定发展, 钢纤维起不到增强作用, 粘结滑移曲线基本上呈线性关系。

1.2.2 裂缝稳定扩展阶段 (AB): 过A点后, 内裂缝的稳定发展使钢筋有可能沿新的滑移面产生较大的相对滑动, 粘结滑移曲线的斜率发生变化, 横跨裂缝的钢纤维的增强作用进一步发挥, 裂缝的稳定发展由于钢纤维的约束作用而受到了限制。这反映在当 $\tau_b > \tau_b^0$ 以后, 随钢纤维体积率 V_f 的增大粘结滑移曲线的斜率更小一些, 同时初裂粘结应力也有较大的提高, 粘结应力达 τ_b^0 时的相对滑动也显著增大。

1.2.3 裂缝失稳扩展阶段 (BC): 过B点后, 内裂缝失稳扩展使试件表面出现劈裂裂缝, 钢纤维的增强作用急剧增大, 加载端和自由端的滑移急剧增加, 尤其自由端的滑移增长更快, 趋近于加荷端的滑移。随变形的增加, 粘结应力达到极限强度。钢纤维的阻裂作用延缓了劈裂裂缝的发展, 使极限粘结强度 $\tau_{b,u}$ 随 V_f 的增大而提高, 见图7, 并使外围混凝土不致很快崩裂。

1.2.4 破坏段 (C点以后): 达到极限强度后, 肋间混凝土逐渐被挤碎, 混凝土的咬合齿逐个被剪断, 这时钢筋被徐徐拔出, 产生“刮犁式”破坏, 钢筋与混凝土发生沿肋外径圆柱面上的剪切滑移⁽²⁾。在钢筋被拔出的过程中, 尽管相对滑移已很大, 但粘结力并未明显下降。这是因为沿圆柱滑移面上混凝土颗粒间存在有很大的咬合力及摩阻力以及横跨裂缝的钢纤维的阻裂增强与直接抗剪作用的结果, 反映在粘结滑移曲线上有较长的水平段, 表现了较好的粘结延性。

圆直纤维增强的钢纤维混凝土与光圆钢筋以及变形钢筋之间的粘结滑移性能与月牙型纤维增强的钢纤维混凝土与光圆钢筋以及与变形钢筋之间的粘结滑移性能有相似的规律, 见图 6

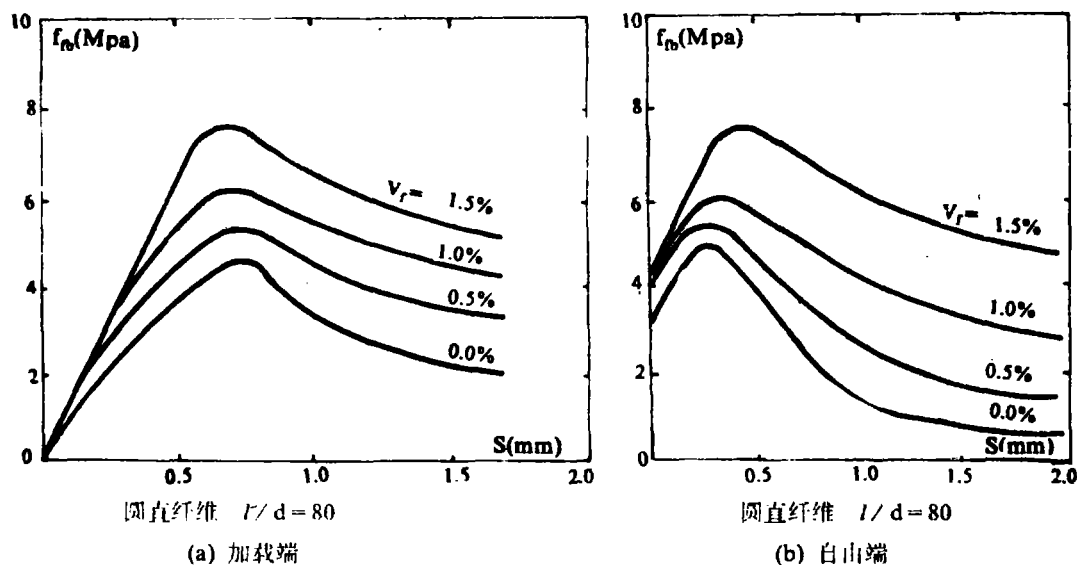


图 6 变形钢筋与钢纤维混凝土粘结滑移关系

综合上述, 钢纤维混凝土与变形钢筋的粘结滑移特性与受箍筋横向约束的混凝土与变形钢筋的粘结滑移特性一样, 提高了粘结强度, 使粘结破坏具有良好的延性性能。

2 钢纤维混凝土与钢筋粘结试验及粘结强度的讨论

以往的钢筋与混凝土粘结试验曾采用过两种中置钢筋试件, 一种是 $100 \times 100 \times 200$ 毫米, 一种是 $150 \times 150 \times 150$ 毫米。由于粘结强度是按自由端滑移量为一定值时对应的荷载值计算的, 由图 1、图 6 的曲线表明, 试件两端在同一荷载下的滑移量是不同的, 可以设想试件越长, 自由端产生滑移将越迟; 另一方面, 用这种方法求得的粘结强度实际上是粘结长度上的平均值, 因而试件长短对强度计算结果的影响是必然的。为此本文推荐 $150 \times 150 \times 150$ 毫米的试件作为粘结试验的标准, 因为它的粘结长度短些, 在拔出试验的粘结状态下, 上下端差异小些, 其平均值更有意义。

另外, 由于钢纤维的掺入, 试件截面尺寸的大小会引起纤维的取向和分布发生变化, 截面越大钢纤维的“边壁效应”的影响则相对小些。因此, 150×150 毫米截面优于 100×100 毫米截面。

本文试验表明, 试件两端的荷载滑移曲线有很好的相关性, 见图 1、6 所示。由于自由端滑移量测方便, 应以该端的滑移作为计算依据。考虑到钢纤维的掺入对极限粘结强度提高较大, 为了更好地评价钢纤维混凝土与钢筋的粘结性能, 建议按下述两阶段计算变形钢筋与钢纤维混凝土的粘结强度。

2.1 初始滑移粘结强度 f_{bs} 以自由端滑移量为 0.02 毫米的抗拔荷载为计算依据, 其值基本相应于图 3 中的 S 点。即按下式计算变形钢筋与钢纤维混凝土的初始滑移粘结强度:

$$f_{bs} = \frac{P_s}{A} \quad (1)$$

式中: f_{bs} —初始滑移粘结强度 (MPa);

P_s —钢筋自由端滑移量为 0.02 毫米时的荷载值 (N);

A —埋入钢纤维混凝土中的钢筋表面积 (mm^2), 计算公式为: $A = \pi D l$;

D —钢筋计算直径 (mm);

l —钢筋埋入长度 (mm)。

2.2 极限粘结强度 f_{bu} 以试验中的最大抗拔荷载为计算依据, 其值相应于图 3 中的 C 点。即按下式计算变形钢筋与钢纤维混凝土的极限粘结强度:

$$f_{bu} = \frac{P_u}{A} \quad (2)$$

式中: f_{bu} —极限粘结强度 (MPa);

P_u —拔出试验的最大荷载 (N)。

对于光圆钢筋, 由于钢纤维的加入不提高钢筋与钢纤维混凝土间的极限粘结强度, 初始滑移粘结强度即是极限粘结强度, 两者合二为一。因此可按(2)式计算光圆钢筋与钢纤维混凝土之间的粘结强度。

下面通过对本文试验结果的分析, 给出变形钢筋与钢纤维混凝土初始滑移粘结强度 f_{bs} 和极限粘结强度 f_{bu} 的具体计算公式。

2.3 变形钢筋与钢纤维混凝土的极限粘结强度

试验表明, 影响变形钢筋与混凝土之间粘结性能有许多因素⁽²⁾, 诸如, 混凝土的强度和组成成份、浇注位置、变形钢筋的外形特征、保护层厚度、横向配筋率等。对于钢纤维混凝土, 钢纤维含量特征参数也是影响粘结性能的一个因素。当浇注位置相同时, 影响钢纤维混凝土拔出试件粘结强度的主要变量为相对保护层厚度 C/D 、相对埋长 L/D 以及钢筋含量特征参数。根据对本文试验结果的分析, 对 $L/D=7.5$ 、 $C/D=3.25$ 的变形钢筋与钢纤维混凝土的极限粘结强度有下列经验公式:

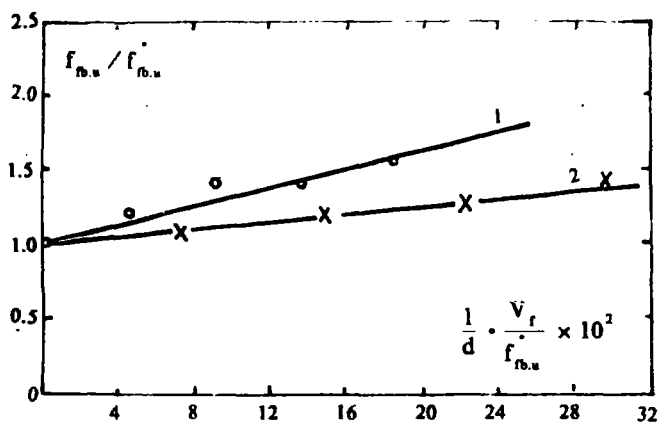
$$\text{对月牙纤维} \quad f_{bu} = f_{bu}^0 + 3.25V \frac{l}{d} \quad (3a)$$

$$\text{对圆直钢筋} \quad f_{bu} = f_{bu}^0 + 1.25V \frac{l}{d} \quad (3b)$$

式中: f_{bu}^0 —混凝土基体与变形钢筋的极限粘结强度;

f_{bu}^0 、 f_{bu} 的单位为 MPa。

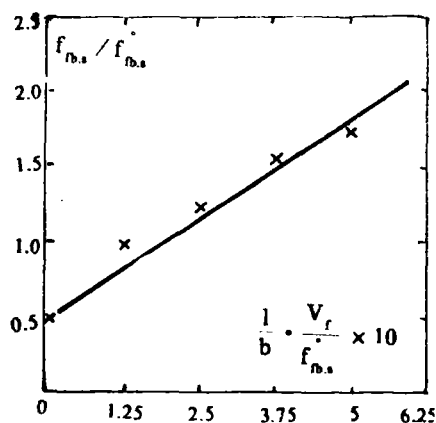
式 (3) 与试验结果的符合程度见图 7。



1. 月牙型钢纤维: $f_{b,u} = f_{b,u}^0 + 3.25V_f \frac{l}{d}$

2. 圆直钢纤维: $f_{b,u} = f_{b,u}^0 + 1.25V_f \frac{l}{d}$

图7 变形钢筋极限粘结强度试验验证



$f_{b,s} = f_{b,s}^0 + 2.67V_f \frac{l}{d}$

图8 变形钢筋初始滑移粘结强度

2.4 变形钢筋与钢纤维混凝土的初始滑移粘结强度

图8为 $L/D=7.5$ 、 $C/D=3.25$ 的拔出试验情况下, 变形钢筋与钢纤维混凝土之间的初始滑移粘结强度与钢纤维含量特征参数的关系。由图可见 $f_{b,s}$ 随 $V_f \frac{l}{d}$ 的增大而提高, 对月牙型纤维增强的钢纤维增强混凝土与钢筋的初始滑移粘结强度有下列经验公式:

$$f_{b,s} = f_{b,s}^0 + 2.67V_f \frac{l}{d} \quad (4)$$

式中: $f_{b,s}^0$ ——混凝土基体的初始滑移粘结强度;

$f_{b,s}$ 、 $f_{b,s}^0$ 的单位为 MPa。

3 结 论

本文通过对钢纤维混凝土与钢筋粘结性能试验结果的分析, 对钢纤维混凝土与钢筋之间的粘结强度有如下主要认识和结论:

3.1 钢纤维的掺入对光圆钢筋的粘结强度基本上没有影响; 变形钢筋的粘结强度随钢纤维含量特征参数的增大而提高, 并使粘结破坏具有良好的延性性能。

3.2 按本文建议的两阶段计算粘结强度的方法, 概念明确、简单可靠, 基本上反映了钢纤维混凝土的特点。

致谢: 本文得到大连理工大学赵国藩教授、黄承逵高工的指导, 作者表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- (1) 谢年祥. 混凝土与钢筋的握裹力试验方法. 河海大学科技情报室. 1985.3
- (2) 王传志, 滕志明. 钢筋混凝土结构理论. 清华大学工程结构教研组. 1983
- (3) 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
- (4) 蒋大骅. 钢筋与混凝土的结合与滑移. 同济大学学报. 1984.4

The Bonding Strength Between SFC and Steel

Gao Danying

(ZhengZhou Institute of Technology)

Abstract: By analysing the palling out experimental results, the paper studies the bond slip behavior between SFC and steel. Based on this, the bonding behavior between SFC and steel is reflected by using original slip bonding strength and ultimate bonding strength. The propose and conclusion of this paper has been listed into chinese standard of experimental method of SFC.

Keywords: steel fibre concrete, bonding strength