

钢纤维与水泥砂浆粘结 强度试验研究

黄承逵 田稳苓 赵国藩

摘要:本文选用四种水泥砂浆(一种45kg级硫铝酸盐自应力水泥砂浆、一种普通硅酸盐水泥砂浆、两种掺加不同量UEA膨胀剂的普通硅酸盐水泥砂浆)作为基体,选三种钢纤维(剪切平直型钢纤维、贝卡尔特和哈瑞克斯钢纤维)作了钢纤维拔出试验,分析了基体性能参数及钢纤维形状对钢纤维与水泥砂浆间界面粘结性能的影响,探讨了剪切平直型钢纤维和两端带钩钢纤维(贝卡尔特和哈瑞克斯钢纤维)与基体的粘结滑移机理,比较并研究了平直钢纤维与带钩钢纤维拔出荷载—位移曲线特征。

关键词 钢纤维 拔出试验 粘结强度 粘结滑移曲线

一、前言

钢纤维对混凝土的增强增韧作用主要通过它与混凝土基体间的粘结力来实现,由于钢纤维与基体的粘结作用,使钢纤维能起到阻止裂缝开展并承受荷载的作用。同时,由于其间的粘结滑移消耗大量的能力,使混凝土裂后性能发生了根本的变化,大大改善了混凝土变形性能。大量试验结果表明,影响裂后性能的重要因素是钢纤维与基体界面间的粘结性能,而衡量这一性能的重要指标是界面的粘结强度。本文在钢纤维拔出试验基础上,研究了基体性能参数和钢纤维形状对界面粘结强度及荷载—位移曲线特征的影响。

二、试件制作和试验方法

钢纤维对混凝土的增强增韧作用主要依赖于基体混凝土与钢纤维之间的粘结力,而对工程应用而言,影响钢纤维与基体混凝土的粘结强度主要归纳为两个方面:一是混凝土强度;二是钢纤维的长径比和钢纤维的形状。作者结合钢纤维膨胀混凝土基本力学性能试验,选425号普通硅酸盐水泥砂浆、掺加不同量UEA膨胀剂的425号普

通硅酸盐水泥砂浆及45kg级硫铝酸盐自应力水泥砂浆作基体;鞍山产剪切平直形钢纤维、比利时产贝卡尔特钢纤维和上海产哈瑞克斯钢纤维作钢纤维的拔出对比试验。钢纤维与水泥砂浆基体粘结强度的测定方法按照《钢纤维混凝土试验方法标准》(CECS13:89)中的规定执行。钢纤维的特征参数如表1所示。试验在100kN的万能试验机上进行,加荷速度控制在0.3mm/min,由试验机自动记录荷载—位移曲线。

表1 钢纤维特征参数

钢纤维代号	规格品种	平均长度(mm)	等效直径(mm)	长径比
J	鞍山产剪切平直型	32.13	0.600	53.55
B	比利时产贝卡尔特	30.50	0.565	54.0
H	上海产哈瑞克斯	32.50	0.942	34.5

三、影响界面粘结强度的因素

钢纤维与水泥砂浆基体界面间的粘结强度为界面单位面积的粘结力,它包括两方面的内容:钢纤维与基体接触面上所产生的粘着力及机械咬合力。因此,界面粘结强度即受基体性能参数的影响

黄承逵 田稳苓 大连理工大学土木系
赵国藩 大连理工大学 教授 中国工程院院士

又受钢纤维特征参数的影响。

1. 膨胀剂对钢纤维与水泥砂浆界面粘结强度的影响

钢纤维膨胀混凝土是集防渗与承载于一体的新型复合材料,试验结果表明钢纤维与膨胀剂联合作用可使混凝土的各项力学性能指标得以更大提高。为探讨其联合增强机理,本文选用普通剪切平直钢纤维和两种膨胀水泥砂浆,即45kg级硫铝酸盐自应力水泥砂浆和425号普通硅酸盐水泥砂浆中掺加不同量膨胀剂的水泥砂浆,作钢纤维的拔出试验。水泥砂浆的特征参数及试验结果示于表2和图1。

表2 膨胀剂掺量对粘结强度的影响

试件编号	水泥品种	水灰比	灰砂比	膨胀剂掺量%	砂浆强度(MPa)	粘结强度(MPa)
S0J	425号普硅水泥	0.5	1:1.7	0	45.78	5.09
S2J	425号普硅水泥	0.5	1:1.7	14	49.46	4.11
S3J	425号普硅水泥	0.5	1:1.7	16	19.25	3.50
SEJ	45kg级自应力水泥	0.45	1:2.0	0	37.14	4.30

注:膨胀剂掺量指水泥用量的百分比,且按内掺法计算。

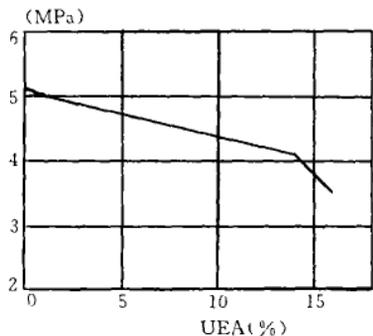


图1 膨胀剂掺量与粘结强度的关系

由试验结果可知,随膨胀剂掺量的增加,其界面粘结力减小,但砂浆强度变化不明显。界面粘结力减小的原因分析:膨胀水泥水化过程中,在产生膨胀能的同时,也因结构的形成而产生强度。由于膨胀开始得较早,而强度则滞后产生并逐渐加大,所以膨胀能总是对变化着的阻抗做功,这样在无限制的情况下,膨胀对其结构有一种破坏作用。当水泥砂浆强度低时,钢纤维粘结力不足以保证与水泥砂浆一同膨胀变形,这样由于砂浆的自由膨胀破坏了钢纤维与基体的部分粘着力,膨胀剂掺量越大,自由膨胀能越大,界面粘着力破坏越严重,使得界面粘结强度越小。而随着膨胀剂掺量增加水泥砂浆强度变化不明显的原因可能是由于膨

胀剂的加入减少了水灰比而使强度的提高与膨胀剂对强度的降低相互抵消的缘故。

S0J和SEJ相比较,45kg级硫铝酸盐自应力水泥砂浆强度低,界面粘结强度也低。说明在自由膨胀情况下,自应力水泥砂浆的强度和界面粘结强度都较低。

2. 钢纤维形状对粘结强度的影响

试验结果表明,钢纤维形状是影响钢纤维与水泥砂浆粘结强度的重要因素,随着钢纤维混凝土的逐步推广和应用,各种异型钢纤维也应运而生。对同一基体,异型钢纤维比直线形钢纤维有更好的粘结性能。本文选用鞍山产剪切平直型、比利时产贝卡尔特和上海产哈瑞克斯钢纤维作了钢纤维拔出试验,水泥砂浆参数及试验结果如表3。

表3 钢纤维形状对粘结强度的影响

编号	水泥品种	水灰比	灰砂比	砂浆强度(MPa)	钢纤维品种	粘结强度(MPa)
SEJ	45kg级硫铝酸盐	0.45	1:2	37.14	剪切平直型	4.30
SEB	自应力水泥	0.45	1:2	37.14	贝卡尔特	6.72
SH		0.60	1:2	19.0	哈瑞克斯	3.58
SB	425号普硅	0.60	1:2	19.0	贝卡尔特	4.03

从表3可见,对同一配比的水泥砂浆而言,贝卡尔特钢纤维较剪切平直型钢纤维界面粘结强度高很多;而不同类型的异型钢纤维的界面粘结强度相差也较大。

四、钢纤维与基体的粘结滑移机理及荷载一位移曲线特征分析

钢纤维对混凝土的增韧作用是通过钢纤维从基体中拔出消耗大量的能量而实现的。所以说钢纤维与基体要有足够的粘结强度来阻止裂缝开展和传递荷载,同时还必须有足够的粘结滑移,以吸收足够的能量以达到增韧混凝土的作用。因此对钢纤维与基体的粘结滑移机理作进一步的分析研究非常重要。

1. 剪切平直钢纤维

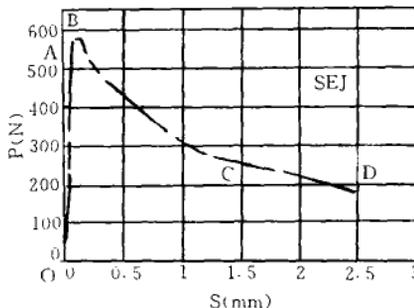


图2 剪切钢纤维平直拔出荷载一位移曲线

钢纤维的拔出过程可分三个阶段^[2,3](图2):

- (1)弹性粘结阶段,该阶段拔出阻力由界面间粘结力提供。对应的荷载一位移曲线为直线部分OA段,A点的荷载定义为 P_0 ,并称之为初裂荷载。
- (2)部分脱粘结阶段,此阶段从拉拔端到埋入端逐渐产生粘着失效破坏,位移明显增大,直至完全脱粘,荷载急剧下降。对应的荷载位移曲线为ABC,B点的荷载最大,定义为 P_{max} , P_0 与 P_{max} 很接近。越过 P_{max} 后,荷载急剧下降至C点,C点为完全脱粘点,该阶段拔出阻力由界面间粘结摩擦力提供。
- (3)全部脱粘并处于动态拔出阶段,对应荷载一位移曲线的下降段CD,该阶段为摩擦粘结阶段,而且随位移的增大,摩擦粘结急剧下降,此时,摩擦力下降的原因:一是钢纤维周围混凝土被破坏产生一些颗粒,这些颗粒对钢纤维的拔出产生一种滚动作用;二是钢纤维埋入长度的逐渐减小。

2. 带弯钩的钢纤维

(1)贝卡尔特钢纤维

图3为贝卡尔特钢纤维拔出荷载一位移曲线。OA段为直线上段,此段与图2中SEJ曲线的直线部分相似,属于弹性粘结阶段,阻拔力由界面粘着力提供。越过A点后进入部分脱粘阶段,曲线的曲率明显增大,但此阶段拔出阻力不仅仅由钢纤维与基体间的粘结摩擦力提供,而钢纤维的变形也为钢纤维的拔出提供一种阻力。在钢纤维的拔出过程中,端钩逐渐被拉直,拔出荷载仍可大幅度增加,但位移增加较快,使上升段由直线变为曲线,弯钩部分逐渐被拉直并沿钢纤维全长全部脱粘后至B点。过此点后,拔出荷载随位移的增加而下降,但下降段没有明显的反弯点。这说明部分拉直的钢纤维与基体的摩擦力较大。但试验

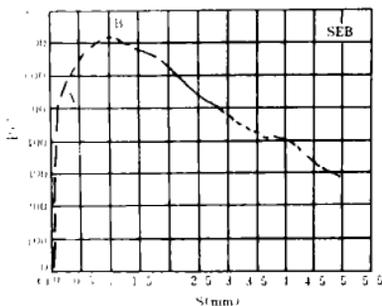


图3 SEB拔出荷载一位移曲线的影响

中发现拔出的钢纤维弯钩几乎全部被拉直,通过这一现象,并对比图3、图4曲线下降段的曲线形式,可以肯定,SEB曲线下降段的阻拔力,由弯钩的进一步拉直变形提供的阻拔力和钢纤维与基体的摩擦阻拔力组成。可见,贝卡尔特钢纤维端钩的变形阻拔作用,贯穿于部分粘结及完全脱粘的两大过程,弯钩对弹性粘结阶段的拉拔力几乎没有影响。

(2)哈瑞克斯钢纤维

哈瑞克斯钢纤维,其截面呈三角形,反面粗糙,沿纵向扭曲,两端有带钩的锚尾。其拔出荷载一位移曲线如图4示。曲线也是由上升段和下降段组成,上升段由直线部分和曲线部分组成,曲线部分的曲率较图3中的SEB相应曲线的曲率小。越过最大拉拔荷载点后曲线进入下降段,且下降段有明显的反弯点,但荷载下降速度比较缓慢。说明在完全脱粘后,SH的摩擦阻力比SEJ的大,比SEB的小。从试验结果看,哈瑞克斯端弯钩的拉直程度很小。其弯钩变形抗拔阻力没能充分发挥作用。

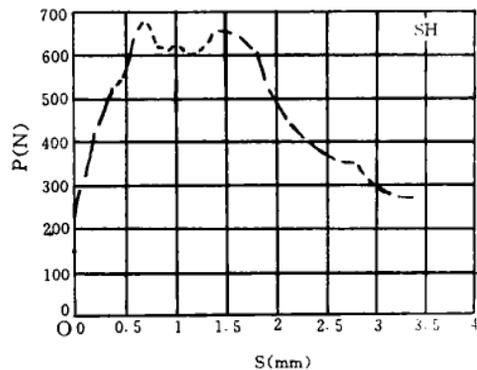


图4 SH拔出荷载一位移曲线的影响

比较图2~4可见:

(1)三个图中上升段都有一直线段,因此阶段为弹性粘结阶段,故对同一基体而言,钢纤维品种对直线部分影响不大,可将不同种类钢纤维的荷载一位移上升段的直线部分取同一直线。

(2)带弯钩的钢纤维在拔出过程中,其端钩拉直变形提供的阻拔力贯穿部分脱粘和完全脱粘两个阶段,大大提高了拔出功,从图中可知, P_{max} 对应的 S_{max} 值,SEB和SH的比SEJ的大很多,由此可见,达到最大荷载时,贝卡尔特和哈瑞克斯钢纤维

(下转第36页)

可减少掺水和离析,虽然粘聚性增加,但拌合物和易性、可浇注性和可泵送性改善,且产生一种均匀的、稳定的、密实的填充质结构,有助于改善混凝土修整特性,便于施工。

4.2 由于含水量减少,振捣密实,水泥水化反应增强以及凝硬反应等;在混凝土中掺粉煤灰有利于降低其渗透性。与之相关,加之其它因素,掺粉煤灰混凝土抗硫酸盐侵蚀、碳化,对钢筋锈蚀、冻融以及碱—骨料反应等耐久性得以改善。

4.3 由于掺粉煤灰混凝土弹性模量增加,收缩徐变值减少,有良好变形恢复能力,利于在预应力混凝土中推广使用。

4.4 掺粉煤灰预应力混凝土构件,虽然混凝土早期强度有所下降,但是,长期强度有较大增长,结构性能(承载能力、抗裂性和刚度)与未掺粉煤灰的普通预应力混凝土构件相比无明显差异,且受弯构件正截面应变分布符合平均平截

面假定,应予特别强调指出的是塑性特征更加明显。

4.5 在诸多综合利用粉煤灰途径之中,将粉煤灰用于混凝土,可以说是最能大量节省水泥、节约能源的一条有效途径。若将我国热电厂年排粉煤灰量10%~30%有效地用于混凝土生产,则年节约水泥可达1200~4500万吨,有十分显著的经济效益。

4.6 综合利用粉煤灰,变废为宝,保护环境,节省水泥,节约能源,减少CO₂排放,生产质量优良、耐久性好的绿色高性能混凝土,不仅有显著的经济效益,而且有极大的社会效益。

参 考 文 献

- 1 [英]JR·K·德海尔著陈义初译,粉煤灰的试验研究及其工程应用,人民交通出版社,1992年1月第1版
- 2 孙靛萍编,高性能混凝土1998年10月

(上接第25页)

维吸收能量的能力比平直钢纤维要大的多。

(3)不同钢纤维弹性粘结阶段以后的荷载—位移曲线相差很大,反映在相应的钢纤维混凝土的宏观力学性能中,对混凝土的增强、增韧程度差别很大,我们的力学性能试验证明了这一点。

五、结束语

1. 自由状态下,加入膨胀剂的水泥砂浆基体与钢纤维的界面粘结强度,随膨胀剂掺量增加而降低。自应力水泥砂浆与钢纤维的界面粘结力,较普通硅酸盐水泥砂浆与钢纤维界面粘结力低。

2. 同一基体而言,两端带钩的钢纤维(贝卡尔特、哈瑞克斯)较平直型钢纤维界面粘结强度高。不同类型异型钢纤维的界面粘结强度相差较大。所以,应对钢材材质适用的基体混凝土强度、对混凝土增强增韧要求及效果进行综合考虑,设

计生产出较优质的异型钢纤维。

3. 在拔出试验中,从达到最大荷载时的吸能比较结果看,带钩钢纤维比平直钢纤维的吸能能力大几十倍。

参考文献

1. 赵华,赵鲁光.充分利用钢纤维对钢纤维混凝土的增强性能,钢纤维混凝土技术简讯(大连理工大学),1994,5(17)
2. 金藏生等,钢纤维与基体界面粘结性能的研究,武汉工业大学学报,1991,1,55~60
3. J. M. Aljwan, A. E. Naaman & W. Hansen. Cement & concrete composites 13(1991)247~255
4. Youjiong Wang, Victor C. Li and Stanley Backer. The international Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 10, Number 3.
5. 钢纤维混凝土试验方法(CECS 13:89),中国建设标准化协会标准