

钢纤维高强混凝土的劈拉及剪切变形性能

朱海堂, 高丹盈, 张启明

(郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要 通过钢纤维高强混凝土的劈拉和剪切性能试验, 分析钢纤维对高强混凝土劈拉和剪切变形性能的影响。结果表明, 钢纤维的加入有效地改善了高强混凝土的劈拉和剪切变形性能。劈拉荷载作用下, 钢纤维高强混凝土的劈拉变形能力随钢纤维体积率的增大而提高; 剪切荷载作用下, 钢纤维高强混凝土的初裂和破坏变形均随着钢纤维体积率的增大而增大, 当钢纤维体积率为 2.0% 时, 钢纤维高强混凝土的初裂变形较相应的普通高强混凝土提高了 42% ~ 65%, 剪切韧性提高了 4 ~ 5 倍。此外, 研究表明钢纤维类型对高强混凝土劈拉及剪切荷载作用下的变形性能具有不同程度的影响。

关键词 钢纤维高强混凝土 劈拉变形 剪切变形 混凝土韧性

中图分类号 : TU528.572

文献标识码 : A

文章编号 : 1006-7647(2008)06-0005-04

Deformation behavior of steel fiber-reinforced high strength concrete under splitting or shear//ZHU Hai-tang, GAO Dan-ying, ZHANG Qi-ming (School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract : Based on the splitting and shear tests of steel fiber-reinforced high strength concrete (SFRHSC), the effects of steel fiber on the deformation behavior of high strength concrete (HSC) are investigated. The test results show that the deformation and toughness of HSC reinforced with steel fiber is effectively improved under splitting or shear load. The splitting deformation of HSC increase with the increase of volume fractions of steel fiber. The shear deformation of HSC in cracking and failure also increase with the increase of volume fractions of steel fiber. Compared with HSC, the cracking deformation of SFRHSC is 42% ~ 65% higher and its toughness is 4 ~ 5 times higher with 2.0% volume fractions of steel fiber. The results also indicate that the steel fiber types have the different influences on the deformation of HSC under splitting or shear load.

Key words : steel fiber-reinforced high strength concrete ; splitting deformation ; shear deformation ; toughness of concrete

混凝土的荷载 ~ 变形全曲线是混凝土在各个受力阶段的变形、内部微裂缝的发展、损伤积累、表面破损剥落和最终破坏形态的形成等一系列变化过程的完整的宏观反映, 是研究和分析混凝土结构和构件承载力及其变形时所依据的主要材料特性, 在构件极限状态下的截面应力分布分析、抗震和抗爆结构的延性和恢复力的特性分析、一维构件的非线性(有限元)全过程分析等过程中, 是不可或缺的材料物理条件, 直接影响计算结果的准确性^[1]。

高强混凝土具有不同于普通混凝土的特点, 随着强度的提高, 其脆性越大, 延性越差。钢纤维高强混凝土改变了骨料与水泥浆体之间、水泥浆体与纤维之间的界面黏结性能, 在劈裂抗拉(以下简称劈

拉)或者剪切荷载作用下的变形与破坏特征更是具有与普通混凝土不同的特点。因此, 仅仅研究钢纤维高强混凝土劈拉、剪切破坏时的抗拉强度和剪切强度显然是不够的, 有必要对其劈拉和剪切变形性能进行研究。迄今为止, 不少学者对钢纤维高强混凝土的压缩应力-应变关系、弯曲韧性等进行了大量研究^[2-7], 取得了一系列研究成果, 但对劈拉、剪切等荷载作用下的变形性能研究甚少。笔者试图在常规试验的基础上, 通过对试验装置的改进, 测试钢纤维高强混凝土的劈拉荷载 ~ 变形曲线和剪切荷载 ~ 变形曲线, 以研究钢纤维高强混凝土的劈拉及剪切变形性能, 为钢纤维高强混凝土的结构分析提供研究依据。

基金项目 河南省高校科技创新人才支持计划(2008HASTTT027)

作者简介 朱海堂(1964—), 男, 河南虞城人, 教授, 博士, 从事新型材料及其结构性能研究。E-mail: htzhu@zzu.edu.cn

1 试件设计与试验方法

1.1 试件设计及原材料

试验设计基体混凝土强度等级为 C60,以钢纤维类型、钢纤维体积率等作为试验参数。钢纤维类型分别采用铣削型(本文以 MF 表示)、切断弓型(以下简称切断型,以 BF 表示)、剪切波纹型(以下简称剪切型,以 SF 表示)3 种,以 MF 作为主导纤维,钢纤维体积率分别为 0,0.5%,1.0%,1.5%,2.0%。3 种类型的钢纤维特征参数见表 1。

表 1 钢纤维特征参数

钢纤维类型	平均长度 l_f/mm	等效直径 d_f/mm	长径比 l_f/d_f
MF	32.3	0.944	34.2
BF	30.5	0.559	54.6
SF	32.4	0.565	57.4

试件采用 42.5 级普通硅酸盐水泥,细度模数为 2.91 的中粗天然河沙,最大粒径为 25 mm 的天然石灰岩碎石,沙、石颗粒级配均良好、连续,采用 FDN 型高效减水剂,水灰比 $W/C = 0.3$ 。为消除基体混凝土的变异对试验结果的影响,在浇筑钢纤维高强混凝土的同时,采用相同的混凝土配合比浇筑强度等级相同的普通高强混凝土作为对比试件。

1.2 试验方法

为了研究钢纤维高强混凝土的劈拉与剪切变形性能,对现行《钢纤维混凝土试验方法》^[8]中规定的劈拉强度和抗剪强度的试验装置进行改进,以测试钢纤维高强混凝土的劈拉荷载~变形关系曲线和剪切荷载~变形关系曲线。

1.2.1 劈拉试验方法

现行《钢纤维混凝土试验方法》中规定的劈拉强度测试装置仅限于进行劈拉强度值的测定,而不能反映混凝土的拉应力与拉应变之间的关系。为此,笔者对其装置进行了适当的改进,将电子百分表通过特制的夹具(标距 40 mm)固定在试件上,用于测定沿预定劈拉破坏面两侧混凝土的相对变形。在劈拉垫板和下压板之间设置最大量程为 500 kN 的荷载传感器。电子百分表与荷载传感器同时被连接到 $X \sim Y$ 函数记录仪上,用以测定被测试件的劈拉荷载~变形曲线。

1.2.2 抗剪试验方法

按《钢纤维混凝土试验方法》中的有关规定,试件尺寸采用 100 mm × 100 mm × 400 mm 的小梁试件。为测定剪切面处的相对位移及试件受剪时中部的竖向位移,将该试验方法中的试验测试装置进行了适当的改进,在试件上布置 4 块电子百分表,其中 2 块表用于测定试件中部的竖向位移,另 2 块表用于测

定试件剪切破坏面两侧混凝土的相对变形。剪切装置上刀口上部连接荷载传感器,将电子百分表和荷载传感器连接到 $X \sim Y$ 函数记录仪上,以测定试件的剪切荷载~变形关系曲线。

2 钢纤维高强混凝土的劈拉变形性能

2.1 劈拉破坏的受力过程

钢纤维高强混凝土改变了骨料与水泥浆体之间、水泥浆体与纤维之间的界面黏结性能,其在劈拉荷载作用下的变形与破坏特征具有与普通混凝土不同的特点。

图 1 为钢纤维体积率最大(2.0%)时 MF 钢纤维高强混凝土试件的实测劈拉荷载~变形曲线。观察该曲线特征可知,钢纤维高强混凝土劈拉破坏的荷载~变形曲线与软钢的拉伸荷载~变形曲线极其相似,由于钢纤维的限裂作用,荷载达峰值后的曲线并非突然下降,而是有一个缓慢下降的过程,表现出良好的抗拉韧性。从开始加载到破坏,依次经历弹性变形阶段(oa 段)、应力软化阶段(bc 段)、应力硬化阶段(cd 段)与破坏阶段(de 段)这 4 个不同的受力阶段。

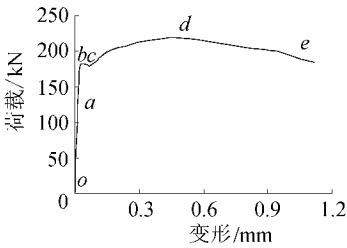


图 1 MF 钢纤维高强混凝土劈拉破坏时典型的荷载~变形曲线

自试件开始受力至最大荷载的 60% ~ 80% (a 点),钢纤维高强混凝土的劈拉荷载~变形曲线基本呈线性变化,此为明显的弹性变形阶段(oa 段) 过此阶段后,由于钢纤维混凝土内部微裂缝的出现而使曲线有一微小的弯峰,变形增加稍快,呈现一定的非线性特征,但无明显的拐点出现(ab 段)。这之后进入应力软化阶段,曲线出现一段水平台阶(bc 段),类似于软钢拉伸荷载~变形曲线的屈服阶段,钢纤维高强混凝土产生一定的塑性变形。仔细观察试件表面,沿试件劈拉破坏面中部已有肉眼可见的细微裂缝产生。在此阶段,高强混凝土基体的内部微裂缝扩展延伸,钢纤维逐步发挥其增强增韧作用,产生‘应力重分布’现象。

水平段过后进入应力硬化阶段(cd 段),曲线斜率陡增。随着裂缝的不断扩展与加宽,横跨裂缝间的钢纤维开始发挥作用。由于钢纤维的阻裂增强作用,使得荷载继续上升,变形(裂缝)继续增大,但曲线的斜率渐趋平缓,直至为零,此时可得到钢纤维高强混

凝土试件的最大劈裂抗拉应力,即劈拉强度。此阶段类似于软钢的拉伸荷载~变形曲线的强化阶段。

峰值过后,试件进入破坏阶段(*de*段),曲线缓慢下降。在此阶段,横跨裂缝间的钢纤维经由弹性阶段、屈服阶段到达强化阶段甚至破坏阶段(对于低强纤维)。随着钢纤维拉伸变形量的增大,部分钢纤维被拔出甚至被拉断,使得试件的承载力降低。在试件劈拉破坏过程中可听到试件内部有撕裂破坏的嘈杂声,试件破坏后,劈拉破坏面两侧并未分离,而是依靠裂缝间的钢纤维连接成完好的整体。

2.2 钢纤维对高强混凝土劈拉变形性能的影响

2.2.1 钢纤维体积率的影响

图2给出了MF钢纤维高强混凝土在不同钢纤维体积率下的劈拉荷载~变形关系曲线,图中MC0表示与MF钢纤维高强混凝土相应的普通高强混凝土试件,MF1.0和MF2.0分别表示钢纤维体积率为1.0%和2.0%时的铣削型钢纤维高强混凝土试件。由图2可以看出,在本文试验条件下,随钢纤维体积率的增大,初裂荷载和初裂变形、极限荷载和极限变形均有相应的提高,荷载~变形曲线下所包围的面积逐渐增大。对于高强混凝土,试件开裂之后曲线就开始下降,试件很快破坏。而钢纤维高强混凝土在基体开裂以后,跨越裂缝的钢纤维开始发挥作用,弥补了基体开裂造成的承载力降低,使曲线表现出类似钢筋屈服破坏时的水平段,随着裂缝的发展,钢纤维的作用逐渐增大,试件的承载能力继续提高,最后随着钢纤维的拔出或拉断,曲线逐渐下降。因此,钢纤维的加入,提高了高强混凝土劈拉破坏时的强度并改善了高强混凝土劈拉破坏时的变形性能,从而提高了其受拉韧性。

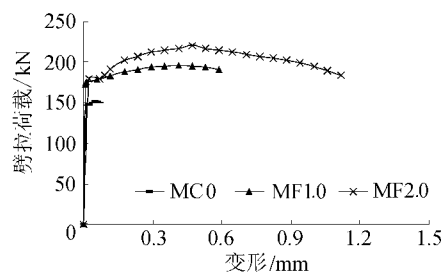


图2 MF钢纤维高强混凝土劈拉荷载~变形曲线

2.2.2 钢纤维类型的影响

图3给出了不同类型钢纤维高强混凝土劈拉荷载~变形关系曲线的对比,图中MF2.0,BF2.0和SF2.0分别代表钢纤维体积率为2.0%的铣削型、切断型和剪切型钢纤维高强混凝土试件。由图3可以看出,在相同的钢纤维体积率下,不同类型的钢纤维对高强混凝土在劈拉破坏时的强度和韧性的改善幅度是不同的,在试验所测试的3种钢纤维中,以BF

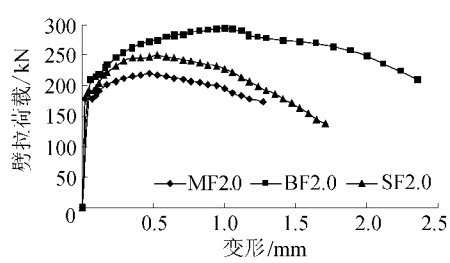


图3 钢纤维类型对高强混凝土劈拉荷载~变形曲线的影响
钢纤维对高强混凝土劈拉破坏时的强度和变形的增大幅度最大,表明BF钢纤维两端的弯钩有效地提高了钢纤维与高强混凝土之间的锚固力。在试件受力破坏过程中,将BF钢纤维从基体中拔出时不仅需要消耗较大的能量,而且需要将弯钩拉直,其间钢纤维可经过弹性阶段、屈服阶段到强化甚至破坏阶段的过程,这样就延缓了试件的破坏过程,改善了试件破坏时的变形性能,从而提高了高强混凝土劈拉破坏时的韧性。因此,钢纤维类型对劈拉变形性能具有明显的影响。

3 钢纤维高强混凝土的剪切变形性能

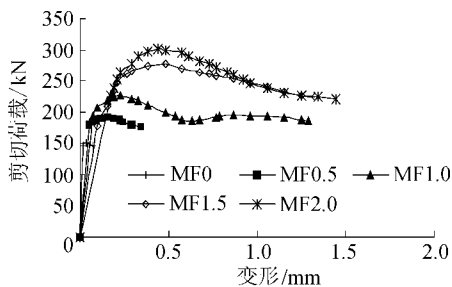
3.1 剪切荷载作用下的荷载~变形性能

图4给出了该试验3种钢纤维高强混凝土试件在剪切荷载作用下的荷载~变形曲线。对于普通高强混凝土试件,剪切荷载和变形之间为线性关系,沿剪切破坏面中部出现可见裂缝后便随之发生破坏,变形能力差,脆性大,破坏极具突然性,即典型的‘一裂即坏’。对于钢纤维高强混凝土试件,初裂前的荷载~变形关系也呈线性变化,与普通高强混凝土试件相似。开裂后,每种类型的钢纤维高强混凝土试件的初裂荷载及初裂变形、极限荷载及极限变形均随着钢纤维体积率的增大而增大。与相应的普通高强混凝土相比,在最大钢纤维体积率(2.0%)时,MF钢纤维高强混凝土、BF钢纤维高强混凝土和SF钢纤维高强混凝土的初裂变形分别提高了51%,65%和42%。在达到极限荷载之后,表现出应变软化行为,其原因主要是在试件开裂后跨越裂缝的钢纤维起到较大的抗拉作用,使原本已失去承载力的高强混凝土试件重新获得一定的承载能力。同时,钢纤维与高强混凝土基体间界面黏结性能较普通强度的混凝土有所提高,从而使钢纤维能够达到屈服甚至强化。

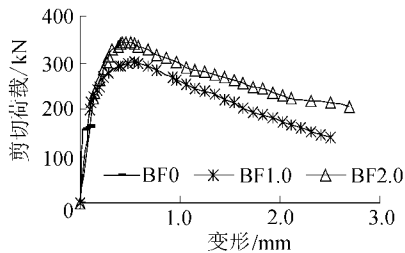
总体上说,由于高强混凝土基体与钢纤维间的界面黏结性能得到显著改善,使钢纤维在混凝土基体中能起到较好的增强和增韧效果,从而使得钢纤维高强混凝土具有较高的抗剪强度与变形性能。

3.2 钢纤维高强混凝土的剪切韧性

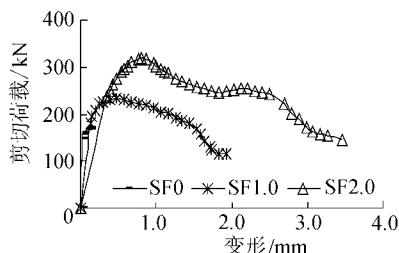
参照文献[9],以抗剪试件破坏前剪应力~变形



(a)MF 钢纤维高强混凝土



(b)BF 钢纤维高强混凝土



(c)SF 钢纤维高强混凝土

图 4 钢纤维高强混凝土的剪切荷载~变形曲线。曲线下的面积作为试件的相对韧性指标,并根据实测试验结果对每个抗剪试件的相对剪切韧性进行了计算,结果见表 2。由表 2 可以看出,钢纤维的加入有效地提高了高强混凝土的剪切韧性,随着钢纤维体积率的增大,剪切韧性的提高幅度也相应增大。在最大钢纤维体积率(2%)时,MF 钢纤维高强混凝土和 BF 钢纤维高强普通混凝土的剪切韧性较相应的普通高强混凝土的剪切韧性提高了约 5 倍,SF 钢纤维高强混凝土提高了约 4 倍。由此可见,如果在高强混凝土中加入适量的钢纤维,能有效地缓解高强混凝土的剪切脆性,避免脆性剪切破坏的发生。

表 2 钢纤维高强混凝土剪切韧性计算结果

试件名称	剪切韧性/(MPa·mm)	增韧比
MF 0	0.44	
MF 1.0	0.99	2.25
MF 2.0	2.15	4.98
BF 0	0.56	
BF 1.0	2.11	3.77
BF 2.0	2.79	4.98
SF 0	0.58	
SF 1.0	1.18	2.03
SF 2.0	2.38	4.10

注 增韧比为钢纤维高强混凝土的剪切韧性与相应普通高强混凝土剪切韧性的比值。

4 结 论

高强混凝土的高脆性是制约其发展和应用的主

要障碍,而钢纤维的加入能有效改善高强混凝土的剪切韧性和劈拉韧性。基于试验分析,笔者对钢纤维高强混凝土的劈拉及剪切变形性能进行了研究,并得到以下主要结论:

a. 在一定钢纤维体积率下,钢纤维高强混凝土的劈拉荷载~变形曲线依次经历弹性变形阶段、应力软化阶段、应力硬化阶段以及破坏阶段。

b. 在劈拉或者剪切荷载作用下,由于裂缝间钢纤维的‘桥联作用’使得试件最终破坏时均能保持其完整性,呈较好的塑性特征。

c. 在劈拉荷载作用下,钢纤维高强混凝土的变形能力随钢纤维体积率的增大而相应提高。钢纤维的加入不仅提高了高强混凝土的劈拉强度,而且有效地改善了高强混凝土的劈拉变形性能和劈拉韧性。

d. 钢纤维的加入有效地改善了高强混凝土剪切破坏时的变形性能和剪切韧性,随着钢纤维体积率的增大,初裂和破坏变形也都增大。当钢纤维体积率为 2.0% 时,与相应普通高强混凝土相比,钢纤维高强混凝土的初裂剪切变形提高了 42%~65%,剪切韧性提高了 4~5 倍。

e. 钢纤维类型对高强混凝土的劈拉和剪切变形性能具有不同程度的影响。在本文试验条件下,BF 钢纤维的增韧效果相对较好。

参考文献:

- [1] 赵国藩. 高等钢筋混凝土结构学[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 严少华, 钱七虎, 孙伟, 等. 钢纤维高强混凝土单轴压缩下应力-应变关系[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2001, 31(2): 77-80.
- [3] 焦楚杰, 孙伟, 秦鸿根, 等. 钢纤维高强混凝土单轴受压本构方程[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2004, 34(3): 366-369.
- [4] 朱海堂, 高丹盈, 谢丽, 等. 钢纤维高强混凝土弯曲韧性的研究[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(5): 656-660.
- [5] TAERWE L R. Influence of steel fibers on strain-softening of high-strength concrete [J]. ACI Materials Journal, 1992, 89(1): 34-60.
- [6] MANSUR M A, CHIN M S, WEE T H. Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(1): 21-29.
- [7] 朱海堂. 纤维高强混凝土力学性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2004.
- [8] CECS 13—1989, 钢纤维混凝土试验方法[S].
- [9] KHALOO A R, KIM N. Influence of concrete and fiber characteristics on behavior of steel fiber reinforced concrete under direct shear [J]. ACI Materials Journal, 1997, 94(6): 592-601.

(收稿日期 2008-05-04 编辑 骆超)