

钢纤维增强超高强混凝土拉压比试验研究

闫长旺^{*1,2}, 贾金青¹, 张 菊²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 内蒙古工业大学 矿业学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 在超高强混凝土(C100级)中掺入螺旋型钢纤维,通过立方体抗压强度与劈裂抗拉强度试验,研究钢纤维对超高强混凝土增强增韧效果和拉压比性能的影响.立方体试件尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,钢纤维掺量为0、0.50%、0.75%、1.00%、1.50%.试验结果表明,掺入钢纤维后,超高强混凝土立方体试件裂缝开展路径较多,裂而不散,坏而不碎,抗压韧性显著增强;抗压强度提高10.6%~15.5%,劈裂抗拉强度提高38.2%~91.9%;掺入钢纤维的超高强混凝土拉压比为0.060 5~0.084 6,拉压比提高24.08%~73.46%.提出了钢纤维超高强混凝土立方体抗压强度与劈裂抗拉强度预测模型,预测值与试验值误差分别在±1.79%、±17.84%范围内.掺入钢纤维可使超高强混凝土脆性大、韧性小的缺点得到显著改善.

关键词: 钢纤维;超高强混凝土;拉压比;韧性

中图分类号: TU528.572 **文献标志码:** A

0 引言

超高强混凝土由于具有强度高、耐久性好等优异的性能,已在工程中得到应用并取得了较好的技术经济效益.随着混凝土强度的提高,其脆性大、韧性差的缺点更加明显,呈现出突然性爆裂破坏,尤其是已有较广应用的超高强混凝土(C100级),在轴压作用下应变软化性能微乎其微.这些缺点限制了超高强混凝土进一步推广应用.已有研究表明在混凝土中掺入一定量纤维,可以克服混凝土的脆性缺点,增加混凝土韧性.夏广政等^[1]在混凝土中掺入钢纤维和聚丙烯纤维,通过劈裂抗拉强度与立方体抗压强度试验,得出掺入适量的钢纤维和聚丙烯纤维后,虽对立方体抗压强度影响不明显,但是,可使劈裂抗拉强度提高10%~30%.ATIS等^[2]通过在超高强混凝土(C100级)中掺入钢纤维和粉煤灰的试验,分析了立方体抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量以及干

缩收缩等性能,研究结果表明掺入钢纤维可提高立方体抗压强度和劈裂抗拉强度;Ashour等^[3]通过钢纤维钢筋混凝土梁弯曲试验发现钢纤维掺量对梁的弯曲韧性影响明显,弯曲韧性随着钢纤维掺量的增加而增大.可见,在混凝土中掺入适量纤维,可以降低混凝土的脆性,增强混凝土的韧性.同时,我国现行的《钢纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)^[4]中钢纤维混凝土的最高强度等级仅为CF80,为促进超高强混凝土的进一步推广与应用,对掺入钢纤维的超高强混凝土(C100级)进一步研究也是非常必要的.

本研究通过在超高强混凝土(C100级)中掺入钢纤维,进行立方体抗压强度与劈裂抗拉强度试验,分析钢纤维对立方体抗压强度与劈裂抗拉强度的增强作用,以及对拉压比(劈裂抗拉强度与立方体抗压强度之比)性能影响,研究钢纤维对超高强混凝土脆性的改善作用和韧性的增强作用.

收稿日期: 2010-07-06; 修回日期: 2011-12-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878037);海岸和近海工程国家重点实验室开放基金资助项目(LP1015);中国博士后科学基金资助项目(20100471445).

作者简介: 闫长旺*(1978-),男,博士,大连理工大学2009届博士,E-mail:ycw20031013@126.com;贾金青(1962-),男,博士,教授,博士生导师.

1 试验概况

1.1 试验原材料

水泥:水泥选用大连小野田水泥厂生产的P·II 52.5R硅酸盐水泥,3、28 d实测抗压强度分别为37.7、67.3 MPa.

掺合料:硅粉采用埃肯国际贸易(上海)有限公司生产的微硅粉920U,活性SiO₂含量≥87.23%,烧失量≤3.63%;粉煤灰选用葫芦岛绥中热电厂粉煤灰有限责任公司生产的I级粉煤灰.

粗集料:采用抚顺上党石灰石矿生产的5~20 mm粒径的石灰岩碎石,级配连续.

细集料:大连当地的过筛去除泥块、砾石的中粗河砂,最大粒径5 mm,细度模数2.5.

外加剂:高效减水剂掺量按胶结材料用量的固定比例掺入.

钢纤维:选用螺纹型短纤维,长度为30.0~30.4 mm,等效直径为0.55 mm,长径比为55,形状合格率为93%,抗拉强度为540~650 MPa,弹性模量为200 GPa,弯折(D=3 mm, α=90°)合格.

1.2 配合比设计

超高强混凝土的配制采用“硅酸盐水泥+超塑化剂+活性超细矿物掺合料”这一技术路线.超高强混凝土采用强制式搅拌机搅拌,加料顺序为水泥+硅粉+粉煤灰→砂+石子→干拌→90%的水+减水剂→10%的水→搅拌,干拌时将钢纤维均匀抛洒至混合料中,这样可以有效防止纤维在搅拌中堆积结团.钢纤维的掺入或多或少会使混凝土的流动性降低,影响浇筑质量,因此采用单一增加高效减水剂掺量的办法来保证必要的流动性.故钢纤维超高强混凝土配比中高效减水剂用量调整为水泥掺量的3.33%,即每立方米钢纤维超高强混凝土中高效减水剂的用量为14.05 kg.超高强混凝土配合比:m(水泥):m(硅灰):m(粉煤灰):m(水):m(石子):m(砂):m(减水剂)=421.9:56.3:84.4:135.0:1158.6:623.9:11.3,钢纤维掺量为0、0.50%、0.75%、1.00%、1.50%.

1.3 试件制作与试验方法

立方体抗压强度与劈裂抗拉强度试验均采用100 mm×100 mm×100 mm立方体试块.测试每组3个试件28 d强度,取其平均值作为每组混凝土的强度.立方体抗压强度试验中,加荷速度取0.9 MPa/s;劈裂抗拉强度试验中,加荷速度取0.09 MPa/s^[5,6].试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室进行.

2 结果分析

表1列出了钢纤维超高强混凝土立方体抗压强度和劈裂抗拉强度试验测量值.其中,UHSC表示钢纤维掺量为0的超高强混凝土试件;SFRC-0.50表示钢纤维掺量为0.50%的超高强混凝土试件,其他以此类推.从表1所示结果可以看出,钢纤维掺量的增加,不同程度地增强了超高强混凝土立方体抗压强度和劈裂抗拉强度以及增大了拉压比(劈裂抗拉强度与立方体抗压强度之比).

2.1 立方体抗压强度

立方体抗压强度试验过程中,未掺入钢纤维的超高强混凝土立方体试件呈爆裂式破坏,裂缝开展路径单一,表现出很强的脆性特点.而掺入钢纤维的超高强混凝土试件,裂缝开展路径较多,裂而不散,坏而不碎,表现出一定程度上的塑性破坏.并且,试件破坏时基本保持着正平行六面体的形状,这说明掺入钢纤维可显著增强超高强混凝土的抗压韧性.掺入钢纤维后,超高强混凝土立方体抗压强度的提高程度λ为10.6%~15.5%,提高程度λ随纤维掺量V_f的增长曲线如图1所示.同时,从图2所示的钢纤维掺量V_f与立方体抗压强度f_{cd}的关系可以看出,当钢纤维掺量V_f为0.75%时,钢纤维增强超高强混凝土立方体强度达到最大,这可能是因为在低水胶比情况下,钢纤维掺量V_f的增大,使钢纤维难以分布均匀,过高的钢纤维含量会在搅拌和成型时,使超高强混凝土内部出现较大的含气量,出现立方体抗压强度降低的现象.

表 1 钢纤维超高强混凝土试验结果

Tab.1 Experimental results of steel fiber reinforced ultra high strength concrete

试件编号	$V_f/\%$	立方体抗压强度 f_{cf}		劈裂抗拉强度 f_{ct}		拉压比 f_{tf}/f_{cf}	
		测量值/MPa	提高程度 $\lambda/\%$	测量值/MPa	提高程度 $\lambda/\%$	测量值	提高程度 $\lambda/\%$
UHSC	0	103.6	—	5.05	—	0.0487	—
SFRC-0.50	0.50	115.4	11.4	6.98	38.2	0.0605	24.08
SFRC-0.75	0.75	119.7	15.5	9.38	85.7	0.0784	60.76
SFRC-1.00	1.00	116.3	12.3	9.49	87.9	0.0816	67.39
SFRC-1.50	1.50	114.6	10.6	9.69	91.9	0.0846	73.46

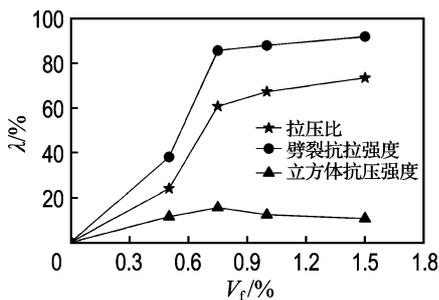


图 1 钢纤维掺量 V_f 与提高程度 λ 的关系

Fig. 1 Relationship between V_f and λ

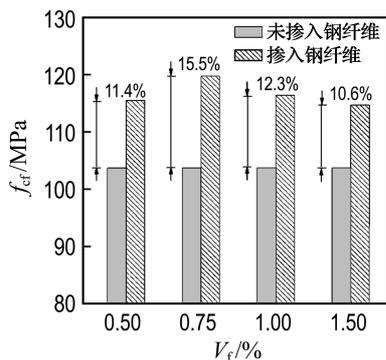


图 2 钢纤维掺量 V_f 与立方体抗压强度 f_{cf} 的关系

Fig. 2 Relationship between V_f and f_{cf}

根据本文中钢纤维掺量 V_f 、掺入与未掺入钢纤维的超高强混凝土立方体抗压强度试验值 f_{cf} 和 f_c ，提出基于 V_f 和 f_c 的钢纤维超高强混凝土立方体抗压强度预测模型：

$$f_{cf} = f_c + mV_f + nV_f^2 \quad (1)$$

由本文试验数据回归可得出预测模型中，系数 $m = 31.109$ ， $n = -16.092$ ，以及未掺入钢纤维的超高强混凝土立方体抗压强度试验值 $f_c = 103.6$ MPa，如图 3 所示。由立方体抗压强度预测

模型(1) 得出本文 f_{cf} 和 V_f 、 f_c 的关系：

$$f_{cf} = 103.6 + 31.109V_f - 16.092V_f^2 \quad (2)$$

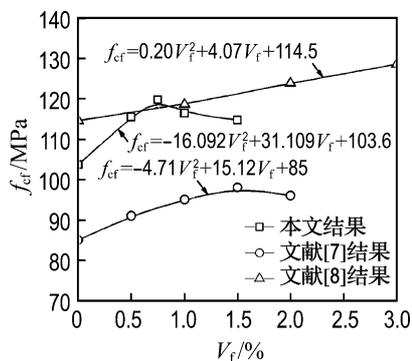


图 3 立方体抗压强度 f_{cf} 回归模型

Fig. 3 Regression models of f_{cf}

由立方体抗压强度预测模型(1)对文献[7、8]中立方体抗压强度分析，可得出 f_{cf} 和 V_f 、 f_c 的关系：

$$f_{cf} = 85 + 15.12V_f - 4.71V_f^2$$

$$f_{cf} = 114.5 + 4.07V_f + 0.20V_f^2$$

由以上各关系式所得钢纤维超高强混凝土立方体抗压强度预测值与试验值如表 2 所示，预测值与试验值吻合较好，误差在 $\pm 1.79\%$ 范围内。

2.2 劈裂抗拉强度

掺入钢纤维后，超高强混凝土劈裂抗拉强度试验值如表 1 所示。钢纤维掺量为 0、0.50%、0.75%、1.00%、1.50%，劈裂抗拉强度的提高程度 λ 分别为 38.2%、85.7%、87.9%、91.9%。相比立方体抗压强度，钢纤维对劈裂抗拉强度的提高程度较大。并且，提高程度 λ 随 V_f 的增加而增加。同时，从图 1 和 4 所示 V_f 与劈裂抗拉强度及提高程度的关系可以看出， V_f 从 0 增加到

表2 立方体抗压强度预测值与试验值对比

Tab. 2 Comparison of predicted and measured values for cubic compressive strengths

$V_f/\%$	本文结果			文献[7]结果			文献[8]结果		
	预测值/MPa	试验值/MPa	误差/%	预测值/MPa	试验值/MPa	误差/%	预测值/MPa	试验值/MPa	误差/%
0	103.6	103.6	0	85.0	85.0	0	114.5	114.5	0
0.50	114.9	115.4	0.44	91.4	91.0	0.44	—	—	—
0.75	117.6	119.7	1.79	—	—	—	—	—	—
1.00	118.3	116.3	-1.69	95.4	95.0	-0.42	118.8	118.5	0.25
1.50	113.8	114.6	0.70	97.1	98.0	0.93	—	—	—
2.00	—	—	—	96.4	96.0	-0.42	123.4	123.7	0.24
3.00	—	—	—	—	—	—	128.5	128.4	-0.08

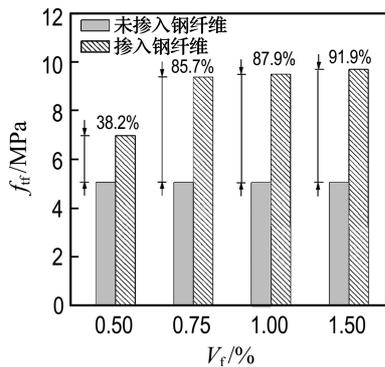


图4 钢纤维掺量 V_f 与劈裂抗拉强度 f_{tf} 的关系

Fig. 4 Relationship between V_f and f_{tf}

0.75%，超高强混凝土劈裂抗拉强度增长较快，强度的提高程度较大；而当 V_f 大于 0.75% 时，超高强混凝土劈裂抗拉强度增长变缓，强度的提高程度较小。

根据本文中钢纤维掺量 V_f 、掺入与未掺入钢纤维的超高强混凝土劈裂抗拉强度试验值 f_{tf} 、 f_c ，提出基于 V_f 、 f_{tf} 、 f_c 的钢纤维超高强混凝土劈裂抗拉强度预测模型：

$$f_{tf} = a \sqrt{f_c} + bV_f + cV_f^2 \quad (3)$$

由本文试验数据回归可得出预测模型中，系数 $a=0.496$ ， $b=6.672$ ， $c=-2.335$ ，以及未掺入钢纤维的超高强混凝土立方体抗压强度试验值 $f_c=103.6$ MPa，如图 5 所示。由劈裂抗拉强度预测模型(3)得出本文 f_{tf} 和 V_f 、 f_c 的关系：

$$f_{tf} = 5.05 + 6.672V_f - 2.335V_f^2 \quad (4)$$

由劈裂抗拉强度预测模型(3)对文献[7、8]中劈裂抗拉强度分析，可得出 f_{tf} 和 V_f 、 f_c 的关系：

$$f_{tf} = 5.8 + 3.01V_f - 0.02V_f^2$$

$$f_{tf} = 6.67 + 6.43V_f - 1.08V_f^2$$

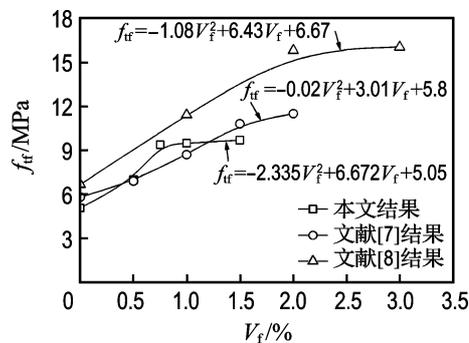


图5 劈裂抗拉强度 f_{tf} 回归模型

Fig. 5 Regression models of f_{tf}

由以上各关系式所得钢纤维超高强混凝土劈裂抗拉强度预测值与试验值如表 3 所示，误差在 ±17.84% 范围内。

2.3 拉压比性能

拉压比为劈裂抗拉强度与立方体抗压强度之比。混凝土拉压比性能是混凝土脆性的主要标志，混凝土强度越高，拉压比越小，脆性越大，韧性越小。超高强混凝土立方体抗压强度较高，但是其相应的劈裂抗拉强度的增大速度却相对较小，表现出显著的脆性大、韧性小的特点。因此，增强超高强混凝土韧性成为其广泛应用的关键。

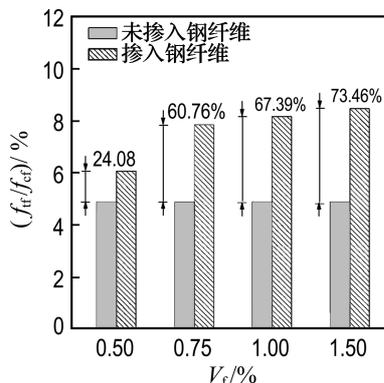
国内外已有研究资料^[8]表明：普通混凝土的拉压比为 0.058~0.125，且强度越高，拉压比越小，高强混凝土的拉压比为 0.042~0.050。本文中未掺入钢纤维的超高强混凝土拉压比仅为 0.048 7，而掺入钢纤维的超高强混凝土拉压比为 0.060 5~0.084 6。掺入钢纤维后，超高强混凝土

表3 劈裂抗拉强度预测值与试验值对比

Tab.3 Comparison of predicted and measured values for splitting tensile strength

$V_f/\%$	本文结果			文献[7]结果			文献[8]结果		
	预测值/MPa	试验值/MPa	误差/%	预测值/MPa	试验值/MPa	误差/%	预测值/MPa	试验值/MPa	误差/%
0	5.05	5.05	0	5.80	5.80	0	6.67	6.67	
0.50	7.19	6.98	-2.92	7.30	6.90	-5.48	—	—	—
0.75	7.96	9.38	17.84	—	—	—	—	—	—
1.00	8.53	9.49	11.25	8.79	8.70	-1.02	12.02	11.42	-4.99
1.50	9.09	9.69	6.60	10.27	10.80	5.16	—	—	—
2.00	—	—	—	11.74	11.50	-2.04	15.21	15.82	4.01
3.00	—	—	—	—	—	—	16.24	16.05	-1.17

的立方体抗压强度、劈裂抗拉强度以及拉压比 (f_{tf}/f_{cf}) 如表1所示. 从表1可以看出, 立方体抗压强度增长幅度较小, 劈裂抗拉强度增长幅度较大, 拉压比随着钢纤维掺入量的增加而增加. 并且, 从图6所示 V_f 与拉压比 f_{tf}/f_{cf} 的关系可以看出, 掺入钢纤维后, 拉压比的提高程度为 24.08%~73.46%. 超高强混凝土脆性大、韧性小的缺点得到显著改善.

图6 钢纤维掺量 V_f 与拉压比 f_{tf}/f_{cf} 的关系Fig.6 Relationship between V_f and f_{tf}/f_{cf}

3 结论

(1) 掺入钢纤维的超高强混凝土立方体试件, 裂缝开展路径较多, 裂而不散, 坏而不碎, 并且, 试件破坏时基本保持着正平行六面体的形状, 超高强混凝土的抗压韧性得到显著增强. 同时, 掺入钢纤维后, 超高强混凝土立方体抗压强度提高 10.6%~15.5%. 提出了钢纤维超高强混凝土立方体抗压强度预测模型, 预测值与试验值误差在

±1.79% 范围内.

(2) 超高强混凝土劈裂抗拉强度随钢纤维掺量的增加而增大, 掺入钢纤维后, 劈裂抗拉强度提高 38.2%~91.9%. 提出了钢纤维超高强混凝土劈裂抗拉强度预测模型, 预测值与测量值误差在 ±17.84% 范围内.

(3) 掺入钢纤维后, 拉压比随着钢纤维掺入量的增加而增加, 与未掺入钢纤维的超高强混凝土相比, 拉压比的提高程度为 24.08%~73.46%, 超高强混凝土脆性大、韧性小的缺点得到显著改善.

参考文献:

- [1] 夏广政, 夏冬桃, 徐礼华, 等. 混杂纤维增强高性能混凝土拉压比试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(5):103-105
- [2] ATIS C D, KARAHAN O. Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete [J]. **Construction and Building Materials**, 2009, 23(1):392-399
- [3] ASHOUR S A, WAFI F F, KAMAL M I. Effect of the concrete compressive strength and tensile reinforcement ratio on the flexural behavior of fibrous concrete beams [J]. **Engineering Structures**, 2000, 22(9):1145-1158
- [4] 中国工程建设标准化协会. CECS 38:2004 钢纤维混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004
- [5] 中华人民共和国建设部. GB/T 50081—2002 普通

- 混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003
- [6] 中国工程建设标准化协会. CECS 13:2009 钢纤维混凝土试验方法[S]. 北京:中国计划出版社, 2010
- [7] SONG P S, HWANG S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2004, 18(9): 669-673
- [8] 杜修力, 田予东, 田瑞俊, 等. 钢纤维超高强混凝土的力学性能试验[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(9):1198-1203

Experimental study of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for steel fiber reinforced ultra high strength concrete

YAN Chang-wang^{*1,2}, JIA Jin-qing¹, ZHANG Ju²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Mining and Technology, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China)

Abstract: An experimental study of the splitting tensile strength and cubic compressive strength of thread-typed steel fiber reinforced ultra high strength concrete (C100) was carried out. Effects of steel fiber were analyzed on the enhanced toughness and ratio between splitting tensile strength and compressive strength. The dimensions of cubic specimens were 100 mm×100 mm×100 mm and steel fibers were added at the volume fractions of 0, 0.50%, 0.75%, 1.00% and 1.50%. The research results show that cracks developing path of ultra high strength concrete cubic specimens is more and cracks are scattered, but specimens are not broken, and the compressive toughness is enhanced with an addition of steel fiber. Besides, the compressive strength increases by 10.6%-15.5%, splitting strength increases by 38.2%-91.9% and ratio between splitting tensile strength and compressive strength is 0.060 5-0.084 6, increases by 24.08%-73.46% after steel fibers are added. The prediction models for splitting tensile strength and compressive strength are presented and errors of predicted and measured values are $\pm 1.79\%$ and $\pm 17.84\%$ respectively. Conclusions are drawn that marked brittleness and bad toughness can be overcome by an addition of steel fibers for ultra high strength concrete.

Key words: steel fiber; ultra high strength concrete; ratio between splitting tensile strength and compressive strength; toughness