

弯钩型钢纤维混凝土弯曲韧性试验研究

贺晓铭¹, 张振龙², 尚汇源³

[1. 黄河水利职业技术大学, 河南 开封 475004; 2. 贝卡尔特应用材料科技(上海)有限公司, 上海市 200120;

3. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450016]

摘要: 通过对5种类型钢纤维混凝土基本力学性能试验, 对比研究钢纤维类型、钢纤维掺量对混凝土抗压强度、弹性模量、劈拉强度的影响, 确定弯钩型钢纤维选型。基于三分梁、切口梁试验和配合比优化研究其钢纤维掺量、长径比对混凝土弯曲韧性的影响。结果表明: 弯钩型钢纤维对抗压强度、弹性模量、劈拉强度增强作用较好。随着长径比和钢纤维掺量增加, 弯曲韧性指数、残余强度明显提高。钢纤维掺量为30~35 kg/m³, 各阶段残余弯拉强度都随之提高, 且优化配合比可使残余阶段强度提高约12.9%。

关键词: 钢纤维混凝土; 切口梁试验; 弯曲韧性; 残余弯拉强度

中图分类号: U454

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0319-06

Experimental Study on Bending Toughness of Hooked Steel Fiber Concrete

HE Xiaoming¹, ZHANG Zhenlong², SHANG Huiyuan³

[1. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China; 2. Bekaert Applied Material Technology (Shanghai) Co.,

Ltd., Shanghai 200120, China; 3. Henan Water Conservancy Survey, Design and Research Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China]

Abstract: Through the basic mechanical property tests on five types of steel fiber concrete, the influence of steel fiber type and steel fiber dosage on the compressive strength, elastic modulus and splitting tensile strength of concrete is studied and compared. The selection of hooked steel fiber is determined. Based on the test of three-divided beam and coped beam, and the mix ratio optimization, the influence of steel fiber content and length-diameter ratio on the bending toughness of concrete is studied. The results show that the hooked steel fiber has a better effect on enhancing the compressive strength, elastic modulus and splitting tensile strength of concrete. With the increase of length-diameter ratio and steel fiber dosage, the bending toughness index and residual strength increase significantly. When the steel fiber dosage is 30~35 kg/m³, the residual bending-tensile strength of each stage increases as the steel fiber dosage increases, and the residual strength can be increased by 12.9% by optimizing the mix ratio.

Keywords: steel fiber concrete; coped beam test; bending toughness; residual bending-tensile strength

0 引言

钢纤维是改善混凝土工作性能的新型复合材料^[1]。国外钢纤维混凝土的研究与应用较早, 但国内还未大面积推广使用^[2]。为提高不同工作环境下混凝土结构耐久性和强度, 钢纤维长径比、外形、参

数也在不断改进^[3]。曹玉新^[4]通过钢纤维混凝土配合比设计优化研究对强度的影响。赵修敏等^[5]对不同钢纤维掺量下混凝土冲击韧性进行研究。宁喜亮等^[6]对不同类型纤维在冻融和荷载复合作用环境下的强度和弯曲韧性进行研究。但弯钩型钢纤维作为新材料, 对其钢纤维混凝土力学性能、本构模型研究还处于探索阶段。因此, 通过进行钢纤维混凝土基本力学试验和弯曲韧性试验, 研究弯钩型钢纤维强度增强增韧作用。

1 不同类型钢纤维基本力学性能试验

1.1 试验原材料选择

试验用钢纤维类型为: (1) 弯钩型钢纤维, 代号分别为B80-3D、B80-4D, 其钢纤维参数见表1; (2)

收稿日期: 2024-12-04

基金项目: 贝卡尔特应用材料科技(上海)有限公司科研项目, 高强度低配筋预应力盾构隧道结构及其施工方法成套关键技术研究(2023-082)

作者简介: 贺晓铭(1993—), 男, 硕士, 助教, 从事隧道工程等领域的教学与科研工作。

通信作者: 张振龙(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事防灾减灾工程及防护工程等领域的研究工作。电子邮箱: 1217053382@qq.com

铣削型钢纤维,抗拉强度约800 MPa,代号为H40(长径比40);(3)凸痕型钢纤维,抗拉强度大于600 MPa,代号为J50(长径比50);(4)异型钢纤维,代号为A。胶凝材料为P·O42.5水泥,28 d强度约为48~49 MPa。粗骨料采用粒径为5~25 mm的碎石。细骨料采用天然河沙,细度模数3.0,含泥量为4.0%,粗、细骨料级配曲线见图1。粉煤灰采用一级粉煤灰,细度模数1.0。外加剂为西卡减水剂。

表1 弯钩型钢纤维参数

 B80-3D	弹性模量/GPa	200
	抗拉强度/GPa	1.345
	长度/mm	44
	直径/mm	0.55
	长径比	80
 B80-4D	弹性模量/GPa	210
	抗拉强度/GPa	1.8
	长度/mm	60
	直径/mm	0.75
	长径比	80

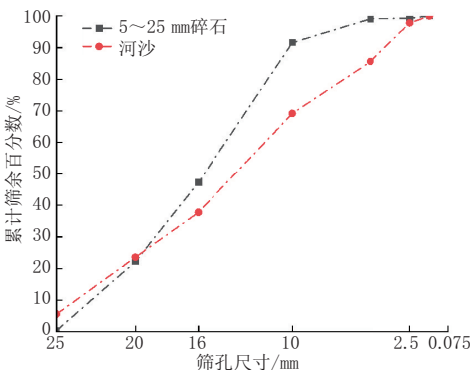


图1 粗、细骨料级配曲线

1.2 试验方法

试验以钢纤维类型、钢纤维掺量作为变化参数。钢纤维类型为H40、A、J50、B80-3D的掺量为0、30、40、50、60、80 kg/m³;钢纤维类型为B80-4D的掺量为0、25、30、35、40 kg/m³。C50混凝土配合比见表2。钢纤维混凝土基本力学试验按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)和《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13:2009)规定的试验方法测试。

表2 C50混凝土配合比

材料	掺量/(kg·m ⁻³)
水泥P·O 42.5	400
粉煤灰	50
碎石(5~25 mm)	1 100
河沙	740
水	155
减水剂	4.05

1.3 试验结果分析

图2为各类型钢纤维在不同掺量下28 d立方体抗压强度。与素混凝土试件强度相比,H40型试件强度随钢纤维掺量增加分别增大了0.92%、3.67%、-1.83%、-6.73%、-4.74%,强度出现先增大后降低现象;A型试件强度随钢纤维掺量增加分别增大了13.27%、8.25%、10.68%、11.81%、13.27%,掺量超过30 kg/m³时,强度增强作用出现弱化,掺量为30 kg/m³和80 kg/m³时作用效应相当;J50型试件强度随钢纤维掺量增加分别增大了10.91%、-5.05%、4.98%、4.65%、10.27%,掺量超过30 kg/m³时,强度增强作用也出现弱化,掺量为30 kg/m³和80 kg/m³时作用效应与A型试件一致;B80-3D型试件强度随钢纤维掺量增加分别降低了3.36%、11.31%、5.70%、3.02%、-8.39%,这说明弯钩型钢纤维掺量过多并不能增强;B80-4D型试件强度随钢纤维掺量增加分别降低了4.81%、-1.92%、-0.08%、1.95%。从强度增长幅度分析,钢纤维掺量在30~40 kg/m³时,H40、A、J50型试件强度增长幅度明显,但超过40 kg/m³后,增强效应减弱。而对于B80-3D、B80-4D型试件随掺量增加其强度变化幅度很小,尤其是掺量在30~40 kg/m³。通过这5类钢纤维试件强度分析,其随钢纤维掺量增加强度变化不明显且存在降低现象,这说明钢纤维掺量过多,在成型中不易均匀分散易产生结团现象,最终造成钢纤维增强作用下降,从而限制立方体抗压强度的有效增长。但从立方体抗压强度值得得B80-4D-30 kg/m³试件增强作用较好。

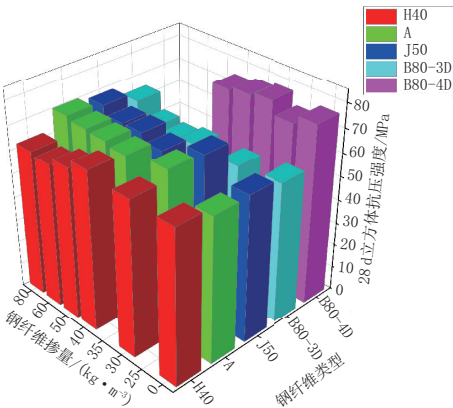


图2 28 d立方体抗压强度

图3所示为各类型钢纤维在不同掺量下28 d轴心抗压强度。H40型试件强度随钢纤维掺量增加分别降低了2.65%、2.24%、8.96%、24.44%、14.46%,强度随掺量增加出现了降低;A型试件强度随钢纤维掺量增加分别降低了7.85%、13.43%、-4.55%、2.27%、

4.75%;J50 型试件强度随钢纤维掺量增加分别降低了-3.52%、1.86%、0%、0.21%、-5.80%;B80-3D 型试件强度随钢纤维掺量增加分别降低了 4.11%、13.96%、-3.90%、2.87%、5.34%;B80-4D 型试件强度随钢纤维掺量增加分别增大了 8.29%、2.65%。H40 型试件在掺量 30~40 kg/m³时,强度下降幅度较小,大于 40 kg/m³时下降幅度较大。A、J50、B80-3D 型试件强度总体随钢纤维掺量变化幅度较小,且强度出现不同程度降低,只有 B80-4D 型钢纤维轴心抗压强度得到增强。从轴心抗压强度值可得 B80-3D-50 kg/m³试件增强作用较好。

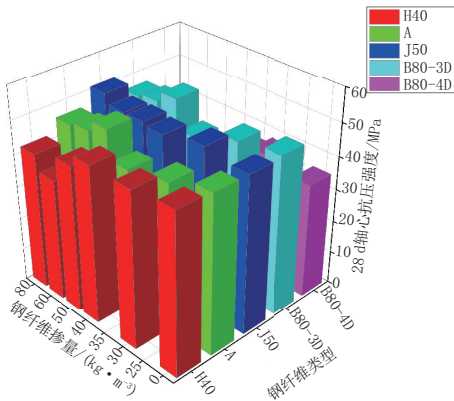


图3 28 d 轴心抗压强度

图 4 所示为各类型钢纤维在不同掺量下 28 d 弹性模量。H40 型试件弹模随钢纤维掺量增加分别提高了-1.54%、3.73%、23.25%、14.47%、-6.36%,出现随掺量先增大后降低现象;A 型试件弹模随钢纤维掺量增加分别提高了-8.78%、-11.99%、8.78%、9.42%、7.07%,出现随掺量先降低后增大现象;J50 型试件弹模随钢纤维掺量增加分别提高了 4.36%、12.20%、-3.27%、-1.09%、-6.32%,出现随掺量先增大后降低现象;B80-3D 型试件弹模随钢纤维掺量增加分别提高了-2.12%、-2.12%、15.68%、1.06%、17.58%,出现随掺量先降低后增大现象;B80-4D 型试件弹模随钢纤维掺量增加分别降低了 2.12%、2.12%。从弹模增长规律分析,H40、J50 型试件弹模随掺量增加先增大后降低,A、B80-3D、B80-4D 型试件弹模随掺量增加先降低后增大。钢纤维掺量增加至 50kg/m³,H40、J50、B80-3D 型试件弹性模量出现不同程度提高,A、B80-4D 型试件弹模却出现下降现象但幅度很小,说明这两种类型钢纤维对于弹模提升作用有限。从弹性模量值可得 B80-3D-80 kg/m³试件增强作用较好。

图 5 为各类型钢纤维在不同掺量下 28 d 劈裂抗拉强度。H40 型试件强度随钢纤维掺量增加分别增

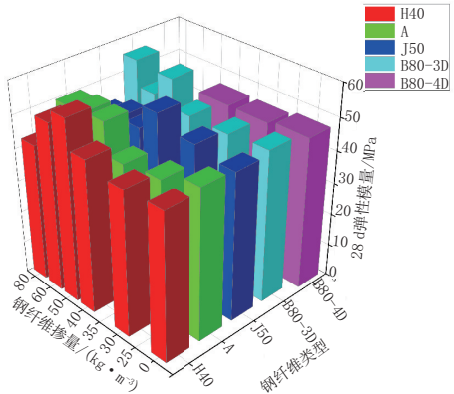


图4 28 d 弹性模量

大了-1.30%、9.57%、10.87%、-8.26%、-11.74%,出现随掺量先增加后降低现象;A 型试件强度随钢纤维掺量增加分别降低了-4.64%、6.54%、11.60%、1.05%、6.54%;J50 型试件强度随钢纤维掺量增加分别降低了-9.32%、22.88%、1.48%、0.42%、3.60%;B80-3D 型试件强度随钢纤维掺量增加分别降低了 5.62%、6.07%、-6.52%、3.82%、-10.56%;B80-4D 型试件强度随钢纤维掺量增加分别增大了 20.75%、28.21%、77.86%、95.34%。H40、A、J50、B80-3D 型试件并不能有效弥补混凝土抗拉性能,且掺量增加导致纤维集聚现象较多,从而使钢纤维作用效率降低,限制抗拉强度的有效增长。B80-4D 型试件由于钢纤维类型端部弯钩数量较多,易于基体混凝土形成较强的机械锚固力,掺量越多作用效率越高。从劈裂抗拉强度值可得 B80-4D-40 kg/m³试件增强作用较好。

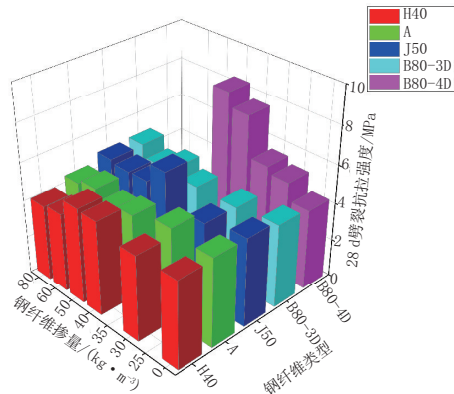


图5 28 d 劈裂抗拉强度

由上述 4 个基本力学指标分析,各类型钢纤维在不同掺量下对抗压强度、弹性模量增强作用不明显,但 B80-4D 型试件对混凝土抗拉增强作用明显,说明随着钢纤维掺量增加,由于钢纤维端部带弯钩形态增大了钢纤维与集料之间的黏结力,钢纤维排状黏结形态使其桥接、摩阻增强效应得到增强。B80-4D 型试件各掺量间强度增长幅度分别为 20.75%、

6.18%、38.73%、9.83%。B80-4D型钢纤维掺量在30~40 kg/m³时,对混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度增强作用较好。这说明弯钩型钢纤维对混凝土基本力学性能作用明显。

2 不同长径比弯钩型钢纤维混凝土弯曲韧性试验

2.1 试验方法

弯钩型钢纤维分别采用长径比为50、56、62、80,试件代号分别为J50、H56、G62、B80-4D。钢纤维弯曲韧性试验方法依据《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13:2009)和美国规范ASTM C1018—98规定的三分梁试验方法测试。试验加载装置见图6。



图6 弯曲韧性试验装置

2.2 试验结果分析

图7至图10为不同长径比钢纤维混凝土在不同掺量下等效弯拉强度-挠度曲线(试件龄期为7 d)。由图分析可得,不同长径比钢纤维掺量增加使混凝土韧性提高,随着钢纤维掺量的增加,长径比大的试件韧性改善更趋于明显。J50、G62型试件强度-挠度曲线存在明显的下降段,但在较大跨中挠度变形下仍能保持较大的剩余承载能力。H56、B80-4D型试件强度-挠度曲线并未出现明显的下降段,并且在钢纤维掺量在大于40 kg/m³,跨中挠度达到0.5~1.0 mm范围时,试件剩余承载能力逐渐增大,混凝土试件韧性得到提高。表3为弯曲韧性指数试验结果,由残余强度 $R_{5,10}$ 、 $R_{10,30}$ 分析可得^[7],同一类型钢纤维试件随着钢纤维掺量的增加,试件残余承载能力不断提高;同一掺量钢纤维试件下随着长径比的增加,试件残余强度性能优势表现更加明显。这说明弯钩型钢纤维与高强度混凝土基体的黏结锚固作用,会随着长径比加大扩大其排状桥接作用区域,从而使试件在开裂后仍能与混凝土保持整体性和较好的残余承载能力。以J50型试件为分析对象,当掺量为30 kg/m³,

H56、G62、B80-4D型试件残余强度 $R_{10,30}$ 分别增大了234.5%、121.3%、213.5%;当掺量为40 kg/m³,H56、G62、B80-4D型试件残余强度 $R_{10,30}$ 分别增大了178.0%、71.2%、240.6%;当掺量为50 kg/m³,H56、G62、B80-4D型试件残余强度 $R_{10,30}$ 分别增大了85.1%、50.2%、117.6%;当掺量为60 kg/m³,H56、G62型试件残余强度 $R_{10,30}$ 分别增大了85.3%、105.1%。从残余强度增长幅度分析,随着钢纤维掺量的增加,H56、G62型试件逐渐降低,说明试件出现裂后软化现象。但B80-4D型试件在掺量为40 kg/m³强度增长幅度出现较大提高,说明B80-4D型试件强度出现裂后强化现象,并且掺量不宜超过40 kg/m³,弯钩型钢纤维宜选用B80-4D。

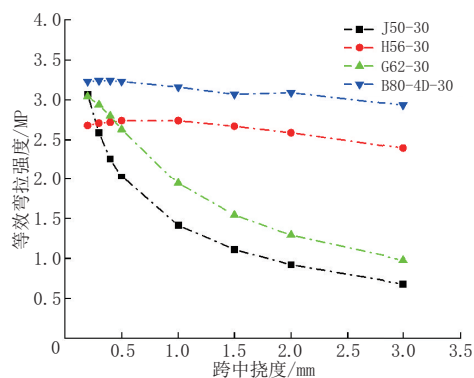


图7 不同长径比钢纤维混凝土强度-挠度曲线(掺量为30 kg/m³)

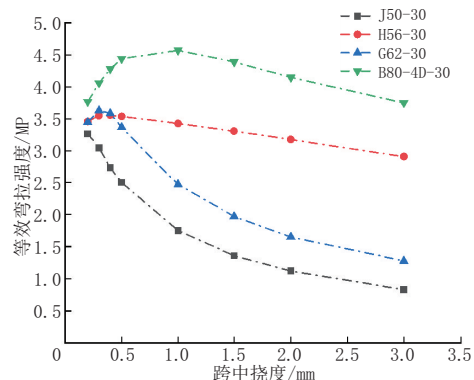


图8 不同长径比钢纤维混凝土强度-挠度曲线(掺量为40 kg/m³)

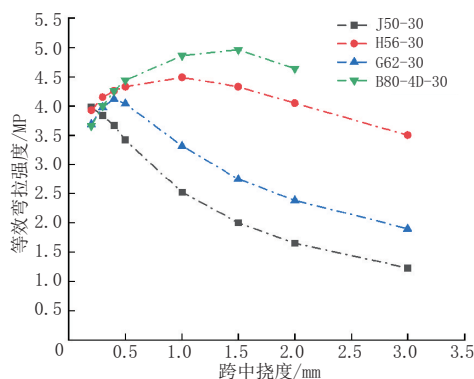


图9 不同长径比钢纤维混凝土强度-挠度曲线(掺量为50 kg/m³)

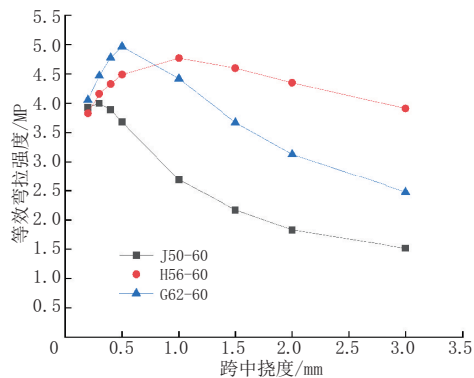


图 10 不同长径比钢纤维混凝土强度-挠度曲线(掺量为 60 kg/m³)

表 3 弯曲韧性指数试验结果

试件编号	I_5	I_{10}	I_{30}	$R_{5,10}$	$R_{10,30}$
J50-30	5.77	6.29	11.03	10.40	23.67
J50-40	4.11	7.70	14.62	71.80	34.60
J50-50	4.86	9.44	21.62	91.60	60.93
J50-60	5.31	10.70	23.66	107.80	64.78
H56-30	4.46	8.44	24.28	79.60	79.18
H56-40	4.98	9.97	29.20	99.80	96.18
H56-50	5.31	10.88	33.43	111.40	112.78
H56-60	5.10	10.54	34.54	108.80	120.03
G62-30	4.50	8.26	18.74	75.20	52.38
G62-40	5.37	10.88	22.73	110.20	59.25
G62-50	5.24	10.87	29.17	112.60	91.51
G62-60	5.63	12.10	38.68	129.40	132.89
B80-4D-30	4.16	7.90	22.74	74.80	74.21
B80-4D-40	4.94	10.16	33.72	104.40	117.84
B80-4D-50	5.34	11.15	37.67	116.20	132.61

3 B80-4D 型钢纤维混凝土切口梁试验

3.1 试验方法

钢纤维采用 B80-4D 型,以钢纤维掺量作为变化参数。试验依据欧洲规范 EN14651 Test method for metallic fibered concrete-Measuring the flexural tensile strength 规定的切口梁试验方法测试。试验加载装置见图 11。

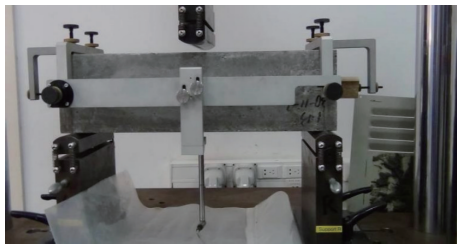


图 11 切口梁试验装置

3.2 试验结果分析

图 12 为不同钢纤维掺量下 B80-4D 型钢纤维混凝土残余弯拉强度(试件龄期为 28 d)。以钢纤维掺量 25 kg/m³ 为对比对象, f_L 为弯拉强度, $f_{R,i}$ 为切口张

开位移值为 0.5、1.5、2.5、3.5 mm 时的残余弯拉强度。弯拉强度 f_L ,试件强度随钢纤维掺量增加分别降低了-3.64%、-3.96%、-0.63%;残余弯拉强度 $f_{R,1}$,试件强度随钢纤维掺量增加分别增大了 23.45%、44.33%、62.89%;残余弯拉强度 $f_{R,2}$,试件强度随钢纤维掺量增加分别增大了 11.27%、49.48%、40.92%;残余弯拉强度 $f_{R,3}$,试件强度随钢纤维掺量增加分别增大了 20.35%、91.93%、36.14%;残余弯拉强度 $f_{R,4}$,试件强度随钢纤维掺量增加分别增大了 28.34%、109.63%、22.99%。这说明 B80-4D 型钢纤维掺量对弯拉强度影响很小。当钢纤维掺量为 25 ~ 35 kg/m³,残余弯拉强度随钢纤维掺量的增加而增加,当钢纤维掺量大于 35 kg/m³ 时,残余弯拉强度 $f_{R,2} \sim f_{R,4}$ 增长幅度急降,过多钢纤维掺量影响其均匀分布性,钢纤维增韧效率降低,从而出现钢纤维掺量为 40 kg/m³,残余弯拉强度增大幅度减小的现象。所以,B80-4D 型钢纤维混凝土最佳掺量为 30 ~ 35 kg/m³。

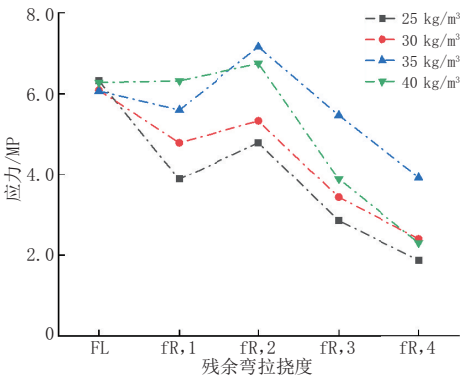


图 12 不同钢纤维掺量残余弯拉强度

4 不同混凝土配合比对弯曲韧性的影响

4.1 混凝土配合比

混凝土配合比见表 4。

表 4 混凝土配合比试验

材料	掺量/(kg·m ⁻³)		
	配合比二	配合比三	配合比四
水泥 P·O 42.5	400	400	400
粉煤灰	50	50	50
碎石(5 ~ 25 mm)	900	1 100	936
碎石(5 ~ 16 mm)	200	—	—
河沙	740	740	880
水	150	150	150
减水剂	4.50	5.40	5.85
B80-4D	30	30	30

4.2 试验结果分析

图 13 所示为钢纤维掺量为 30 kg/m³ 不同混凝土配合比残余弯拉强度。混凝土配合比一见表 4,配合

比三虽与配合比一保持一致,但浇筑工艺和振捣时间有所调整。以配合比一残余弯拉强度为对比,弯拉强度 f_L ,配合比二~四试件强度分别降低了8.98%、12.38%、23.84%;残余弯拉强度 $f_{R,1}$,配合比二~四试件强度分别增大了0.53%、15.70%、-4.23%;残余弯拉强度 $f_{R,2}$,配合比二~四试件强度分别降低了2.20%、-10.10%、2.78%;残余弯拉强度 $f_{R,3}$,配合比二~四试件强度分别降低了20.20%、6.08%、6.47%;对于残余弯拉强度 $f_{R,4}$,配合比二~四试件强度分别降低了30.53%、13.17%、16.53%。对于残余弯拉强度 $f_{R,2}$,配合比二、四强度出现不同幅度下降,但配合比三却出现明显裂后强化现象。对于残余弯拉强度 $f_{R,3} \sim f_{R,4}$ 降低幅度配合比三<配合比四<配合比二,掺入较小粒径的粗集料使试件在破坏阶段强度软化速度较快。故通过对混凝土配合比优化分析,B80-4D型钢纤维混凝土推荐采用配合比三,使裂后残余阶段强度提高约12.9%。在实际工程中应控制搅拌时间和钢纤维均匀分布,使B80-4D型钢纤维发挥良好的增强增韧性能。

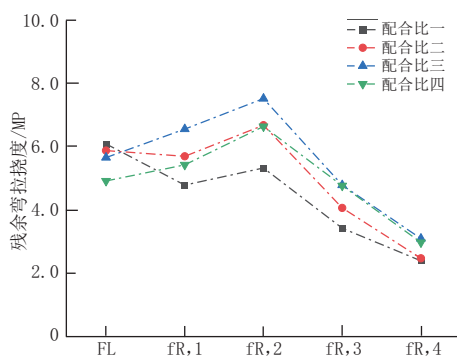


图 13 各工况残余抗拉强度

5 结 语

通过对多型钢纤维混凝土基本力学试验和弯钩型钢纤维混凝土弯曲韧性试验,得到以下结论:

(1)各型钢纤维对混凝土抗压强度、弹性模量增强影响较小,但弯钩型钢纤维 B80-4D 在掺量 30 ~ 40 kg/m³ 时,对劈裂抗拉强度增强作用明显提高。弯钩型钢纤维有效提升与混凝土之间的黏结力和机械锚固力,提升混凝土抗拉性能。

(2)弯钩型钢纤维混凝土试件残余承载能力随钢纤维掺量和长径比的增加而提高,钢纤维粘结成排提升其桥接、摩阻增强效应。

(3)弯钩型 B80-4D 钢纤维掺量为 30 ~ 35 kg/m³,残余弯拉强度随掺量的增加而增大,钢纤维掺量大于 35 kg/m³ 时,残余弯拉强度 $f_{R,2} \sim f_{R,4}$ 增长幅度有所下降,说明最佳掺量为 35 kg/m³,且弯钩型钢纤维对混凝土裂后强度起强化作用。

参考文献:

- [1] 刘若愚. 地铁隧道无筋钢纤维混凝土管片裂缝发展分析研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [2] 杨跃. 无筋钢纤维混凝土管片正常使用极限状态设计方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [3] 陈刚,史命,李瑞然,等. 多端钩型钢纤维混凝土劈拉强度的试验研究[J]. 工业建筑,2020,50(10):129-132;169.
- [4] 曹玉新. 盾构管片钢纤维混凝土配合比的设计优化[J]. 工业建筑,2020,50(8):101-104;159.
- [5] 赵修敏,杨海峰,李雪良,等. 钢纤维橡胶混凝土的静力和动冲击性能研究[J]. 工业建筑,2021,51(8):173-178.
- [6] 宁喜亮,王万平,郝帅,等. 不同纤维对混凝土在多重因素作用下抗冻耐久性的影响[J]. 工业建筑,2020,50(10):122-128.
- [7] 程伟峰,杨虹,仝德华,等. 现场喷射成型双掺硅粉和钢纤维湿喷混凝土弯曲韧性研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(5):1073-1081.

(上接第318页)

术研究[R]. 天津:天津市市政工程研究院,2009.

[14] 李波,李鹏,张新雨,等. 废旧胶粉的反应与交联作用对橡胶沥青黏度的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版),2017,37(2):26-34.

[15] JEONG K D, LEE S J, AMIRKHANIAN S N, et al. Interaction effects of crumb rubber modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5): 824-831.

[16] 谢昭彬,陈剑峰,李秋平. 橡胶沥青性能评价指标和影响因素研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2011(12):73-76.

[17] 杨岱汶. 基于橡胶沥青黏度损失性能的室内试验分析[J]. 交通科技与管理,2023,4(13):99-101.

[18] 弥海晨,郭平,胡苗. 橡胶沥青粘度测试影响因素及粘度值确定方法研究[J]. 中外公路,2011,230(5):301-304.