

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.041



纤维类型对混凝土抗压强度和弯曲韧性的增强效应及变异性的影响

李传习, 聂洁, 石家宽, 曾宇环

(长沙理工大学 南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室, 长沙 410004)

摘要:为研究单掺钢纤维、聚丙烯纤维和纤维素纤维对混凝土抗压强度及弯曲韧性的影响,在不同体积掺量下进行了混凝土试块的抗压强度及弯曲韧性试验,并对试验结果进行了变异性分析。试验结果表明:3种纤维混凝土抗压强度较素混凝土平均提高26.7%、6.1%和11.1%;二次抗压强度保持率分别达77.0%、45.7%和58.0%;抗弯承载力最大分别提高31.6%、3.5%和14.0%;基于荷载-挠度曲线、Newkumar法及弯拉应力-应变曲线分别计算的弯曲韧性指数 I_{20} 、Newkumar指标 PCS_m 和韧度比 R_x 分别为素混凝土的4.2、3.1、2.6倍,19.9、9.8、6.9倍和4.0、3.4、2.7倍。变异性分析结果表明,掺入纤维后混凝土的抗压强度变异性小于弯曲韧性。同时,基于Newkumar法和应力-应变曲线法算得的混凝土弯曲韧性指标变异系数小于荷载-挠度曲线法。总体而言,钢纤维增强混凝土的抗压强度和弯曲韧性最为显著,且变异系数最小。纤维素纤维增强混凝土抗压强度及聚丙烯纤维增强混凝土弯曲韧性则相对较显著。

关键词:纤维混凝土;二次抗压强度保持率;荷载-挠度曲线;弯拉应力-应变曲线;弯曲韧性;变异系数

中图分类号:TU528 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2019)02-0147-12

Effect of fiber type on compressive strength and flexural toughness of concrete and analysis of variability

Li Chuanxi, Nie Jie, Shi Jiakuan, Zeng Yuhuan

(National Joint Engineering Research Laboratory for Long-term Performance Improvement Technology for Bridges in Southern China, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, P. R. China)

Abstract: This paper aims to study the effect of single-doped steel fiber, monofilament polypropylene fiber and cellulose fiber on compressive strength and flexural toughness of concrete. The compressive strength and flexural toughness of concrete specimens were firstly tested under different volume fraction of fibers,

收稿日期:2018-05-11

基金项目:国家自然科学基金(51778069);973计划项目(2015CB057700);湖南省研究生科研创新项目(CX2016B386);长沙理工大学国家地方联合工程实验室开放基金(16BCX01)

作者简介:李传习(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事桥梁工程新技术、新工艺研究,E-mail:lichuanxi2@163.com。

Received:2018-05-11

Foundation item:National Natural Science Foundation of China(No. 51778069);National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program)(No. 2015CB057700);Graduate Research and Innovation Project of Hunan Province(No. CX2016B386);Open Fund of National Joint Engineering Research Laboratory(No. 16BCX01)

Author brief:Li Chuanxi(1963-), professor, doctoral supervisor, main research interest: new technology of bridge engineering, E-mail:lichuanxi2@163.com.

and the variability of test results was then analyzed. The test results show that the compressive strength of the three kinds fiber reinforced concrete are 26.7%, 6.1% and 11.1% higher than that of normal concrete respectively. The average retention rate of secondary compressive strength are 77.0%, 45.7% and 58.0%. The flexural toughness index I_{20} , Nemkumar index PCSm, and toughness ratio R_x of fiber reinforced concrete are 4.2 times, 3.1 times, 2.6 times, and 19.9 times, 9.8 times, 6.9 times, and 4 times, 3.4 times, 2.7 times higher than of normal concrete respectively, which these based on load-deflection curves, Nemkumar method and bending-tension stress-strain curves, The results of the variability analysis show that the compressive strength of concrete is less than the flexural toughness after the incorporation of fiber. Meanwhile, the coefficient of variation of flexural toughness of concrete obtained from Nemkumar method and bending stress-strain curves is less than that of load-deflection curve method. Overall, the compressive strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete are the most significant with the smallest coefficient of variation, and the compressive strength of cellulose fiber reinforced concrete and the flexural toughness of polypropylene fiber reinforced concrete are relatively significant.

Keywords: fiber reinforced concrete; rate of secondary compressive strength; load-deflection curve; bending stress-strain curve; flexural toughness; coefficient of variation

混凝土自 18 世纪 30 年代初出现以来,经过近 200 年的发展与应用,已成为当代最主要的建筑材料之一^[1-2]。但普通素混凝土的固有缺点是抗压强度远大于抗拉强度、韧性差、在荷载作用下易发生脆性破坏^[3-4]。在混凝土基体内掺入纤维是改善其力学性能缺点的有效途径之一^[5-6]。目前,在纤维混凝土的研究中,较普遍选用钢纤维和聚丙烯纤维^[7-9],而对纤维素纤维混凝土的研究较少,且大多集中在早期开裂、抗渗和抗冻性能方面^[10-12],对其抗压强度及弯曲韧性的研究鲜有报道。纤维素纤维作为一种天然植物纤维,相较聚丙烯纤维,抗拉强度更高,经济性更好,因此,研究纤维素纤维增强混凝土抗压强度及弯曲韧性有其必要性和积极意义。

邓宗才等^[13-15]研究了纤维素纤维混凝土的弯曲韧性,但未涉及抗压强度。其研究结果显示,纤维体积掺量为 0.09%~0.11%时,弯曲韧性指数 I_5 、 I_{10} 分别为 3.99~4.48 和 6.82~6.92,且在特定掺量下优于聚丙烯纤维混凝土。夏冬桃等^[16]研究了钢纤维、塑钢纤维和杜拉纤维对混凝土的力学性能影响,结果显示,3 种纤维体积掺量分别在 0.4%~1.0%、0.19%~0.39%和 0.055%~0.11%时,纤维混凝土的抗压强度相较普通混凝土增幅达 12%~20%,抗折强度最大提高 28%。Hossein 等^[17]研究显示,当混凝土内掺入体积分数为 0.5%的聚丙烯纤维,龄期为 91 d 时,其弯曲韧性指数较普通混凝土提升 19.5%。Lee 等^[18]研究结果显示,当钢纤维掺量为 0.5%时,混凝土板内部承载力和边缘承载力分别提高 37.7%和 20.8%。以上学者虽进行了大量关于纤维混凝土力学性能的试验研究,并取得丰硕成果,但尚未涉及变

异性分析。标准差或变异系数体现了试验结果的离散程度或混凝土材料力学性能的稳定性,同时也决定混凝土设计强度的取值。

目前,用来评价纤维混凝土韧性指标的方法包括美国标准 ASTM C 1018^[19]、日本 JSCE-SF4 法^[20]、欧洲 RILEM TC 162-TDF 法^[21]以及由两者融合改进而来的中国 CECS13:2009 法^[22]等。这些方法皆基于荷载-挠度曲线来计算混凝土的弯曲韧性指标。而基于弯拉应力-应变曲线评价弯曲韧性指标则较少提及,该方法具有计算简单、误差较小等优点。因此,结合荷载-挠度曲线和应力-应变曲线评价纤维混凝土的弯曲韧性可做到既精确又全面^[18]。同时,文献^[11]的研究表明,采用 JSCE-SF4 法评价纤维混凝土韧性指标有一定的局限性;RILEM TC 162-TD 的试验方法与本文试验差别较大;ASTM C 1018 和 CECS13:2009 虽可全面评价混凝土的韧性,但也存在过于依赖初裂挠度,容易产生较大误差的缺点。为精确而全面地评价纤维混凝土的弯曲韧性,本文采用 CECS13:2009、不依赖初裂荷载的 Nemkumar 韧性指标法^[23]以及误差较低的弯拉应力-应变曲线法分别计算混凝土的弯曲韧性指标。

综合以上情况,除选用钢纤维和聚丙烯纤维外,还将选用一种新型纤维素纤维,研究在不同体积率下纤维对混凝土抗压强度和弯曲韧性的增强效应。除获得各类混凝土的初裂荷载和破坏荷载,还将对已破坏试块进行二次抗压强度试验,以得到各试块的二次抗压强度保持率,进而双层面评价纤维对混凝土抗压强度的增强效应。然后,采用所提出的 3

种方法,分别计算各混凝土试块的弯曲韧性指标。最后,对试验结果进行变异性分析。

1 试验方案

1.1 混凝土配合比及试件尺寸

试验采用 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥;粗骨料为连续级配碎石(粒径 5~25 mm);细骨料为含泥量低且级配良好的黄砂;S95 级矿粉;细度模数为 20 的二级粉煤灰;减水剂采用 FDN-2 高效减水剂;自来水;水胶比为 0.34,混凝土强度等级为 C40。除纤维以体积分数计量外,其余材料用量均按质量计,称量的精确度满足规范要求。具体配比如表 1 所示。

表 1 混凝土配合比
Table 1 Mix design of concrete $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

水	水泥	矿粉	粉煤灰	砂	碎石	高效减水剂
156	318	98	48	751	1 023	9.7

抗压试验试块尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,弯曲韧性试验试块尺寸为 150 mm×150 mm×550 mm,每组浇筑 3 个。

1.2 纤维特性与纤维体积掺量

纤维选用武汉中鼎经济发展有限公司生产的钢丝端勾形钢纤维(SF)、单丝聚丙烯纤维(PF)和矩形纤维素植物纤维(CF)。纤维具体的材料特性如表 2 所示,其中: ρ 为纤维密度; σ_b 为抗拉强度; E 为弹性模量; l 为纤维长度; d 为纤维直径; δ 为纤维断裂伸长率。两种尺寸的试验试块采用相同的纤维体积掺量(共 10 组),如表 3 所示。

表 2 纤维材料特性
Table 2 The material properties of fibers

纤维材料	材料特性					
	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	σ_b/MPa	E/GPa	l/mm	$d/\mu\text{m}$	$\delta/\%$
SF	7.8	$\geq 1\ 000$	205	35	750	4.0
PF	0.9	455	4.69	18	30.5	21.2
CF	1.1	655	9.28	2.5	16.4	3.5

表 3 纤维体积掺量
Table 3 Volume fraction of fibers

混凝土类型	纤维体积含量/%			编号
	SF	PF	CF	
素混凝土				NC
	0.52			S-1
钢纤维混凝土	0.64			S-2
	0.71			S-3
	0.77			S-4

续表 3

混凝土类型	纤维体积含量/%			编号
	SF	PF	CF	
聚丙烯纤维混凝土		0.09		P-1
		0.11		P-2
		0.13		P-3
纤维素纤维混凝土			0.07	C-1
			0.09	C-2
			0.11	C-3

1.3 拌和工艺与试验方法

拌和过程对纤维在混凝土基体内均匀分布至关重要。为了保证纤维在混凝土基体内均匀分布,试验采用强制式搅拌机进行拌和,总拌和时间控制在 3 min。投料顺序为:先拌和粗、细骨料和水泥 60 s,然后掺入纤维后再搅拌 60 s,最后将水和外加剂投入搅拌 60 s。拌和完成后将混凝土浆倒入模具中,并在 1 m² 的振动台上震动成型,试块静置 1 d 后脱模,移至混凝土标准养护室,养护至指定龄期后进行试验。

抗压试验选用 2 000 kN YES-2000B 伺服试验机,加载速率控制在 6~7 kN/s;弯曲韧性试验选用 2 000 kN 万能试验机,采用三分点加载,在试块底面跨中横向依次粘贴 3 个长度为 5 cm 的电阻应变片,如图 1 所示。每隔 60 s 读取一次应变值,取 3 个应变的算数平均值作为试块跨中的受拉应变值,并记录所对应的弯曲荷载。试验采用恒速率控制,加载速率为 0.2 mm/min,直至试块破坏时终止试验。

同时,需要特别说明的是,文中所有试验结果,如抗压强度、抗压保持率、荷载-挠度曲线、抗弯峰值等皆为 3 个试件的平均值。

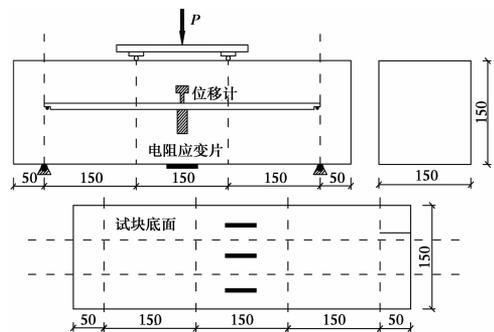


图 1 弯曲韧性试验装置简图

Fig. 1 Device diagram of flexural toughness test

2 试验结果分析

2.1 纤维对混凝土抗压强度的影响

各试块抗压强度结果见表 4、表 5。需要说明的

是,本文研究成果与文献对比前提条件为:混凝土配合比相同、纤维掺量及尺寸相近,因此,表 5 中甄选试验条件与本文最接近的文献进行对比。

表 4 抗压强度试验结果

Table 4 Test results of compressive strength

试块编号	F_{cr}/MPa	$\Delta F/\text{MPa}$	F/MPa	F_t/MPa	$\Delta F_t/\%$
NC	43.7	2.4	46.1		
S-1	50.4	5.4	55.8	46.3	83
S-2	49.8	6.6	56.4	42.6	76
S-3	53.9	9.5	63.4	45.3	71
S-4	49.1	9.0	58.1	45.5	78
P-1	43.3	5.0	48.3	25	52
P-2	46.5	3.0	49.5	22.8	46
P-3	30.3	1.9	32.2	12.6	39
C-1	49.1	4.5	53.6	29.5	55
C-2	46.7	3.6	50.3	30.2	60
C-3	47.4	2.4	49.8	29.3	59

表 5 抗压强度比较

Table 5 Comparison of compressive strength

纤维类型	体积掺量/%	抗压强度/MPa		
		本文	文献	变化/%
SF(文献[24])	0	46.1	45.7	+0.88
	0.52	55.8	50.0	+11.6
	0.64	56.4	48.6	+16.0
	0.71	64.3	47.8	+34.5
	0.77	58.1	46.3	+25.5
PF(文献[25])	0	46.1	43.8	+5.3
	0.09	48.3	44.0	+9.8
	0.11	49.5	47.8	+3.6
	0.13	32.2	48.2	-33.2
CF(文献[26])	0	46.1	41.6	+10.8
	0.07	53.6	43.5	+23.2
	0.09	50.3	45.3	+11.0
	0.11	49.8	44.6	+11.7

试验后发现,素混凝土试块(NC)表面脱落严重,基本呈“工”字形,而纤维混凝土试块表面除了有较多裂缝外并无明显的脱落现象,如图 2 所示,说明纤维对裂缝周围基体还有一定的约束作用。混凝土基体受压开裂或者破坏后如需继续承压,此时纤维的拉拽作用将是决定性的,而二次抗压强度试验则是为了验证该作用。表 4 中 F_{cr} 为立方体试块抗压初裂荷载; ΔF 为试块破坏荷载和初裂荷载的差值; F 为抗压强度(破坏荷载); F_t 为试块二次抗压强

度; ΔF_t 为抗压强度保持率。试验结果取值均按照规范要求。

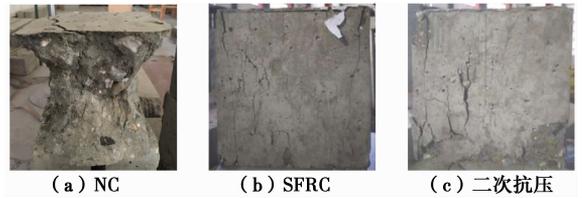


图 2 破坏形态

Fig. 2 The destroyed mode of concrete

可以看出:

1)除 P-3 试块外,纤维混凝土试块的初裂荷载和抗压强度均较 NC 有明显提高,提高幅度在 3%~23%和 4.8%~37.5%之间。P-3 初裂荷载和抗压强度低于 P-1、P-2 及 NC。从表 6 的结果可以看出,P-3 抗压强度试验取值在符合规范相关要求下并不存在数据突变情况,从而可判断,其强度较低的原因在于纤维自身材性及搅拌工艺。分析其原因为 PF 为一种柔性纤维,其长径比远大于 SF 和 CF,自然状态下处于结团状态,且亲水加剧结团现象。当 PF 体积掺量为 0.13%时,由于上述原因,PF 在混凝土内部较难分散均匀,容易产生纤维沉底(图 3(a)所示)或纤维在混凝土基体内结团的缺陷,后者会严重影响混凝土密实度,随着水分蒸发,混凝土内部产生“空洞”(图 3(b)所示),极大地影响了混凝土的抗压强度。建议改进措施:①加入 PF 前应先进行手工分散,在搅拌机运行时缓慢倒入;②PF 倒入搅拌机后应干拌不少于 3 min,使其在干粉料中均匀分散;③用水量应分两次缓慢倒入,每次加水时间控制在 $30 \pm 1 \text{ s}$ 。

2)对于钢纤维试块(SFRC),抗压强度和破坏-初裂荷载差值 Δp 都随着钢纤维体积掺量的增加而呈“先增后减”的趋势。其原因为:当钢纤维体积掺量在 0.52%~0.71%时,随着钢纤维的数量增多,混凝土基体内纤维形成有效“承载网络”的概率也增大,这些网络结构对基体受压时内部裂缝的产生和发展起到了抑制作用;当纤维总掺量过大时,混凝土基体内单位体积中的纤维过多,导致纤维之间互相干扰甚至结团,影响基体内的密实性和粘结性,从而使混凝土抗压强度有所降低。

3)对于聚丙烯纤维混凝土(PFRC)和纤维素纤维混凝土试块(CFRC),抗压强度和破坏-初裂荷载差值都随着纤维体积掺量的增加而呈递减趋势(除了 P-2 试块抗压强度比 P-1 试块稍稍增大外)。

4)纤维混凝土试块的破坏-初裂荷载差值 Δf 都大于 NC(除 P-3 外),说明在试块产生裂缝后,纤

维对其发展起到了较明显的抑制作用。

5)在混凝土表面无明显脱落的情况下,SFRC试块保持承载能力最强,最大可达试块破坏强度的83%,纤维素纤维次之,聚丙烯纤维最弱。反之,NC破坏之后完全失去了承载能力;单纤维增强基体抗压强度的最佳体积掺量为: $V_s = 0.71\%$ 、 $V_p = 0.11\%$ 和 $V_c = 0.07\%$ 。

6)通过与本文试验条件最为接近的文献对比可知,在纤维类型、尺寸、掺量相同时,本文的试验结果大幅优于文献。

表 6 P-3 抗压强度结果

Table 6 Test results of compressive strength of P-3

试验值/MPa	均值/MPa	试验值与均值误差/%	允许误差/%
36.8,30.8,29.1	32.2	14.3,4.3,9.6	15



(a) 纤维沉底 (b) 纤维结团

图 3 混凝土缺陷

Fig. 3 Concrete defects

2.2 纤维对荷载-挠度曲线的影响

图 4 为各试块的弯曲破坏形态,图 5 给出了 3 种纤维混凝土在不同纤维体积掺量下的荷载-挠度曲线。



图 4 弯曲破坏形态

Fig. 4 The destroyed mode of bending test

可以看出:纤维混凝土试块较 NC 具有更强的变形能力。NC 在达到抗弯荷载峰值后瞬间失去承载能力,呈现无征兆的脆性破坏。PFRC 和 CFRC 在达到峰值后虽也有明显的突变过程,但突变后依然存在一定的持载能力,此时,纤维不仅起到了对裂缝发展的抑制作用,而且还可起到传力桥的作用,将荷载传递给未开裂的混凝土基体。

从图 5(a)、(b)中可看出,S-1 抗弯峰值明显高于 NC 和其他 SFRC 试块。主要原因与抗压强度分析相似:当 SF 体积掺量为 0.52%时,混凝土基体内

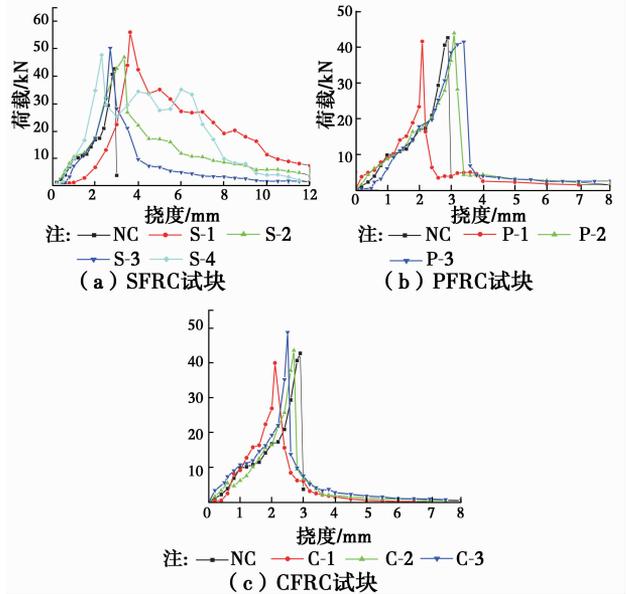


图 5 纤维体积分数不同时荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection curves of concrete with different volume rate of fibers

的纤维量较少,互相之间不易形成干扰,且纤维结团的概率较小。反之,SF 在基体内更易形成有效“承载网络”,这些“网络”结构可以在一定程度上抵消混凝土拌和等问题造成的负面影响;P-2 和 P-3 试块与 P-1 试块曲线较明显不同,但抗弯峰值相近。原因为:PF 作为柔性纤维,刚度远小于 SF,虽也可抑制裂缝的产生和发展,但整体上对基体承载力提高有限。同时,当 PF 掺量逐渐增大时,可提高混凝土基体的变形能力,使掺量较大的 PFRC 试块抗弯峰值对应的跨中挠度较大。

通过比较纤维混凝土荷载-挠度曲线与横坐标所包围的面积可估算出:在试块弹性变形阶段,曲线面积大小顺序依次为 SFRC、PFRC、CFRC,说明 SFRC 试块具有最优的弯曲变形能力,PFRC 试块在一定程度上优于 CFRC 试块。原因为:混凝土梁试块底部先开裂后,其弯拉应力由纤维承担,SF 极高的抗拉强度使其具有最强的抑制裂缝发展能力,而 PF 的长径比远大于 CF,因此,在抑制裂缝发展中有更长的作用距离。在 SFRC 中,S-1 和 S-4 试块具有相对于其他试块更优异的变形能力;在 PFRC 中,P-2 和 P-3 试块的变形能力优于 P-1;在 CFRC 中,不同纤维体积掺量的试块变形能力虽在一定程度上优于 NC,但三者相互之间差异较小。由此可见,纤维素纤维的掺入可以增强混凝土的变形能力,只是当混凝土中聚丙烯纤维或纤维素纤维体积掺量在 0.07%~0.11% 范围内时,其变形能力差距较小。

2.3 纤维对弯曲韧性指数的影响

表 7 给出了试块表面出现第一条明显裂缝时的挠度 δ 、初裂荷载 f_{cr} 、峰值荷载(抗弯强度) f_t 和跨中裂缝最大宽度 D (精确至 0.1 mm)。表 8 列出了文献中具有代表性的成果与本文结果的对比。由表 7、表 8 中数据可以看出:1)纤维混凝土的跨中裂缝宽度都远大于 NC,说明纤维混凝土试块相较 NC 试块具有优异的弯曲变形能力,这也再一次验证了上文的分析结果。2)纤维混凝土试块的初裂挠度都大于 NC 试块初裂挠度(除 S-1 和 C-3 外),说明在混凝土近似弹性变形阶段虽主要由基体承载,但纤维依然会起到抑制裂缝产生和发展的作用。3)纤维混凝土试块(S-1 和 C-3)的初裂荷载小于 NC。原因为:在纤维特定体积掺量下,混凝土凝固以及硬化过程中,纤维由于自身重力作用向下沉降,导致基体内出现“薄弱区域”,该区域中可能存在纤维分布不均匀、无纤维分布甚至纤维结团现象。在试块承受荷载作用并产生微小裂缝时,由于“非薄弱区域”中的纤维网会抑制裂缝的发展,不可避免的要进行荷载传递,致使“薄弱区域”内形成应力集中,从而使纤维混凝土的初裂强度大幅降低。4)本文得到的抗弯峰值及首条可见裂缝所对应挠度总体上优于文献结果。

表 7 抗弯承载力及裂缝宽度

Table 7 Flexural capacity and crack width of the tset

试块	δ /mm	f_{cr} /MPa	f_t /MPa	D /mm
NC	1.7	2.1	5.7	6.5
S-1	2.3	1.6	7.5	36.4
S-2	2.4	3.2	6.3	30.2
S-3	2.1	2.6	6.7	26.1
S-4	2.2	5.5	6.4	35.9
P-1	1.8	2.5	5.5	10.5
P-2	1.9	2.2	5.9	13.6
P-3	2.1	2.5	5.5	23.1
C-1	1.7	2.6	5.3	12.2
C-2	1.8	2.1	5.8	14.8
C-3	1.7	2.0	6.5	13.1

表 8 抗弯承载力对比

Table 8 Comparison of flexural strength

纤维类型	纤维体 积掺 量/%	δ /mm		f_t /MPa	
		本文	文献	本文	文献
SF	0.00	1.7	0.86(文献[16])	5.7	4.65(文献[16])
	0.52	2.3	1.2(文献[16])	7.5	5.04(文献[16])
	0.64	2.4	1.42(文献[1])	6.3	5.63(文献[1])
	0.71	2.1	1.85(文献[1])	6.7	5.27(文献[1])
	0.77	2.2	1.9(文献[1])	6.4	5.36(文献[1])

续表 8

纤维类型	纤维体 积掺 量/%	δ /mm		f_t /MPa	
		本文	文献	本文	文献
PF	0.09	1.8	0.8	5.5	6.66
(文献[14])	0.11	1.9	0.66	5.9	6.26
	0.13	2.1	1.2	5.5	6.21
	0.07	1.7	1.14(文献[1])	5.3	4.62(文献[1])
CF	0.09	1.8	0.56	5.8	5.23(文献[15])
	0.11	1.7	0.35	6.5	4.15(文献[15])

弯曲韧性指数的计算以 S-2($V_s=0.64\%$)为例,如图 6 所示,以 O 为原点,按 1.0、1.5、2.5、3.5 初裂挠度 δ 的倍数,在横轴上确定 $A \sim H$ 各点, P 为荷载峰值点。通过积分算出 OAB 、 $OPCD$ 、 $OPEF$ 和 $OPGH$ 的面积,分别记作 Ω_0 、 $\Omega_{1.5\delta}$ 、 $\Omega_{2.5\delta}$ 、 $\Omega_{3.5\delta}$,后三者与 Ω_0 的比值即为每个试块的弯曲韧性指数 I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 。计算结果如表 9 所示(精确至 0.01)。

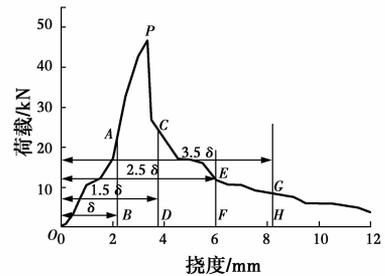


图 6 S-2 面积划分图

Fig. 6 Area classification figure of S-2

表 9 弯曲韧性指数计算结果

Table 9 Calculation results of flexural toughness index

编号	I_5	I_{10}	I_{20}	编号	I_5	I_{10}	I_{20}
NC	1.85	1.85	1.85	P-2	2.62	3.66	4.57
S-1	4.85	6.35	8.71	P-3	3.4	4.14	5.02
S-2	3.76	4.75	6.32	C-1	2.67	3.33	3.58
S-3	3.31	4.36	6.23	C-2	2.86	3.61	3.98
S-4	2.26	4.26	6.59	C-3	2.42	3.21	3.52
P-1	2.53	3.28	3.93				

由表 9 可以得出:

1)SFRC 试块的弯曲韧性指数 I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 相较 NC 试块最大提高 2.6、4.5、5.8 倍;PFRC 试块相较 NC 试块最大提高 1.8、2.2、2.7 倍;CFRC 试块相较 NC 试块最大提高 1.5、2.2 倍。

2)在试块达到初裂或弯曲承载力峰值后,SFRC 试块不同阶段间的弯曲韧性指数具有最明显的上升趋势,PFRC 试块上升较平缓,CFRC 试块变化幅度很小,说明 SFRC 试块具有最显著的变形能力,

PFRC 试块次之。这也验证了上文中通过估算面积而得出的纤维混凝土的变形能力。

3) 相同纤维体积掺量下, PFRC 试块相较 CFRC 试块提升了一 11.5%、-9.1%、-1.3% (纤维体积掺量为 0.9%) 和 8.3%、14.1%、29.8% (纤维体积掺量为 1.1%)。

4) 随着纤维体积掺量的增加, SFRC 试块韧性指数大体呈“先减再增”趋势, PFRC 试块呈递增趋势, CFRC 试块呈“先增后减”趋势。

5) 纤维增强混凝土弯曲韧性指数的最佳体积掺量为 $V_s=0.52\%$ 、 $V_p=0.13\%$ 、 $V_c=0.09\%$ 。

2.4 纤维对 Nemkumar 韧性指标的影响

Nemkumar 韧性指标法是以峰值荷载为界限, 把荷载-挠度曲线面积在峰值荷载处分为峰前 (T_{pre}) 和峰后 ($T_{pwt,m}$), 以特定的挠度 L/m 为变量来考虑纤维混凝土在变形中所消耗的能量。其计算方法示意图如图 7 所示。

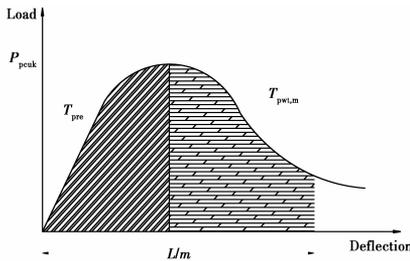


图 7 韧性指标计算方法示意图

Fig. 7 Sketch map of calculation method for flexural toughness index

基于 Nemkumar 法的韧性指标 PCS_m 的定义为

$$PCS_m = \frac{T_{pwt,m}L}{(\frac{L}{m} - \delta)bh^2}, \quad (\frac{L}{m} > \delta) \quad (1)$$

式中: $T_{pwt,m}$ 为峰值荷载后荷载-挠度曲线所包围面积; L 为梁的跨度 (本文为 450 mm); δ 为峰值荷载对应的挠度; b, h 分别为梁截面的宽和高; L/m 为梁的挠度, 其中 m 为定值 (本文取 100)。

由表 10 可以看出: 1) 当挠度达到 $L/100$ (4.5 mm) 时, SFRC、PFRC 和 CFRC 梁试件的韧性指标 PCS_m 最大分别是 NC 的 26.6、12.2、7.4 倍。总体来说, 纤维增强混凝土基体弯曲韧性的顺序为 SF > PF > CF, 与 CECS:2009 计算结果吻合。

2) 随着纤维掺量的增加, SFRC 和 CFRC 试块的韧性变化趋势与 CECS:2009 结果吻合, 但 PFRC 试块的韧性变化趋势呈“先减后增”, 与 CECS:2009 结果有所出入。

3) 相同纤维体积掺量下, PFRC 韧性相较 CFRC 提高了 74.6% ($V=0.09\%$) 和 38.8% ($V=0.11\%$)。

4) 基于 Nemkumar 韧性指标 PCS_m 的计算结果显示, 纤维提升混凝土弯曲韧性的最佳掺量为 $V_s=0.52\%$ 、 $V_p=0.09\%$ 、 $V_c=0.09\%$, 与 CECS:2009 计算结果有所出入 (针对聚丙烯纤维)。

表 10 PCS_m 计算结果

Table 10 Flexural toughness experimental results defined by Nemkumar

编号	PCS_m	编号	PCS_m
NC	0.27	P-2	1.85
S-1	7.18	P-3	2.79
S-2	4.29	C-1	1.66
S-3	4.17	C-2	2.01
S-4	5.87	C-3	1.89
P-1	3.30		

2.5 纤维对韧度比的影响

当梁试块裂缝发展到一定宽度时, 电阻应变片会被拉断, 从而失效。因此, 本文只绘出应变片拉断前的应力-应变曲线 (图 8), 并据此计算了各试块的韧度比 R_x (各纤维混凝土试块应力-应变曲线面积与 NC 之比) 及抗弯弹性模量 E_f (式 (2)、式 (3)), 分别精确至 0.1、1 MPa, 计算结果如表 11 所示。

$$\sigma_f = \frac{Pl}{bh^2} \quad (2)$$

式中: P 为弯曲荷载, N; l 为跨度, $l=3h$, mm; b, h 分别表示试块截面宽度和高度, mm。

$$E_f = \frac{\sigma_{0.5}}{\epsilon_{0.5}} \quad (3)$$

式中: $\sigma_{0.5}$ 为 50% 的破坏应力, MPa; $\epsilon_{0.5}$ 为 $\sigma_{0.5}$ 所对应的应变值。

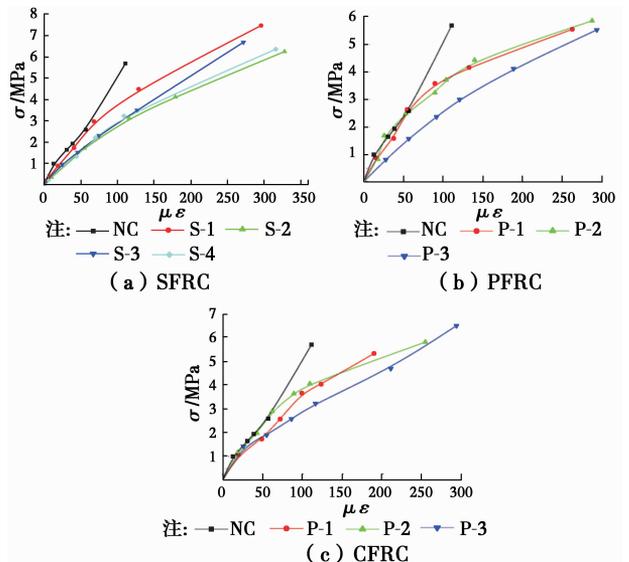


图 8 纤维混凝土应力-应变曲线

Fig. 8 stress-strain curves of fiber reinforced concrete

表 11 抗弯弹性模量和韧度比计算结果
Table 11 Calculation results of flexural elastic modulus and the ratio of toughness

编号	E_t/MPa	R_x
NC	45 968	1.0
S-1	27 391	4.3
S-2	29 385	4.2
S-3	35 714	3.5
S-4	31 372	4.0
P-1	37 855	3.4
P-2	36 420	3.6
P-3	39 220	3.1
C-1	37 857	1.9
C-2	35 667	3.2
C-3	33 862	3.1

由图 8 和表 11 可以看出:1)对比韧度比可知,纤维增强顺序为 SF、PF 和 CF,与上文通过荷载-位移曲线面积得出的结论相同;2)相同纤维体积掺量下,SFRC 试块和 PFRC 试块的韧度比均大于 CFRC 试块;3)随着纤维体积掺量的增加,SFRC 试块的韧度呈先减后增趋势,PFRC 试块呈先增后减趋势,CFRC 试块呈先增后减趋势;4)对于同一纤维混凝土,弹性模量越小,其韧性和变形能力越好,韧度比越高,表 8 中的抗弯弹性模量和韧度比的计算结果基本符合这一规律;5)纤维增强混凝土基体弯曲韧度最佳体积掺量为 $V_s=0.52\%$ 、 $V_p=0.11\%$ 、 $V_c=0.09\%$ 。

2.6 纤维增强混凝土弯曲韧性机理分析

纤维混凝土弯曲韧性指标的计算结果显示,3 种纤维增强混凝土增强弯曲韧性的强弱顺序为 SF、PF 和 CF,且随着纤维体积掺量的增加,混凝土的弯曲韧性分别呈先减再增、递增和先增后减的趋势。原因为:

1)SF 属于刚性纤维,是 3 种纤维中抗拉强度最高、弹性模量和长径比最小的,当宏观可见裂缝发展时,纤维起主要承载作用。纤维掺量在 $0.52\% \sim 0.71\%$ 时,随着纤维量的增加,纤维之间相互干扰的概率也随之增大,导致 SFRC 弯曲韧性有所下降;而当纤维增加至 0.77% 时,纤维的数量优势虽不能抵消纤维间的干扰,但可以使钢纤维“承载网络”形成的数量有所增加,该网络可起到应力重新分配的作用,此时,混凝土的弯曲韧性便会有小幅度增长。

2)PF 的长径比是 3 种纤维中最大的,均匀分布于混凝土内部的单丝聚丙烯纤维间不易发生相互干

扰,且随着聚丙烯纤维掺量的增加,混凝土内部纤维形成有效“承载网络”的概率也增加。

3)CF 在混凝土内部同样可形成一定数量的承载网络,进而提高混凝土的弯曲韧性。只是由于 CF 是一种吸水性良好的天然植物纤维,数量过多时会使混凝土内部水份分布不均,影响其自身的密实性。因此,随着 CF 掺量的增加,CFRC 的弯曲韧性会有所下降。

4)此外,纤维分布不均匀或形成纤维结团会使混凝土内部形成“薄弱区域”,该区域的存在会较大程度影响混凝土的弯曲韧性。

3 试验结果变异性分析

变异性分析包括标准差 δ (式(4),精确至 0.01)和变异系数 c_v (式(5),精确至 0.001)的计算,计算结果见表 12 和表 13。由于应力-应变曲线只测至应力峰值点,基于此计算得到的韧度比 R_x 和抗弯弹性模量 E_t 仅具对比价值。因此,变异性分析并不包括这两个指标。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (4)$$

$$c_v = \frac{\delta}{\mu} \quad (5)$$

式中: x_i 为各试块试验值; N 为试验值个数(共 3 个); μ 为平均值(0.1 MPa)。

可以看出:

1)同等纤维掺量下,混凝土的抗压强度变异系数明显小于弯曲韧性变异系数,说明纤维增强混凝土抗压强度稳定性优于弯曲韧性。

2)抗压初裂强度和二次抗压强度保持率变异系数大于抗压破坏强度,相对增量在 $0.01 \sim 0.05$ 范围,原因为:①由于无法观测混凝土基体内部的初裂缝,本文中初裂荷载记为肉眼可看到的第一条裂缝,因此,导致确定初裂荷载时有一定的人为性,容易产生误差;②纤维掺量相同的条件下,其在混凝土基体内的部分情况无法一致,导致受压性能产生偏差;③二次抗压前试块已有很大程度的破坏,此时完全由纤维的拉拽作用承压,而此时纤维由于基体已被破坏而重新分布,且分布情况极不均匀。

3)随着纤维掺量的增加,混凝土抗压及抗弯变异系数基本呈递增趋势,原因为上文提到的纤维数量过多时易产生相互间的干扰,导致混凝土力学性能的不稳定性。

4)弯曲破坏强度的变异系数小于初裂强度,原因也是由于确定初裂荷载时的人为误差。PFRC 及 CFRC 的抗压强度和弯曲韧性指数变异系数大于

SFRC,原因为 SF 作为刚性和长径比较小的纤维相比较柔性和长径比很大的纤维 PF 和 CF,更容易均匀分布于混凝土基体内。

5)弯曲韧性指数变异系数大于 PCS_m ,且从 $I_5 \sim I_{10}$ 呈递增规律,主要原因是计算时过度依赖初裂荷

载及挠度。

6) R_x 和 E_f 计算结果反映出纤维增强混凝土弯曲韧性与 CECS13:2009 基本相同,但变异系数明显低于后者,说明基于应力-应变曲线评价纤维混凝土韧性指标的方法更加精确而稳定。

表 12 抗压强度变异系数计算结果

Table 12 Calculation result of coefficient variation of compressive strength

试块	F_{cr}/MPa				F/MPa				ΔF_f			
	x_i	μ	δ	c_v	x_i	μ	δ	c_v	$x_i/\%$	$\mu/\%$	δ	c_v
NC	42.63				45.19							
	44.08	43.76	0.82	0.019	46.44	46.11	0.66	0.014				
	44.56				46.70							
S-1	49.04				53.47				88			
	51.45	50.39	1.01	0.02	56.15	55.75	1.73	0.031	81	83	0.04	0.048
	50.68				57.64				80			
S-2	51.94				57.68				81			
	49.58	49.79	1.68	0.034	55.59	56.43	0.9	0.016	77	76.33	0.04	0.052
	47.85				56.04				71			
S-3	49.45				60.22				77			
	55.76	53.85	3.12	0.058	62.32	63.38	3.11	0.049	69	71	0.05	0.070
	56.35				67.61				67			
S-4	50.92				58.12				82			
	46.35	49.07	1.96	0.040	58.94	58.15	0.63	0.011	75	78	0.03	0.038
	49.93				57.39				77			
P-1	45.38				48.87				61			
	49.17	45.17	3.35	0.074	52.85	48.34	3.91	0.081	49	52	0.07	0.135
	40.97				43.31				46			
P-2	46.05				49.44				55			
	48.82	46.5	1.74	0.037	51.74	49.53	1.77	0.036	39	46	0.07	0.152
	44.63				47.41				44			
P-3	34.2				36.8				45			
	28.09	30.31	2.76	0.091	30.78	32.2	3.33	0.103	32	39.33	0.05	0.127
	28.64				29.03				41			
C-1	49.61				52.72				61			
	50.83	49.14	1.6	0.033	54.96	53.57	0.99	0.018	59	55	0.07	0.128
	46.99				53.03				45			
C-2	50.54				53.92				68			
	45.47	46.71	2.77	0.059	48.66	50.26	2.6	0.052	49	60	0.08	0.133
	44.11				48.19				63			
C-3	48.83				51.36				66			
	45.55	47.4	1.37	0.029	48.67	49.81	1.14	0.023	55	59	0.05	0.085
	47.83				49.4				56			

表 13 弯曲韧性变异系数计算结果
Table 13 Calculation result of coefficient variation of flexural toughness

试块	f_{cr}/MPa				f_t/MPa				I_5				I_{10}				I_{20}				PCS_m			
	x_i	μ	δ	c_v	x_i	μ	δ	c_v	x_i	μ	δ	c_v	x_i	μ	δ	c_v	x_i	μ	δ	c_v	x_i	μ	δ	c_v
NC	1.9				5.5				2.01				2.01				2.01				0.25			
	2.35	2.1	0.17	0.081	6.2	5.7	0.36	0.063	1.88	1.85	0.14	0.078	1.88	1.85	0.14	0.078	1.88	1.85	0.14	0.078	0.29	0.27	0.01	0.037
	2.15				5.4				1.67				1.67				1.67				0.28			
S-1	1.75				6.7				5.42				7.46				9.59				7.41			
	1.35	1.6	0.18	0.113	8.4	7.5	0.7	0.093	4.18	4.85	0.51	0.105	5.62	6.35	0.79	0.124	7.32	8.71	0.99	0.114	7.48	7.18	0.37	0.052
	1.7				7.4				4.87				5.99				9.23				6.67			
S-2	2.7				6.7				4.22				5.57				7.21				4.42			
	3.4	3.2	0.36	0.112	6.7	6.3	0.57	0.090	3.43	3.76	0.34	0.091	4.24	4.75	0.58	0.122	5.31	6.32	0.79	0.125	4.55	4.29	0.27	0.063
	3.5				5.5				3.64				4.46				6.43				3.91			
S-3	2.4				5.6				2.83				5.49				5.05				4.22			
	3.28	2.6	0.49	0.188	7.6	6.7	0.83	0.124	3.88	3.31	0.44	0.133	3.39	4.36	0.87	0.199	6.39	6.23	0.91	0.146	4.51	4.17	0.3	0.072
	2.12				6.9				3.23				4.19				7.26				3.77			
S-4	6.4				5.7				2.56				4.97				7.83				6.23			
	4.18	5.5	0.95	0.173	7.2	6.4	0.62	0.097	2.14	2.26	0.21	0.093	4.19	4.26	0.55	0.129	6.28	6.59	0.91	0.138	6.02	5.84	0.42	0.072
	5.92				6.3				2.09				3.64				5.66				5.26			
P-1	2.2				4.9				2.86				3.88				3.48				3.61			
	3.2	2.5	0.5	0.2	6.5	5.5	0.71	0.129	2.29	2.53	0.24	0.095	2.98	3.28	0.43	0.131	5.06	3.93	0.81	0.206	2.85	3.3	0.32	0.097
	2.1				5.1				2.45				2.97				3.26				3.45			
P-2	2.8				6.6				2.93				3.09				3.39				1.92			
	2.1	2.2	0.45	0.205	6.5	5.9	0.92	0.156	2.12	2.62	0.36	0.137	3.39	3.66	0.61	0.167	5.95	4.57	1.06	0.232	2.01	1.85	0.16	0.086
	1.7				4.6				2.82				4.51				4.38				1.61			
P-3	3				6.3				4.11				3.12				3.72				2.53			
	2.8	2.5	0.57	0.228	6.1	5.5	0.99	0.18	2.71	3.4	0.57	0.168	5.06	4.14	0.8	0.193	5.35	5.02	0.96	0.191	3.11	2.79	0.24	0.086
	1.7				4.1				3.38				4.24				5.99				2.74			
C-1	2.86				5.9				3.19				4.12				4.25				1.83			
	1.94	2.6	0.47	0.181	5.7	5.3	0.72	0.136	2.29	2.67	0.38	0.142	3.15	3.33	0.59	0.177	2.88	3.58	0.56	0.156	1.71	1.66	0.16	0.096
	3				4.3				2.53				2.73				3.62				1.45			
C-2	1.9				6.8				3.52				4.35				4.85				1.92			
	2.7	2.1	0.43	0.205	4.56	5.8	0.93	0.160	2.64	2.86	0.46	0.161	3.66	3.61	0.63	0.175	3.09	3.98	0.72	0.181	2.29	2.01	0.21	0.104
	1.7				6.07				2.43				2.82				4.01				1.81			
C-3	1.4				6.9				2.92				3.93				4.25				2.02			
	2.7	2	0.53	0.265	7.3	6.5	0.87	0.134	2.34	2.42	0.37	0.153	3.33	3.21	0.64	0.199	3.66	3.52	0.66	0.188	2.13	1.89	0.25	0.132
	1.9				5.3				2.01				2.38				2.66				1.53			

4 结论

开展了纤维混凝土静态抗压强度和抗弯韧性试验,得到以下结论:

1)SFRC、PFRC 和 CFRC 的抗压强度较 NC 平均提高 26.7%、6.1%和 11.1%,二次抗压强度保持率平均为 77.0%、45.7%和 58.0%。在本文纤维体

积掺量范围内,随着纤维掺量增加,SFRC 抗压强度和二次抗压强度保持率分别呈先增后减和先减后增趋势;PFRC 抗压强度与二次强度保持率大体呈递减趋势;CFRC 抗压强度和二次强度保持率分别呈递减和递增趋势。

2)弯曲韧性指数(I_5 、 I_{10} 和 I_{20})、Nemkumar 韧性指标 PCS_m 和韧度比 R_x 计算结果显示,随着纤维

体积掺量的增加,3种纤维混凝土的弯曲韧性变化趋势大体一致,分别呈先减后增、递增和先增后减趋势。同时,韧度比的计算结果显示,在特定体积掺量下,聚丙烯纤维和纤维素纤维混凝土的韧度接近钢纤维混凝土。

3)3种纤维增强混凝土抗压强度由强到弱的顺序为SF、CF和PF,最佳掺量分别为 $V_s=0.71\%$ 、 $V_c=0.07\%$ 和 $V_p=0.11\%$ 。纤维增强混凝土抗弯韧性的顺序为SF、PF和CF。除聚丙烯纤维的最佳掺量计算结果有所出入外,另两种纤维最佳掺量分别为 $V_s=0.52\%$ 和 $V_c=0.09\%$ 。

4)纤维掺入后,混凝土抗压强度的变异系数小于其弯曲韧性,并且,随着纤维增加,抗压强度及弯曲韧性试验结果的变异系数基本呈递增。SFRC抗压强度及弯曲韧性指标变异性小于PFRC和CFRC。同时,基于应力-应变曲线评价纤维混凝土弯曲韧性的结果与荷载-挠度曲线法基本一致,但其变异性明显小于后者。

参考文献:

- [1] 徐至钧,吴航,张亦农,等. 纤维混凝土在建筑工程中的应用[M]. 北京:中国质检出版社,2015:1-4.
XU Z J, WU H, ZHANG Y N, et al. Application of fiber reinforced concrete in construction engineering [M]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2015:1-4. (in Chinese)
- [2] 高丹盈,李晗,杨帆. 聚丙烯-钢纤维增强高强混凝土高温性能[J]. 复合材料学报, 2015,30(1):187-193.
GAO D Y, LI H, YANG F. Performance of polypropylene-steel hybrid fiber reinforced concrete after being exposed to high temperature [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 30(1):187-193. (in Chinese)
- [3] LI Y J, JIAN J. Experimental study on anti-permeability of cellulose fiber and hybrid fiber concrete [J]. Advanced Materials Research, 2012, 482/483/484:1334-1337.
- [4] 赵顺波,孙晓燕,李长永,等. 高强钢纤维混凝土弯曲韧性试验研究[J]. 建筑材料学报,2003,6(1):95-99.
ZHAO S B, SUN X Y, LI C Y, et al. Flexural toughness of steel fiber reinforced high-strength concrete [J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(1):95-99. (in Chinese)
- [5] GIACCIO G, TOBES J M, ZERBINO R. Use of small beams to obtain design parameters of fiber reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(4):297-306.
- [6] 高丹盈,赵亮平,冯虎,等. 钢纤维混凝土弯曲韧性及其评价方法[J]. 建筑材料学报,2014,17(5):783-789.
GAO D Y, ZHAO L P, FENG H, et al. Flexural toughness and its evaluation method of steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5):783-789. (in Chinese)
- [7] 王艳,赵凯月,宋战平,等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土研究进展[J]. 硅酸盐通报,2015,34(7):1885-1890.
WANG Y, ZHAO K Y, SONG Z P, et al. Research progress of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(7):1885-1890. (in Chinese)
- [8] 李燕飞,杨健辉,丁鹏,等. 混杂纤维混凝土力学性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2013(2):60-64.
LI Y F, YANG J H, DING P, et al. Study on mechanical properties of hybrid fiber reinforced concrete [J]. Fiber Reinforced Plastics/ Composites, 2013(2):60-64. (in Chinese)
- [9] 贺晶晶,师俊平,王学志. 纤维混杂效应对混凝土弯曲韧性的改善[J]. 实验力学,2017,32(1):113-122.
HE J J, SHI J P, WANG X Z. On the effect of fiber hybrid effect on the improvement of concrete flexural toughness [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1):113-122. (in Chinese)
- [10] 郭丽萍,张文潇,孙伟,等. 隧道用纤维素纤维混凝土在弯拉荷载作用下的耐久性[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016,46(3):612-618.
GUO L P, ZHANG W X, SUN W, et al. Durability of cellulose fiber reinforced concrete under bending load in tunnel engineering [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(3):612-618. (in Chinese)
- [11] 田野,元成方,赵卓. 引气纤维混凝土微观结构及抗冻性能的试验研究[J]. 硅酸盐通报,2015,34(10):2919-2924.
TIAN Y, YUAN C F, ZHAO Z. Microstructure characteristic and frost resistance performance of air entraining fiber reinforced concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(10):2919-2924. (in Chinese)
- [12] 孙家瑛. 应力作用下纤维混凝土抗渗特征研究[J]. 建筑材料学报,2012,15(4):474-477.
SUN J Y. Study on influence of external load on fiber concrete impermeability [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4):474-477. (in Chinese)
- [13] 邓宗才. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性与评价方法[J]. 复合材料学报,2016,33(6):1274-1280.
DENG Z C. Flexural toughness and characterization method of hybrid fibers reinforced ultra-high

- performance concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(6):1274-1280. (in Chinese)
- [14] 邓宗才,刘国平,杜超超,等. 新型粗聚丙烯纤维高性能混凝土弯曲韧性[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(2): 228-233.
DENG Z C, LIU G P, DU C C, et al. Flexural toughness of a new kind of macro-polyolefin fiber reinforced high performance concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(2): 228-233. (in Chinese)
- [15] 邓宗才,张鹏飞,薛会青,等. 纤维素纤维及混杂纤维混凝土的弯曲韧性[J]. *北京工业大学学报*, 2008, 34(8): 852-855, 877.
DENG Z C, ZHANG P F, XUE H Q, et al. Flexural toughness of cellulose and hybrid fiber reinforced concrete beams [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2008, 34(8): 852-855, 877. (in Chinese)
- [16] 夏冬桃,刘向坤,夏广政,等. 混杂纤维增强高性能混凝土弯曲韧性研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(6): 108-112.
XIA D T, LIU X K, XIA G Z, et al. Flexural toughness of high performance hybrid fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2013, 41(6): 108-112. (in Chinese)
- [17] MOHAMMADHOSSEINI H, ABDUL-AWAL A S M, MOHD-YATIM J B. The Impact resistance and mechanical properties of concrete reinforced with waste polypropylene carpet fibres [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 143: 147-157.
- [18] LEE J H, CHO B, CHOI E. Flexural capacity of fiber reinforced concrete with a consideration of concrete strength and fiber content [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 138: 222-231.
- [19] Test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (Using beam with third-point loading): ASTM C 1018 [S]. West Conshohocken, 1997.
- [20] Method of test for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete: JCI JSCE-SF4 [S]. Tokyo: Japan Concrete Institute, 1984: 45-51.
- [21] Test and design methods of steel fibre reinforced concrete-Bending test: RILEM TC 162-TDF [S].
- [22] 中国工程建设协会标准. 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13:2009 [S]. 北京:中国计划出版社, 2010: 54-59.
China Association for Engineering Constructure Standardization. Standard test methods for fiber reinforced concrete: CECS 13: 2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010: 54-59. (in Chinese)
- [23] NEMKUMAR B, TROTTIER J F. Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete: Some concerns and a proposition [J]. *ACI Materials Journal*, 1995, 92(1): 48-57.
- [24] 刘涛,冯伟,张智梅. 钢纤维和碳纤维增强混凝土的抗压性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2007, 37(12): 87-89.
LIU T, FENG W, ZHANG Z M. Experimental study on compression behavior of steel and carbon fiber reinforced concrete [J]. *Building Structure*, 2007, 37(12): 87-89. (in Chinese)
- [25] 张延年,董浩,刘晓阳,等. 聚丙烯纤维增强混凝土拉压比试验[J]. *沈阳工业大学学报*, 2017, 39(1): 104-108.
ZHANG Y N, DONG H, LIU X Y, et al. Experiment on tension-compression ratio of polypropylene fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2017, 39(1): 104-108. (in Chinese)
- [26] 夏辉. 纤维素纤维对混凝土力学性能及耐久性能影响研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2017, 5(5): 53-56.
XIA H. Study on the effect of cellulose fiber on the mechanical properties and durability of concrete [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2017, 5(5): 53-56. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)