

合成结构纤维对混凝土力学性能的影响

朱洪波¹, 吴凯凡¹, 李军锁², 陈国强²

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 河北建材职业技术学院, 河北 秦皇岛 050200)

摘要: 采用长度分别为 4.7、5.6 和 6.5 cm 的合成结构纤维, 均以 $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的掺量配制 C40 混凝土, 通过维勃稠度、抗压强度、方板和圆板弯曲韧性、混凝土梁和切口梁弯曲韧性等试验, 分析了其对混凝土工作性能和力学性能的作用规律与特征, 同时与素混凝土以及同体积掺量 ($40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 的钢纤维混凝土进行对比。结果显示, 合成纤维的加入降低了混凝土的流动性、抗压强度和混凝土梁的抗弯强度, 其长度越长则降低抗压强度及抗弯强度的程度越高; 合成纤维对混凝土方板或圆板的初始断裂强度影响不大, 但可明显提高断裂能, 其作用高于同体积掺量的钢纤维, 并且中等长度 (5.6 cm) 的合成纤维增加混凝土断裂能的作用最大; 合成结构纤维混凝土的应力-挠度曲线在其下降过程中呈现一个“平台段”, 虽然平台高度不及钢纤维混凝土的, 但其长度明显更长, 这是由合成结构纤维的材质特征决定的。

关键词: 纤维增强混凝土; 韧性; 合成纤维; 断裂能

中图分类号: TU528.2

文献标志码: A

fibers lead to both decreases of flowability and compressive strength, and reduced the bending strength of concrete beam, and the longer the length of synthetic fibers, the lower the compressive strength of concrete. The synthetic fibers affected little initial rupture strength of concrete square boards or circular plate. The synthetic fibers can enhance fracture energy of concrete obviously and this action is higher than the same volume content of steel fibers. The synthetic fiber with length of 5.6 cm impressed the most of fracture energy of concrete. The stress and the deflection curve of synthetic fiber reinforced concrete displayed a “platform” structure in the process of its decline. Although the platform height was less than that of the steel fiber reinforced concrete, its length was longer obviously. It is due to the material characteristics of the structure of synthetic fibers.

Key words: fiber reinforced concrete; toughness; synthetic fiber; fracture energy

Effect of Synthetic Fibers on Mechanical Proportion of Fiber Reinforced Concrete

ZHU Hongbo¹, WU Kaifan¹, LI Junsuo², CHEN Guoqiang²

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Hebei Construction Material Vocational and Technical College, Qinhuangdao 050200, China)

Abstract: The synthetic fibers, with three lengths of 4.7, 5.6 and 6.5 cm respectively and each dosage of them was $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, were used for the preparation of grade C40 concrete. Weber consistency, compressive strength and the toughness of concrete samples, including square boards, circular plates, beams and coped beams, were tested to analyses the effect of synthetic fibers on the mechanical proportion of fiber reinforced concrete, comparing with that of concrete with the equal volume ($40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) of steel fibers. The results indicated that the addition of synthetic

掺入混凝土中的纤维按照其用途可分为抗裂纤维和结构(增强)纤维 2 类, 其中结构纤维可提高混凝土的延展性、抗弯强度、韧性以及抗磨损性等^[1-5], 能够部分甚至全部替代钢筋用于道路、机场等工程, 实际应用中主要以钢纤维为主^[6], 而有机合成纤维多作为抗裂纤维使用^[7-9]。研究表明, 结构纤维的材质、外观^[10]、掺量以及方向分布^[11-13]等均会对纤维增强混凝土(FRC)的性能产生影响, 在混杂纤维组合中, 钢纤维和聚酯纤维的组合可更好地减少塑性收缩裂缝^[14]; 碳-钢纤维由于有相似的弹性模量和协同交互作用, 可有效地提高混凝土强度和弯曲韧性^[15]; 并且适当的混杂纤维组合对断裂韧性的影响要好于单一的纤维掺杂^[16]。当纤维掺量低时($w=2\%$, w 为质量分数), 混凝土的抗压强度不会明显改变, 但即使掺量非常低($w<0.5\%$), 也可以改善延展性和抑制裂缝的增大^[17]; 而纤维掺量变大时, 会导致混凝土的

收稿日期: 2016-04-22

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0701003-03); “十二五”国家科技支撑计划(2014BAL03B02); 河北省科技(重点)项目(16273805D)

第一作者: 朱洪波(1965—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为水泥混凝土材料. E-mail: 08013@tongji.edu.cn

和易性降低^[18]. 另外,压实和浇筑方法很可能会影响纤维的位置和分布^[8,19-20],对纤维的增强效果产生明显的作用;较长的钢纤维更容易垂直于荷载方向分布,从而更有效地提高弯曲强度^[21],而纤维长径比的不同也是影响混凝土性能和行为的重要因素^[22].

合成结构纤维只是最近几年才在发达国家得到应用并刚刚引入我国^[23],相关研究资料较少,其与钢纤维材质的不同决定了其增韧效果和作用规律也存在一定差异. 本文采用不同长度的这种纤维与钢纤维配制混凝土,并与素混凝土进行了对比试验和分析,以期为其应用提供一定的技术参考资料.

1 试验

1.1 原材料

水泥(C,52.5P, II),上海海螺水泥(集团)有限公司提供;粉煤灰(FA, II 级),来自上海宝钢自备电

厂;聚羧酸减水剂(Ad,固体质量分数为 25%),江苏苏博特新材料有限公司生产;粗骨料(石子),5~35 mm 连续级配;细骨料(砂),细度模数 2.5;合成纤维(SyF),亿枰信(上海)合成纤维科技有限公司提供(马来西亚公司生产),密度 $0.92 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,熔点 $150 \sim 170^\circ\text{C}$,燃点 450°C ,抗拉强度 $550 \sim 640 \text{ MPa}$,3 种长度分别为 4.7、5.6 和 6.5 cm;钢纤维(StF),上海盾坚钢纤维厂提供,DJ-07560 冷拔型,长径比为 80,抗拉强度大于 $1\,100 \text{ MPa}$. 合成纤维与钢纤维的实物如图 1,图 1a,1b 分别为切割纤维混凝土试样后露出的 2 种纤维的断面放大(150 倍)图. 图中 Φ 为纤维断面近似直径, L 为纤维断面长度.

从图 1a,1b 可看出,钢纤维的断面接近圆形,直径约 0.9 mm ,而合成纤维断面近似于边长分别为 0.5 mm , 1.5 mm 的长方形. 图 1c 显示钢纤维的两端有弯折,而合成纤维为短切得到的直线型,表面呈波纹状.

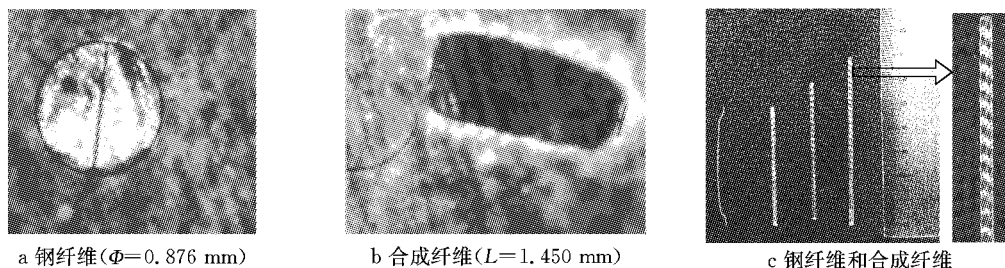


图 1 纤维在水泥石中的断面及其外观形貌

Fig.1 The cross section of fiber in harden cement and the appearance of fiber

1.2 试验方法

3 种长度分别为 4.7 cm、5.6 cm 和 6.5 cm 的合成纤维在混凝土中的掺量均为 $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,根据合成纤维的密度($0.92 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)约为钢纤维密度($7.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)的 $1/8$,换算成同体积掺量的钢纤维掺量为 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,每样各成型 6 块边长为 150 mm 的立方体试块用于测试 7 d 和 28 d 的抗压强度;每样分别成型 8 条长、宽、高分别为 $550, 150, 150 \text{ mm}$ 的混凝土小梁(其中 4 条切口,4 条不切口)用于测量弯曲韧性;每样分别成型 3 条长、宽、高分别为 $300, 150, 150 \text{ mm}$ 的混凝土梁,分别用来测量弹性模量;

方板韧性测试样长、宽、高分别为 $600, 600, 100 \text{ mm}$,每样成型 4 块;圆板韧性测试样横截面直径、高分别为 $800, 75 \text{ mm}$,每样成型 3 块.

试样成型 1 d 之后拆模,将立方体试块和混凝土小梁放到温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 95% 的标准养护室中养护. 混凝土方板和圆板试样拆模后,放置在地下室内(温度波动范围 $18 \sim 20^\circ\text{C}$)自然洒水养护,前 7 d 每天上、下午各浇水 1 次.

C40(素)混凝土配合比以及维勃稠度、抗压强度测试结果如表 1.

表 1 纤维混凝土的配合比、维勃稠度及抗压强度

Tab.1 Mixtures, Weber consistency and compressive strength of fiber reinforced concrete

代号	配合比/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$								维勃稠度/s	抗压强度/MPa	
	水泥	粉煤灰	砂	石	水	减水剂	合成纤维	钢纤维		7 d	28 d
1	370	70	655	1 152	165	3	0	0	13.2	33.21	45.28
2	370	70	655	1 152	165	3	0	40	21.5	28.68	40.69
3	370	70	655	1 152	165	3	5(4.7cm)	0	25.0	28.03	39.72
4	370	70	655	1 152	165	3	5(5.6cm)	0	29.5	27.40	38.46
5	370	70	655	1 152	165	3	5(6.5cm)	0	37.7	26.58	35.44

1.3 试验装置

采用无锡市中科建材仪器有限公司产的 SYE-2000 型压力试验机测定混凝土抗压强度. 采用澳大利亚 TSE Pty 公司生产的混凝土圆板专用加载试验机(如图 2a)测量圆板弯曲韧性, 其仪器参数符合

ASTM C-1550 的规定, 加载速率 $(4.0 \pm 0.5) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. 采用 MTS 工业系统(中国)有限公司生产的 SANS-SHT5605 微机控制电液伺服万能试验机分别测量混凝土方板、梁、切口梁的弯曲韧性及弹性模量.

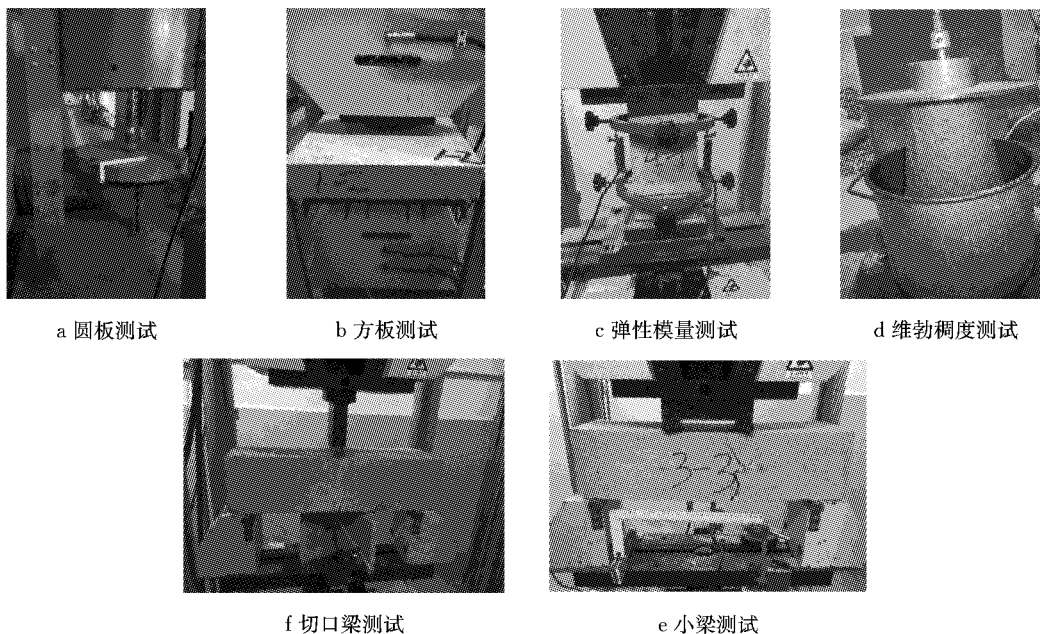


图 2 测试装置

Fig.2 Test apparatus

混凝土梁、切口梁、圆板及方板的弯曲韧性测试参照《纤维混凝土试验方法标准》(CECS13—2009)进行, 测试龄期均为 28 d. 其中, 混凝土梁和切口梁分别采用四点和三点弯曲试验. 圆板由均匀分布在直径为 700 mm 的圆周的 3 点支撑, 通过 1 个椭圆头从其中心位置加载; 方板由边长为 400 mm 的正方形钢框支撑, 通过一个直径为 100 mm 的圆台垫块从其中心位置加载.

2 结果与分析

2.1 稠度及抗压强度

混凝土维勃稠度结果见表 1. 从表 1 可以看出, 素混凝土的稠度值最低, 钢纤维混凝土的次之, 合成纤维进一步增加了稠度, 并且随着合成纤维长度的增大, 稠度增加更明显. 这是由于纤维的加入会占用部分水泥浆体对其进行包裹, 并且阻碍水泥浆体的流动^[18]. 有研究^[23]建议, 为了保持纤维增强混凝土的工作性, 拌合物中应保持足够的浆体量以使纤维更好地分布. 因此, 混凝土纤维特别是合成结构纤维的产品说明书中一般会提示应比普通混凝土略提高

减水剂的用量以抵消纤维对流动性的降低作用.

混凝土抗压强度测试结果见表 1. 从表 1 可以看出, 素混凝土的 7 d 及 28 d 的抗压强度均最高, 纤维的加入则分别降低了 20% 左右的 7 d 强度和 10%~20% 的 28 d 强度, 钢纤维降低强度的作用低于合成纤维, 而合成纤维的长度增加会进一步降低强度, 只是其降低 7 d 强度的幅度远低于对 28 d 强度的不利影响. 由于纤维的加入增加了与混凝土基体之间的大量不良界面, 降低了混凝土的结构稳定性, 从而引起抗压强度下降; 钢纤维由于自身的硬度较高, 加上磁力振动成型时可能会诱使其同向分布, 可相对降低对混凝土强度的负面作用^[6, 24], 而合成纤维的自身硬度较低, 并且在混凝土中呈多向异性分布, 所以对强度的影响更大^[25]. 纤维长度的增加不仅会导致混凝土中的局部不良界面增大, 而且在搅拌过程中更容易团聚、形成混凝土内部的宏观结构缺陷, 因此, 长纤维对混凝土强度的降低作用更明显, 正因如此, 纤维混凝土通常会要求比普通混凝土更长的搅拌时间, 以保障纤维的充分分散; 到水泥水化较为充分的后期, 水泥石对纤维的黏结力显著增强, 界面效应逐渐减少或者完全消失, 纤维对强度的

不利作用一般会减弱^[26],所以多数纤维混凝土强度在 7 d 时降低 20% 而到 28 d 时减少到降低 10%,但最长纤维混凝土试样(5 号)的强度仍降低 20%,说明其长度的不利作用较为突出。

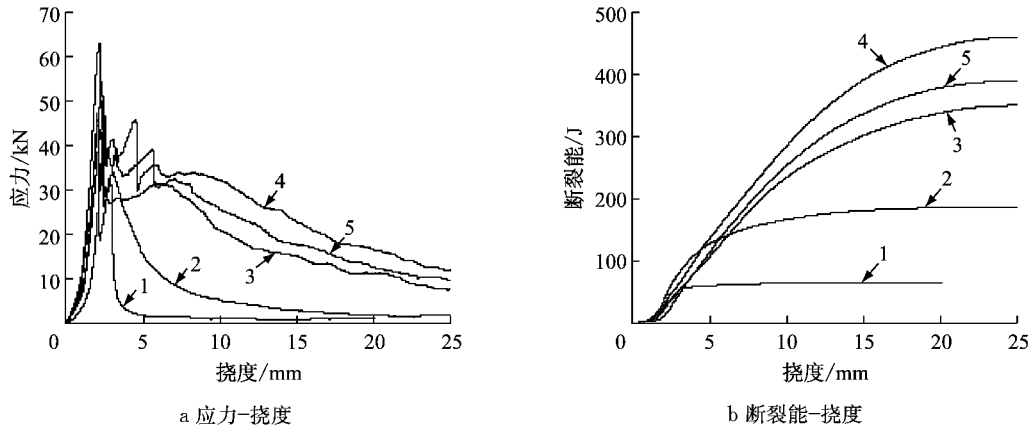


图 3 方板的应力-挠度及断裂能-挠度曲线

Fig.3 Curves of loads-deflection and energy-deflection of square slabs

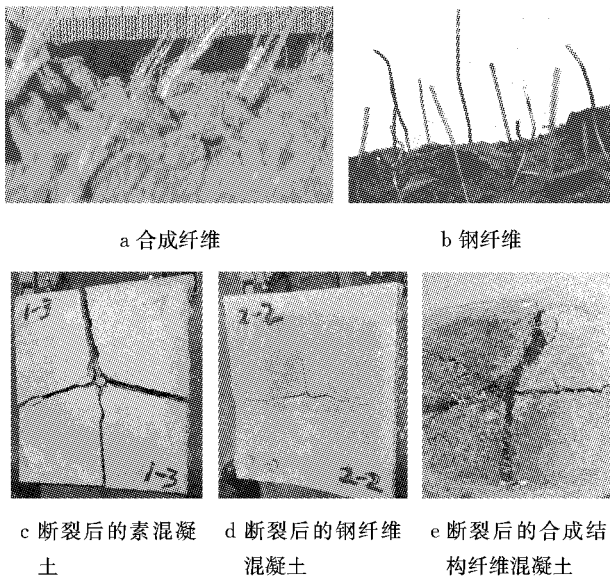


图 4 纤维混凝土断裂界面

Fig.4 Interfaces of fractured fiber reinforced concrete

由图 3a 可以看出,除了钢纤维混凝土试样(2 号)外,其他试样的应力-应变曲线均至少出现 2 个应力峰.测试过程显示,混凝土方板首先随着应力的增加产生初始开裂,形成第 1 个峰;随着应力的继续增加,方板在与第 1 条裂缝近似垂直的方向上再次发生开裂,形成第 2 个峰,图 4c,4d,4e 显示了试样破坏后的形态.钢纤维混凝土试样(2 号)只有 1 个应力峰,原因是方板同时发生纵、横方向的断裂,使 2 个峰叠加在了一起,所以峰值最高。

素混凝土试样(1 号)的应力-应变曲线反映出明显的脆性材料特征,当第 2 个应力峰出现后迅速降

2.2 方板的弯曲韧性

混凝土方板的弯曲韧性(每样 4 块板的平均)试验结果如图 3,合成纤维及钢纤维混凝土试样的断裂界面和断裂形态如图 4。

低至接近零;钢纤维混凝土(2 号)虽然也在应力峰值出现后迅速下降,但下降过程比素混凝土平缓;合成结构纤维混凝土试样(3 号至 5 号)的第 1 应力峰与素混凝土的接近,但第 2 峰值均明显更高,甚至在第 2 个峰之后又呈现出第 3、第 4 个应力峰,且在比较长的挠度变化范围内保持了较高的应力值,显示出合成纤维的显著增韧作用.相应地,图 3b 显示纤维混凝土的断裂能均高于素混凝土,而合成纤维混凝土的断裂能又均比钢纤维混凝土的大幅度提高。

从图 4 可以看出,混凝土断裂后,几乎所有的纤维都被拉出混凝土而不是被拉断,但不同纤维被拉出的外观变化明显不同.钢纤维(图 4b)由于自身强度较高而外观完整,能够看出其弯折的一端已经被拉直,可以推测当混凝土初裂后、钢纤维开始发挥增韧作用时,首先依靠混凝土对其弯折部分的较大握裹力而产生较强的抗弯曲作用,而后随着弯折部分被拉直,这种作用效果明显降低,虽然还可依赖钢纤维与混凝土之间的摩擦力来保持一定的增韧作用,但因之前拉直钢纤维的过程中已经在混凝土中形成了顺畅通道,使得该作用也不再明显.而对比图 4a 中被拉出的合成纤维与其原始状态(图 1)可以发现,多数被拉出的合成纤维已经“起毛”并分散为很多股的细纤维丝.可以推测,合成纤维本身具有一定的弹性,当其被施加拉应力的初始阶段可以利用该特征保持较高的混凝土韧性,随着应力和混凝土挠度的持续增加,纤维的一端被拉出混凝土,包裹纤维的混凝土内壁将原本编织成单股的粗纤维分散成很

多股细丝,由于其原始状态呈波纹状,从而这些细丝保持蓬松,能够保持其与混凝土孔壁的较大摩擦力,进而使其在被拉出混凝土的过程中产生较大的阻力,最终表现为对混凝土韧性的连续贡献。

在3种长度的合成纤维中,中等长度(5.6 cm)的纤维混凝土试样(4号)表现出最佳的增韧作用,不仅其第1、第2应力峰都较高(如图3a),并且其断裂能也最高(如图3b)。单从纤维长度角度分析,既然混凝土断裂后纤维均被拉出,说明纤维的断裂拉伸强度相对于本试验条件的混凝土来说足够高,则其长度越长就应该表现出越高的断裂能,因为其可以在

更长的挠度变化范围内受到包裹混凝土的约束;但从另一方面分析,在同等质量掺量下,长纤维的根数就少,则纤维长度越长产生的受约束点也相对较少,其分散性也会降低,对增韧作用不利。这2种正、反作用的综合结果,导致了这种合成纤维的长度存在最佳值。

2.3 圆板的弯曲韧性

混凝土圆板的弯曲韧性测试结果如图5,每组共3块试样,在图标中以“x-y”表示第x组的第y块试样。

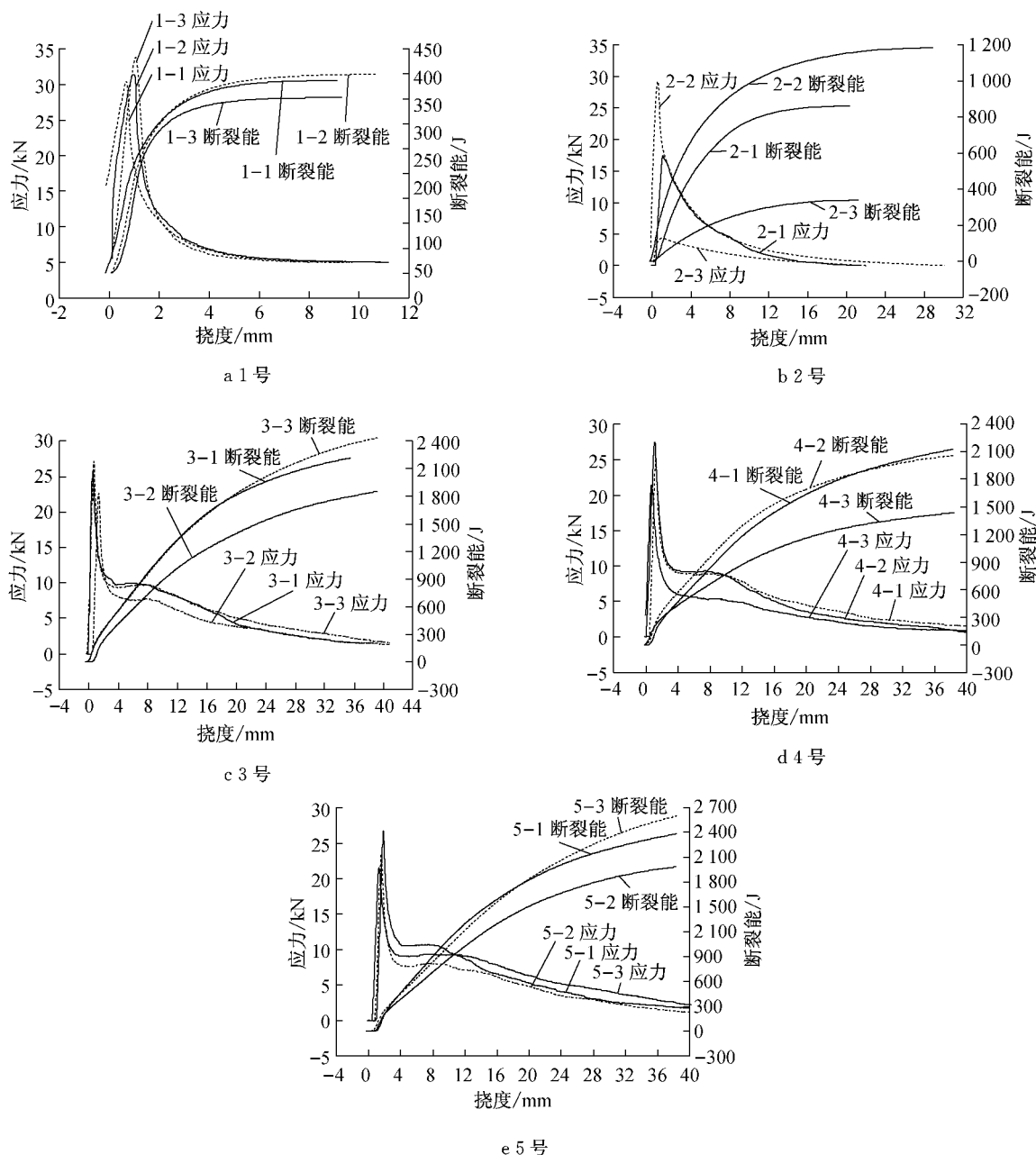


图5 圆板的应力-挠度和断裂能-挠度曲线

Fig.5 Curves of loads-deflection and energy-deflection of disks

对比图5中各分图的应力-挠度曲线可以看出(不考虑钢纤维试件图5b中2-2与2-3的异常结果),各试样的应力峰值都比较接近,说明各种纤维的掺入并未明显改变混凝土圆板的初始断裂强度;但其断裂能的差异显著,从应力-断裂能曲线上断裂能最后所达到的峰值看,钢纤维混凝土比素混凝土增加1倍以上,而3种长度的合成纤维混凝土均又比钢纤维混凝土提高大约1倍.该结果可以从应力-挠度曲线的走势图中找到根据,素混凝土(1号)和钢纤维混凝土(2号)在应力出现峰值后迅速回落,只是素混凝土的应力-挠度曲线陡降程度更高,合成纤维混凝土试样(3号、4号、5号)在应力下降过程中都出现了“平台段”(曲线斜率平缓),其意义表示试样可以在该荷载下发生一定的变形而不破坏,平台越高就预示着混凝土结构具有越强的抗垮塌能力,而平台越长则说明混凝土的抗变形能力越强^[10,27],可以

看出,最终的断裂能值与该平台的高度和长度密切相关,并随高度和长度的增加而增大.在裂缝发展阶段,合成纤维的弹性变形能力大且其根数较多,不易与基体发生脱黏,可有效延缓裂缝的扩展,并且纤维在拔出和弹性变形增大的过程中会不断消耗能量^[28],即如图5表现的那样使平台段变高变长.对比3种长度合成纤维混凝土的断裂能,总体上差异不大,最长合成纤维混凝土(5号)的断裂能略高,但各试样断裂能的平均值差异小于每组试样中单个试件之间的波动值,即可认为合成纤维的长度在此范围内变化对混凝土圆板的断裂能影响不大.

2.4 梁和切口梁的弯曲韧性

图6和图7分别为混凝土梁和切口梁的应力-挠度曲线与断裂能-挠度曲线,表2为混凝土抗弯强度.

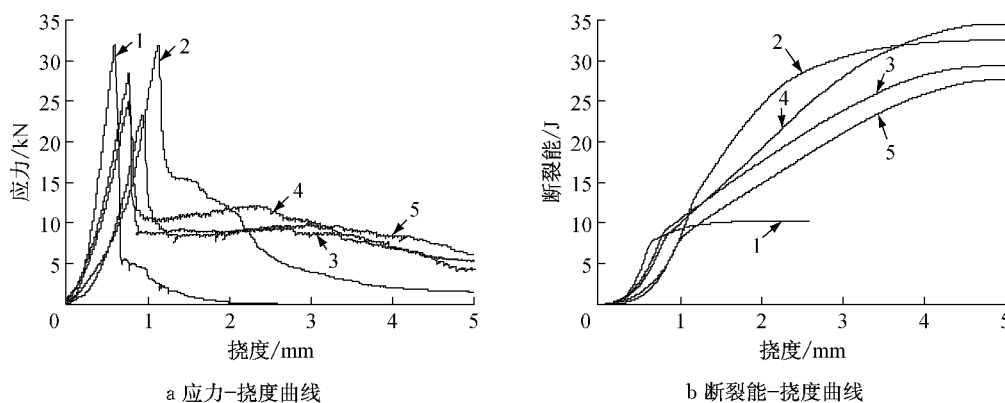


图6 混凝土梁的应力-挠度和断裂能-挠度曲线

Fig.6 Curves of loads-deflection and energy-deflection of concrete beams

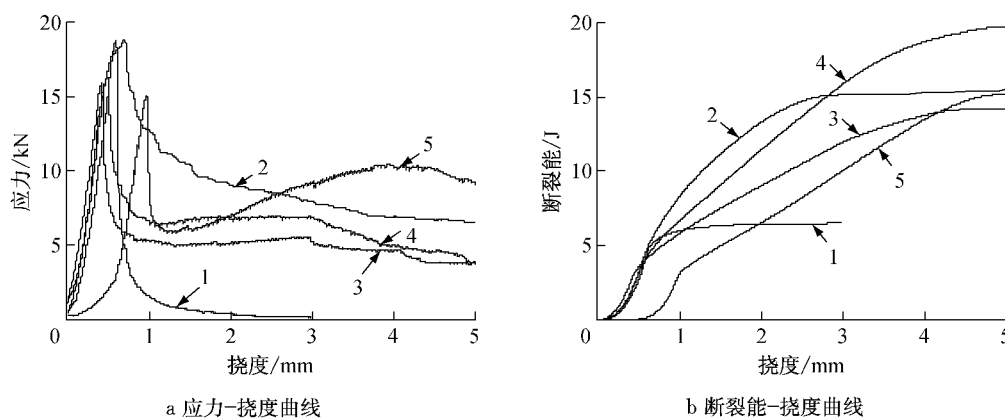


图7 切口梁的应力-挠度和断裂能-挠度曲线

Fig.7 Curves of loads-deflection and energy-deflection of coped concrete beams

根据图6a并结合表2中的混凝土梁抗弯强度可以看出,素混凝土和钢纤维混凝土的应力峰值接近并明显高于合成纤维混凝土试样,但从图6a可以

看出素混凝土的应力-应变曲线在下降段几乎没有平台,钢纤维混凝土的曲线虽有最高的平台但平台长度较短,3种长度的合成纤维混凝土应力-挠度曲

表 2 混凝土梁及切口梁的抗弯强度
Tab.2 The bending strength of concrete beams
and coped concrete beams MPa

代号	混凝土梁	混凝土切口梁
1	4.27	3.76
2	4.25	3.75
3	3.79	3.13
4	3.35	3.27
5	3.11	3.02

线在下降段的平台高度较低但长度明显更长;其结果在图 6b 中表现为中等长度(5.6 cm)合成纤维混凝土可达到最高的断裂能,钢纤维混凝土的次之,另外 2 种长度的合成纤维混凝土断裂能进一步降低,素混凝土的断裂能则大幅度降低。上述结果与 2.2 节中的方板韧性测试结果较为吻合,其形成原因也基本相同。此外,有研究^[15]认为,纤维可通过在斜裂缝中的直接作用和转移到横向力的间接作用来抑制裂缝的产生和发展;还有研究^[13]认为,纤维的桥联、增韧作用与其长度有关,当长度短于粗骨料的平均尺寸时,只能影响微裂缝产生前的阶段,本试验采用的纤维长度均大于粗骨料的平均粒径(石子为 5~35 cm 连续级配,取平均值为 22 cm),所以对试样断裂后的韧性产生了明显作用。

图 7 和表 2 的切口梁弯曲强度数据显示,合成纤维明显降低抗弯强度但可大幅度提高断裂能,这与其对混凝土梁的作用规律一致。分析认为,一方面合成纤维降低了混凝土抗压强度(如表 1),且长纤维的降低程度更大,使混凝土本身的抗弯能力下降;另一方面,合成纤维的弹性较大,在混凝土初始断裂瞬间能够被拉长,未能及时表现出增韧作用。

对比表 2 中梁与切口梁的弯曲强度可以看出,混凝土梁的抗弯强度均比切口梁的更高,这除了由于切口梁更容易断裂外,主要是因为测试方法不同所致,对梁采用的是双轴加载(如图 1e)方式,而对切口梁采用的是单轴加载(如图 1f)方式。

3 结论

(1)合成纤维降低混凝土流动性的能力随着其长度的增加而增加;在本试验条件下会使混凝土 7 d 和 28 d 强度分别降低 20%左右和 10%~20%,另外,随着其长度的增加,合成纤维使 28 d 强度降低加剧。

(2)合成纤维对混凝土方板和圆板的初裂强度基本无影响,但明显降低混凝土梁及切口梁的抗弯强度;合成纤维可明显提高混凝土的断裂能,其作用

高于同体积掺量的钢纤维,这是因为在被拉出混凝土的过程中,合成纤维比钢纤维受到了更长周期的较大约束力,中等长度(5.6 cm)的合成纤维对混凝土的断裂能增加最多。

(3)合成纤维混凝土梁的应力-挠度曲线特征是,在其下降过程呈现出一个“平台段”,虽然平台高度不及钢纤维混凝土,但其长度明显更长,产生这种结果是由合成结构纤维的材质特征决定的。

参考文献:

- [1] Soutsos M N, Le T T, Lampropoulos A P. Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 36(11): 704.
- [2] Mohamed Hamdy M, Masmoudi Radhouane. Flexural strength and behavior of steel and FRP-reinforced concrete-filled FRP tube beams [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32 (11): 3789.
- [3] Issa M S, Metwally I M, Elzeiny S M. Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(5): 1754.
- [4] Siddique R, Kapoor K, Kadri E H, *et al.* Effect of polyester fibres on the compressive strength and abrasion resistance of HVFA concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29(4): 270.
- [5] 李建辉, 张科强, 邓宗才. 粗合成纤维混凝土抗弯冲击强度的分布规律[J]. *建筑科学与工程学报*, 2007, 24(4): 54.
LI Jianhui, ZHANG Keqiang, DENG Zongcai. Distribution regularity of flexural impact resistance of synthetic macro-fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2007, 24(4): 54.
- [6] Qian Chunxiang, Indubhushan Patnaikuni. Properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams in bending [J]. *Cement and Concrete Composites*, 1999, 21(1): 73.
- [7] Tianyu Xie, Togay Ozbakkaloglu. Behavior of steel fiber-reinforced high-strength concrete-filled FRP tube columns under axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2015, 90(5): 158.
- [8] Nicola Buratti, Claudio Mazzotti, Marco Savoia. Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25 (5): 2713.
- [9] Chi Y, Xu L, Mei G, *et al.* A unified failure envelope for hybrid fibre reinforced concrete subjected to true triaxial compression[J]. *Composite Structures*, 2014, 109(3): 31.
- [10] 赖建中, 孙伟, 董贺祥. 粗合成纤维混凝土力学性能及纤维-混凝土界面黏结行为研究[J]. *工业建筑*, 2006, 36(11): 94.
LAI Jianzhong, SUN Wei, DONG Hexiang. Mechanical performance of synthetic structural fiber reinforced concrete and bond behavior of fiber-matrix interface [J]. *Industrial Construction*, 2006, 36(11): 94.
- [11] Soltanzadeh F, Barros J A O, Santos R F C. High performance

- fiber reinforced concrete for the shear reinforcement; Experimental and numerical research[J]. Construction and Building Materials, 2015, 77(2): 94.
- [12] Xu Z, Hao H, Li H N. Experimental study of dynamic compressive properties of fibre reinforced concrete material with different fibres[J]. Materials & Design, 2012, 33(1): 42.
- [13] Zerbino R, Tobes J M, Bossio M E, *et al.* On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(2): 191.
- [14] Sivakumar A, Santhanam M. A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 29(7): 575.
- [15] Yao W, Li J, Wu K. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(1): 27.
- [16] Qian C, Stroeven P. Fracture properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres [J]. Cement and Concrete Composites, 2000, 22(5): 343.
- [17] Furlan S, de Hanai J B. Shear behaviour of fiber reinforced concrete beams[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(4): 359.
- [18] 李建辉. 粗合成纤维混凝土力学特性及其微观增强机理[D]. 北京: 北京工业大学, 2006.
- LI Jianhui. Mechanical properties and micro-mechanism of synthetic macro-fiber reinforced concrete [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.
- [19] Bolat H, Şimşek O, Çullu M, *et al.* The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 61(5): 191.
- [20] Alberti M G, Enfedaque A, Gálvez J C. Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 85(7): 182.
- [21] Akcay B, Tasdemir M A. Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 287.
- [22] Vairagade V S, Kene K S. Strength of normal concrete using metallic and synthetic fibers[J]. Procedia Engineering, 2013, 51(1): 132.
- [23] Aydin A C. Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(6): 1149.
- [24] Abrishambaf A, Barros J A O, Cunha V M C F. Time-dependent flexural behaviour of cracked steel fibre reinforced self-compacting concrete panels [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 72(6): 21.
- [25] Dyer S R, Lassila L V J, Jokinen M, *et al.* Effect of fiber position and orientation on fracture load of fiber-reinforced composite[J]. Dental Materials, 2004, 20(10): 947.
- [26] Zhu H, Yan M, Wang P, *et al.* Mechanical performance of concrete combined with a novel high strength organic fiber[J]. Construction and Building Materials, 2015, 78(3): 289.
- [27] 邓宗才, 师亚军, 曹伟. 聚烯烃粗合成纤维混凝土抗弯韧性试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(1): 19.
- DENG Zongcai, SHI Yajun, CAO Wei. Experiment on flexural toughness of polyolefin macro-fiber reinforced concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(1): 19.
- [28] 邵运达, 李建辉, 郭鸿. 聚丙烯粗合成纤维混凝土力学性能及其增强机理研究[J]. 混凝土, 2012, 270(4): 52.
- SHAO Yunda, LI Jianhui, GUO Hong. Research on mechanical properties and strengthening mechanism of polypropylene synthetic macro-fiber reinforced concrete [J]. Concrete, 2012, 270(4): 52.

(上接第 1893 页)

- [4] Bardelcik A, Worswick M J, Winkler S, *et al.* A strain rate sensitive constitutive model for quenched boron steel with tailored properties [J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 50(12): 49.
- [5] 邢忠文, 包军, 杨玉英, 等. 可淬火硼钢板热冲压成形实验研究[J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(2): 172.
- XING Zhongwen, BAO Jun, YANG Yuying, *et al.* Hot stamping processing experiments of quenchable boron steel [J]. Materials Science & Technology, 2008, 16(2): 172.
- [6] Bok H H, Lee M G, Pavlina E J, *et al.* Comparative study of the prediction of microstructure and mechanical properties for a hot-stamped B-pillar reinforcing part [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2011, 53(9): 744.
- [7] Min J, Lin J, Min Y, *et al.* On the ferrite and bainite transformation in isothermally deformed 22MnB5 steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 550(31): 375.
- [8] He L F, Zhao G Q, Li H P. Measurement and analysis of time-temperature-transformation curves of boron steel 22MnB5 [J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 29(4): 484.
- [9] 贺连芳. 硼钢 B1500HS 的热冲压关键参数测试及其淬火性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
- HE Lianfang. Research on key parameter measuring and quenching properties of boron steel B1500HS in hot stamping process [D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [10] Kop T A, Sietsma J, Van Der Zwaag S. Dilatometric analysis of phase transformations in hypo-eutectoid steels [J]. Journal of Materials Science, 2001, 36(2): 519.
- [11] 徐洲, 赵连城. 金属固态相变原理[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- XU Zhou, ZHAO Liancheng. Principle of metal solid phase transformation [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [12] Avrami M. Kinetics of phase changes II, transformation time relations for random distribution of nuclei [J]. Chemical Physics, 1940, 8: 212.
- [13] 赵连城. 金属热处理原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1987.
- ZHAO Liancheng. Principle of metal heat treatment [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1987.