

文章编号:1673-2049(2017)02-0111-08

生态钢纤维混凝土弯曲韧性和断裂性能

邓宗才¹,王 辉¹,刘 岩²

(1. 北京工业大学 建筑工程学院,北京 100124; 2. 北京中企卓创科技发展有限公司,北京 100621)

摘要:为掌握生态钢纤维混凝土的弯曲韧性和断裂性能,分别对掺率(体积分数)为1.0%,1.7%,2.4%的2种异形生态钢纤维混凝土和掺率为0.7%,1.3%的原生高强钢纤维增强混凝土进行了无切口梁四点弯曲韧性试验和切口梁三点弯曲断裂试验。研究表明:生态钢纤维掺率为1.0%时,无切口梁四点弯曲荷载-挠度曲线和切口梁三点弯曲荷载-挠度及荷载-切口张开位移曲线在达到峰值后都出现局部陡降,试件残余强度较小,断裂韧度值较低,纤维对改善混凝土弯曲韧性和断裂性能的作用较小;当生态钢纤维掺率为1.7%时,混凝土弯曲韧性和断裂性能均得到显著提高,混凝土在变形达到 $15\delta_{ult,p}$ ($\delta_{ult,p}$ 为素混凝土峰值荷载对应的挠度)或 $70D_{ult,p}$ ($D_{ult,p}$ 为素混凝土峰值荷载对应的切口张开位移)水平时,依然具有较高的持荷能力和较好的韧性,波浪型生态钢纤维混凝土断裂能和断裂韧度是素混凝土的27.59倍和8.35倍;生态钢纤维掺率为2.4%时,混凝土弯曲韧性指标、断裂能和断裂韧度进一步增加;掺率为1.7%的生态钢纤维混凝土增韧和抗断裂效果与掺率为0.7%的原生高强钢纤维混凝土相当。

关键词:生态钢纤维混凝土;原生高强钢纤维混凝土;弯曲韧性;断裂性能;掺率

中图分类号:TU502 **文献标志码:**A

Flexural Toughness and Fracture Properties of Ecological Steel Fiber Reinforced Concrete

DENG Zong-cai¹, WANG Hui¹, LIU Yan²

(1. College of Architecture Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Super-creative Technology Co., Ltd, Beijing 100621, China)

Abstract: In order to grasp the flexural toughness and fracture property of ecological steel fiber reinforced concrete, four-point bending toughness test for beam and three-point bending fracture test for notched beam were carried out with different volume fractions of ecological steel fibers 1.0%, 1.7%, 2.4% and different volume fractions of native high strength steel fibers 0.7%, 1.3%. The results show that when the volume fraction of ecological steel fiber is 1.0%, four-point bending load-deflection curves of beam and three-point bending load-deflection curves and load-crack mouth opening displacement curves of notched beam are partial steep drop after the peak point, residual strength and fracture toughness are low. Ecological steel fibers have less improvement on toughness and fracture properties. When the volume fraction of ecological steel fiber is 1.7%, the flexural toughness and fracture property of concrete are greatly improved, concretes still have high toughness when the deformation is $15\delta_{ult,p}$ ($\delta_{ult,p}$ is deflection corresponding to peak load of plain concrete) and $70D_{ult,p}$ ($D_{ult,p}$ is peak crack mouth opening

收稿日期:2016-10-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0303200);中国民航局项目(MHRD20150225)

作者简介:邓宗才(1961-),男,陕西扶风人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:dengzc@bjut.edu.cn。

displacement corresponding to peak load of plain concrete), fracture energy and fracture toughness of wavy ecological steel fiber concrete are 27.59 times and 8.35 times to plain concrete. When the volume fraction of ecological steel fiber is 2.4%, flexural toughness index, fracture energy and fracture toughness further increase. The toughening and fracture resistance effects of 1.7% volume fraction of ecological steel fiber are almost close to those of 0.7% native high strength steel fiber.

Key words: ecological steel fiber reinforced concrete; native high strength steel fiber reinforced concrete; flexural toughness; fracture toughness; volume fraction

0 引言

与素混凝土相比,钢纤维混凝土劈裂抗拉强度、抗剪强度、抗弯强度等均有大幅度的提高^[1-4],尤其是能够显著改善混凝土的抗裂、抗冲击、抗爆、抗疲劳等耐久性能^[5-10]。然而,钢纤维价格较高,将大幅增加工程造价,阻碍了其工程应用。通过对废弃旧轮胎中钢丝加工处理,变为异形生态钢纤维(Ecological Steel Fiber)。生态钢纤维价格远低于原生高强钢纤维,不仅能够实现变废为宝和资源循环利用,而且有利于保护环境和可持续发展。如何合理使用生态钢纤维是人们关注的热点问题之一。本文通过与原生高强钢纤维的对比试验,研究生态钢纤维品种、掺率等对混凝土梁弯曲韧性和断裂性能的影响规律,所得结果将为新型生态纤维的工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 原材料及配合比

水泥为钻牌 P. O42.5R 普通硅酸盐水泥;石子粒径为 5~25 mm,连续级配碎石;砂为中砂,细度模数为 2.3;减水剂为奥莱特高效聚羧酸类减水剂,固含量为 40%,减水率大于 30%;拌和水为饮用自来水。生态钢纤维包括波浪型和压纹型,由玉田县致泰钢纤维公司提供。原生高强钢纤维是由上海贝卡尔特纤维公司提供的弯钩型高强度钢纤维(简称高强钢纤维)。纤维混凝土基准配合比见表 1,3 种钢纤维物理力学参数和纤维类型分别见表 2 和图 1。

表 1 混凝土基准配合比

Tab. 1 Mixture Proportion of Base Concrete

各材料用量/(kg·m ⁻³)				减水剂质量 分数/%
水泥	水	石子	砂	
420	168	1 087	725	0.5

2 种异形生态钢纤维掺率为 1.0%,1.7%,2.4%,原生高强度钢纤维掺率为 0.7%,1.3%。试

表 2 纤维物理力学参数

Tab. 2 Physical and Mechanical Parameters of Fibers

纤维类型	长度/ mm	直径/ mm	抗拉强度/ MPa	密度/ (g·m ⁻³)
波浪型生态钢纤维	38	1.00	2 000	7.85
压纹型生态钢纤维	38	1.30	1 800	7.85
弯钩型原生高强钢纤维	60	0.75	1 300	7.80

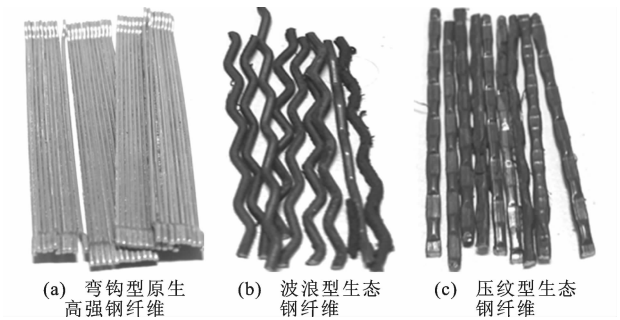


图 1 纤维类型

Fig. 1 Fiber Types

件编号见表 3,试件编号中“WES”代表波浪型生态钢纤维,“EES”代表压纹型生态钢纤维,“HS”代表弯钩型原生高强钢纤维,数字为钢纤维掺率,例如 WES-1.0 表示掺率为 1.0% 的波浪型生态钢纤维混凝土试件。

表 3 试件编号及纤维掺率

Tab. 3 Specimen Numbers and Fiber Volume Fractions

试件编号	纤维掺率/%	试件个数
HS-0	0.0	7
HS-0.7	0.7	6
HS-1.3	1.3	6
WES-1.0	1.0	5
WES-1.7	1.7	6
WES-2.4	2.4	5
EES-1.0	1.0	5
EES-1.7	1.7	6
EES-2.4	2.4	6

1.2 试件制作与试验方法

为保证钢纤维均匀分散在混凝土中,首先将胶

凝材料、砂、石干拌 60 s,再缓慢倒入水和减水剂的混合液体,当拌和物开始转变为胶体状态时,人工加入钢纤维再搅拌 120 s。试件标准养护至 28 d 后进行试验。

1.2.1 四点弯曲韧性试验

无切口梁试件截面尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm,加载方式如图 2(a)所示,采用电液伺服试验机进行三分点加载,恒位移控制加载速率,控制精度为 0.1 mm·min⁻¹,计算机自动采集数据。加载荷载降至峰值荷载的 10%时停止加载,认为试件已破坏。

1.2.2 三点弯曲断裂试验

切口梁试件截面尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm,试验前 1 d 在梁跨中用切割机预制切口,切口厚度 t 为 3 mm,切口深度 a_0 为 30 mm,加载方式见图 2(b)。采用电液伺服试验机在跨中施加集中荷载,恒位移控制加载速率,控制精度为 0.1 mm·min⁻¹,将加载点的净位移作为试件挠度值由计算机自动采集。采用夹式引伸计测量切口张开位移 D ,引伸计最大量程为 6 mm,精度为 0.001 mm,加载荷载降至峰值荷载的 10%时停止加载,认为试件已破坏。

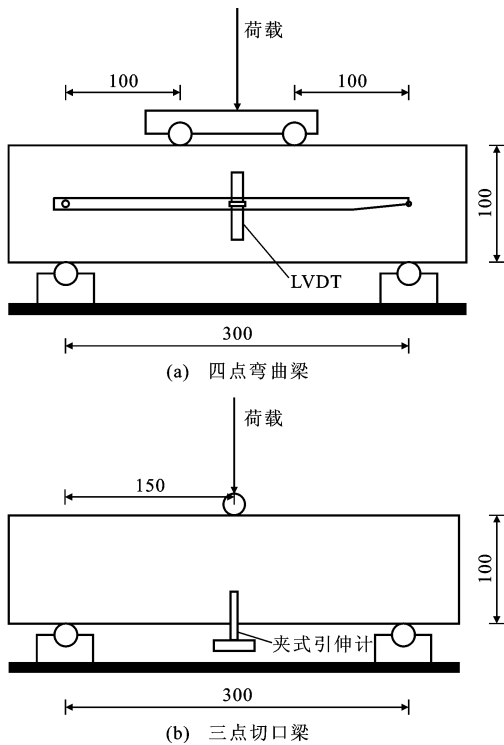


图 2 试验加载方式(单位:mm)

Fig. 2 Test Loading Method (Unit:mm)

2 试验结果与分析

2.1 荷载-变形曲线

不同品种钢纤维和掺率下的无切口梁四点弯曲荷载-挠度($P-\delta$)曲线见图 3(a),三点弯曲切口梁荷载-挠度($P-\delta$)曲线及荷载-切口张开位移($P-D$)曲线分别如图 3(b),(c)所示。

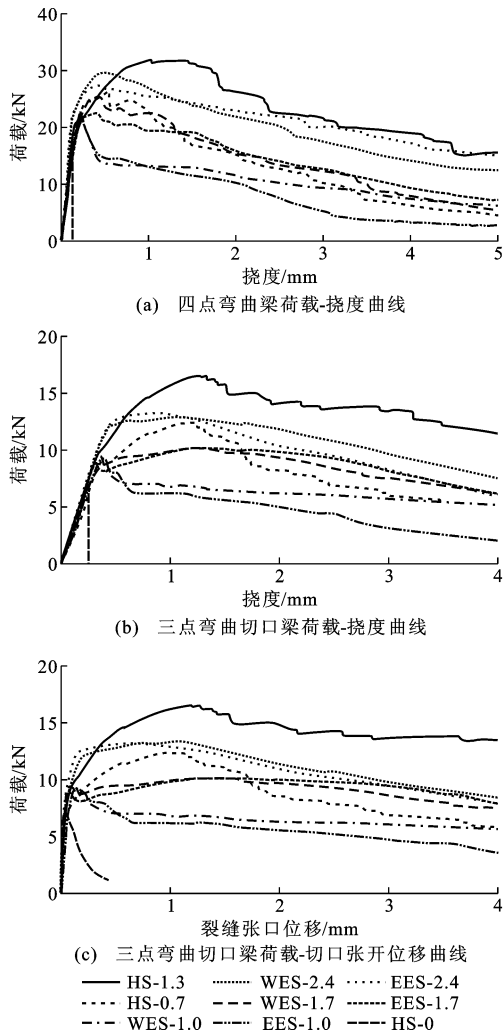


图 3 荷载-变形曲线

Fig. 3 Load-deformation Curves

由图 3(a)可见:素混凝土试件达到峰值后直接断裂成两部分,脆性特征显著, $P-\delta$ 曲线达到峰值后垂直下降;钢纤维混凝土试件 $P-\delta$ 曲线分为线性增长段、初裂后非线性增长段、峰值后裂缝扩展下降段、试件最终破坏段,由于钢纤维的连接作用试件最终破坏也未断裂成两部分。随着生态钢纤维掺量的增加,试件峰值荷载逐渐变大,峰值后残余荷载水平也逐渐提高, $P-\delta$ 曲线越来越饱满。生态钢纤维掺率 1.0%时, $P-\delta$ 曲线在峰值后出现局部陡降;掺率增至 1.7%时,峰值后曲线平稳下降,增加纤维掺率

显著改善了峰值荷载后的持荷能力。虽然掺率为 0.7% 的原生高强钢纤维试件峰值后荷载也出现突降,但下降幅度较小。同一掺率下的波浪型和压纹型生态钢纤维试件 $P-\delta$ 曲线形态相差不大,掺率为 1.7% 的生态钢纤维试件和掺率为 0.7% 的原生高强钢纤维试件破坏时 $P-\delta$ 曲线与坐标轴所围面积大致相等。

生态钢纤维混凝土切口梁三点断裂 $P-\delta$ 和 $P-D$ 曲线变化规律一致。以 $P-D$ 曲线为例可见:①掺率为 1.0% 的生态钢纤维试件峰值荷载前 $P-D$ 曲线同素混凝土相似,荷载基本呈线性增加至峰值荷载;生态钢纤维掺率为 1.7% 或 2.4% 时,随着跨中集中外荷载逐渐增大,试件首先在预制切口顶端出现新的裂纹,然后缓慢向上扩展,由于钢纤维的桥接和阻裂作用,试件承载能力继续缓慢增加,试件峰值荷载前 $P-D$ 曲线形成明显的弹塑性段;②生态钢纤维掺率为 1.0% 时,试件的 $P-D$ 曲线峰值荷载后出现陡降,之后又变为缓慢下降,裂缝处于稳定扩展阶段,纤维控裂能力得到体现;随着生态纤维掺率增加,变形能力进一步提升,掺率增至 1.7% 时,峰值荷载后 $P-D$ 曲线表现出水平持荷段;③尽管掺率为 0.7% 的原生高强钢纤维混凝土峰值强度大于掺率为 1.7% 的生态钢纤维混凝土,但在变形约 2 mm 后,掺率 1.7% 的生态钢纤维混凝土荷载-变形曲线一直处于掺率 0.7% 原生高强钢纤维混凝土曲线的上方,最终断裂破坏时二者耗能相当。

2.2 弯曲韧性

纤维增韧效果通常用韧性指标来衡量,韧性指标可以定量描述材料、构件或结构在基体开裂后的阻裂能力和带裂缝工作能力。本文通过无切口梁四点弯曲韧性和切口梁三点断裂试验曲线对韧性指标进行计算及评价。

2.2.1 美国 ASTM C1609-10 标准评价方法

ASTM C1609-10^[11] 标准是一个新的韧性评价标准,用于取代 ASTM C1018-89 标准^[12]。ASTM C1609-10 标准方法是基于无切口梁四点弯曲荷载-挠度曲线以绝对值参数作为韧性评价指标,主要包括荷载 P 、强度 f 、挠度 δ 以及某一特定挠度的荷载-挠度曲线下的面积 T 。结合本文试验得到的四点弯曲梁荷载-挠度曲线[图 3(a)],分别把峰值挠度 1.0,2.0,4.0 mm 作为特征点,确定峰值荷载 P_f 、特征挠度处残余荷载 $P_{1.0}, P_{2.0}, P_{4.0}$,通过计算获得峰值强度 f_f 、残余强度 $f_{1.0}, f_{2.0}, f_{4.0}$ 及荷载-挠度曲线在 0~4.0 mm 挠度区间内荷载-挠度曲线下的面积

$T_{4.0}$ 。表 4 为 ASTM C1609-10 的韧性指标计算结果。

表 4 ASTM C1609-10 的韧性指标计算结果

Tab. 4 Calculation Results of Toughness Index According to ASTM C1609-10					
试件编号	f_f /MPa	$f_{1.0}$ /MPa	$f_{2.0}$ /MPa	$f_{4.0}$ /MPa	$T_{4.0}$ /J
HS-0	5.48				
HS-0.7	8.84	7.30	4.93	2.79	67.98
HS-1.3	10.89	10.74	9.38	5.77	111.84
WES-1.0	6.61	3.94	3.34	1.95	43.72
WES-1.7	7.54	6.79	4.86	2.41	65.22
WES-2.4	9.06	7.41	6.63	4.89	86.86
EES-1.0	6.13	4.19	3.23	1.11	39.97
EES-1.7	7.06	6.11	4.95	2.81	62.39
EES-2.4	8.89	7.40	5.72	3.66	77.94

由表 4 可以看出:波浪型生态钢纤维掺率为 1.0%,1.7%,2.4% 时,峰值强度比素混凝土分别提高 20.66%,37.58%,65.38%;压纹型生态钢纤维掺率为 1.0%,1.7%,2.4% 时,峰值强度比素混凝土分别提高了 11.80%,28.89%,62.18%,即峰值强度得到明显提高且生态钢纤维掺率越大,增幅越显著。生态钢纤维掺率为 1.0% 时,试件残余强度较小,但随着生态钢纤维掺率的增加,试件残余强度 $f_{1.0}, f_{2.0}, f_{4.0}$ 逐渐增加。峰值强度和残余强度的增加使得试件受荷破坏过程中消耗更多的能量。

波浪型和压纹型生态钢纤维掺率由 1.0% 增至 2.4%,试件荷载-挠度曲线在 0~4.0 mm 挠度区间内的能量吸收约增加 1 倍,可见增加生态钢纤维掺率能显著提高试件的耗能能力。生态钢纤维掺率 1.7% 时,试件弯曲韧性值和掺率 0.7% 原生高强钢纤维试件接近,适宜掺率的生态钢纤维混凝土能够达到原生高强钢纤维混凝土的韧性水平。

2.2.2 等效弯曲强度和等效断裂韧度评价方法

文献[13]基于切口梁三点弯曲断裂试验测得的 $P-\delta$ 曲线和 $P-D$ 曲线,提出了具有明确物理意义的等效弯曲强度 $\sigma_{eq}(n)$ 和等效断裂韧度 $K(n)$ 的计算方法,即

$$\sigma_{eq}(n)=\frac{E_{pc}L}{(n\delta_{ult,p}-\delta_{ult,p})bh^2}$$

(1)

$$K(n)=\frac{T_{pc}L\sqrt{h}}{(nD_{ult,p}-D_{ult,p})bh^2}$$

(2)

式中: E_{pc} 为 $P-\delta$ 曲线在初裂挠度曲线和特征挠度曲线包围的面积; T_{pc} 为 $P-D$ 曲线在初裂切口张开位移和特征切口张开位移曲线包围的面积; $\delta_{ult,p}$ 为素混凝土峰值荷载对应的挠度值,本文试验条件下 $\delta_{ult,p}$ 平均值为 0.252 mm,视为纤维增强混凝土 $P-\delta$

曲线的初裂挠度; $D_{ult,p}$ 为素混凝土峰值荷载对应的切口张开位移值,本文试验条件下 $D_{ult,p}$ 平均值为 0.048 mm,作为纤维增强混凝土 P - D 曲线的初裂切口张开位移值; n 为计算时所取的初裂挠度倍数; L 为试件跨度; h,b 分别为试件截面高度和宽度。

该方法可描述不同变形阶段纤维的增韧贡献,

且等效弯曲强度与抗弯强度的单位和含义相同,等效断裂韧度的单位与断裂韧度相同,具有明确的物理意义,便于工程设计者使用。通过对图 3(b)和图 3(c)曲线进行计算得到各试件等效弯曲强度、等效断裂韧度,计算结果列于表 5。

图 4 为波浪型生态钢纤维掺率对等效弯曲强度

表 5 等效弯曲强度和等效断裂韧度

Tab. 5 Equivalent Flexural Strengths and Equivalent Fracture Toughnesses

试件编号	等效弯曲强度/MPa				等效断裂韧度/(MPa·m ^{1/2})					
	$\sigma_{eq}(ult)$	$\sigma_{eq}(10)$	$\sigma_{eq}(15)$	$\sigma_{eq}(20)$	$K(ult)$	$K(10)$	$K(30)$	$K(50)$	$K(70)$	$K(100)$
HS-0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HS-0.7	6.62	5.95	5.01	4.39	2.17	1.97	2.34	2.05	1.88	1.60
HS-1.3	8.43	8.67	8.44	7.83	2.72	2.18	2.63	2.78	2.80	2.71
WES-1.0	4.95	3.87	3.59	3.33	1.58	1.38	1.29	1.25	1.22	1.15
WES-1.7	5.55	5.37	4.88	4.34	1.77	1.69	1.76	1.74	1.71	1.57
WES-2.4	7.20	7.27	6.64	5.90	2.42	2.31	2.44	2.34	2.31	2.11
EES-1.0	4.81	2.93	2.38	2.04	1.50	1.40	1.17	1.03	0.96	0.80
EES-1.7	5.68	5.49	4.96	4.40	1.81	1.67	1.78	1.81	1.78	1.64
EES-2.4	6.99	6.78	6.08	5.39	2.38	2.34	2.41	2.26	2.16	1.92

注: $\sigma_{eq}(ult)$, $K(ult)$ 分别为峰值挠度处的等效弯曲强度和等效断裂韧度。

$K(70)$ 未出现明显下降,表明高掺率可以显著改善峰值荷载后的韧性和裂缝控制能力;②生态纤维掺率由 1.0% 增加到 1.7% 时,试件的 $\sigma_{eq}(ult)$ 和 $K(ult)$ 增长缓慢;掺率增加至 2.4% 时, $\sigma_{eq}(ult)$ 和 $K(ult)$ 有明显提高,表明高掺率可以显著改善混凝土峰值前韧性。

压纹型生态钢纤维掺率对等效弯曲强度和等效断裂韧度的影响规律与波浪型生态钢纤维相似,见图 5,不同之处在于,波浪型生态钢纤维掺率由 1.7% 增加至 2.4% 时,试件在各变形下的等效弯曲强度和等效断裂韧度增长幅度明显大于掺率由 1.0% 增至 1.7% 时的增幅,而压纹型生态钢纤维掺率由 1.7% 增至 2.4% 时,等效弯曲强度和等效断裂韧度增长幅度明显小于纤维掺率由 1.0% 增至 1.7% 时的增幅[除 $\sigma_{eq}(ult)$ 和 $K(ult)$ 外],这可能主要与生态纤维的长径比、表面形态等纤维本身性质有关。

纤维品种、掺率对等效弯曲强度和等效断裂韧度的影响如图 6 所示。由图 6 可见,生态钢纤维掺率为 1.0% 和 2.4% 时,波浪型生态钢纤维增韧贡献高于压纹型生态钢纤维,掺率为 1.7% 时,二者增韧效果相差不大。与高强钢纤维增韧作用相比,掺率为 1.7% 的波浪和压纹型生态钢纤维试件的 $\sigma_{eq}(ult)$ 和 $K(ult)$ 小于掺率为 0.7% 的原生高强钢纤维,但随着变形增大,生态钢纤维混凝土等效弯曲强

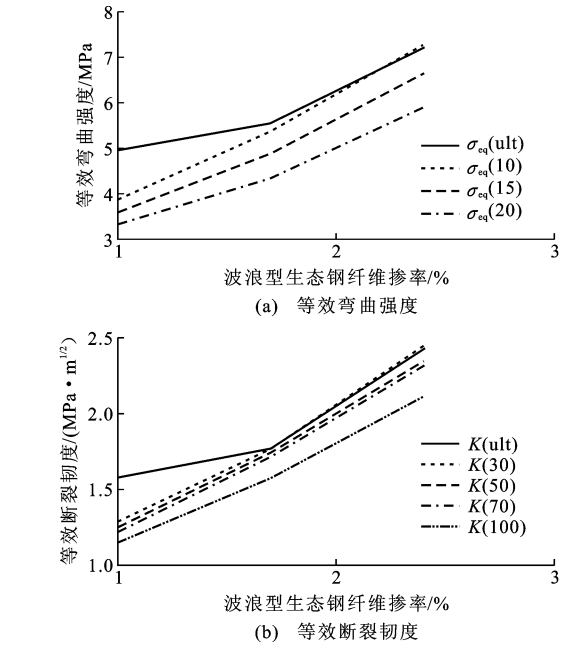


图 4 波浪型生态钢纤维掺率对等效弯曲强度和等效断裂韧度的影响

Fig. 4 Effects of WES Volume Fraction on Equivalent Flexural Strength and Equivalent Fracture Toughness and equivalent fracture toughness. 由图 4 可见:①波浪型生态钢纤维掺率为 1.0% 时, $\sigma_{eq}(10)$ 和 $K(30)$ 均比峰值点 $\sigma_{eq}(ult)$ 和 $K(ult)$ 明显下降,但纤维掺率为 1.7% 或者 2.4% 时,试件分别在 $15\delta_{ult,p}$ 和 $70D_{ult,p}$ 变形处的等效弯曲强度 $\sigma_{eq}(15)$ 和等效断裂韧度

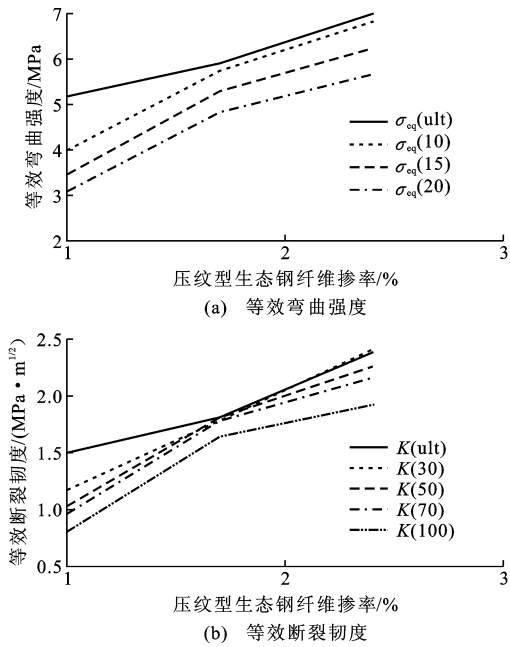


图5 压纹型生态钢纤维掺率对等效弯曲强度和等效断裂韧度的影响

Fig.5 Effects of EES Volume Fraction on Equivalent Flexural Strength and Equivalent Fracture Toughness

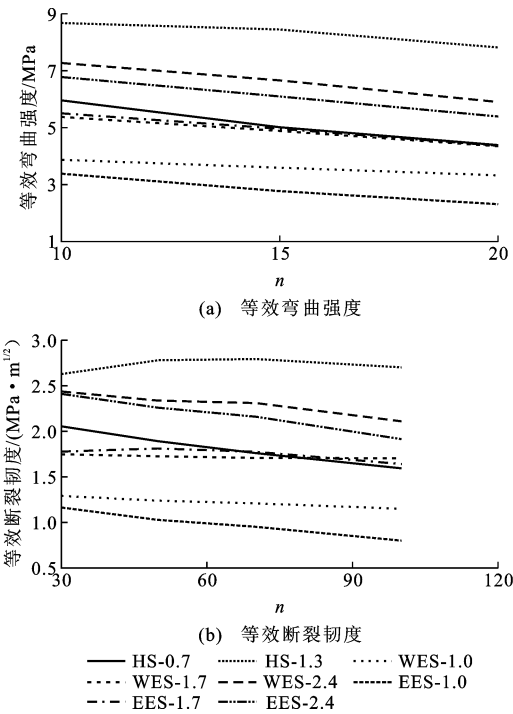


图6 纤维品种、掺率对等效弯曲强度和等效断裂韧度的影响

Fig.6 Effects of Fiber Types and Volume Fractions on Equivalent Flexural Strength and Equivalent Fracture Toughness

荷载后曲线下降较缓慢,而掺率为 0.7% 的原生高强钢纤维试件峰值荷载后曲线下降相对较快。生态钢纤维掺率为 2.4% 时,任意变形下的等效弯曲强度和等效断裂韧度都高于掺率为 0.7% 的原生高强钢纤维混凝土,但不及掺率为 1.3% 的原生高强钢纤维混凝土。

2.3 断裂性能

2.3.1 断裂能

断裂能 G_f 为裂缝扩展单位面积所需的能量。根据图 3(b),采用国际结构与材料研究所联合会 RILEM 标准测试方法^[14],断裂能计算式见式(3)

$$G_f = \frac{\int_0^{+\infty} P(\delta) d\delta + mg\delta_0}{A_{lig}} = \frac{W_0 + mg\delta_0}{(h - a_0)b} \quad (3)$$

式中: W_0 为断裂功; m 为试件在 2 个支座间的质量; δ_0 为试件破坏时的挠度; g 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; A_{lig} 为韧带面积。

2.3.2 断裂韧度

通过 P - D 曲线,按照式(4)~(9)计算有效裂缝长度 a_c 和裂缝尖端裂缝强度因子 $K_I(a_c)$ ^[15-16],即

$$a_c = \frac{2}{\pi} (h + h_0) \cdot \arctan\left(\sqrt{\frac{bED_c}{32.6P_{max}}} - 0.1135\right) - h_0 \quad (4)$$

$$K_I(a_c) = \frac{3P_{max}sk_\beta(a_c)\sqrt{h}}{2bh^2} \quad (5)$$

$$E = \frac{1}{bC_i} [3.70 + 32.6 \tan^2(\frac{\pi}{2} a_h)] \quad (6)$$

$$P_\infty(a_c) = 1.99 + 0.83a_c - 0.31a_c^2 + 0.41a_c^3 \quad (7)$$

$$P_4(a_c) = 1.9 + 0.41a_c + 0.51a_c^2 - 0.71a_c^3 \quad (8)$$

$$k_\beta(a_c) = \frac{a_c^{1/2}}{(1 - a_c)^{2/3} (1 + 3a_c)} \{P_\infty(a_c) + \frac{4}{\beta} [P_\infty(a_c) - P_4(a_c)]\} \quad (9)$$

式中: C_i 为初始柔度,从 P - D 曲线的初始直线段得到; $a_h = (t + a_0)/(h + t)$; $a_c = a_c/h$; 跨高比 $\beta = 3$; s 为试件跨度, $s = 300 \text{ mm}$; D_c 为峰值荷载对应的裂缝张口位移; P_{max} 为峰值荷载。

2.3.3 断裂参数计算与结果分析

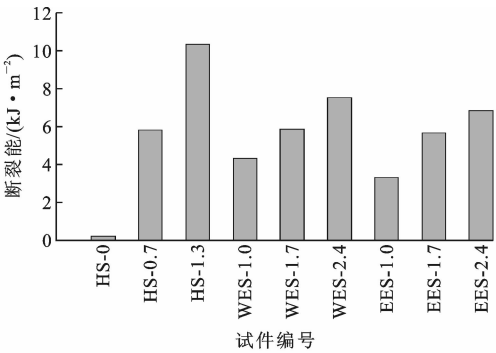
按照上述式(3)~(9)求得的断裂能、断裂韧度列于表 6,不同纤维品种、掺率下的混凝土断裂力学指标变化规律见图 7。

由表 6 可知,随着生态钢纤维掺率增加,断裂能、断裂韧度呈增加趋势。波浪型生态钢纤维掺率为 2.4% 时,断裂能和断裂韧度分别为素混凝土的

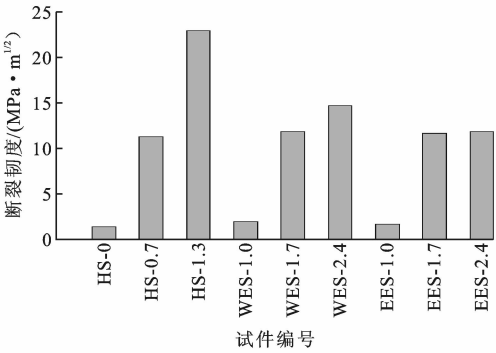
度和等效断裂韧度逐渐接近于原生高强钢纤维混凝土,这是因为掺率为 1.7% 的生态钢纤维试件峰值

表 6 断裂力学指标计算结果

试件编号	P_{\max}/kN	D_c/mm	a_c/mm	$K_I/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	$G_f/(\text{J}\cdot\text{m}^{-2})$
HS-0	7.32	0.05	42.02	1.42	212.87
HS-0.7	12.42	0.79	78.18	11.26	5 824.90
HS-1.3	16.10	1.93	83.56	22.92	10 337.29
WES-1.0	8.42	0.08	48.16	1.99	4 318.36
WES-1.7	9.77	1.15	81.68	11.86	5 873.00
WES-2.4	13.91	0.99	80.33	14.67	7 524.43
EES-1.0	8.51	0.11	42.95	1.69	3 338.24
EES-1.7	9.97	0.93	81.68	11.67	5 677.29
EES-2.4	12.86	0.77	78.57	11.85	6 833.71



(a) 断裂能



(b) 断裂韧度

图 7 纤维品种、掺率对混凝土断裂力学指标的影响
Fig. 7 Effects of Fiber Types and Volume Fractions on Fracture Mechanics Indexes of Concrete

35.35 倍、10.33 倍;压纹型生态钢纤维掺率为 2.4% 时,断裂能和断裂韧度分别为素混凝土的 32.10 倍、8.35 倍。可见波浪型和压纹型生态钢纤维能够显著提高混凝土断裂力学指标。

由图 7 可见,生态钢纤维掺率为 1.0% 时,断裂韧度与素混凝土相比无明显增加,这说明生态钢纤维掺率低对断裂性能改善作用小。生态钢纤维掺率增至 1.7% 时,断裂韧度显著提高。纤维掺率继续增至 2.4% 时,波浪型生态钢纤维混凝土断裂韧度继续增加,但压纹型生态钢纤维混凝土断裂韧度基

本无增加,理论上其值应该有一定程度的增加,其原因可能是试验误差所致。生态钢纤维混凝土断裂能基本随纤维掺率呈线性增加。

掺率为 1.7% 的生态钢纤维试件与掺率为 0.7% 的原生高强钢纤维试件断裂能和断裂韧度接近。掺率为 2.4% 的生态钢纤维试件断裂能和断裂韧度均高于掺率为 0.7% 的原生高强钢纤维混凝土,但仍低于掺率为 1.3% 的原生高强钢纤维混凝土。综合比较掺率为 1.0%,1.7%,2.4% 下 2 种生态钢纤维断裂能和断裂韧度发现,同一掺率下波浪型生态钢纤维混凝土断裂性能要优于压纹型。

3 结 语

(1)生态钢纤维较好地改善了混凝土的脆性,随着生态钢纤维掺率的增加,无切口梁四点弯曲荷载-挠度曲线峰值荷载显著增加,峰值荷载后下降段愈加平稳,切口梁三点弯曲荷载-挠度和荷载-切口张开位移曲线峰值荷载前出现明显的弹塑性段,峰值荷载后下降段愈加平缓。

(2)较低生态钢纤维掺率(1.0%)时,无论是无切口梁还是切口梁,荷载-变形曲线下降段持荷能力较差,残余强度较小,耗能能力较低,纤维增韧作用不佳,波浪型和压纹型生态钢纤维混凝土断裂韧度分别为素混凝土的 1.40 倍和 1.19 倍,纤维对裂缝的控制能力较弱;生态钢纤维掺率较高时(大于等于 1.7%),其增韧和阻裂作用效果显著,在 $15\delta_{ult,p}$ 和 $70D_{ult,p}$ 的大变形下等效弯曲强度和等效断裂韧度值较峰值挠度处韧性指标 $\sigma_{eq}(ult)$ 和 $K(ult)$ 仍无明显下降,波浪型和压纹型生态钢纤维混凝土断裂韧度分别至少为素混凝土的 8.35 倍和 8.21 倍。

(3)纤维掺率为 1.7% 的生态钢纤维混凝土和掺率为 0.7% 的原生高强钢纤维混凝土韧性、断裂性能基本处于相同水平。因此,可以用生态钢纤维代替原生高强钢纤维使用,以节约资源并降低成本。

(4)波浪型生态钢纤维增韧阻裂性能优于压纹型生态钢纤维。

参考文献:

References:

[1] 周德喜,侯建国,崔 蕾.国内外钢纤维混凝土受力性能研究述评[J]. 武汉大学学报:工学版,2008,41(增):57-60.
ZHOU De-xi,HOU Jian-guo,CUI Lei. Review of Researches on Force Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete at Home and Abroad[J]. Engineering

- Journal of Wuhan University, 2008, 41(S): 57-60.
- [2] 王志杰, 孟祥磊. 钢纤维混凝土基本力学性能研究[J]. 混凝土, 2014(4): 78-81, 86.
WANG Zhi-jie, MENG Xiang-lei. Study on Basic Mechanical Properties of Steel Fibrous Shotcrete[J]. Concrete, 2014(4): 78-81, 86.
- [3] 王海涛, 王立成. 钢纤维改善轻骨料混凝土力学性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(2): 188-194.
WANG Hai-tao, WANG Li-cheng. Experimental Study on Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(2): 188-194.
- [4] 杨萌, 黄承逵, 刘毅. 钢纤维高强混凝土抗剪性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(6): 842-846.
YANG Meng, HUANG Cheng-kui, LIU Yi. Experimental Research on Shear Behavior of High-strength SFRC[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(6): 842-846.
- [5] 高丹盈, 赵伟, 张廷毅, 等. 钢纤维体积分率对高强混凝土断裂性能的影响[J]. 工业建筑, 2008, 38(8): 50-53, 108.
GAO Dan-ying, ZHAO Wei, ZHANG Ting-yi, et al. Influence of Steel Fiber Volume Fraction on the Fracture Performance of High Strength Concrete[J]. Industrial Construction, 2008, 38(8): 50-53, 108.
- [6] 王海涛, 王立成. 钢纤维高强轻骨料混凝土弯曲韧性及抗冲击性能[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6): 1082-1086.
WANG Hai-tao, WANG Li-cheng. Flexural Toughness and Impact Resistance of Steel Fiber Reinforced High-strength Light Weight Aggregate Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(6): 1082-1086.
- [7] 卢康道, 孙伟. 钢纤维增强混凝土抗爆性能的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2002(5): 32-34.
LU Kang-dao, SUN Wei. Study on the Anti-explosion Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2002(5): 32-34.
- [8] 侯蔚峰. 钢纤维混凝土弯曲疲劳性试验及抗裂性能研究[J]. 混凝土, 2015(6): 96-99.
HOU Wei-feng. Steel Fiber Reinforced Concrete Bending Fatigue Test and Crack Resistance[J]. Concrete, 2015(6): 96-99.
- [9] 牛荻涛, 姜磊, 白敏. 钢纤维混凝土抗冻性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(4): 80-84, 98.
NIU Di-tao, JIANG Lei, BAI Min. Experimental Analysis on the Frost Resistance of Steel Fiber Reinforced Concrete[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(4): 80-84, 98.
- [10] 王艳, 牛荻涛, 苗元耀. 碳化与酸雨侵蚀共同作用下钢纤维混凝土的耐久性能[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4): 579-585, 591.
WANG Yan, NIU Di-tao, MIAO Yuan-yao. Durability of Steel Fiber Reinforced Concrete Under the Combined Effects of Carbonization and Acid Rain Erosion[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(4): 579-585, 591.
- [11] ASTM C1609-10, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforcement Concrete (Using Beam with Third-point Loading)[S].
- [12] ASTM C1018-89, Standard Test Method for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete[S].
- [13] 邓宗才. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性及评价方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1274-1280.
DENG Zong-cai. Flexural Toughness and Characterization Method of Hybrid Fibers Reinforced Ultra-high Performance Concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1274-1280.
- [14] MANNING J M, LEE C K, CERAMI A, et al. Draft Recommendation: "Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Tests on Notched Beams"[J]. Materials and Structures, 1985, 18(6): 484.
- [15] XU S, REINHARDT H W. A Simplified Method for Determining Double-K Fracture Parameters for Three-point Bending Tests[J]. International Journal of Fracture, 2000, 104(2): 181-209.
- [16] 赵艳华. 混凝土断裂过程中的能量分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
ZHAO Yan-hua. The Analytical Study on Energy in the Fracture Process of Concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.