

文章编号:1007-9629(2024)02-0099-07

玄武岩纤维棒聚合物混凝土的弯曲韧性

崔圣爱*, 徐李麟, 饶家锐, 曹卓颖

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都, 610031)

摘要:研究了玄武岩纤维棒(BFB)的纤维增强指数 I_R 对玄武岩纤维棒聚合物混凝土(BFB-PC)韧性指标 $T_{2(n-1)}(n)$ 的影响,通过分形理论探究了 $T_{2(n-1)}(n)$ 与裂缝形貌的关系,并建立了弯曲韧性计算模型.结果表明:当 $I_R=90.0$ 时,BFB对BFB-PC的增韧效果最优,此时BFB-PC的弯曲韧性比未掺BFB时提升了8.39倍;BFB的增韧阈值为 $I_R=37.5$ 和 $I_R=90.0$;当 I_R 相同时,与未掺聚合物的混凝土相比,聚灰比为0.06的BFB-PC $T_{2(n-1)}(n)$ 更高; I_R 越大裂缝形貌越复杂, $T_{2(n-1)}(n)$ 与裂缝分形维数呈二次函数关系;本文提出的弯曲韧性计算模型准确描述了BFB对PC梁的增韧作用,其试验值与理论值的相对误差小于15.00%.

关键词:聚合物混凝土;玄武岩纤维棒;纤维增强指数;韧性指标;分形维数

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.02.001

Flexural Toughness of Basalt Fiber Bar Polymer Concrete

CUI Sheng'ai*, XU Lilin, RAO Jiarui, CAO Zhuoying

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The impact of the fiber reinforcement index (I_R) of basalt fiber bars (BFB) on the toughness index $T_{2(n-1)}(n)$ of basalt fiber bar polymer concrete (BFB-PC) was investigated. The relationship between $T_{2(n-1)}(n)$ and crack morphology was discussed by fractal theory. A calculation model of flexural toughness was established. The results indicate that, compared to PC without BFB, when I_R is 90.0, BFB has the best toughening effect on BFB-PC, and the flexural toughness of BFB-PC is increased by 8.39 times. The toughening thresholds of BFB are $I_R=37.5$ and $I_R=90.0$. When the I_R is the same, $T_{2(n-1)}(n)$ of BFB-PC with the polymer-cement ratio of 0.06 is higher than that of concrete without polymer. The crack morphology becomes more complicated with the increases of I_R , and $T_{2(n-1)}(n)$ has a quadratic function relationship with the fractal dimension of the crack. The model accurately expresses the toughening effect of BFB on PC beams, and the relative error between the experimental and theoretical values is less than 15.00%.

Key words: polymer concrete; basalt fiber bar; fiber reinforcement index; toughness index; fractal dimension

作为水泥混凝土的替代品,聚合物混凝土(PC)广泛应用于排水系统、桥面铺装层等领域^[1-3].适量的聚合物能促进水泥水化,使PC具有优良的力学性能.这一方面归因于聚合物成膜后使PC内部微裂纹与应力集中减少,另一方面可能与聚合物增强界面的化学键强度有关^[4-5].但过

量的聚合物反而导致PC的力学性能降低^[6-7],比如锦江桥和成龙大道桥裂损后桥面修补比例高达61.2%和63.3%.因此,亟需改善PC的韧性,提高其抗裂性.

掺入纤维能提高复合材料的力学性能^[8-10],且与纤维增强指数 I_R (纤维掺量与长径比的乘积)有

收稿日期:2023-02-24; 修订日期:2023-04-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278277);四川省国际科技创新合作项目(2023YFH0061);成都市科技计划项目(2021-YF05-00138-SN);中央高校基本科研业务资助项目(2682021GF020)

第一作者(通讯作者):崔圣爱(1981—),女,山东费县人,西南交通大学教授,博士生导师,博士.E-mail:shengai_cui@126.com

关^[11].在微观层面上,纤维承载并传递了基体中形成的部分应力,纤维的桥接作用阻止了基体中微裂纹的发展;在宏观层面上,纤维通过抑制基体中微裂纹的发展来提高其吸收能量的能力.玄武岩纤维棒(BFB)是一种绿色环保纤维,且弹性模量和抗拉强度较高.掺入聚酰胺树脂包裹的玄武岩纤维束,试件达到峰值荷载后仍有较高的残余强度和延性^[12].

鉴于此,本文研究了不同聚灰比 m_p/m_c (质量比,文中涉及的含量、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比)和 I_R 条件下玄武岩纤维棒聚合物混凝土(BFB-PC)的弯曲韧性,分析了 I_R 对其韧性指标 $T_{2(n-1)}(n)$ (n 为未掺纤维试件峰值荷载对应挠度的倍数)的影响,探究了 $T_{2(n-1)}(n)$ 与裂缝形貌的关系,并建立了BFB-PC的弯曲韧性计算模型,以期高韧性聚合物混凝土的设计提供理论依据.

1 试验

1.1 原材料与配合比设计

水泥(C)为P·O 42.5普通硅酸盐水泥;骨料为细度模数2.7的中砂(S),级配区为Ⅱ区;聚合物(P)为丁苯乳液,固含量为50%,黏度为2 300 mPa·s;消泡剂(DA)为聚醚改性硅消泡剂,用于减少因丁苯乳液掺入而引入的气泡;减水剂为减水率25%以上的聚羧酸减水剂;拌和水(W)为自来水.硅灰(SF)的SiO₂含量为96.04%;微珠(CP)的SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃的总含量为82.45%.BFB由400根玄武岩纤维单丝和树脂包裹组成,长度 l_i 为12、15 mm,直径 d_i 为0.4 mm,密度为2 000 kg/m³,抗拉强度为2 300 MPa.设置BFB-PC的 m_p/m_c 为0、0.06,胶砂比为0.33,水胶比为0.35,BFB的体积分数 φ_i 为0%、1%、2%、3%,经试拌确定减水剂的掺量为1.8%,硅灰及微珠掺量均为胶凝材料的5.0%.BFB-PC的配合比见表1.

表1 BFB-PC的配合比

Table 1 Mix proportions of BFB-PC

Specimen	$\varphi_i/\%$	l_i/mm	Mix proportion/(kg·m ⁻³)							
			C	S	SF	CP	P	W	DA	BFB
P0B0	0		432.00	1 440.00	24.00	24.00	0	168.00	0.48	0
P0B1-12/15	1	12, 15	432.00	1 440.00	24.00	24.00	0	168.00	0.48	20.00
P0B2-12/15	2	12, 15	432.00	1 440.00	24.00	24.00	0	168.00	0.48	40.00
P0B3-12/15	3	12, 15	432.00	1 440.00	24.00	24.00	0	168.00	0.48	60.00
P6B0	0		432.00	1 440.00	24.00	24.00	57.60	139.20	0.48	0
P6B1-12/15	1	12, 15	432.00	1 440.00	24.00	24.00	57.60	139.20	0.48	20.00
P6B2-12/15	2	12, 15	432.00	1 440.00	24.00	24.00	57.60	139.20	0.48	40.00
P6B3-12/15	3	12, 15	432.00	1 440.00	24.00	24.00	57.60	139.20	0.48	60.00

1.2 试验方法

1.2.1 试件成型及养护

将BFB、胶凝材料及砂放入搅拌锅内搅拌,待材料混合均匀且纤维分散后,缓慢加入含减水剂、丁苯乳液和消泡剂的水.成型尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的胶砂试件,装模后覆盖1层不透水薄膜,防止水分散失.24 h后拆模放入标准养护室养护至7 d取出,再转入室内自然养护至规定龄期.

1.2.2 四点弯曲试验

四点弯曲试验能模拟许多工程中构件的受力情况,为了更直观地展现纤维增强水泥基复合材料的弯曲韧性,设置试件的净跨高比为3,龄期28 d.根据CECS 13—2009《纤维混凝土试验方法标准》进行四点弯曲试验,使用RTM305D型微机控制电子万能试验机加载,加载速率为0.1 mm/min,利用荷载传感器和LVDT测量弯曲荷载与跨中挠度.

2 结果与讨论

2.1 荷载-挠度曲线

试件的荷载-挠度($P-\delta$)曲线见图2.由图2可见,掺入BFB后,BFB-PC由脆性断裂转变为延性破坏,部分工况表现出明显的挠曲软化行为,具有更高的剩余承载力.由于BFB-PC峰后软化曲线较长,荷载难以降至0 N,故当挠度达到5.5 mm时停止加载,弯曲韧性为荷载-挠度曲线在挠度为0~5.5 mm下的面积.与试件P0B0相比,试件P0B2-15、P0B3-12的弯曲韧性分别提升了5.35、8.39倍,韧性提升显著.

2.2 弯曲荷载下的韧性指标

采用鞠杨法^[13]评估BFB-PC的韧性,该方法属于能量比值法.韧性指标 $T_{2(n-1)}(n)$ 是评价纤维混凝土梁、板弯曲韧性的相对指标,该值反应梁或板在

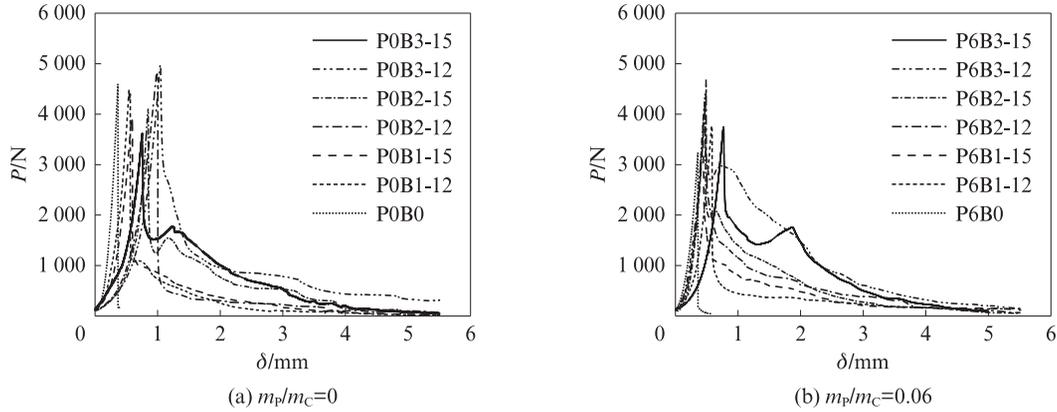


图1 试件的荷载-挠度曲线
Fig. 1 $P-\delta$ curves of specimens

四点弯曲荷载作用下的延性与吸收能量的大小. 将未掺纤维试件峰值荷载下的挠度 δ_{max} 作为荷载-挠度曲线的初始参考变形来计算 $T_{2(n-1)}(n)$, 其计算式为:

$$T_{2(n-1)}(n) = \frac{E_{n\delta_{max}} - E_{unrein}}{E_{unrein}} \quad (1)$$

式中: n 取值 3、5、7、10; E_{unrein} 为不掺纤维试件荷载-挠度曲线下的面积; $E_{n\delta_{max}}$ 为给定挠度下荷载-挠度曲线下的面积.

试件尺寸与加载方式不变时, δ_{max} 和 E_{unrein} 为材料

常数, 与纤维掺量无关^[14]. P6B0和P0B0的 δ_{max} 分别为 0.365、0.358 mm. BFB-PC 的 $T_{2(n-1)}(n)$ 见图 2. 由图 2 可见: $T_{2(n-1)}(n)$ 与 I_R 呈二次函数关系, 这与文献[14]的研究结果一致; 当 $m_p/m_c=0.06$ 时, 相关系数 $R^2 > 0.800$; 当 $m_p/m_c=0$ 时, 除了 $T_4(3)$ 外, $R^2 > 0.900$; $T_{18}(10)$ 和 $T_{12}(7)$ 的相关系数较高, $T_8(5)$ 和 $T_4(3)$ 的相关系数较低, $T_{2(n-1)}(n)$ 与 I_R 在大挠度阶段的相关性更好; 当 $m_p/m_c=0.06$ 时, BFB-PC 的 $T_{2(n-1)}(n)$ 高于其在 $m_p/m_c=0$ 时, 这与聚合物的掺入提高了纤维与基体界面黏结性能有关^[15-16].

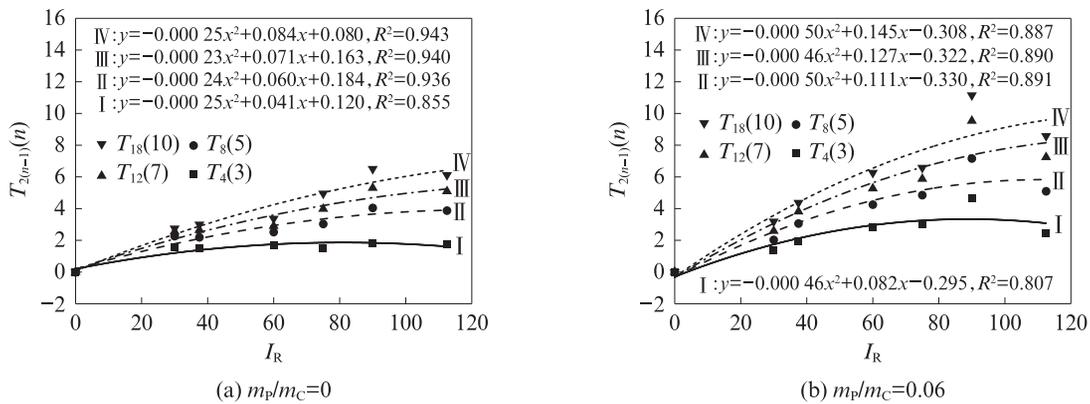


图2 BFB-PC 的 $T_{2(n-1)}(n)$
Fig. 2 $T_{2(n-1)}(n)$ of BFB-PC

由图 2 还可见: 当 $I_R < 90.0$ 时, $T_{2(n-1)}(n)$ 随着 I_R 的增大而增大, 更多、更长的纤维有利于桥接基体裂缝并消耗能量, 从而增强 BFB-PC 的弯曲韧性; $T_{2(n-1)}(n)$ 的增长率随着 n 的增大而增大, 其中 $T_4(3)$ 的增长率最低, $T_{18}(10)$ 的增长率最高, 这是因为在初裂阶段, 裂缝扩展较小, BFB 尚未充分发挥作用. 随着加载的继续进行, 挠度增大, 纤维抑制裂缝进一步扩展, 并起桥接裂缝的作用; $I_R=90.0$ 是 BFB 的增韧阈值, 当 $I_R > 90.0$ 时, 不论聚灰比和 n 取值如何, $T_{2(n-1)}(n)$ 开始减小, 因为 BFB 的长度或体积分过

高时, 纤维难以分散均匀, 从而导致基体内部薄弱面和缺陷增多, 使得抗弯性能下降; $I_R=37.5$ 是另一个阈值, 当 $I_R < 37.5$ 时, 少量 BFB 对聚合物混凝土的韧性提升有限, 试件的弯曲韧性受基体控制.

2.3 韧性指标与裂缝形貌的关系

$T_{2(n-1)}(n)$ 随 I_R 增大而增大, 同时 BFB-PC 的裂缝扩展路径与裂缝形貌变得更加曲折、复杂. 通过分形理论可以建立分形维数与材料特性之间的关系, 有效描述混凝土裂缝形态的复杂程度, 因此大量应用于断口、裂纹等领域^[17-18]. BFB-PC 的裂缝形貌与弯曲

韧性存在一定的关系,为进一步分析 I_R 与试件在大挠度下裂缝形貌的关系,采用盒计数法定量描述裂缝的分形特征.将若干个边长为 r 的盒子覆盖所有裂缝,计算非空盒子的数量,通过改变 r 形成若干盒子,计算包含裂缝的最小非空盒子数 N_r ,经多次变换 r ,求出不同的 N_r 和 $1/r$,将二者取对数进行线性回归,所得直线斜率的绝对值为裂缝分形维数 D_{box} :

$$D_{\text{box}} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N_r}{\lg(1/r)} \quad (2)$$

通过 Matlab 计算 BFB-PC 的裂缝分形维数,提

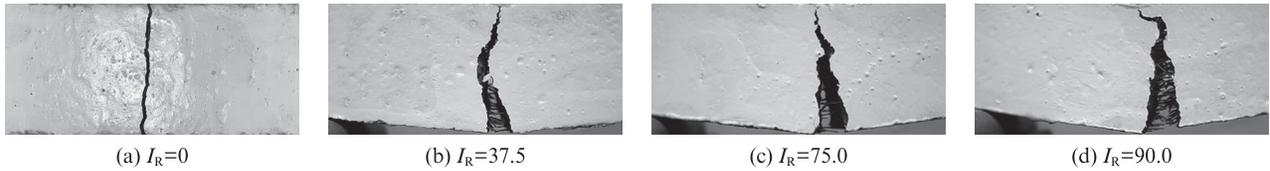


图 3 BFB-PC 的裂缝灰度图
Fig. 3 Grey images of cracks in BFB-PC ($m_p/m_c=0.06$)

BFB-PC 裂缝分形维数与 $T_{2(n-1)}(n)$ 的关系见图 4. 由图 4 可见: $T_{2(n-1)}(n)$ 与裂缝分形维数呈二次函数关系,且 $T_{2(n-1)}(n)$ 随着分形维数的增大而增大,这表明裂缝形貌越复杂, BFB-PC 开裂时消耗的能量越多,韧性指标越大;相关系数随着 n 的增大而增大,当 $m_p/m_c=0.06$ 时, $T_{18}(10)$ 的相关系数最大, $T_4(3)$ 的相

取裂缝图像,将原始图转换成灰度图,并对灰度图进行二值化处理.当 $m_p/m_c=0.06$ 时, BFB-PC 的裂缝灰度图见图 3. 由图 3 可见: 当 $I_R=0$ (不掺 BFB) 时, 试件呈脆性破坏, 断面平整, 裂缝垂直于拉伸方向; 当 $I_R=37.5$ 时, 裂缝面积增大, 扩展路径更加曲折, 这表明试件破坏时的变形能力与耗能能力提升, 这也是 BFB-PC 弯曲韧性提高的重要原因; 当 I_R 增大到 75.0、90.0 时, 裂缝复杂程度进一步提升, 这与 BFB-PC 的挠曲软化行为对应; 由于纤维的存在, 试件破坏后并没有完全断开.

关系系数最小. 值得注意的是, 本文计算的是 BFB-PC 破坏后的裂缝分形维数, 因此其与试件在大变形下的韧性指标相关性更好. 与 $m_p/m_c=0$ 的 BFB-PC (未掺聚合物) 相比, $m_p/m_c=0.06$ 的 BFB-PC 相关系数更高, 且其裂缝形貌复杂程度相对较低, 裂缝分形维数更小.

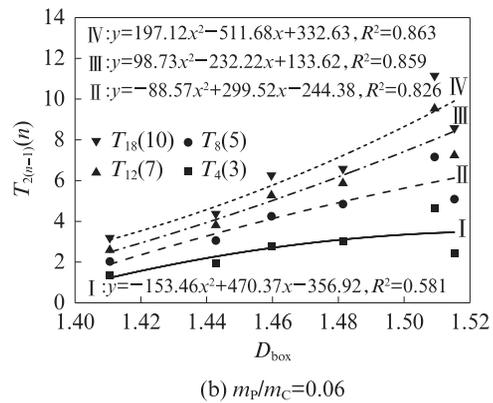
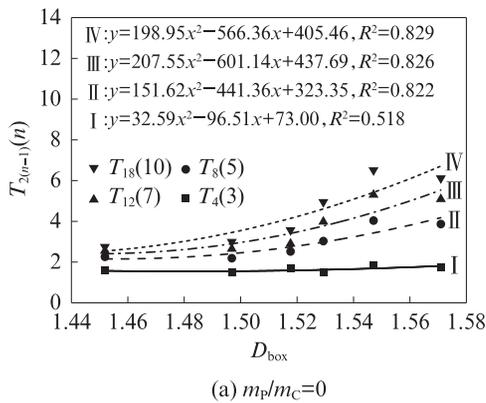


图 4 BFB-PC 裂缝分形维数与 $T_{2(n-1)}(n)$ 的关系
Fig. 4 Relationships of D_{box} and $T_{2(n-1)}(n)$ of BFB-PC

2.4 弯曲韧性计算模型

根据文献 [19] 计算纤维体积分数为 1%、2% BFB-PC 的弯曲韧性. 当复合材料中纤维取向与混凝土主拉应力方向一致时, 才能发挥 BFB 的最佳补强效果, 但实际并非如此, 故计算时考虑纤维的取向系数 η_0 . 另外, 由于纤维的不连续性, 纤维会随着基体产生裂缝而滑移, 故计算时还需要考虑纤维的长度有效系数 η_l [20].

无序分布的纤维取向系数 η_0 可通过计算得到.

由于边界效应的影响, 复合材料中单根纤维的 η_0 与其到试件边缘的距离有关. 假定纤维几何中心到试件边缘的距离为 αl_i ($0 < \alpha < 1$), α 与取向系数 η_0 的关系见图 5 [21].

当试件宽度 $t > 2l_i$ 时, BFB-PC 中 BFB 的纤维取向系数平均值 $\bar{\eta}_0$ 与 t, l_i 的关系为 [21]:

$$\bar{\eta}_0 = \left[2 \int_0^{l_i} \eta_0 dx + \frac{3}{8} (t - 2l_i) \right] / t \quad (3)$$

由计算可得, 当 l_i 为 12、15 mm 时, BFB 的 η_0 分

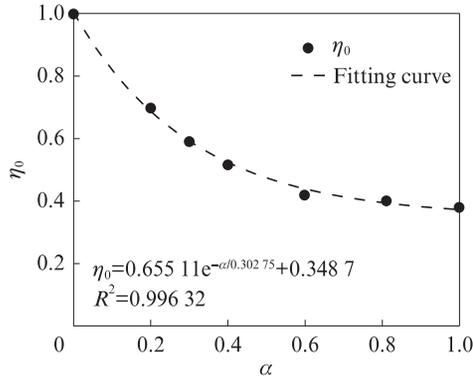


图5 边界效应对纤维取向系数的影响
Fig. 5 Influence of boundary effect on fiber orientation coefficient^[21]

别为0.474 0、0.498 8.

当BFB-PC失效时,BFB的拔出或拔断与其长度密切相关,文献[22]明确了纤维承受的拉应力与其长度的关系.当纤维长度 l_f 小于其临界长度 l_f^{crit} ($l_f < l_f^{crit}$)时,试件破坏时纤维被拔出;当 $l_f = l_f^{crit}$ 时,BFB-PC中间处出现裂缝时,纤维被拔断,否则纤维从短的嵌入侧拔出;当 $l_f > l_f^{crit}$,试件破坏时纤维被拔断.

当满足临界条件 $l_f = l_f^{crit}$ 时,得到BFB的临界长度 l_f^{crit} 为:

$$l_f^{crit} = \frac{\sigma_f^m d_f}{2\tau} \quad (4)$$

式中: σ_f^m 为BFB的抗拉强度; τ 为BFB与基体间的平均界面黏结强度.

当BFB-PC产生裂缝后,荷载开始向BFB上转移,直至纤维从基体中拔出或拔断.由BFB-PC的抗拉强度^[19] σ_{fc}^u ,可得基体与BFB的平均界面黏结强度 τ 为:

$$\tau = \frac{\sigma_{fc}^u d_f}{2\eta_0 \eta_l l_f \varphi_f} \quad (5)$$

纤维增强混凝土的抗弯强度与抗拉强度呈线性关系.为简便计算,文献[23]中纤维增强混凝土抗弯强度 σ_{fc}^b 与 σ_{fc}^u 的关系为:

$$\sigma_{fc}^b = 2.44\sigma_{fc}^u \quad (6)$$

BFB的长度有效系数 η_l 为^[24]:

$$\begin{cases} \eta_l = \frac{l_f}{2l_f^{crit}}, l_f \leq l_f^{crit} \\ \eta_l = 1 - \frac{l_f}{2l_f^{crit}}, l_f > l_f^{crit} \end{cases} \quad (7)$$

结合式(4)~(7),BFB的临界长度为:

$$\begin{cases} l_f^{crit} = \frac{l_f \sqrt{\eta_0 \sigma_f^m \varphi_f}}{\sqrt{2\sigma_{fc}^b}/2.44}, l_f \leq l_f^{crit} \\ l_f^{crit} = \frac{2\eta_0 \sigma_f^m \varphi_f l_f}{2\sigma_{fc}^u + \eta_0 \sigma_f^m \varphi_f}, l_f > l_f^{crit} \end{cases} \quad (8)$$

将单根BFB的平均功^[20]与单位体积BFB-PC中BFB的数量 N 相乘,得到弯曲韧性增量 W_a . W_a 和 N 的计算式为:

$$\begin{cases} W_a = \frac{\pi \tau d_f (l_f)^2 N}{24}, l_f \leq l_f^{crit} \\ W_a = \frac{\pi \tau d_f (l_f^{crit})^3 N}{24 l_f}, l_f > l_f^{crit} \\ N = \frac{4\varphi_f}{\pi (d_f)^2 l_f} \end{cases} \quad (9)$$

由于试件破坏后没有直接断开,这表明并非所有BFB都参与抑制裂缝扩展,因此引入高缝比 β (试件高度与裂缝长度的比值)来计算BFB的数量效率.通过Image J测量试件裂缝的长度,结果取平均值.综上,得到修正后的BFB-PC弯曲韧性增量 W_a 为:

$$\begin{cases} W_a = \frac{\beta \pi \tau d_f (l_f)^2 N}{24}, l_f \leq l_f^{crit} \\ W_a = \frac{\beta \pi \tau d_f (l_f^{crit})^3 N}{24 l_f}, l_f > l_f^{crit} \end{cases} \quad (10)$$

文中挠度指LVDT测得梁的跨中变形,试验中定义荷载-挠度曲线总积分面积得到的弯曲韧性为极限弯曲韧性.根据荷载-挠度曲线的积分面积计算试件破坏时吸收的能量.

BFB-PC梁的弯曲韧性理论参数见表2.由表2可见, $l_f < l_f^{crit}$,故试件破坏时纤维均被拔出.

表2 BFB-PC梁的弯曲韧性理论参数

Table 2 Theoretical parameters of flexural toughness for BFB-PC beams

Parameter	$m_p/m_c=0$				$m_p/m_c=0.06$			
	P0B1-12	P0B1-15	P0B2-12	P0B2-15	P6B1-12	P6B1-15	P6B2-12	P6B2-15
$N \times 10^3 / (\text{mm}^{-3})$	6.6	5.3	13.2	10.6	6.6	5.3	13.2	10.6
l_f^{crit} / mm	15.17	20.88	20.77	28.54	16.45	20.78	20.65	27.51
τ / MPa	30.28	22.04	22.14	16.11	27.94	22.14	22.23	16.70
η_l	0.396	0.359	0.289	0.263	0.365	0.361	0.291	0.273
β	0.83	0.79	0.86	0.85	0.86	0.85	0.88	0.80

BFB-PC梁的弯曲韧性增量见图6.由图6可见,BFB-PC梁的弯曲韧性增量理论值与通过荷载-挠度曲线得到的试验值间的相对误差均小于15.00%,其中试件P0B2-12的相对误差最大,为12.75%.综上所述,本文所建立的弯曲韧性计算模型可以准确描述BFB对PC梁的增韧作用.

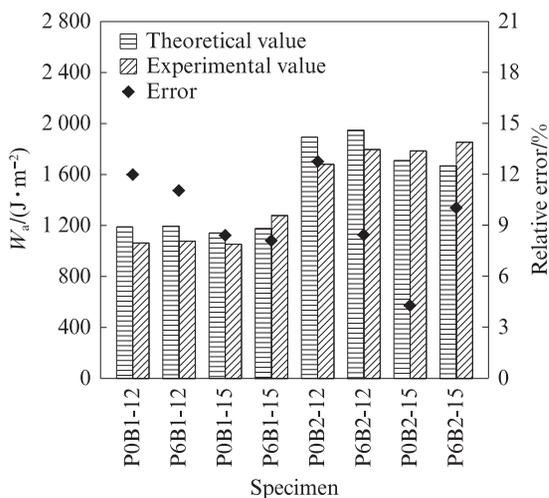


图6 BFB-PC梁的弯曲韧性增量

Fig. 6 Increment value of flexural toughness of BFB-PC beams

3 结论

(1)BFB的增韧阈值为 $I_R=37.5$ 和 $I_R=90.0$.当 $37.5 \leq I_R \leq 90.0$ 时,纤维增强指数 I_R 和聚灰比对BFB-PC的韧性指标 $T_{2(n-1)}(n)$ 产生正面影响;当 $I_R < 37.5$ 时,少量BFB对BFB-PC的韧性提升有限;当 $I_R > 90.0$ 时,BFB-PC的 $T_{2(n-1)}(n)$ 随着 I_R 的增大而减小.与不掺BFB相比,当 $I_R=90.0$ 时,BFB对BFB-PC的增韧效果最优,其弯曲韧性提升了8.39倍.随着 I_R 的增大,BFB-PC从脆性断裂转变为延性破坏,部分工况表现出明显的挠曲软化行为,具有更高的剩余承载力.

(2) $T_{2(n-1)}(n)$ 与 I_R 之间存在二次函数关系,且 $T_{2(n-1)}(n)$ 与 I_R 在大挠度阶段具有更好的相关性.随着 n 的增大, $T_{2(n-1)}(n)$ 的增长率增大.当 I_R 相同,BFB-PC聚灰比为0.06且 $T_{2(n-1)}(n)$ 高于其未掺聚合物时,掺入丁苯乳液可改善BFB与基体的界面黏结性能.

(3)随着 I_R 的增大,BFB-PC的裂缝形貌发生变化,裂缝扩展路径从直线变得非常曲折,且裂缝形貌越复杂,BFB-PC开裂时消耗的能量越多. $T_{2(n-1)}(n)$ 与裂缝分形维数呈二次函数关系,当 $I_R < 90.0$ 时, $T_{2(n-1)}(n)$ 随着分形维数的增大而增大,相关性随 n 的增大而增大.

(4)建立了考虑纤维取向系数、长度有效系数的BFB-PC弯曲韧性计算模型,理论值与试验值的相对误差均小于15.00%.故本文计算模型可靠,能够很好地描述BFB对PC梁的增韧作用.

参考文献:

- [1] 郭帆,曾磊,莫金旭,等.外掺橡胶粉的苯丙乳液改性混凝土力学性能及微观结构[J].建筑材料学报,2019,22(5):714-720. GUO Fan, ZENG Lei, MO Jinxu, et al. Mechanical properties and microstructure of styrene-acrylic emulsion modified concrete with rubber powder[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(5):714-720. (in Chinese)
- [2] 胡富贵,田小革,胡宏立,等.SBR胶乳掺量对改性乳化沥青性能的影响[J].建筑材料学报,2021,24(4):895-900. HU Fugui, TIAN Xiaoge, HU Hongli, et al. Effect of SBR latex content on performance of modified emulsified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):895-900. (in Chinese)
- [3] 李悦,朱金才,吴玉生.聚合物对超高韧性水泥基复合材料性能的影响[J].建筑材料学报,2018,21(1):26-32. LI Yue, ZHU Jincai, WU Yusheng. Effect of polymer on performance of ultra-high toughness cementitious composites[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(1):26-32. (in Chinese)
- [4] WANG R, LACKNER R, WANG P M. Effect of styrene-butadiene rubber latex on mechanical properties of cementitious materials highlighted by means of nanoindentation [J]. Strain, 2011, 47(2):117-126.
- [5] MANSUR A A P, DO NASCIMENTO O L, MANSUR H S. Physico-chemical characterization of EVA-modified mortar and porcelain tiles interfaces [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(12):1199-1208.
- [6] PENG Y, ZHAO G R, QI Y X, et al. In-situ assessment of the water-penetration resistance of polymer modified cement mortars by μ -XCT, SEM and EDS [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 114:103821.
- [7] MA R, CHEN Q, JIANG Z W, et al. Performances of UHPC bonded cementitious composite systems containing styrene-butadiene rubber latex in a chloride-rich environment [J]. Construction and Building Materials, 2022, 353:129126.
- [8] WANG X Z, HE J, MOSALLAM A S, et al. The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC) [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019:1-17.
- [9] 王俊颜,庄云芳,刘非凡,等.减缩剂和PVA纤维对超轻水泥复合材料收缩开裂行为的影响[J].建筑材料学报,2022,25(7):744-750. WANG Junyan, ZHUANG Yunfang, LIU Feifan, et al. Effect of shrinkage reduce admixture and PVA fiber on shrinkage cracking behaviors of ultra lightweight cement composite [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):744-750. (in Chinese)
- [10] 赵健,廖霖,张帆,等.碳纤维混凝土弯曲性能和纤维分布试验研究[J].建筑材料学报,2020,23(4):838-845.

- ZHAO Jian, LIAO Lin, ZHANG Fan, et al. Experimental study on flexural properties and fiber distribution of steel fiber reinforced concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(4):838-845. (in Chinese)
- [11] 李黎, 委玉杰, 李宗利, 等. 基于纤维增强指数的碱激发砂浆物理力学性能[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(8):2212-2220.
LI Li, WEI Yujie, LI Zongli, et al. Properties of alkali activated mortar fresh and hardened properties based on fiber reinforced index[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(8):2212-2220. (in Chinese)
- [12] MAHMOUD K, GHAZY A, BASSUONI M T, et al. Properties of nanomodified fiber-reinforced cementitious composites[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(10):04017173.
- [13] 鞠杨, 刘红彬, 陈健, 等. 超高强度活性粉末混凝土的韧性与表征方法[J]. *中国科学:技术科学*, 2009, 39(4):793-808.
JU Yang, LIU Hongbin, CHEN Jian, et al. Toughness and characterization methods of ultra-high strength reactive powder concrete [J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2009, 39(4):793-808. (in Chinese)
- [14] CAO M L, LI L. New models for predicting workability and toughness of hybrid fiber reinforced cement-based composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 176:618-628.
- [15] 袁宗征, 徐方, 刘苗, 等. 有机纤维与聚合物复掺改性水泥砂浆力学性能研究[J]. *材料导报*, 2015, 29(18):108-112.
YUAN Zongzheng, XU Fang, LIU Miao, et al. Study on mechanical properties of organic fiber and polymer composite-modified cements mortar[J]. *Materials Reports*, 2015, 29(18):108-112. (in Chinese)
- [16] MU B, MEYER C, SHIMANOVICH S. Improving the interface bond between fiber mesh and cementitious matrix[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(5):783-787.
- [17] TANG S W, HUANG J S, DUAN L, et al. A review on fractal footprint of cement-based materials[J]. *Powder Technology*, 2020, 370:237-250.
- [18] YAN A, WU K R, ZHANG X. A quantitative study on the surface crack pattern of concrete with high content of steel fiber [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(9):1371-1375.
- [19] 沈荣熹, 崔琪, 李清海. 新型纤维增强水泥基复合材料[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2004:49-85.
SHEN Rongxi, CUI Qi, LI Qinghai. New type fiber reinforced cement-based composites[M]. Beijing:China Building Material Industry Press, 2004:49-85. (in Chinese)
- [20] ZHANG S H, WANG Y, TONG Y P, et al. Flexural toughness characteristics of basalt fiber reinforced shotcrete composites in high geothermal environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 298:123893.
- [21] DONG S F, ZHOU D C, ASHOUR A, et al. Flexural toughness and calculation model of super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 104:103367.
- [22] HAN B G, ZHANG L Q, ZHANG C Y, et al. Reinforcement effect and mechanism of carbon fibers to mechanical and electrically conductive properties of cement-based materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125:479-489.
- [23] WANG D N, DONG S F, WANG X Y, et al. Investigating the compatibility of nickel coated carbon nanotubes and cementitious composites through experimental evidence and theoretical calculations[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 300:124340.
- [24] HAN B G, DONG S F, OU J P, et al. Microstructure related mechanical behaviors of short-cut super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete[J]. *Materials and Design*, 2016, 96:16-26.