

# 纤维协同效应下超高性能混凝土的弯曲性能

李福海, 刘耕园, 刘梦辉, 杨宗驰, 穆勃江, 苏君豪, 姜怡林

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 为研究钢-聚丙烯粗纤维对超高性能混凝土(UHPC)的弯拉性能影响,采用四点弯曲试验,得到不同掺量(钢纤维与聚丙烯粗纤维掺入体积分数分别为0、0.5%、1.0%、1.5%)组合下的荷载-挠度曲线,从试件破坏形态、抗弯强度、弯曲韧性等方面进行阐述,并且利用单掺纤维拟合公式引出一个可行性较高的评价模型,并利用该模型对混杂纤维的协同效应进行分析,最后结合扫描电子显微镜(SEM)对混杂纤维UHPC微观结构进行观测。试验结果表明:钢-聚丙烯粗纤维的掺入显著提高了UHPC的抗弯强度,提高幅度为17.8%~101.2%;同时利用提出的模型发现混杂纤维的协同效应在总纤维掺入体积分数为1.5%~2.0%时呈现正协同效应,并在钢纤维与聚丙烯粗纤维掺入体积分数为1.0%时取得最好的正协同效应;另外,与不掺纤维的试件相比,钢纤维与聚丙烯粗纤维的加入分别使基体试件的初裂韧度提升了51.8%~98.2%与33.9%~48.2%,同时在钢纤维掺入体积分数为1.0%和聚丙烯粗纤维掺入体积分数为1.0%的搭配比例下,对UHPC弯曲韧性的改善效果最优,进一步验证了纤维协同效应评价模型;最后在微观层面揭示了纤维混杂产生的协同作用及混杂纤维增强增韧机理。

**关键词:** 超高性能混凝土;混杂纤维;弯曲韧性;协同效应

中图分类号: TU528.58

文献标志码: A

## Flexural Properties of Ultra-high Performance Concrete Under Fiber Synergistic Effect

LI Fuhai, LIU Gengyuan, LIU Menghui, YANG Zongchi, MU Bojiang, SU Junhao, JIANG Yilin  
(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To study the effect of steel-polypropylene crude fiber on the bending and tensile properties of ultra-high performance concrete (UHPC), a four-point bending test was conducted to obtain different volume contents

(the content of steel fiber and polypropylene crude fiber being 0, 0.5%, 1.0%, and 1.5%). The load-deflection curve under the combination is described from the failure form, flexural strength, flexural toughness, etc., of the specimen, and a model with high feasibility is derived from the fitting formula of the single-doped fiber to analyze the synergistic effect of the hybrid fiber. Finally, the microstructure of the hybrid fiber UHPC was observed and analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The test results show that the incorporation of steel-polypropylene crude fiber significantly improves the flexural strength of UHPC, with an increase range of 17.8% to 101.2%. At the same time, using the proposed method, it is found that the synergistic effect of hybrid fibers showed a positive synergistic effect when the total fiber volume content is between 1.5% and 2.0%, and the best positive synergistic effect is obtained in S10P10. In addition, compared with the specimens without fiber, the initial crack toughness of matrix specimens increases by 51.8% to 98.2% and 33.9% to 48.2% respectively with the addition of steel fiber and polypropylene crude fiber. When the content of steel fiber is 1.0% and the volume content of polypropylene crude fiber is 1.0%, the improvement to the bending toughness of UHPC is the best, which further verifies the evaluation model of fiber synergy effect. Finally, the synergistic effect and the toughening mechanism of the hybrid fiber are revealed at the micro level.

**Key words:** ultra-high performance concrete (UHPC); hybrid fibers; bending toughness; synergistic effect

1994年Larrard与Sedran<sup>[1]</sup>提出了超高性能混凝土(ultra high performance concrete, UHPC)的概念,因其具有的高强度、优异的耐久性和低渗透性<sup>[2]</sup>等

收稿日期: 2023-03-27

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600900);四川省科技厅项目(2021YJ0545, 2021JDTD0012);国家自然科学基金(U2034205)

第一作者: 李福海(1979—),男,高级工程师,工学博士,主要研究方向为混凝土耐久性、高性能混凝土。

E-mail: lifuhai2007@swjtu.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

优势,广泛应用于桥梁工程、建筑工程、军事防护工程、市政、电力、轨道交通工程等领域,具有十分广阔的应用空间与前景<sup>[3]</sup>。但同时UHPC也存在更大的脆性问题<sup>[4]</sup>,解决此问题的方式之一是加入不同种类与尺度的纤维<sup>[5]</sup>。陈倩等<sup>[6]</sup>指出体积分数为1.5%的钢纤维和长径比为167、体积分数为0.1%的聚丙烯粗纤维的混凝土综合性能最优,并表现出了正混杂效应。Ganesan等<sup>[7]</sup>研究表明钢纤维与聚丙烯纤维的混杂表现出正协同作用,增强了混凝土的抗拉和抗裂性能。Rashiddadash等<sup>[8]</sup>测试了混杂纤维混凝土的韧性指标,得出钢纤维体积分数为0.75%、聚丙烯粗纤维体积为0.25%的混凝土综合性能最优。Sivakumar等<sup>[9]</sup>研究表明钢-聚丙烯纤维混杂的各方面性能均优于其他纤维组合。孔祥清等<sup>[10]</sup>、吴海林等<sup>[11]</sup>的研究结果也同样表明混杂纤维混凝土的弯曲韧性、抗裂能力均优于掺单一纤维。由此可见,混杂纤维可以从多方面改善混凝土性能。本文在前人基础上从多方面评价钢-聚丙烯粗纤维在单掺、混掺模式下的UHPC的弯曲韧性,同时提出一种可用于评价混杂纤维协同效应的预测模型,并在2种弯曲韧性方法下验证了其可行性,最后结合扫描电子显微镜(SEM)对混杂纤维UHPC微观结构进行观测分析,进一步揭示混杂纤维产生的微观协同作用及增强增韧机理。

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

① 水泥:P. O42.5R级普通硅酸盐水泥;② 粉煤灰漂珠:粉煤灰漂珠,比表面积 $10.99\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ,堆积密度 $750\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;③ 硅灰:SF-95型二氧化硅微粉;④ 骨料:采用10~20目、40~70目2种级配石英砂;⑤ 水:成都市普通自来水;⑥ 减水剂:聚羧酸系高效减水剂(减水率大于30%);⑦ 纤维:长径比65的平直型镀铜钢纤维与长径比58的平直型聚丙烯粗纤维,其外观与性能见图1与表1。

### 1.2 试件设计

UHPC基准配合比见表2。为探究混杂纤维对UHPC的增强作用,掺加钢纤维与聚丙烯粗纤维体积分数分别为0、0.5%、1.0%、1.5%,相应命名为S00、S05、S10、S15与P00、P05、P10、P15,如掺体积分数为1.0%钢纤维与体积分数为0.5%聚丙烯粗纤维的命名为S10P05。其中纤维混杂试验共9组,单掺纤维及不加纤维的对比试验7组,共16组,每组

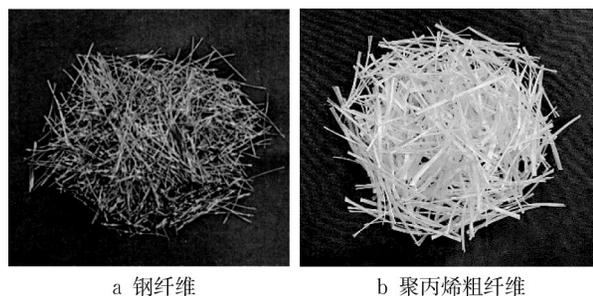


图1 纤维外观

Fig. 1 Fiber appearance

表1 纤维主要参数

Tab. 1 Main parameters of fiber

纤维	直径/mm	长度/mm	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	抗拉强度/MPa
钢纤维	0.20	13	7.80	$\geq 2850$
聚丙烯粗纤维	0.55	32	0.92	$\geq 500$

3个试件取平均值。

表2 超高性能混凝土基准配合比

Tab. 2 UHPC benchmark mix ratio

单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$					
水泥	粉煤灰	硅灰	石英砂	减水剂	水
646	168	159	1073	21	176

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 抗弯试验

UHPC弯拉强度测试参照《纤维混凝土试验方法标准》(CECS13—2009),试件尺寸为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 400\text{mm}$ ,每组3个试件,浇筑28d后在量程为300kN的电液伺服万能试验机上进行四等分点加载,利用自行设计的跨中变形测量辅助架以及固定在试件两端的位移传感器(LVDT)测量跨中变形,如图2所示。图中, $L$ 为试件长度, $l$ 为加载点之间的距离, $P$ 为荷载。在正式加载前对试件进行预加载,预加载速率为 $100\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$ ,达到开裂荷载的20%,目的是为了使试件和加载架充分接触,并且通过位移计读数判断是否出现偏心,重复3次。接着对试件进行正式加载,以 $100\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速率加载到极限荷载的60%,然后采用位移加载,加载速率为 $0.2\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,直至试件破坏。

#### 1.3.2 微观试验

为进一步分析钢-聚丙烯粗纤维对UHPC的增强增韧作用,对抗弯试验后混凝土断面附近进行破碎处理,采用KYKY-EM3200型SEM观测混杂纤维UHPC基体以及纤维的微观形貌。

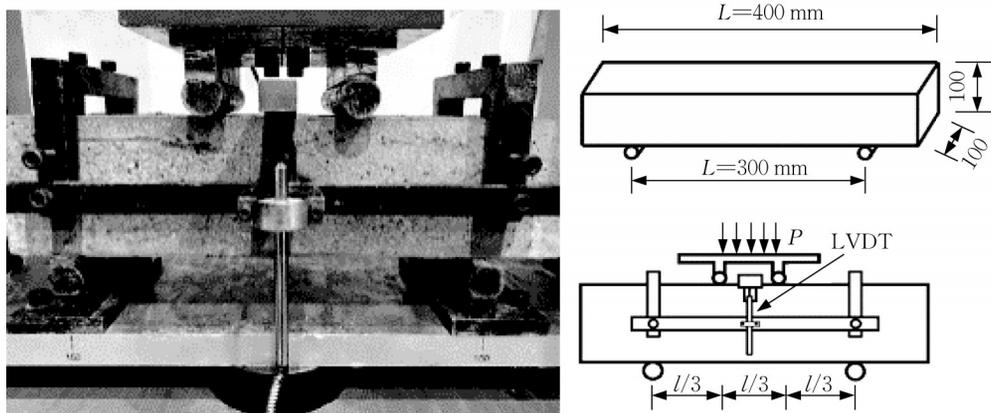


图 2 弯拉强度测试

Fig. 2 Flexural strength test

## 2 试验结果

### 2.1 试件破坏形态

通过对不同纤维种类与掺量的 UHPC 试件进行抗弯试验,得到图 3 典型的几种弯拉破坏形态。其中无纤维试件随着荷载的增加底部突然裂开,失去承载能力,其大裂缝走向几乎为一条直线,试件发生脆性破坏,见图 3a;单掺体积分数为 1.0% 钢纤维试件的裂缝走向较曲折,破坏时有一定的持荷时间,说明钢纤维的掺入起到了增加抗弯强度( $f_t$ )的作用,见

图 3b;混掺体积分数为 1.0% 钢纤维与部分聚丙烯粗纤维的试件随荷载的增加,底部出现主裂缝,同时随着主裂缝延伸,四周出现部分微小裂缝,并且随着聚丙烯粗纤维掺量的增加,主裂缝走向更加曲折,微裂缝数量增加,甚至有不连续裂缝出现,当荷载增加时,在裂缝里有许多纤维处于绷直受力状态,延缓了裂缝扩张,延长破坏的持荷时间,这些多种裂缝的出现分散了主裂缝上的应力集中效应,增加了试件韧性,见图 3c、3d 与 3e。以上结果均表明,钢-聚丙烯粗纤维混杂 UHPC 比单掺纤维 UHPC 具有更大的韧性和延性。

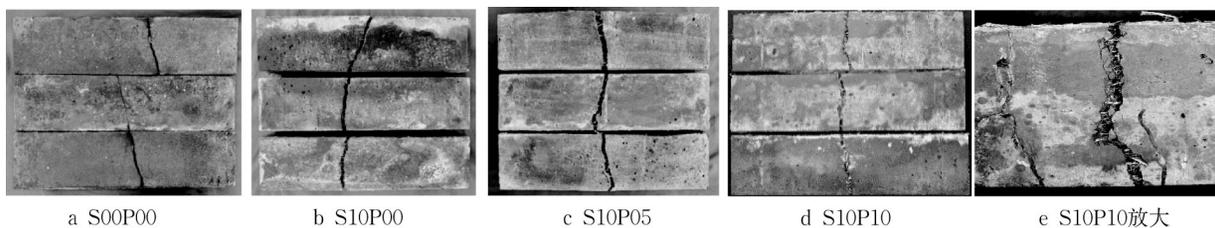


图 3 超高性能混凝土典型弯拉破坏形态

Fig. 3 Typical flexural failure form of UHPC

### 2.2 荷载-挠度曲线

图 4 中, $P_{cr}$ 为初裂荷载, $\delta_{cr}$ 为初裂挠度, $P_{peak}$ 为峰值荷载, $\delta_m$ 为峰值挠度,UHPC 的荷载-挠度曲线特征根据试件的不同破坏模式分为 3 个阶段。

(1) 弹性阶段 OA: 试件加载初期,UHPC 基体和纤维共同受力,随着挠度的增大,荷载几乎呈线性增加,直至在试件底部形成第 1 条裂缝,达到开裂荷载。

(2) 挠曲硬化阶段 AD: 达到开裂荷载后,部分试件中桥接在裂缝两端的纤维开始受力并把一部分应力传递给纤维表面的未开裂基体,使 UHPC 能够继

续承担荷载,当纤维增强增韧能力大于裂缝开展带来的破坏时,试件承载力继续上升,表现为纤维对基体的二次强化,此后裂缝不断延伸和开展,使纤维失效,试件破坏。

(3) 挠曲软化阶段 AB: 达到开裂荷载后,裂缝开展使试件承载力出现小幅度骤降,尽管纤维接管开裂处的荷载使试件承载力有所回升,表现出二次强化,但试件中纤维增强增韧能力不能弥补裂缝开展带来的破坏,试件的承载力总体呈逐渐下降趋势,当竖向裂缝扩展到梁顶时,试件失去承载力。

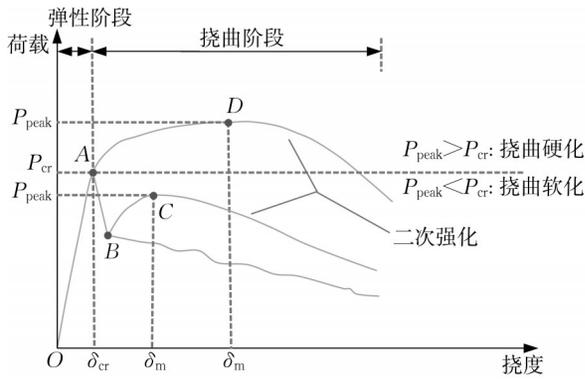


图 4 荷载-挠度曲线示意

Fig. 4 Schematic diagram of load-deflection

2.2.1 单掺钢纤维与聚丙烯粗纤维

单掺纤维的荷载-挠度曲线如图5所示。对于图5a,随着钢纤维的掺量增加,UHPC的破坏模式由脆性破坏转变为延性破坏,并显著提高了UHPC的抗

弯强度,如图5c与表3所示,当掺入0.5%、1.0%和1.5%的钢纤维时,UHPC的抗弯强度分别提升了4.0%、69.7%和99.9%,并且对初裂强度( $f_{cr}$ )也有较大的提升,说明钢纤维对抑制微裂缝产生有较大作用。

图5b表明,聚丙烯粗纤维的掺入同样改变了UHPC的破坏模式,但对UHPC的抗弯强度与初裂强度提升微弱。如图5c与表3所示,当掺入0.5%、1.0%和1.5%的聚丙烯粗纤维时,UHPC的抗弯强度分别提高了1.5%、5.7%、6.7%。同时,当混杂纤维总体积掺量相同时,S10P05试件的抗弯强度大于S05P10试件,S15P05试件的抗弯强度大于S10P10试件,说明钢纤维对UHPC抗弯强度的提升效应大于聚丙烯粗纤维。可以解释为聚丙烯粗纤维弹性模量较低,与高模量钢纤维相比,强度增强作用不明显<sup>[12]</sup>。

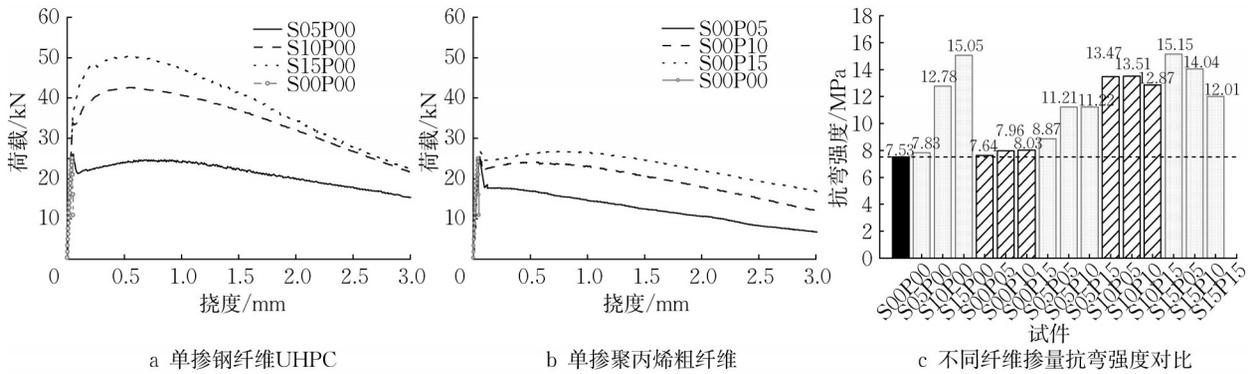


图 5 单掺纤维超高性能混凝土荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection curve of single fiber UHPC

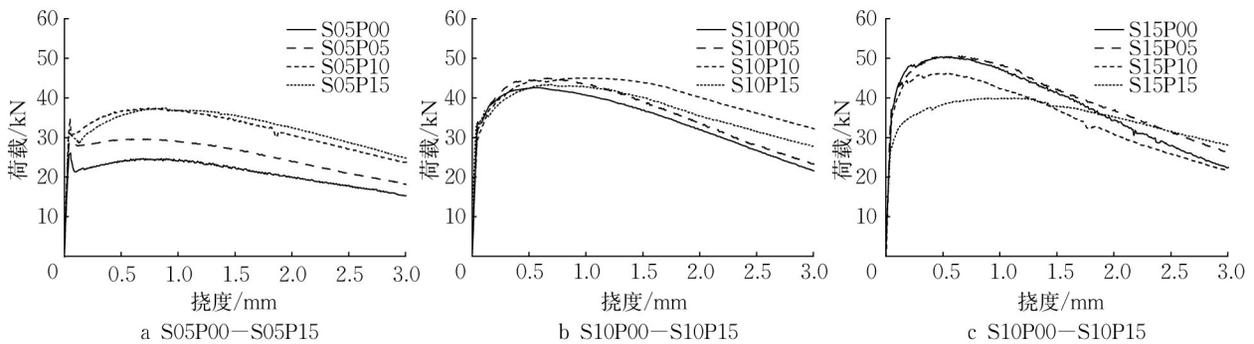


图 6 混杂纤维超高性能混凝土荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load-deflection curve of hybrid fiber UHPC

2.2.2 混掺钢纤维与聚丙烯粗纤维

如图5c与表3,混杂纤维显著提高了UHPC的抗弯强度,提高幅度为17.8%~101.2%,说明不同混杂纤维对UHPC的增强效应较复杂,特别是S15P15较S15P00的抗弯强度下降了20.2%,再一

次说明聚丙烯粗纤维对抗弯强度的提升有限,且掺量过高时会导致强度降低。

从图6还可以看出,当钢纤维掺量相同时,混杂纤维UHPC的荷载-挠度曲线随着聚丙烯粗纤维掺量的提高更为饱满、平缓,这是由于聚丙烯粗纤维减

表 3 四点弯曲试验结果

Tab. 3 Four-point bending test results

试件名称	$f_{cr}/\text{MPa}$	$f_t/\text{MPa}$	$\Delta f_t/\%$	峰后强化	试件名称	$f_{cr}/\text{MPa}$	$f_t/\text{MPa}$	$\Delta f_t/\%$	峰后强化
S00P00	7.53	7.53	—	—	S05P10	9.15	11.21	48.9	挠曲硬化
S05P00	7.85	7.83	4.0	挠曲软化	S05P15	9.10	11.22	49.0	挠曲硬化
S10P00	9.33	12.78	69.7	挠曲硬化	S10P05	9.50	13.47	78.9	挠曲硬化
S15P00	11.12	15.05	99.9	挠曲硬化	S10P10	9.69	13.51	79.4	挠曲硬化
S00P05	7.68	7.64	1.5	挠曲软化	S10P15	9.84	12.87	70.9	挠曲硬化
S00P10	8.00	7.96	5.7	挠曲软化	S15P05	9.38	15.15	101.2	挠曲硬化
S00P15	8.77	8.03	6.7	挠曲软化	S15P10	10.70	14.04	86.5	挠曲硬化
S05P05	8.39	8.87	17.8	挠曲硬化	S15P15	10.34	12.01	59.5	挠曲硬化

小了宏观裂缝的扩展,增强了基体的增韧效果<sup>[13]</sup>。同时,从图 5a 和图 6b 以及图 6c 可以观察到,无论是否加入聚丙烯粗纤维,当钢纤维掺入体积分数达到 1.0% 后,UHPC 试件的峰值荷载均超过开裂荷载,即出现了挠曲硬化现象。

### 2.3 纤维与挠曲阶段关系

如图 5、图 6,与素 UHPC 相比,纤维的加入极大地改善了 UHPC 挠曲阶段的曲线,具体如下:

(1) 钢纤维掺入体积分数为 0.5% 及以下时,聚丙烯粗纤维比钢纤维的直径与长度大,单位面积 UHPC 中纤维数量较少,不能有效阻止裂缝出现,而低掺量钢纤维与聚丙烯粗纤维对 UHPC 基体增强有限,使试件初裂强度较低,同时试件初裂后横贯裂缝的纤维开始发挥主要作用,通过自身变形与机械锚固消耗断裂能<sup>[14]</sup>,对抗裂缝的发展,使基体重新具有持荷能力,呈现出“二次强化”阶段,但同样由于纤维增强有限,曲线多表现为挠曲软化现象。

(2) 钢纤维掺入体积分数为 1.0% 及以上时,钢-聚丙烯混杂纤维协同效应增强,高掺量的高弹模钢纤维均匀分布在 UHPC 基体中,通过与基体的紧密黏结,抑制裂缝出现,使试件的初裂强度大幅增加<sup>[15]</sup>。此后低弹模的聚丙烯粗纤维也发挥作用,大体积掺量的混杂纤维使裂缝周围的应力重分布<sup>[16]</sup>,平滑地接管了断裂面基体的持荷能力,曲线达到开裂荷载后不再下降,在混杂纤维的多项约束系统作用下,峰后“二次强化”段与“弹性强化”段融合,表现为曲线的“持续强化”,峰值荷载增加,表现出明显的挠曲硬化现象。

(3) 总纤维掺入体积分数大于 2.0% 时,峰值荷载反而下降,这是因为太高的掺量导致纤维在 UHPC 基体内的平均间距减小,当小到一定程度后导致纤维在基体内分散不均、相互结团,影响与基体间的黏结性能,造成混凝土内部缺陷增多,导致抗弯强度降低<sup>[17]</sup>。

### 2.4 纤维协同效应

为进一步探究混杂纤维对 UHPC 的协同效应,参考纤维混凝复合材料理论公式(1)<sup>[18-19]</sup>,对单掺纤维的抗弯强度进行拟合分析。

$$f_i = f_b(1 - V_f) + \alpha\tau V_f \frac{c}{d} \quad (1)$$

式中: $f_i$ 为 UHPC 的抗弯强度; $f_b$ 为素 UHPC 的抗弯强度; $V_f$ 为纤维掺入体积分数; $\alpha$ 为纤维方向系数的乘积; $\tau$ 为纤维与素混凝土基质间的平均黏结应力, $\alpha\tau$ 可看作纤维与混凝土之间的黏结系数; $c$ 为纤维长度; $d$ 为纤维直径。

式(1)可分为基体与纤维两部分, $f_b(1 - V_f)$ 代表基体受力,主要作用在图 4 的弹性阶段; $\alpha\tau V_f c/d$ 代表纤维受力,对图 4 的挠曲阶段影响较大。采用 2 种不同的纤维,意味着  $\alpha\tau$  与  $c/d$  不同,为探究混杂纤维的对抗弯强度的不同影响,令  $k = \alpha\tau c/d$ ,提出式(2):

$$f_i = f_b(1 - V_{f,t}) + k_s V_{f,s} + k_p V_{f,p} \quad (2)$$

式中: $V_{f,t}$ 为总纤维掺入体积分数; $V_{f,s}$ 为钢纤维掺入体积分数; $V_{f,p}$ 为聚丙烯粗纤维掺入体积分数; $k_s$ 、 $k_p$ 分别为钢纤维与聚丙烯粗纤维对混凝土的影响系数。

同样地, $f_b(1 - V_{f,t})$ 代表混杂纤维中的基体受力, $k_s V_{f,s}$ 代表钢纤维受力大小, $k_p V_{f,p}$ 代表聚丙烯粗纤维受力大小。利用单掺纤维的  $f_i$  拟合式(1)得到曲线如图 7,得到不同纤维的  $k_s$ 、 $k_p$ ,将其代入式(2),可以得到混掺纤维的  $f_i$  预测曲线如图 8。

由图 7 可知,单掺纤维的曲线拟合度较好,说明式(1)可以很好地反映钢纤维与聚丙烯粗纤维分别在不同单独掺入体积分数下的 UHPC 抗弯强度变化,同时表明  $k$  值符合 2 种纤维在基体中的受力情况。

值得注意的是,由式(1)推导出的式(2)仅考虑了各纤维在基体中的独立作用。然而实际情况中,钢纤维与聚丙烯粗纤维混杂具有一定的协同效应,

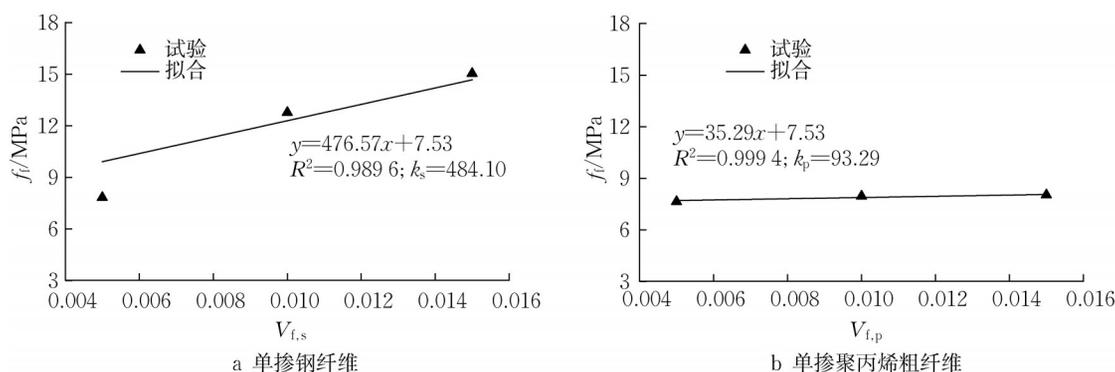


图7 单掺纤维下抗弯强度拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of flexural strength with single-doped fiber

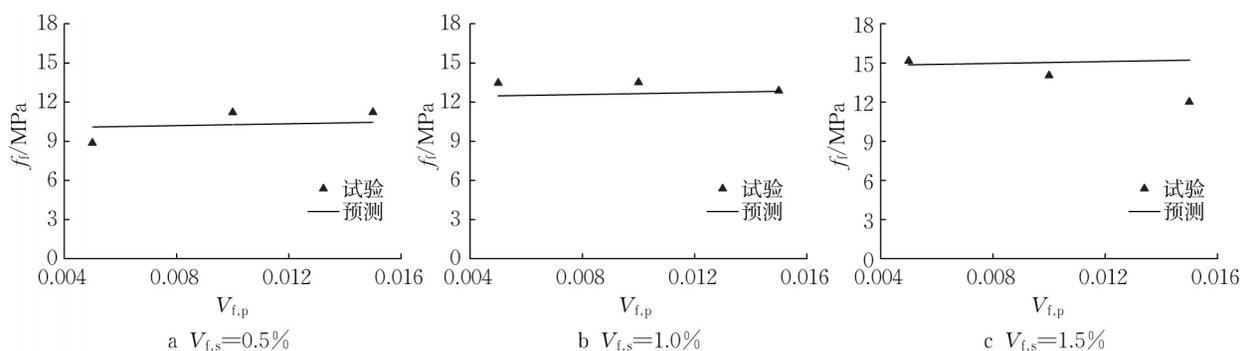


图8 混杂纤维的试验值与预测值

Fig. 8 Experimental and predicted values of hybrid fibers

这部分作用在式(2)计算中未体现,所以图8中试验值与预测曲线具有一定的偏差,这部分偏差即是混杂纤维协同效应的体现,并且偏差越大,协同效应越大。故图8中试验值在预测曲线之下表现了混杂纤维的负协同效应,在曲线之上的表现了混杂纤维的正协同效应。

如图8所示,随 $V_{f,i}$ 的提高,UHPC的抗弯强度先增加后降低,混杂纤维在 $V_{f,i}$ 较低与较高时都呈现负协同效应,当 $1.5\% \leq V_{f,i} \leq 2.0\%$ 时,混杂纤维呈现正协同效应,这主要与纤维掺量过低和过高时的分布不均有关,这与2.3节分析吻合,说明该评价方法有一定可行性,而S10P10抗弯强度较高,且超过预测曲线更多,正协同效应最大,说明此时混杂纤维在基体中能最大发挥作用。

另外,试验中 $k_s$ 、 $k_p$ 分别代表钢纤维与聚丙烯粗纤维的增强作用,牛建刚等<sup>[20]</sup>提到 $\alpha\tau$ 与二次强化段有关,即纤维的增强作用主要集中在挠曲阶段,本研究中 $c/d$ 相近, $k$ 可代表 $\alpha\tau$ ,而 $k_s$ 、 $k_p$ 相差较大的主要原因是钢纤维与聚丙烯粗纤维对挠曲阶段的二次强化效应相差较大,钢纤维对UHPC的增强作用远大于聚丙烯粗纤维,且二次强化段越大, $k$ 值越大。

综上,式(2)可用于评价混杂纤维的协同效应,同时得出钢纤维与聚丙烯粗纤维掺入体积分数分别为1%时增强效应最优。

## 2.5 弯曲韧性

为进一步评价混杂纤维的增韧作用与2.4节模型的可行性,采用ASTM C1018标准<sup>[21]</sup>与Banthia等<sup>[22]</sup>提出的PCS评价方法进行弯曲韧性评价。

ASTM C1018标准中评价方法中弯曲韧性指数量纲为一,利用韧性指数 $I_5$ 、 $I_{10}$ 和 $I_{20}$ 来衡量纤维混凝土的弯曲韧性和吸收能量的能力。

$$I_5 = \frac{\Omega_{3\delta}}{\Omega_\delta}, I_{10} = \frac{\Omega_{5.5\delta}}{\Omega_\delta}, I_{20} = \frac{\Omega_{10.5\delta}}{\Omega_\delta} \quad (3)$$

式中: $\delta$ 为初裂挠度; $\Omega_\delta$ 、 $\Omega_{3\delta}$ 、 $\Omega_{5.5\delta}$ 和 $\Omega_{10.5\delta}$ 表示挠度,分别为 $\delta$ 、 $3\delta$ 、 $5.5\delta$ 和 $10.5\delta$ 时对应的荷载-挠度曲线与坐标轴所围的面积。

PCS法以峰值挠度为界,将荷载-挠度曲线分为峰前( $E_{pre}$ )和峰后( $E_{post,m}$ )2个区域,通过计算峰值荷载后的等效抗弯强度 $P_{CS,m}$ 来表征纤维混凝土的弯曲韧性。

$$P_{CS,m} = \frac{E_{post,m}L}{\left(\frac{L}{M} - \delta_m\right)bh^2} \quad (4)$$

式中: $P_{CS,m}$ 为峰值荷载后等效抗弯强度,MPa; $E_{post,m}$

为  $\delta_m$  后荷载-挠度曲线的面积;  $L$  为试件跨度;  $b$  和  $h$  为试件横截面尺寸;  $\delta_m$  为峰值挠度;  $m$  为变量, 推荐

取值范围为 150~3 000, 本文取 150 和 200。计算得到弯曲韧性结果如图 9 所示。

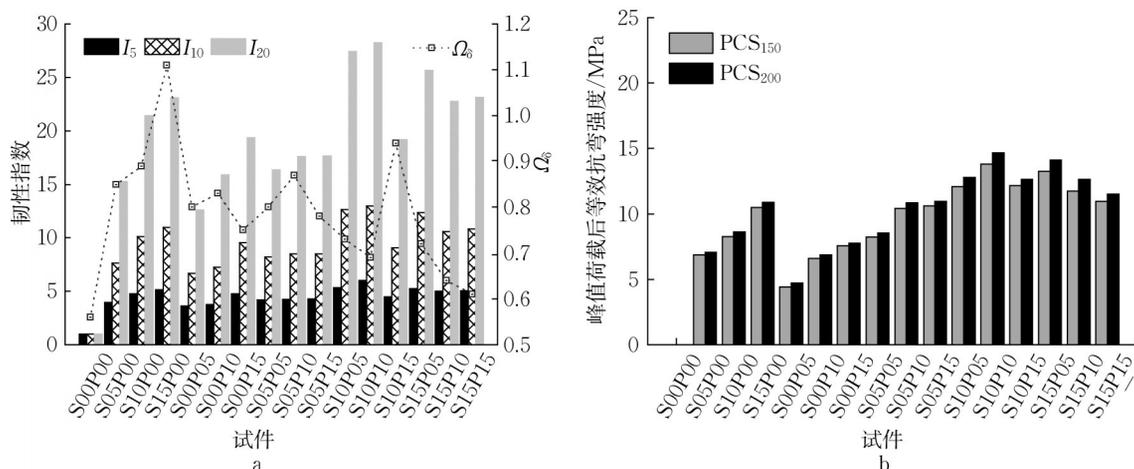


图 9 纤维掺量对弯曲韧性的影响

Fig. 9 Effect of fiber content on bending toughness

通过图 9a 看出纤维掺量对韧性指数的变化规律, 可以看出纤维的掺入能显著提升韧性指数, 如 2.3 节所述, 纤维对 UHPC 的提升主要体现的挠曲阶段, 此时基体开裂时, 向纤维传递了较大的拉应力, 致使纤维在裂纹表面被拉出或变形, 良好的纤维桥接效应使 UHPC 能够继续承担荷载<sup>[23]</sup>。钢纤维的加入使 UHPC 的初裂韧度提升了 51.8%~98.2%, 聚丙烯粗纤维使 UHPC 的初裂韧度只提升了 33.9%~48.2%, 韧性指数也比钢纤维提升较低, 可见在相同掺量下, 钢纤维对初裂韧度和韧性指数的提升较大。而对于混杂纤维的 UHPC 试件而言, 当钢纤维掺入体积分数为 0.5% 时, 提高聚丙烯粗纤维掺量, 各阶段韧性指数也随之提高, 较 S05P00 试件,  $I_5$ 、 $I_{10}$  和  $I_{20}$  的提高幅度分别为 5.3%~7.7%、7.6%~11.6% 和 7.4%~15.9%。而当钢纤维掺入体积分数提升到 1.0% 与 1.5% 时, 随聚丙烯粗纤维掺量的提升, 各阶段的韧性指数都是先增加后减少, 此外, S10P10 试件各阶段韧性指数在各试件中达到最高, 其韧度指数  $I_5$ 、 $I_{10}$  和  $I_{20}$  较素 UHPC 分别提升了 6.03、12.98 和 28.24 倍, 可以说明按照 ASTM C1018 评价方法计算的掺入体积分数为 1.0% 的钢纤维且掺入体积分数为 1.0% 的聚丙烯粗纤维 UHPC 试件的弯曲韧性最佳。

从等效抗弯强度上分析, 钢纤维与聚丙烯粗纤维均能改善 UHPC 的峰后行为, 从图 9b 可知, 单掺钢纤维 UHPC 试件的等效抗弯强度总体上大于单掺聚丙烯粗纤维 UHPC 试件的等效抗弯强度, 说明钢

纤维对峰后行为的提升较大, 且钢纤维掺量越大, 提升效果越好。对于混杂纤维的 UHPC 试件, 当钢纤维掺入体积分数为 0.5% 时, UHPC 试件的等效抗弯强度随聚丙烯粗纤维掺量的提高呈递增趋势, 而当钢纤维体积率为 1.0% 和 1.5% 时, 等效抗弯强度随聚丙烯粗纤维掺量的提高先增加后减小, 且 S10P10 的等效抗弯强度达到最大, 峰后行为最好, 更进一步说明了此掺量下的钢纤维能充分发挥高弹模的特点, 最大程度提高 UHPC 的强度, 聚丙烯粗纤维能充分发挥低弹模、大变形、长度长的特点, 最大程度改善 UHPC 韧性和延性, 两者混杂能够起到正协同作用。

结合韧性指数与等效抗弯强度 2 种弯曲韧性评价方法, 均可知 S10P10 组试件弯曲韧性最好, 与式 (2) 得到的结果一致, 进一步验证该评价方法有较高的可行性。

## 2.6 混杂纤维增强机理

为探究混杂纤维下正协同效应的增强增韧机理, 对 S10P10 弯曲韧性试验破坏后的 UHPC 断面取样后进行 SEM 分析, 微观结构如图 10、图 11 所示。

混杂纤维的加入提高了 UHPC 的强度与韧性, 改善了其脆性破坏特性, 图 10 与图 11 是 UHPC 试件断面上钢纤维和聚丙烯粗纤维与水泥浆体结合的微观结构, 由图 10 可知, 钢纤维和聚丙烯粗纤维在断裂破坏时通过桥接在裂缝两端发挥作用, 对裂缝的进一步开展起到抑制效果, 这种桥接作用改善了裂缝区域的应力分布, 提高了整体强度<sup>[24]</sup>。

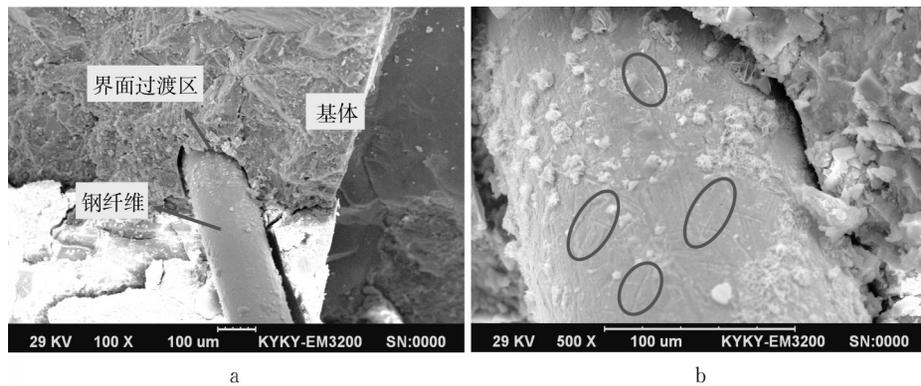


图 10 钢纤维与水泥浆界面微观结构

Fig. 10 Microstructure of the interface between steel fiber and cement slurry

由图 10b 可以发现,钢纤维表面有大量划痕和附着在表面的混凝土材料,这是由于裂缝持续扩展,钢纤维脱黏拔出产生的,说明钢纤维与 UHPC 基体黏结性强,并通过滑移脱黏耗能抑制初期微裂缝的发展<sup>[25]</sup>。由图 11a 可见,表面经过特殊工艺处理后的聚丙烯粗纤维与基体牢牢黏结在一起,纤维表面附着大量混凝土材料;另外,从图 11b 可以观察到聚丙烯粗纤维表面和端部被撕裂成丝,并相互缠绕,界面被撕裂成毛糙状。以上现象都说明聚丙烯粗纤维发挥出了其高变形、与水泥浆黏结力强的优势。这与之前观察的破坏形态分析相吻合,综上所述,钢纤维和聚丙烯粗纤维与 UHPC 基体结合良好,钢纤维的拉拔作用和聚丙烯粗纤维的高延性保证了混杂纤维增强 UHPC 具有高强度和优异韧性,两者可以混合到 UHPC 基体中,起到积极的协同作用。

基于 Qian 等<sup>[26]</sup>提出混杂纤维系统吸引力优势,结合上述说明,对钢-聚丙烯粗纤维两者的混杂对 UHPC 的增强增韧作用进行分析。不同弹模和不同尺度的钢纤维与聚丙烯粗纤维对 UHPC 的增强增韧

作用可归结为纤维在各个阶段对基体内各种裂缝的抑制作用<sup>[5]</sup>。在弯拉荷载作用下,混凝土的破坏过程实际上就是微裂纹萌生、扩展延伸形成宏观裂缝贯穿至试件顶部的过程。钢纤维和聚丙烯粗纤维在基体内乱向分布且相互搭接缠绕,由于钢纤维具有较高的弹性模量和强度<sup>[27]</sup>,在加载初期,钢纤维的变形量很小,对初始微裂纹有较强的抑制作用,随外荷载持续增加,UHPC 基体内薄弱面微裂纹贯穿,此处的应力重新分配,在断面处起桥接作用的纤维开始承受荷载并将荷载传递给基体中未开裂部分,见图 12;随着外荷载继续增加,试件变形持续增大,当微裂纹不断扩张发展为裂缝,裂缝延伸融合,最后产生宏观裂缝时,短钢纤维与基体间的机械咬合力和黏结力开始减小,钢纤维大部分脱黏拔出,此时粗且长的低弹模聚丙烯粗纤维发生较大变形后开始发挥增强增韧作用<sup>[28]</sup>。如此反复,直至试件破坏。因此,将 2 种不同尺度、不同性质的钢纤维和聚丙烯粗纤维混杂,可使纤维在混凝土断裂过程中的不同应力水平发挥各自作用,达到逐级阻裂的目的,进一步提高混凝土强度和韧性。

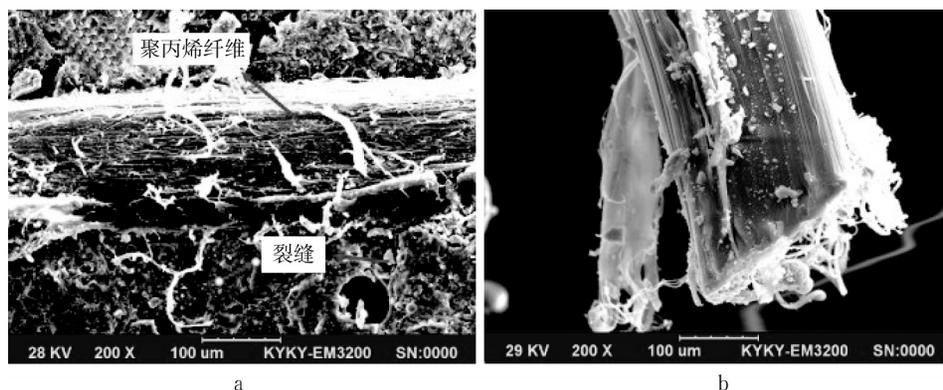


图 11 聚丙烯粗纤维与水泥浆界面微观结构

Fig. 11 Microstructure of the interface between polypropylene crude fiber and cement slurry

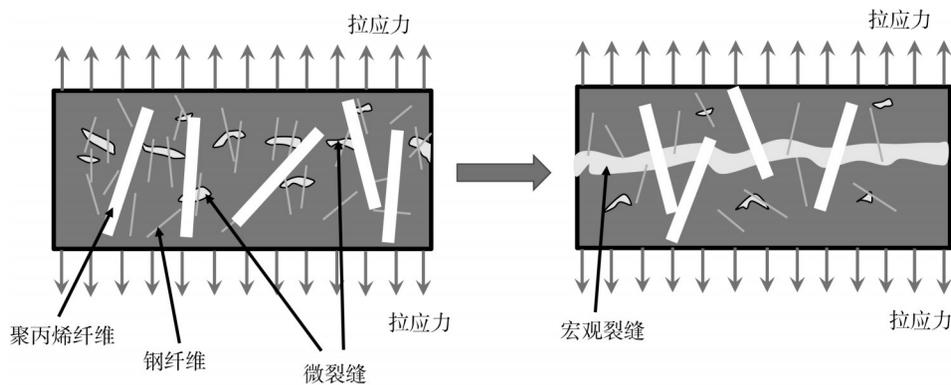


图 12 钢-聚丙烯混杂纤维增强增韧机理

Fig. 12 Reinforcement and toughening mechanism of steel-polypropylene hybrid fiber

### 3 结论

(1) 钢纤维和聚丙烯粗纤维的掺入均能提高 UHPC 的抗弯强度与开裂后性能, 对抗弯强度而言, 钢纤维的增强效果明显大于聚丙烯粗纤维。

(2) 提出一种可评价混杂纤维协同效应的方法, 结合弯曲韧性分析有较高的可行性, 得出钢纤维与聚丙烯粗纤维掺入体积分数分别为 1% 时, UHPC 能充分发挥的纤维正协同效应, 并验证了  $k_s$ 、 $k_p$  与二次强化段大小呈正相关。

(3) 钢-聚丙烯粗纤维混杂对提高 UHPC 弯曲韧性的效果优于单掺钢纤维或聚丙烯粗纤维, 且钢纤维掺入体积分数为 1.0%, 聚丙烯粗纤维掺入体积分数为 1.0% 的混掺组合对 UHPC 弯曲韧性改善效果最优。

(4) 钢纤维主要通过对 UHPC 基体的脱黏与滑移耗能来抑制微裂缝的产生, 聚丙烯粗纤维主要通过自身的延长和断裂约束宏观裂缝的扩展。

(5) 钢纤维和聚丙烯粗纤维与 UHPC 基体黏结性较好, 在混凝土断裂过程中, 钢纤维的高强度和聚丙烯粗纤维的高延展性与黏结性强的优势都得以充分发挥, 可以混合到 UHPC 基体中, 起到积极的协同作用, 达到增强增韧的目的。

#### 作者贡献声明:

李福海: 项目负责人、命题提出与构思。

刘耕园: 论文撰写与整理、数值计算。

刘梦辉: 论文修改、参与试验研究。

杨宗驰: 参与试验研究和试验结果分析、参与论文修改。

穆勃江: 参与试验研究和试验结果分析、参与论文修改。

苏君豪: 参与试验研究和试验结果分析、参与论文修改。

姜怡林: 指导试验设计、试验研究和试验结果分析。

#### 参考文献:

- [1] LARRARD F D, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model[J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(6):997.
- [2] XUE J, BRISEGHELLA B, HUANG F, *et al.* Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering [J]. Construction and Building Materials, 2020, 260:119844.
- [3] 邵旭东, 樊伟, 黄政宇. 超高性能混凝土在结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2021, 54(1): 13.  
SHAO Xudong, FAN Wei, HUANG Zhengyu. Application of ultra-high performance concrete in structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(1): 13.
- [4] CHANG Y, SHI J, HOU Y, *et al.* Experimental study on the uniaxial compression performance of ultrahigh-performance concrete constrained by stirrups and fibers [J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112656.
- [5] 赵雅明, 张明飞, 张振, 等. 混杂纤维增强高强混凝土性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(7):2299.  
ZHAO Yaming, ZHANG Mingfei, ZHANG Zhen, *et al.* Research on properties of hybrid fiber reinforced high strength concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(7):2299.
- [6] 陈倩, 徐礼华, 吴方红, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维增强超高性能混凝土强度试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(3):740.  
CHEN Qian, XU Lihua, WU Fanghong, *et al.* Experimental study on the strength of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced ultra-high performance concrete [J]. Bulletin of the Chinese Silicate Society, 2020, 39(3):740.
- [7] GANESAN, N, INDIRA, P V, SABEENA, M V. Tension stiffening and cracking of hybrid fiber-reinforced concrete [J]. ACI Materials Journal, 2013, 110(6):2013.
- [8] RASHIDDADASH P, RAMEZANIANPOUR A A, MAHDIKHANI M. Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice [J]. Construction & Building Materials, 2014, 51:313.

- [9] SIVAKUMAR A, SANTHANAM M. Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2007, 29(8):603.
- [10] 孔祥清,高化东,刚建明,等.钢-聚丙烯混杂纤维再生混凝土弯曲韧性研究[J].*硅酸盐通报*,2018,37(9):2729.  
KONG Xiangqing, GAO Huadong, GANG Jianming, *et al.* Study on flexural toughness of steel-polypropylene hybrid fiber recycled concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Silicate Society*, 2018,37(9):2729.
- [11] 吴海林,裴子强,杨雪枫.钢-聚丙烯混杂纤维配筋混凝土抗裂性能试验[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*,2020,48(4):43.  
WU Hailin, PEI Ziqiang, YANG Xuefeng. Test on crack resistance of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*,2020,48(4):43.
- [12] 丁一宁,王卿,林宇栋.纤维对开裂后混凝土渗透性及裂缝恢复的影响[J].*复合材料学报*,2017,34(8):1853.  
DING Yining, WANG Qing, LIN Yudong. Effect of fibers on the permeability and crack recovery of cracked concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*,2017,34(8):1853.
- [13] 孔德成,安明喆,贾方方.聚丙烯粗纤维超高性能混凝土的断裂性能[J].*公路*,2021,66(5):281.  
KONG Decheng, AN Mingzhe, JIA Fangfang. Fracture properties of polypropylene crude fiber ultra-high performance concrete[J]. *Highway*, 2021,66(5):281.
- [14] 陈鹏.多尺度聚丙烯纤维混凝土顶管受弯性能研究[D].重庆:重庆大学,2021.  
CHEN Peng. Research on mechanical properties of multi-scale polypropylene fiber reinforced concrete pipe jacking [D]. Chongqing:Chongqing University, 2021.
- [15] CUI Kai, LIANG Kaikang, CHANG Jun, *et al.* Investigation of the macro performance, mechanism, and durability of multiscale steel fiber reinforced low-carbon ecological UHPC [J]. *Construction and Building Materials*,2022,327:126921.
- [16] 潘柏兆. FRP-UHPFRCC 复合薄壁箱梁的抗剪性能研究[D].广东:广东工业大学,2022.  
PAN Baizhao. Study on shear behavior of FRP-UHPFRCC composite thin-walled box girder [D]. Guangdong:Guangdong University of Technology, 2022
- [17] NIU Ditao, HUANG Daguan, ZHENG Hao, *et al.* Experimental study on mechanical properties and fractal dimension of pore structure of basalt-polypropylene fiber-reinforced concrete[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(8) :1602.
- [18] SWAMY R N, AL-TA'AN S A. Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced beams made with steel fibre concrete[J]. *Journal of the American Concrete Institute*, 1981, 78(5):395.
- [19] NAAMAN A E, REINHARDT H W. Proposed classification of HPRC composites based on their tensile response [J]. *Materials and Structures*, 2006, 39(5): 547.
- [20] 牛建刚,刘江森,王佳雷.聚丙烯粗纤维轻骨料混凝土梁的二次峰值荷载曲线[J].*材料导报*,2018,32(14):2407.  
NIU Jiangan, LIU Jiangan, WANG Jialei. Secondary peak load curve of polypropylene coarse fiber lightweight aggregate concrete beam[J].*Materials Review*,2018,32(14):2407.
- [21] American Society of Testing Materials. ASTM C 1018 Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading) [S] West Conshohocken: ASTM Internation, 1997.
- [22] BANTHIA N, 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.
- [23] BANYHUSSAN Q S, YLDRM, GÜRKAN, *et al.* Deflection-hardening hybrid fiber reinforced concrete: The effect of aggregate content [J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 125:41.
- [24] 张丰,白银,张金康,等.预制实心墩柱混凝土裂缝成因及防裂措施研究[J].*混凝土*,2022(5):143.  
ZHANG Feng, BAI Yin, ZHANG Jinkang, *et al.* Research on the causes of concrete cracks and anti-crack measures for precast solid piers[J]. *Concrete*, 2022(5): 143.
- [25] JX A, JING W B, CZ A. Study on reinforcement mechanism and microscopic morphology of steel-basalt mixed fiber HPCC - ScienceDirect [J]. *Construction and Building Materials*, 2020 (256): 119480.
- [26] QIAN C X, STROEVEN P. Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Research*,2000,30(1) :63.
- [27] 刘浩楠.钢纤维破碎卵石再生混凝土力学性能及声发射试验研究[D].邯郸:河北工程大学,2021.  
LIU Haonan. Experimental study on mechanical properties and acoustic emission of steel fiber broken pebble recycled concrete [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021.
- [28] 梁宁慧,曹郭俊,刘新荣,等.基于三点弯曲试验的聚丙烯纤维桥接应力研究[J].*材料导报*,2020,34(2):2153.  
LIANG Ninghui, CAO Guojun, LIU Xinrong, *et al.* Study on bridging stress of polypropylene fibers based on three-point bending test[J].*Materials Review*,2020,34(2):2153.