

高性能纤维增强混凝土与筋材复合体系拉伸性能研究

余江滔¹, 史天成¹, 郁 颀¹, 谢正良², 俞可权¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海中环投资开发(集团)有限公司, 上海 200060)

摘要: 超高性能混凝土(UHPC)具有优异的抗压强度, 而超高延性水泥基复合材料(ECC)具有优良的拉伸应变强化能力, 二者均属于高性能纤维增强基材。纤维增强复合材料筋(FRP bar)具有抗拉强度高、密度小、耐腐蚀性能好的优点。高性能基体与高强度筋材的结合使用, 有望解决传统钢筋混凝土结构的耐久性问题, 同时保证结构体系的承载能力。选取力学性能不同的3种基体(普通混凝土、ECC和UHPC)与2种筋材(钢筋、BFRP筋), 在其材料性能试验基础上, 对其组成的6种配筋复合体系进行了轴拉试验。试验结果表明, 复合材料的拉伸性能受多种因素的影响。高性能基材可以有效地提升构件强度, 但复合体系的变形能力由基材与筋材中应变能力较弱的一方决定; 高性能基材所提供的抗拉贡献和应变软化会导致复合体系提前进入破坏状态, 反而降低了体系的延性(拉伸变形能力)。初步证明, 基于高性能材料的结构构件设计必须综合考虑材料各自的力学性能和材料间相互作用造成的综合影响。

关键词: 超高延性混凝土; 纤维增强复合材料筋; 复合体系; 拉伸性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Experimental Study of Tensile Properties of Composite System of High Performance Concrete and Reinforcements

YU Jiangtao¹, SHI Tiancheng¹, YU Jie¹, XIE Zhengliang², YU Kequan¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Zhonghuan Investment and Development (Group) Co, Ltd, Shanghai 200060, China)

Abstract: Ultra-high-performance concrete (UHPC) is known for its ultra-high strength, engineered

cementitious composites (ECC) possesses high tensile strain-hardening characteristic, and fiber reinforced polymer bar (FRP bar) has the advantages of high tensile strength, low density, and good corrosion resistance. It is expected that the combination of high-performance matrix and high-performance reinforcement can solve the durability issue long-existed in civil engineering and maintain high strength simultaneously. In this paper, three kinds of matrix materials (normal concrete, ECC, and UHPC) and two kinds of reinforcements (steel and BFRP bar) were selected for fabricating six different composite systems. Tensile tests were conducted to obtain the tension-strain behaviors of the composite system for comparison. The test results indicate that the tensile properties of the composite system are affected by various factors. High-performance matrix can effectively enhance the tensile strength of the system, but the sustained tensile contribution and the strain-softening behavior after peak strength of high-performance matrix may bring premature failure to the system, thus reducing the ductility eventually. It is preliminarily demonstrated that the ductility of the composite system is determined by the components with a weaker deformability. In the design of the composite structural member made of high-performance materials, it is recommended that the individual properties of materials and the interaction between materials be comprehensively considered.

Key words: ultra-high ductility concrete; fiber reinforced polymer bar; composite system; tensile properties

传统的钢筋混凝土结构一直受混凝土开裂、钢

收稿日期: 2020-07-21

第一作者: 余江滔(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为普通型超高强度水泥基材料的机理与研发、智能化与无筋建造在土木工程的实现技术、混凝土结构及组合结构的抗火性能及损伤评估。
E-mail: yujiangtao@tongji.edu.cn

通信作者: 俞可权(1986—), 男, 助理教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为高性能混凝土材料开发与结构应用、高性能混凝土3D打印、混凝土断裂性能。E-mail: zjzykq@163.com



论文
拓展
介绍

筋锈蚀等耐久性问题的困扰,这一现象在岛礁、海滨地区尤为严重。多年来,研究人员努力寻求这类问题的解决方案,其核心是防止钢筋的锈蚀。从研究现状来看,潜在的方法之一是使用纤维增强复合材料筋(fiber reinforced polymer bar, FRP bar)替换传统混凝土结构中的钢筋。FRP筋是一种由纤维材料和基体材料按照一定的比例混合并经过工艺复合形成的高性能新型材料^[1]。与普通钢筋相比,FRP筋具有顺纤维方向抗拉强度高、密度小、耐腐蚀性能好等优点^[2-6]。使用FRP筋可以从源头上解决筋材锈蚀的发生。然而FRP筋属于脆性材料,其延伸率远低于钢筋。因此,FRP筋与混凝土的组合结构可能存在变形能力不足的问题。近年来,研究者提出将FRP筋与高性能纤维增强混凝土结合使用,以提升复合体系的变形和耗能能力。高性能纤维增强可以分成2种类型。其一为高强度型,如超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)。UHPC的抗压强度可达200MPa以上,抗拉强度为5~15MPa,但拉伸应变能力一般不超过0.5%。另一种为高应变强化型,如高延性纤维增强水泥基复合材料(engineered cementitious composites, ECC)。ECC最早由美国密歇根大学的Li等^[7]根据细观力学和断裂力学原理研发,在纤维掺量不大于2%的条件下即可拥有超过3%的拉伸应变能力^[8-9]。相比而言,ECC的抗压强度则一般不超过80MPa。

高强度筋材(如FRP筋)与高延性基体(如ECC)的组合,已经得到了试验层面的初步验证。Li等^[10]进行了GFRP筋增强梁的研究。试验发现ECC可以显著提高构件延性、承载能力、抗剪强度及抵抗破坏的能力,并可部分或全部替代抗剪箍筋。文献[11-14]发现,ECC出色的抗拉性能使混合配筋的ECC-混凝土组合梁的开裂、屈服、极限弯矩和刚度均得到改善,弯曲延性明显高于普通钢筋混凝土梁。潘金龙等^[15]也发现与FRP筋混凝土梁相比,FRP-ECC梁在承载能力、抗剪强度、延性和破坏耐受性方面显示出更好的抗弯性能。

然而,上述研究均集中在FRP筋与高性能纤维增强混凝土受弯构件的力学性能层面,由于受弯构件的特殊性,这一类型的力学试验不能充分反映筋材与基体之间共同工作的机理。为此,一些学者进行了更加基础的研究。如Fischer等^[16]进行了带缺口的配钢筋-ECC试件直拉实验,试验结果表明配筋ECC试件在出现多裂纹后ECC仍能承担拉伸荷载。Moreno等^[17]进行了筋材与不同类型混凝土的轴向

拉伸试验,试验结果指出,ECC与钢筋的组合甚至降低了复合体系的变形能力。以上2位研究者仅对于钢筋及其与高性能纤维增强混凝土的复合体系进行了初步的研究,其局限在于:①Fisher等进行的是带缺口ECC基体与钢筋的拉伸试验,复合体系的最大应变水平仅达到0.5%,远低于ECC本身和钢筋的应变能力;而Moreno等的试验中ECC的拉伸性能并不优良,严格地说,该材料属于一种拉伸软化型材料,并不能代表应变强化基体的特性。②上述2套试验均未涉及FRP筋。FRP属于脆性材料,其力学性能与传统的钢筋存在明显的差别。

从常理推测,高性能筋材与高性能基体的组合会提升体系的承载力和延性。然而,在受力过程中,材料之间会发生复杂的相互作用,高性能材料能否发挥出其各自的能力,这一问题仍有待探讨。基于以上的考虑,本文进行钢筋、BFRP筋2种筋材和普通混凝土、ECC、UHPC这3种基体组合而成的复合体系拉伸试验,探究高性能纤维增强混凝土与筋材的复合体系拉伸性能,旨在为结构建模和工程应用提供依据。

1 试验概况

1.1 材料及其力学性能

首先进行材料的基本力学性能试验。筋材选用直径16mm的HRB400螺纹钢和直径12mm的玄武岩纤维增强复合材料(basalt fiber reinforced polymer tender, BFRP)筋,BFRP筋表面带有螺纹。基体采用ECC、UHPC和普通混凝土(以下简称PC,实为未加钢纤维的UHPC)。ECC、UHPC以及PC所使用的材料和配合比见表1、表2^[18]。

表1 基体材料的配合比

Tab. 1 Mix proportion of matrix material (g·L⁻¹)

基体材料	砂	水泥	粉煤灰	水	减水剂	纤维
ECC	401.4	936.7	401.4	361.3	4	20(PE纤维)
UHPC	1000	950	150	194	7	195(钢纤维)
PC	1000	950	150	194	7	0

BFRP筋的拉伸试验依据美国ACI4403. R-04^[19]。BFRP筋的剪切强度较低,在拉伸试验过程中,为避免试件两端因为夹具的作用发生剪切破坏,在FRP筋两端使用外径32mm、壁厚4mm的钢管进行锚固,如图1所示。试件完成养护后,使用万能试验机对锚固后的BFRP筋和钢筋进行拉伸,并使

表 2 PE 纤维的性能^[18]

Tab. 2 Properties of PE fiber^[18]

纤维类型	直径/ μm	长径比	强度/GPa	弹性模量/GPa	断裂伸长率/%	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
PE 纤维	25	720	2.9	116	2.42	0.97

用拉线式位移传感器测量标距 300 mm 内的变形。由单轴拉伸试验获得的钢筋与 BFRP 筋的应力-应变曲线如图 2 所示,拉伸力学性能如表 3 所示。从拉伸性能来看,BFRP 筋与传统的钢筋有显著差别:BFRP 筋材的强度普遍高于钢筋,但在延伸率上与钢筋相差甚远;BFRP 属于弹脆性材料,而钢材属于典型的弹塑性材料。

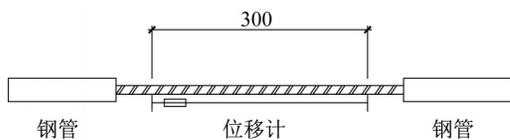


图 1 BFRP 筋拉伸试件(单位:mm)

Fig. 1 Tensile specimen of BFRP bar (unit: mm)

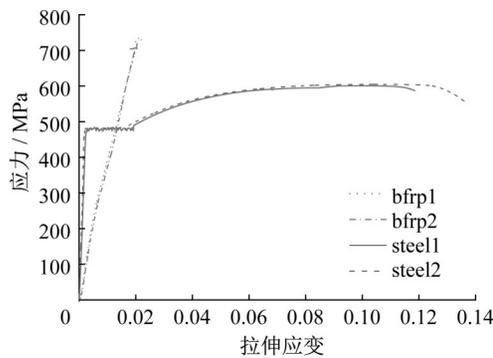


图 2 筋材应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of reinforcements

表 3 筋材的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of reinforcements

筋材类型	直径/mm	屈服强度/MPa	峰值强度/MPa	峰值强度对应变/%	弹性模量/GPa
HRB400	16	471.76	602.78	9.95	205.25
BFRP	12		728.63	2.08	35.02

ECC 和 UHPC 拉伸试件采用日本土木工程师协会(Japan Society of Civil Engineers, JSCE 2008)推荐的哑铃型试件,试件具体尺寸见图 3。使用万能试验机进行拉伸加载,并通过拉线式位移传感器测量标距 80 mm 内的变形。试验获得的 ECC 和 UHPC 应力-应变曲线如图 4 所示,拉伸性能如表 4。其中极限应变为软化阶段 80% 极限荷载处应变。

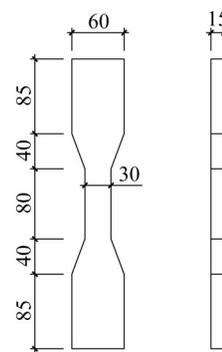


图 3 哑铃型试件(单位:mm)

Fig. 3 Dog bone specimen (unit: mm)

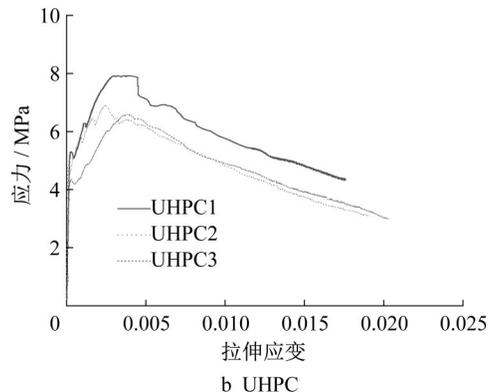
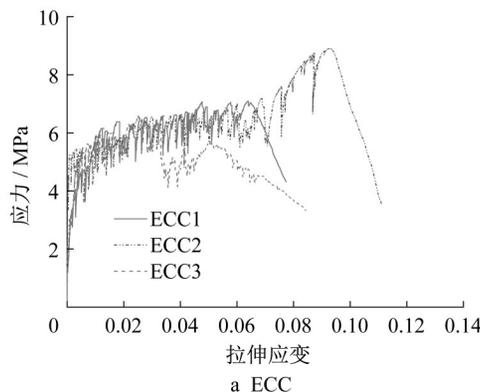


图 4 基体材料应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of matrix materials

综合比较筋材和基体的极限应变能力,由大到小的顺序是:钢筋、ECC、BFRP、UHPC、PC。综合比较筋材和基体的极限拉伸强度,由大到小的顺序

是: BFRP、钢筋、UHPC 与 ECC、PC。UHPC 和 ECC 的极限强度接近,但拉伸变形能力相差近 10 倍。

表4 基体材料的力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of matrix materials

基体材料类型	峰值强度/MPa	峰值强度对应应变/%	极限应变/%
ECC	6.96	5.33	7.27
UHPC	7.24	0.33	0.85

1.2 试件设计及加载测量方案

进行钢筋、BFRP筋2种筋材和PC、ECC、UHPC这3种基体组合的复合体系的拉伸试验,分析不同类型的筋材和基体的组合给复合体系带来的影响,进一步了解筋材与高性能纤维增强混凝土共同工作的性能。

试验共设计6种组合:钢筋-PC基体、BFRP筋-PC基体、钢筋-UHPC基体、BFRP筋-UHPC基体、钢筋-ECC基体和BFRP筋-ECC基体,每种工况制备2个试件,共12个试件。

如图5,试件的设计尺寸为127 mm×127 mm×1 100 mm。为保证拉伸过程中试件夹持稳定,防止BFRP筋发生剪切破坏,在筋材两端粘结了外径32mm、壁厚4mm的钢管,试验中通过夹持钢管施加拉伸荷载。钢管外焊接螺栓,保证荷载传递至基体。试件两端安装有钢板,以避免试件两端发生劈裂破坏。试件侧面布置有拉线式位移传感器来获取试件的变形,标距长度为800 mm。筋材表面均匀布置有9个应变片,用以获取钢筋/BFRP筋应变。

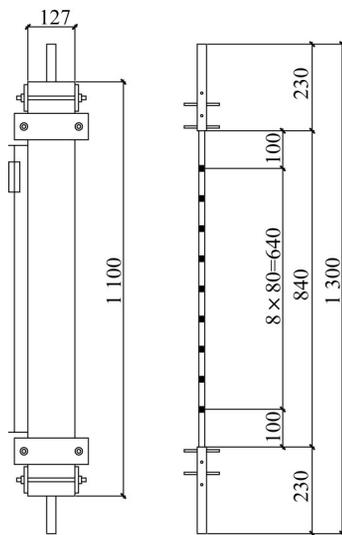


图5 拉伸试验试件(单位:mm)

Fig. 5 Specimen for tensile test (unit: mm)

1.3 理论分析

基于材料的力学特性,建立通用的拉伸力学模型,对试验现象及结果进行分析预测。

普通混凝土(PC)、UHPC和FRP筋属于拉伸软

化或断裂失效型材料,可采用图6中的二折线模型; ECC和钢筋属于拉伸强化材料,可采用图6中的三折线模型。

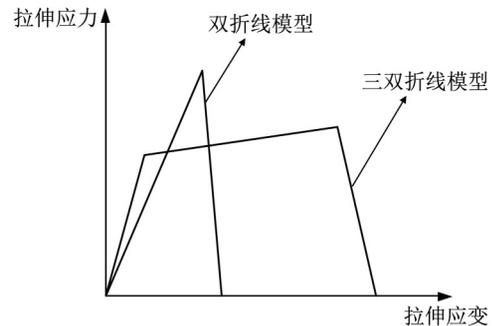


图6 拉伸力学模型

Fig. 6 Tensile mechanical model

假设基体发生开裂前,筋材与基体之间不发生粘结滑移,保持协调变形工作,即筋材与基体应变相同, $\epsilon_r = \epsilon_m$ 。此时同一截面处的内力由基体与筋材共同承担,且按相对刚度进行分配。因此对于拉伸荷载 P ,有

$$P = \sigma_r A_r + \sigma_m A_m = E_r A_r \epsilon_r + E_m A_m \epsilon_m \quad (1)$$

式中: σ_r 、 ϵ_r 、 A_r 、 E_r 分别为某截面处筋材的应力、应变、截面积及弹性模量; σ_m 、 ϵ_m 、 A_m 、 E_m 分别为同一截面处基体的应力、应变、截面积及弹性模量和开裂强度。显然,当基体处于未开裂状态时,拉伸荷载 P 与应变 ϵ_r (或 ϵ_m) 之间成正相关,复合材料整体表现出弹性特征。

当复合材料的应变达到一定水平时,基体将在最薄弱部位发生开裂。普通混凝土开裂后丧失拉伸强度,荷载将发生突降,随后此截面处的荷载将全部由筋材承担。若配筋率较大,开裂部位筋材可承受开裂前的荷载水平,则表现为拉伸强化,材料整体将继续承载,并随着荷载的增大在下一个薄弱部位发生开裂,直至裂缝间距稳定。随后材料表现将由筋材控制,对于拉伸荷载 P ,有

$$P = \sigma_r A_r \quad (2)$$

若配筋率较小,开裂部位的筋材无法承受开裂前的荷载水平,则表现为拉伸弱化。由此可见,在材料性质确定的前提下,复合材料在基体开裂后的拉伸特性与最终极限承载力由试件的配筋率决定。即存在临界配筋率,使得实际配筋率高于临界配筋率时,复合材料在基体开裂后表现为拉伸强化;当实际配筋率小于临界配筋率,复合材料在基体开裂后表现为拉伸弱化。根据复合材料受力特征和平衡条件

可知,临界配筋率下,有

$$f_{ru} A_{r, \min} = A_{r, \min} \sigma_r + A_m \sigma_{tp} \quad (3)$$

$$\rho_{\min} = A_{r, \min} / A \quad (4)$$

式中: f_{ru} 、 σ_{tp} 和 σ_r 分别为筋材的极限强度、基体的极限强度和基体达到极限强度时的筋材应力; $A_{r, \min}$ 、 A_m 和 A 分别为临界配筋面积、基体面积和复合材料截面面积; ρ_{\min} 为临界配筋率。因此有

$$\rho_{\min} = A_m \sigma_{tp} / [A(f_{ru} - \sigma_r)] \quad (5)$$

对于UHPC基体,其峰值应力后发生应变软化,随着应变增加,应力水平大幅下降。与普通混凝土原理相同,若筋材的强化水平可以弥补UHPC软化导致的荷载下降,则复合材料整体表现为拉伸强化,否则为拉伸弱化。因此式(5)同样适用于UHPC基体的复合材料。

ECC作为典型的应变硬化材料,在发生开裂后仍可继续承载,同时高应变能力允许ECC与钢筋在超过屈服应变后仍可以发生均匀且协调的变形^[16]。因此ECC开裂后式(1)依然成立,只是比例系数 $E_r A_r + E_m A_m$ 发生改变,复合材料整体刚度减小,但依然表现出拉伸强化的特征,并不断产生新裂缝。直至某截面ECC进入软化阶段,复合材料进入下一阶段,根据实际配筋率与临界配筋率的相对大小关系表现为拉伸强化或弱化。ECC拉伸应变能力较

强,对于高拉伸应变能力的筋材(钢筋)来讲,ECC的软化会先于筋材破坏,式(5)依然成立;而对于低拉伸应变能力的筋材(如FRP筋),筋材破坏会先于ECC软化的发生,因此式(5)不再成立。同样根据复合材料受力特征和平衡条件,可以得到筋材先于基体失效的情况下临界配筋率为

$$A_m \sigma_{tp} = A_m \sigma_m + f_{ru} A_{r, \max} \quad (6)$$

$$\rho_{\max} = A_{r, \max} / A = A_m (\sigma_{tp} - \sigma_m) / (A \times f_{ru}) \quad (7)$$

式中: f_{ru} 、 σ_{tp} 和 σ_m 分别为筋材的极限强度、基体的极限强度和筋材达到极限强度时的基体应力; $A_{r, \max}$ 、 A_m 和 A 分别为临界配筋面积、基体面积和复合材料截面面积; ρ_{\max} 为临界配筋率。当实际配筋率高于临界配筋率时,复合材料在基体开裂后表现为拉伸强化;当实际配筋率小于临界配筋率时,复合材料在基体开裂后表现为拉伸弱化。

2 结果与讨论

2.1 裂缝分布特征

试验将试件加载至完全断裂,不同基体的试件在裂缝发展方面呈现出较大差异,如图7所示。由于ECC基体试件存在极多细密裂缝,为方便图示这里采用DIC(digital image correlation)分析照片。

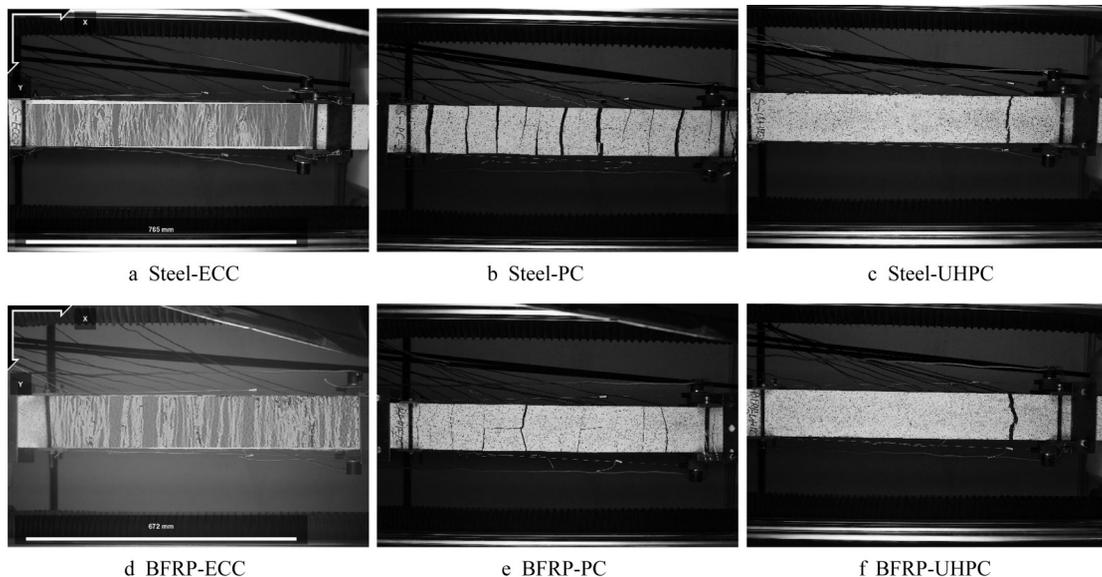


图7 裂缝分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of specimen cracks

在基体开裂后,钢筋-ECC试件在全长范围内逐渐发展出大量细密裂缝。随荷载增加,试件两侧边缘的裂缝宽度开始增加,逐渐形成宏观裂缝。试件

破坏时,某一条宏观裂缝发展为贯通裂缝。BFRP筋-ECC试件的裂缝发展情况与钢筋-ECC试件类似,但由于筋材的高弹性,ECC上裂缝宽度非常微

细;试件断裂后,由于未断裂BFRP筋回弹,细密裂缝出现闭合现象。

在加载过程中,钢筋-PC试件依次发展出10~15条贯通截面的宏观裂缝,同时观察到存在3~5条纵向裂缝连接相邻的2条横向裂缝。这些纵向与横向裂缝将PC基体分割成若干块体,可以观察到某些块体近乎脱落。BFRP筋-PC试件的裂缝发展情况与钢筋-PC试件类似,裂缝宽度较小,且存在卸载后裂缝闭合的现象。

在UHPC基体的4个试件中,3个试件在加载过程中均只发展出1条裂缝,其余部分无可见裂缝。其余1个钢筋-UHPC试件出现了3条贯通裂缝,在其余部位仍未观察到可见裂缝。

综上,ECC与钢筋或BFRP筋组合仍保留了多裂缝开展的特征,在拉伸过程中,ECC始终保持其抗拉贡献;普通混凝土(PC)与钢筋或BFRP筋的组合同样呈现多裂缝状态,但裂缝数量较少且宽度大,而

PC由于开裂后失效,无法提供抗拉的贡献;而UHPC与钢筋或BFRP筋的组合则基本不具有多缝开裂的能力。

2.2 筋材应变

试件基体和筋材平均应变与荷载关系曲线如图8所示。如前文所述,基体的应变源于试件整体变形结果在长度方向上的平均,而筋材的应变则通过电阻应变片进行采集,并取平均值。从结果来看,筋材的应变形状比较不规则,反映了局部的变形,而基体应变相对平滑,反映了整体的变形。此外,由于电阻应变片受到筋材和基体变形不协调的影响,大部分电阻应变片在超过 $2\,000 \times 10^{-6}$ 后失效,少部分应变数据达到了 $10\,000 \times 10^{-6}$ 以上。

由图8可见,筋材与基体的应变发展趋势基本一致,且大部分曲线显示出基体应力滞后于筋材应力的现象,这说明确实基体与筋材之间存在着一定的粘结滑移。

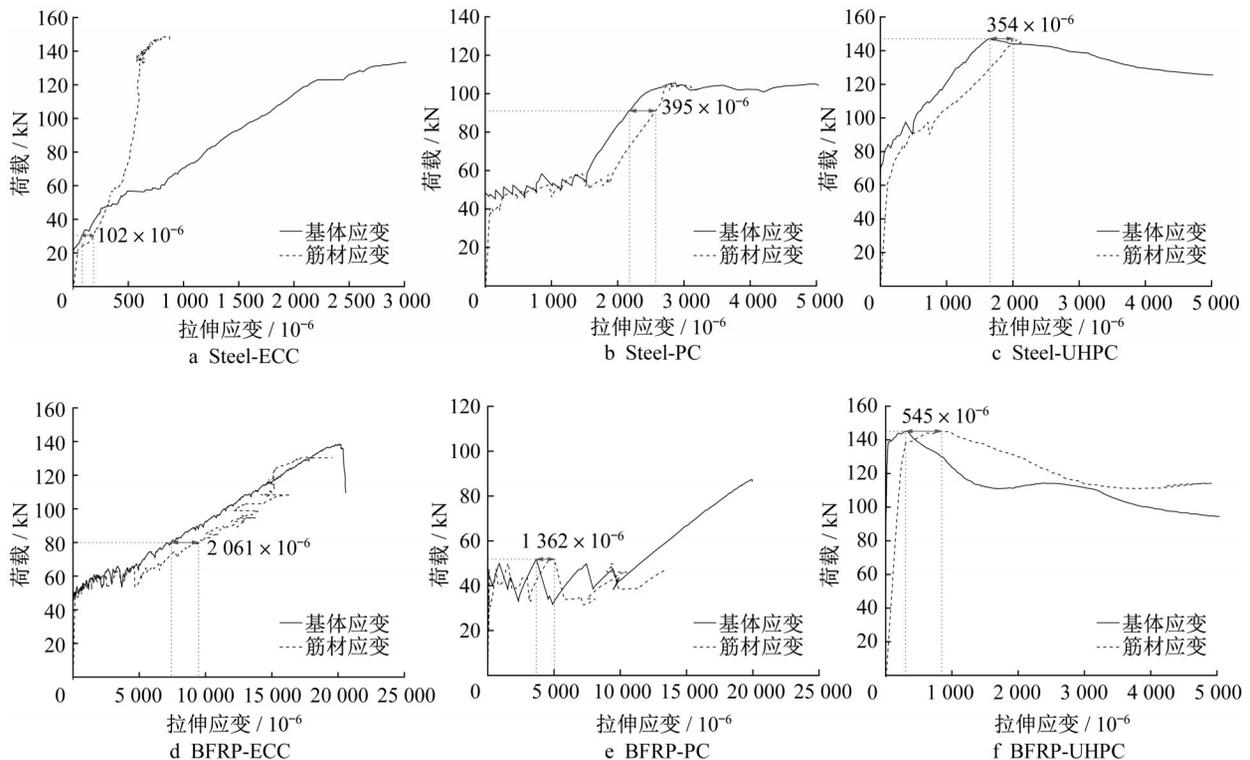


图8 基体及筋材平均荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of matrix and reinforcement

2.3 荷载-应变曲线

拉伸试件的荷载-应变曲线如图9、图10所示。其中应变由安装于试件侧面的拉线式位移传感器获得的位移数据处理得到,代表试件在标距内的平均应变。同时钢筋与BFRP筋的材性数据也在图中绘出作为对比。注意到少数试件由于数据采集过程发

生意外,得到的荷载-应变曲线不完整,但并不影响对于试件整体拉伸性能的分析。下面就钢筋-基体组合以及FRP筋-基体组合进行分开讨论。图中示意了复合体系极限承载力及极限拉伸应变与筋材的差距。其中对于存在弱化阶段的复合体系,极限拉伸应变取弱化阶段80%极限荷载处应变,不存在弱

化阶段的体系则取极限承载力对应应变。

钢筋-PC基体试件在较低的荷载水平(约50kN)即发生基体开裂,出现第1个较短的波动平台,荷载在一定的应变区间内不断波动并小幅上升,同时发生既有裂缝开展和新裂缝产生;随后试件的荷载-应变曲线发展趋势与钢筋直拉曲线类似,出现屈服平台与强化段,最终试件在124kN处破坏,对应平均应变为8%。试验结果表明PC对复合体系拉伸强度的贡献极低。与钢筋的拉伸试验结果相比(表4),复合体系在相同应变下的荷载仅提高了4~8kN,但体系的拉伸应变能力出现轻微下降,弱化段80%极限荷载对应应变为8.61%。以上现象符合工程界对传统的钢筋混凝土组合的认知。

钢筋-ECC基体试件的荷载-应变曲线近似分为2段,钢筋屈服前试件弹性模量较大,荷载近似线性增加。达到134kN时钢筋屈服,试件弹性模量降低,但承载力仍在增加。最终达到试件的平均峰值承载力151kN,对应应变为4%。荷载-应变曲线存在明显的拉伸强化段,则存在ECC开裂强化而产生的波动。相比于钢筋,组合体系的极限承载力增加了33kN。必须指出的是,相比钢筋,复合体系的拉伸应变能力出现了大幅度下降,处于ECC的同等水平。

钢筋-UHPC基体试件在弹性阶段拥有较大的

弹性模量,而在达到极限荷载150kN后基体发生开裂弱化,同时钢筋屈服,复合体系的承载力随之迅速下降,出现短暂的平台段后试件整体断裂破坏。钢筋-UHPC组合在开裂后表现出快速、明显的弱化,其应变能力约为0.3%,处于UHPC的同等水平。在弱化阶段下降到80%极限荷载时,试件应变为1.8%。

就拉伸荷载下的整体表现,ECC基体试件和PC基体试件表现出明显的拉伸强化,即在基体开裂/钢筋屈服后仍有承载力提升的能力,而UHPC基体试件则表现出拉伸弱化。相较于钢筋本身,ECC基体试件和UHPC基体试件的承载力均有明显提升,而PC基体试件承载力提升不明显。3种试件相比,钢筋-ECC试件承载力最高,其次为钢筋-UHPC试件,而钢筋-PC试件承载力最低。3种试件的拉伸变形能力均不如钢筋本身。3种试件相比,钢筋-PC试件拉伸变形能力最高,钢筋-ECC试件其次,钢筋-UHPC试件最低。从试验结果可以看出,如果ECC与UHPC有不可忽视的贡献,体系的拉伸应变能力由组合中应变能力较弱的基体决定,基体的拉伸延性是复合体系极限状态的决定因素。当其进入软化阶段,对应复合体系会表现为拉伸弱化或直接破坏。

对FRP筋-基体组合的试验现象进行讨论。

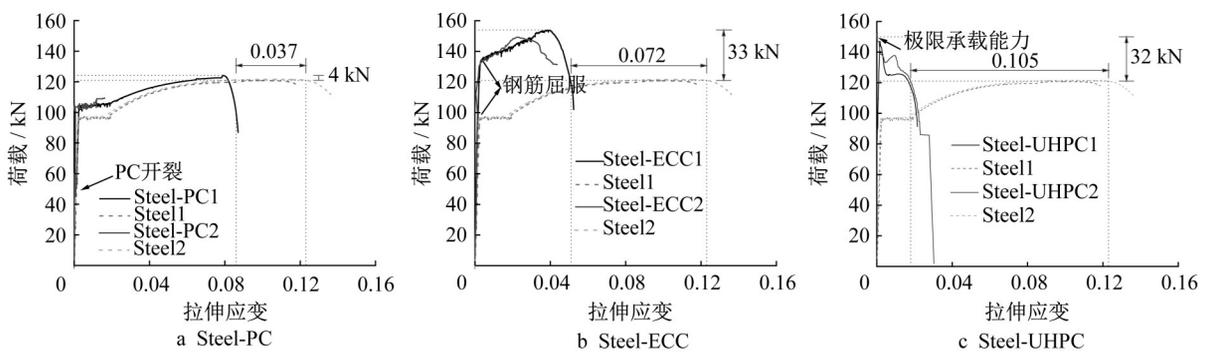


图9 钢筋试件的应变-荷载曲线

Fig. 9 Load-strain curves of steel reinforced specimens

BFRP筋-PC基体试件在48kN开裂,随后亦进入一段较长的波动平台,荷载无明显增加,直至应变达到1%。如图10所示,荷载-应变的强化段同样趋近于BFRP筋直拉曲线,最终达到极限荷载86kN,与BFRP筋相比,复合体系整体承载力仅提高了8kN。当平均应变达到2%时,试件出现破坏。由于PC开裂即退出工作,BFRP筋-PC基体试件的变形能力由BFRP筋决定。

BFRP筋ECC基体试件在47kN时即发生基体开裂,随后复合体系进入强化阶段。由于ECC的开裂强化,曲线表现出明显的波动上升。如图10所示,BFRP筋-ECC基体试件的荷载-位移强化段与BFRP直拉筋近似平行,但承载力全程稳定提高了近50kN,峰值荷载为135kN。值得注意的是,复合体系的拉伸延性与BFRP筋相同,仅为2%,说明BFRP筋-ECC基体组合的变形能力由较弱的BFRP

筋决定。

BFRP筋-UHPC基体试件的拉伸刚度较大,这体现了UHPC在弹性模量上的优势。试件迅速到达极限荷载136kN,随后承载力下降,表现出拉伸弱化的特点,期间经历了长的平台段。峰值荷载对应的应变为0.03%,弱化段80%极限荷载对应应变为0.2%,约为BFRP筋拉伸延性的1/10,说明BFRP筋-UHPC基体组合的变形能力由较弱的UHPC基体决定。

总体而言,在与BFRP组合中,ECC基体试件和

PC基体试件表现出拉伸强化,而UHPC基体试件则表现出拉伸弱化。相较于BFRP筋本身,ECC基体试件和UHPC基体试件的承载力均有所提升,而PC基体试件承载力提升不明显。3种试件相比,BFRP筋-UHPC试件与BFRP筋-ECC试件承载力相近,BFRP筋-PC试件最低。在拉伸变形能力上,UHPC试件的拉伸延性极低,ECC基体试件和PC基体试件的拉伸变形能力与BFRP筋近似。这里,变形能力相对较低的BFRP筋和更低的UHPC分别成为了复合体系拉伸性能的决定因素。

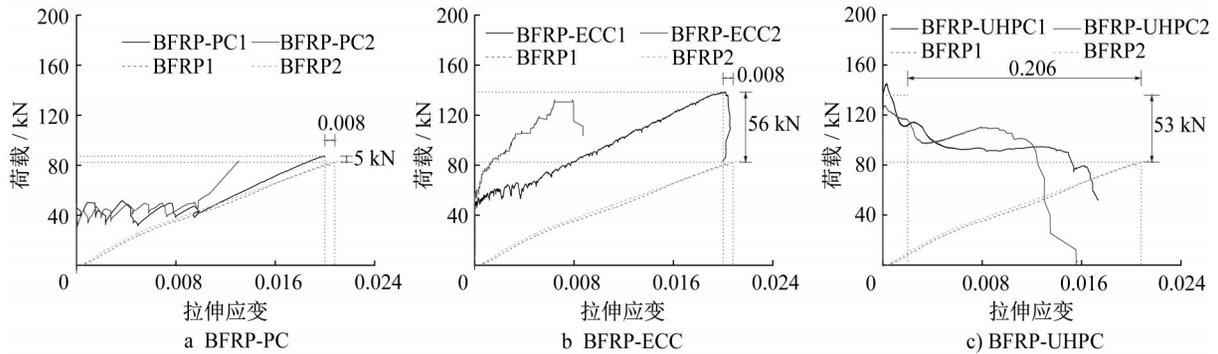


图10 BFRP筋试件的应变-荷载曲线

Fig. 10 Load-strain curves of BFRP bar reinforced specimens

2.4 理论分析与试验结果对比

如前节所述,不同基体试件开裂(或软化)前应整体表现出线弹性特征,开裂(或软化)后的拉伸特征与复合材料配筋率有关。本次试验中,钢筋试件配筋率为1.25%,BFRP筋试件配筋率为0.7%,结合材性试验结果,即可计算试件的理论临界配筋率,用以判断拉伸荷载下试件在基体开裂(或软化)后的发展趋势。由于普通混凝土抗拉强度低,因此这里将式(3)和(4)进行简化,有

$$f_{ru} A_{r,min} = A_{r,min} \sigma_r + A_m \sigma_{tp} \approx A \sigma_{tp} \quad (8)$$

$$\rho_{min} = A_{r,min} / A \approx \sigma_{tp} / f_{ru} \quad (9)$$

综上根据式(5)和式(9)计算出的各工况试件临界配筋率如表5所示。其中钢筋-UHPC试件和钢筋-ECC试件在基体进入软化阶段时钢筋已经屈服,不存在临界配筋率,使得基体软化后的复合体系表现出拉伸强化。将试验结果与理论分析对比可知,由试验所得的不同工况拉伸荷载下的荷载-变形关系与由临界配筋率分析所得的趋势一致。

表5 试件的理论临界配筋率

Tab. 5 Theoretical critical reinforcement ratio of specimens

工况	临界配筋率/%	实际配筋率/%	试件拉伸性能发展趋势
钢筋-PC	0.50	1.25	拉伸强化
BFRP筋-PC	0.33	0.70	拉伸强化
钢筋-UHPC	基体软化时钢筋屈服	1.25	拉伸弱化
BFRP筋-UHPC	1.34	0.70	拉伸弱化
钢筋-ECC	基体软化时钢筋屈服	1.25	拉伸弱化
BFRP筋-ECC	0.16	0.70	拉伸弱化

由式(1)计算所得的试件极限承载力计算值和试验结果如表6所示。钢筋-PC试件在计算时考虑了钢筋的强化阶段,其他工况均未考虑钢筋的强化。对比可知,钢筋-PC、BFRP筋-PC和BFRP筋-

UHPC的计算值和试验值较为接近,钢筋-UHPC、钢筋-ECC和BFRP筋-ECC的计算值高于试验值。这里猜测是由于材料强度具有离散性,同时浇筑过程中采用分层浇筑对试件质量也有一定影响。

表6 试件的极限承载力

Tab. 6 Ultimate bearing capacity of specimens

工况	极限承载力计算值/kN	极限承载力试验值/kN	计算值与试验值之比
钢筋-PC	121.24	116.79	1.04
BFRP筋-PC	82.45	85.54	0.96
钢筋-UHPC	213.17	150.13	1.41
BFRP筋-UHPC	139.10	136.34	1.02
钢筋-ECC	197.88	151.60	1.31
BFRP筋-ECC	167.01	135.43	1.23

3 结论

基于各种材料的材性试验及复合体系拉伸试验,对不同筋材增强高性能纤维增强混凝土的拉伸性能进行了研究,得到如下结论:

(1)ECC和UHPC本身具有较高的拉伸强度,与筋材组合可以明显提升其拉伸承载能力;PC由于抗拉强度极低,对复合体系的拉伸承载力无明显提升作用。

(2)筋材和基体复合体系的变形能力受多种因素的影响,对于高性能纤维增强混凝土和筋材的组合,由于基体的拉伸贡献已经不可忽视,因此复合体系的变形能力会由两者中应变能力较弱的一方决定。弱方的应变软化或断裂将可能导致整个体系进入弱化阶段,在物理现象上表现为复合体系出现关键裂缝。试验结果获得的变形能力大小关系为:①钢筋-PC试件最高,钢筋-ECC试件其次,钢筋-UHPC试件最低;②BFRP筋-PC试件与BFRP筋-ECC试件相近,BFRP筋-UHPC最低。

(3)给出了临界配筋率的计算公式,用于判断复合材料在某一相发生弱化或破坏后的拉伸性能,并通过拉伸试验进行了对比分析。试验结果表明,通过计算临界配筋率来预测复合材料的拉伸性能是切实可行的。

在土木工程领域,越来越多的高性能材料被用于提升结构的可靠度。但高性能基体与筋材的力学性能与普通的混凝土和钢筋相差甚远。从本文研究成果来看,高性能基体与筋材的组合不一定能带来更高的力学性能,在变形能力(延性)方面,某些组合方式会带来明显的负面效果。研究表明,结构体系的力学性能与组成材料的强度和变形能力密切相关,但材料之间的相互作用并未厘清。在高性能材料被广泛应用之前,还有大量的基础研究工作需要进行。

作者贡献说明:

余江滔:提出研究课题,指导论文撰写,审阅修订论文。

史天成:设计试验方案,实施试验研究,处理试验数据,

撰写论文。

郁 颀:实施试验研究,处理试验数据。

谢正良:提供探究思路与技术指导。

参考文献:

- [1] 叶列平,冯鹏.FRP在工程结构中的应用与发展[J].土木工程学报,2006(3):24.
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3):24.
- [2] American Concrete Institute Committee 440. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars: ACI440.1R-15 [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.
- [3] 钱洋. 预应力AFRP筋混凝土梁受弯性能试验研究[D]. 南京:东南大学,2004.
QIAN Yang. Experimental study on flexural behavior of concrete beams prestressed with AFRP reinforcement [D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [4] 王晓璐,查晓雄. 高温下GFRP筋力学性能的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2011,39(9):75.
WANG Xiaolu, ZHA Xiaoxiong. Experimental investigation into mechanical behavior of GFRP rebars at elevated temperature [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(9): 75.
- [5] 蒋凤昌,朱慈勉,薛剑胜,等.CFRP加固钢筋混凝土结构的研究及应用现状[J]. 新型建筑材料,2007(9):70.
JIANG Fengchang, ZHU Cimian, XUE Jiansheng, et al. Current study and application of CFRP strengthening RC structures [J]. New Building Materials, 2007(9):70.
- [6] CHEN Y, JULIO F. Davalos, INDRAJIT Ray, et al. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures [J]. Composite Structures, 2007, 78(1):101.
- [7] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11): 2246.
- [8] LI V C. Engineered cementitious composites-tailored composites through micromechanical modeling [J]. Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future, Canadian Society of Civil Engineers, 1998, 1(3): 64.

(下转第890页)