

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202405272024101990

文章编号:1674-599X(2024)05-0062-08

引用格式:杨洋,肖博文,李洪舟,等.粗骨料对超高性能混凝土中钢筋黏结性能的影响[J].交通科学与工程,2024,40(5):62-69.

Citation: YANG Yang, XIAO Bowen, LI Hongzhou, et al. Influence of coarse aggregates on bonding performance of steel reinforcements in ultra-high performance concrete [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5): 62-69.

## 粗骨料对超高性能混凝土中钢筋黏结性能的影响

杨洋<sup>1</sup>,肖博文<sup>1</sup>,李洪舟<sup>1</sup>,张靖航<sup>2</sup>,邹有宝<sup>2</sup>,黄敦文<sup>2</sup>,彭晖<sup>2</sup>

(1.达濠市政建设有限公司,广东 汕头 515041;2.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**含粗骨料的超高性能混凝土(ultra-high performance concrete-coarse aggregate, UHPC-CA)拥有低成本、低收缩的优势,且适用于常温养护的现浇工程,因而具有广阔的应用前景。基于此,聚焦于UHPC-CA中的钢筋拉拔性能,开展了钢筋拉拔试验研究,分析了试件的黏结应力-滑移曲线,并系统性地探讨了粗骨料粒径、掺量以及钢纤维掺量三者如何协同作用于UHPC-CA中的钢筋黏结性能。研究发现:所有钢筋拉拔试件均呈现劈裂破坏的特征,揭示了UHPC-CA在特定条件下的力学行为特性。值得注意的是,粗骨料粒径、掺量以及钢纤维掺量对钢筋黏结性能的影响并非简单线性递增,而是存在一个最优区间,使得UHPC-CA的钢筋黏结性能达到最大化;当粗骨料粒径为5~8 mm、掺量为20%,且钢纤维掺量为2%时能够配制出具有最佳钢筋黏结性能的UHPC-CA,这一发现为实际工程应用提供了重要的参考依据。

**关键词:**超高性能混凝土;粗骨料;钢纤维;抗压强度;黏结应力-滑移曲线;黏结强度

中图分类号:U414

文献标志码:A

### Influence of coarse aggregates on bonding performance of steel reinforcements in ultra-high performance concrete

YANG Yang<sup>1</sup>, XIAO Bowen<sup>1</sup>, LI Hongzhou<sup>1</sup>, ZHANG Jinghang<sup>2</sup>, ZOU Youbao<sup>2</sup>, HUANG Dunwen<sup>2</sup>, PENG Hui<sup>2</sup>

(1. Dahao Municipal Construction Co., Ltd., Shantou 515041, China; 2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** Ultra-high performance concrete-coarse aggregate (UHPC-CA) has broad application prospects due to its low cost and low shrinkage characteristics, and it can be used in cast-in-place engineering for room-temperature maintenance. On this basis, the tensile performance of steel reinforcements in UHPC-CA was analyzed, and tensile tests were conducted. The bond stress-slip curves of the specimens were analyzed, and the synergistic effects of particle size and content of coarse aggregates and steel fiber content on the bonding performance of steel reinforcements in UHPC-CA were systematically discussed. The results show that all tensile specimens exhibit splitting failure, revealing the mechanical behavior of UHPC-CA under certain conditions. It is worth noting that the influence of particle size and content of coarse aggregates and steel fiber content on the bonding performance of steel reinforcements is not linearly increasing, but there is an optimal interval, which can maximize the bonding performance of steel reinforcements in UHPC-CA. When the particle size and content of coarse aggregates are 5-8 mm and 20%, and the steel fiber content is 2%, UHPC-CA with optimal bonding performance of steel reinforcements can be prepared, providing an important

收稿日期:2024-05-27

基金项目:国家自然科学基金项目(52178186, 52008036);湖南省自然科学基金项目(2021JJ40581);湖南省教育厅科研项目(22B0344);交通基础设施安全风险管控交通运输行业重点实验室(长沙)开放基金资助项目(22KF02)

通信作者:黄敦文(1990—),男,副教授,主要从事桥梁高性能材料与新结构体系方面的研究工作。

E-mail: dw.huang@csust.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

reference for practical engineering applications.

**Key words:** ultra-high performance concrete; coarse aggregate; steel fiber; compressive strength; bond stress-slip curve; bonding strength

超高性能混凝土(UHPC)以其卓越的力学性能、出色的体积稳定性及优良的耐久性,在材料科学领域展现出显著优势<sup>[1-3]</sup>。然而,高昂的原料成本以及复杂的蒸压养护过程限制了UHPC的大规模推广和应用<sup>[4]</sup>。为了突破这一局限,研究人员创新性地引入了含粗骨料的超高性能混凝土(UHPC-CA)。此举不仅减少了对昂贵胶凝材料的需求,显著降低了生产成本,而且通过粗骨料的加入,有效遏制了UHPC的自收缩现象,进一步提升了混凝土的体积稳定性。UHPC-CA的引入还打破了传统UHPC对蒸压养护过程的依赖,为超高性能混凝土的施工与应用开辟了更加灵活与经济的途径<sup>[5-7]</sup>。

钢筋与混凝土之间良好的黏结性能是确保两者协同工作的前提。在混凝土结构中,其黏结性能的好坏直接影响着结构的整体性能和安全性。钢纤维的掺入显著改变了UHPC的开裂特性,进而提升了带肋钢筋与UHPC之间的握裹力。基于此,赵灿晖等<sup>[8]</sup>开展了保护层厚度对钢筋与UHPC黏结性能的影响分析。结果表明:虽然保护层厚度的增加对初始滑移时的黏结应力影响有限,但它能显著增强钢筋周围UHPC抵抗劈裂破坏的能力,从而有效提升构件极限黏结应力;在相同规格的试件中,相较于未掺入粗骨料的UHPC,掺入粗骨料的UHPC所需保护层厚度更大。HU等<sup>[9]</sup>研究了高强钢筋与UHPC之间的黏结性能,发现黏结强度随钢筋直径的增大而提高。李艳艳等<sup>[10]</sup>发现,随着锚固长度的减小,黏结强度反而提高,当锚固长度为 $3d$ ( $d$ 为钢筋直径)时,试件表现出优良的黏结性能。张文华<sup>[11]</sup>在传统UHPC材料中分别掺入了四种不同粒径的粗骨料,并对其进行抗压试验。结果表明:最大粒径为10 mm的粗骨料对UHPC-CA抗压强度的提升效果最为显著,同时能有效减少胶凝材料的用量。苏捷等<sup>[12]</sup>对UHPC-CA的力学性能进行了研究,发现当钢纤维掺量为3%时,立方体试件的抗压强度相较于不掺入纤维的试件有显著提高。GARCIA-TAENGUA等<sup>[13]</sup>研究了钢纤维掺量对UHPC与钢筋之间黏结性能的影响,发现纤维掺量存在一个临界值,超过此值后,其极限黏结强度无明显提升。LIU等<sup>[14]</sup>指出:掺入适量粗骨料有助于

提高UHPC的抗压强度,但过量粗骨料则会降低其黏结强度。

以往的研究在探讨UHPC-CA的钢筋黏结性能时,往往局限于单一因素的分析,未能全面考察粗骨料粒径、掺量以及钢纤维掺量三者之间复杂的交互作用,同时忽视了抗压强度与黏结强度之间紧密的内在联系。基于此,本研究拟开展不同粒径、掺量的粗骨料及不同掺量钢纤维组合下UHPC-CA的钢筋拉拔试验,并排除了抗压强度变化对黏结强度带来的干扰,确保能够准确分析粗骨料粒径、掺量以及钢纤维掺量对钢筋黏结强度的直接作用,以期提出优化后的粗骨料和钢纤维配合比方案,确保UHPC-CA中钢筋黏结性能最大化。

## 1 试验设计

### 1.1 原材料及配合比

水泥采用湖南韶峰湘乡水泥有限责任公司生产的南方牌P·O 52.5级普通硅酸盐水泥,具体成分见表1;掺合料采用江苏苏博特新材料股份有限公司提供的SBT®-HDC(V)UHPC掺合料,该掺合料可减小30%以上的低水胶比混凝土黏度,且28 d活性指数大于110%;钢纤维采用江西大业金属纤维有限公司生产的平直型镀铜钢纤维,其中钢纤维直径为0.2 mm,长度为13 mm;细骨料选用最大粒径为5 mm的天然河砂,其细度模数为2.3;粗骨料选择湖南省的玄武岩碎石;减水剂选用减水率大于30%的聚羧酸减水剂。前期预试验表明,5~8 mm粒径的粗骨料与所采用的HRB400级、公称直径为22 mm且肋间距为10.5 mm的钢筋较为适配,故本试验围绕此粒径开展试验设计。本研究选取的具体配合比见表2。

表1 水泥化学组分及质量分数

**Table 1** Chemical composition and mass fraction of cement

%								
$w$ (CaO)	$w$ (SiO <sub>2</sub> )	$w$ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$w$ (MgO)	$w$ (SO <sub>3</sub> )	$w$ (Na <sub>2</sub> O)	$w$ (K <sub>2</sub> O)	$w$ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$w$ (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
59.98	19.50	6.02	2.95	3.16	0.32	0.79	5.51	1.77

表2 UHPC-CA 配合比  
Table 2 UHPC-CA mix ratio

编号	配合比/(kg·m <sup>-3</sup> )			水胶比	减水剂 质量分数/%	粗骨料 粒径/mm	粗骨料 掺量/%	钢纤维 掺量/%
	水泥	掺合料	石英砂					
R0-C0-P2	900	600	800	0.16	2	0	0	2
R8-C10-P2	900	600	800	0.16	2	5~8	10	2
R8-C20-P2	900	600	800	0.16	2	5~8	20	2
R8-C30-P2	900	600	800	0.16	2	5~8	30	2
R8-C40-P2	900	600	800	0.16	2	5~8	40	2
R8-C20-P0	900	600	800	0.16	2	5~8	20	0
R8-C20-P1	900	600	800	0.16	2	5~8	20	1
R8-C20-P3	900	600	800	0.16	2	5~8	20	3
R8-C20-P4	900	600 <td 800	0.16	2	5~8	20	4	
R5-C20-P2	900	600	800	0.16	2	3~<5	20	2
R10-C20-P2	900	600	800	0.16	2	8~<10	20	2

注: R0-C0-P2表示粗骨料最大粒径为0 mm,粗骨料掺量为0%,钢纤维掺量为2%,其余以此类推。

1.2 试件制备

依据表2中的配合比,将水泥、掺合料、石英砂与粗骨料预先进行干拌处理,持续时间为30~60 s。向该干混料中缓慢加入减水剂与水,并持续搅拌3~4 min,直至形成均匀的浆体。在低速搅拌的同时,逐渐将钢纤维加入浆体中,直至钢纤维完全融入,之后继续搅拌3~4 min,以确保钢纤维在浆体中均匀分布且浆体达到理想的匀质性。为确保试验结果的准确性,同时浇筑了13组试件,每组

包含3个中心拉拔试件用于评估黏结强度,以及6个抗压试件用于测定抗压强度。试验时,取每组3个同类型试件测试结果的算术平均值,作为该组试件的抗压和黏结强度值。所有抗压试件与中心拉拔试件均在静置48 h后拆模,随后进行48 h的90 °C蒸汽养护,并在自然冷却后进行测试,测试龄期为7 d。拉拔试件的具体构造及尺寸如图1所示。

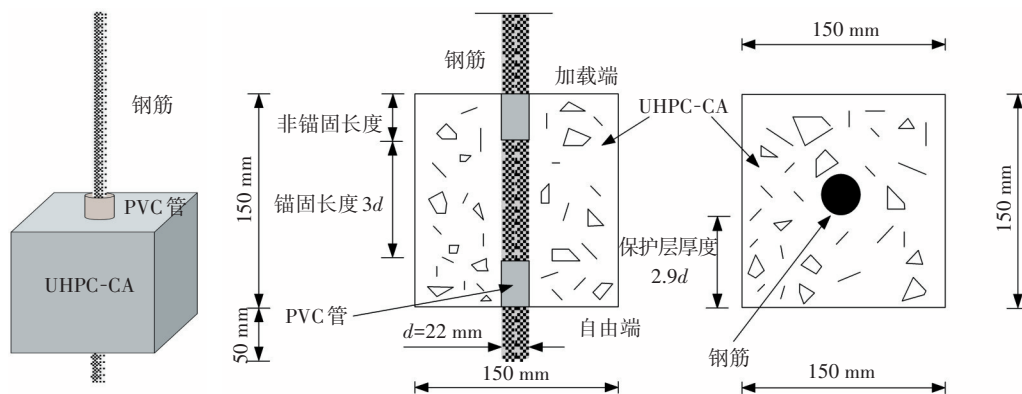


图1 拔出试件尺寸图

Fig. 1 Dimensional drawing of extracted specimen

1.3 试验方法

依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019),在压力机上开展立方体试块(100 mm×100 mm×100 mm)抗压试验。为控制试验结果的离散度,当同组的两个试件试验结果的相对误差超出20%时,须重做该组试验。拉拔试验装置

如图2所示,试件由钢框架连接、WAW-2000B型电液伺服试验机施加拉力。采用位移控制的加载方式,加载速度为2 mm/min。在试件的底面及钢筋自由端放置三个位移传感器,以测量UHPC-CA和钢筋之间的相对滑移,位移传感器与动态信号测试分析系统相连,荷载由试验机直接采集。

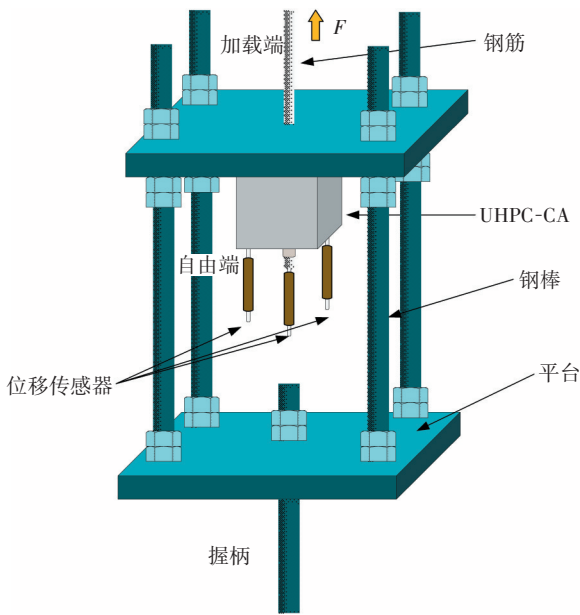


图2 拉拔装置示意图  
Fig. 2 Tensile test device

## 2 试验结果与讨论

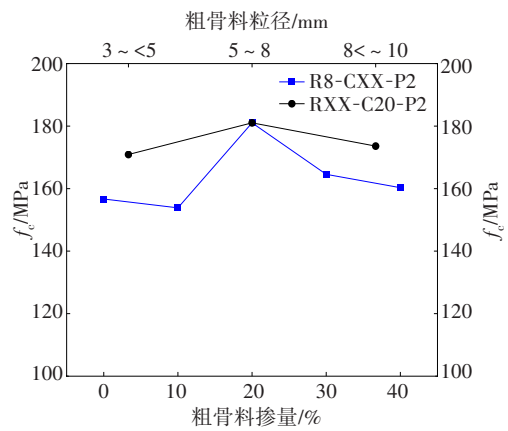
### 2.1 UHPC-CA立方体抗压强度测试结果

图3为不同粒径、掺量的粗骨料与不同掺量钢纤维组合下的UHPC-CA立方体抗压强度 $f_c$ 试验结果。由图3(a)可知,将粗骨料掺量设置为自变量,粗骨料粒径固定为5~8 mm,发现当粗骨料掺量为20%时,立方体抗压强度达到最大值,相较于未添加粗骨料的基准组,其强度提升了15.55%。这主要是因为适量的粗骨料能在UHPC-CA基体内部形成整体性较好的刚性骨架,增强骨料之间的咬合作用力。同时钢纤维能有效锚固于骨料与基体之间,三者协同作用,显著提升了体系的整体性能,从而增强了UHPC-CA的立方体抗压强度。当粗骨料掺量增加至40%时,立方体抗压强度明显降低,较20%掺量时降低了11.46%。原因可能是过多的粗骨料增大了其与基体的接触面积,在拌合过程中吸收了更多的水分,造成新拌混凝土的流动性下降,进而增加了钢纤维结团的可能性,降低了浆体搅拌的均匀性。此时,混凝土内部结构缺陷增多,会造成UHPC-CA立方体抗压强度下降。同时,过多的粗骨料掺量也可能导致材料的致密度降低,颗粒排列松散,进一步削弱了UHPC-CA的立方体抗压强度。

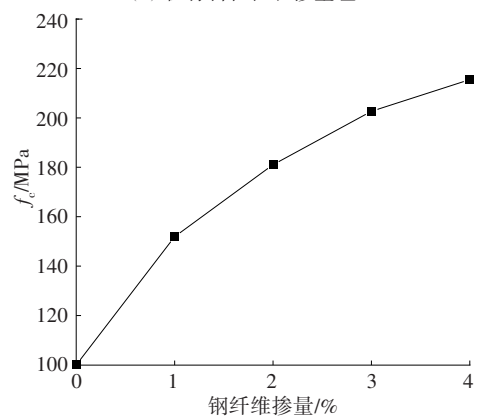
由图3(a)可知,将粗骨料掺量固定为20%,粗骨料粒径设置为自变量,当粗骨料粒径为5~8 mm时,UHPC-CA的立方体抗压强度达到了最大值,而增加

或者减小骨料粒径均会降低其立方体抗压强度。当粒径为3~<5 mm时,立方体抗压强度相较于粒径为5~8 mm时降低了5.59%,当粒径为8~<10 mm时,立方体抗压强度相较于粒径为5~8 mm时降低了4.10%。这可能是因为当粗骨料粒径适中时,骨料之间的咬合作用更明显,基体与骨料之间接触面积增加,黏结力变大,立方体抗压强度出现小幅增长。但过大的粗骨料粒径可能导致颗粒级配失衡,不利于材料的堆积密实度和内聚力,降低了立方体抗压强度。

由图3(b)可知,随着钢纤维掺量的增加,UHPC-CA的立方体抗压强度有明显提升,但其增长幅度逐渐减小。当钢纤维掺量为4%时,立方体抗压强度相比于无钢纤维基准试件提升了115.46%。钢纤维在混凝土中的作用机制在于其能够有效地约束和控制裂缝在受力过程中的扩展,形成一种增强的支撑网络,从而显著延缓裂缝的产生与发展。这种抗裂效应极大地提升了混凝土的整体结构稳定性和抗压能力。此外,随着钢纤维掺量的适度增加,其在混凝土基体中的分布愈发均匀,这种状态进一步增强了其阻止和延缓裂缝发展的能力,实现了立方体抗压强度的提升<sup>[15]</sup>。



(a) 粗骨料粒径和掺量组



(b) 钢纤维掺量组

图3 不同粒径及掺量组合下UHPC-CA的立方体抗压强度

Fig. 3 Compressive strength of UHPC-CA with different particle size and content combinations



## 2.2 拉拔试验结果

### 2.2.1 破坏模式

本次试验中所有试件均呈现出如图4所示的劈裂破坏模式。当UHPC-CA试件受到拉力时,钢筋周围的混凝土开始产生微裂纹。随着荷载的逐步施加,微裂纹逐渐扩展并相互贯通,形成了更大的裂缝,此时可以明显地观测到纤维材料能跨接裂缝,起到桥接作用。随着荷载的进一步增大,裂缝沿着钢筋表面或周围混凝土区域迅速扩展,最终导致混凝土产生局部破坏。随着裂缝的不断扩展,钢筋周围混凝土的约束能力逐渐减弱,直至无法有效锚固钢筋。



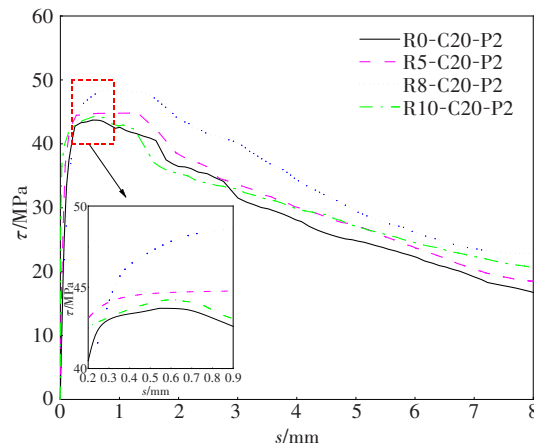
图4 UHPC-CA破坏模式(劈裂破坏)

Fig. 4 UHPC failure mode (splitting failure)

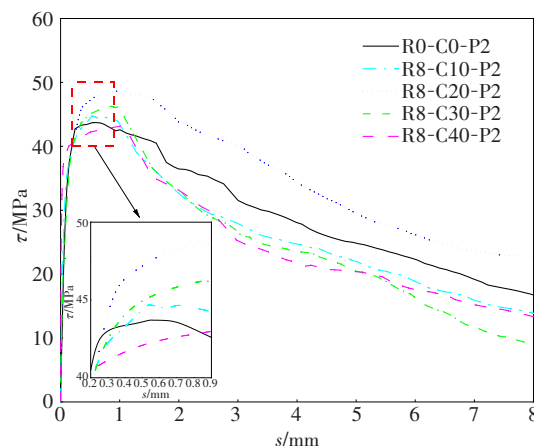
### 2.2.2 UHPC-CA黏结应力-滑移曲线

试件的黏结应力-滑移曲线( $\tau$ - $s$ )如图5所示。除钢纤维掺量为0%的试件因混凝土劈裂破坏迅速未能测得下降段外,其余试件均测得了完整的 $\tau$ - $s$ 曲线。这些曲线与纤维混凝土的轴心受拉曲线类似<sup>[16]</sup>,大体可以概括为三个阶段:1)开裂前阶段。此时所有试件的黏结应力与滑移量呈近似线性关系,表明UHPC-CA和钢筋之间处于完全黏结状态,未发生相对滑移。2)开裂至峰值应力阶段。随着荷载的持续增加,试件自由端开始发生滑移,此时黏结应力-滑移曲线上升段的应力降低,展现出非线性特征,直至达到峰值应力。此时,钢筋表面开始出现裂缝,裂缝内可见钢纤维,说明与裂缝相交的纤维变形增大导致应力倍增,开裂区域的拉应力逐渐由纤维承担。在此阶段,钢筋界面的化学

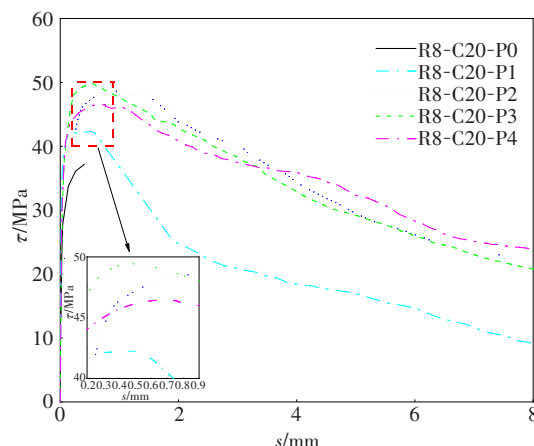
黏结力逐渐减弱,黏结应力的传递逐渐依赖于钢筋肋部的机械咬合力和钢筋表面的摩擦力。3)峰值应力后的破坏阶段。一旦达到峰值应力,滑移量迅速增加,黏结应力下降直至试件最终破坏。此时,钢筋界面处的裂缝进一步扩展并相互贯通,标志着钢筋界面处的UHPC-CA基体已完全丧失承载能力。



(a) 骨料粒径组



(b) 骨料掺量组



(c) 钢纤维掺量组

图5 不同参数UHPC-CA的钢筋黏结应力-滑移曲线

Fig. 5 Bond stress-slip curves of steel reinforcements with different parameters in UHPC-CA

由图5(a)可知,粗骨料粒径为5~8 mm时,曲线线性阶段斜率最大,此时黏结应力最大。当粗骨料粒径为8<~10 mm时,曲线线性阶段斜率最小。但图5(a)中各曲线斜率差异细微。由图5(b)可知,当粗骨料掺量为20%时,试件的黏结强度最大。除骨料掺量为40%的曲线峰值外,其余骨料掺量的曲线峰值均比未掺骨料时的曲线峰值大,说明掺入适量的骨料有助于提升黏结强度。骨料掺量为40%时,可能是骨料过多引起了混凝土缺陷增多,降低了黏结强度。此外,从峰值后的曲线下速率来看,仅20%掺量有助于保持开裂后的黏结性能,其余掺量则使UHPC-CA黏结性能表现出“脆性”的特征。从图5(c)可知,钢纤维掺量为3%时,试件的黏结强度达到顶峰,但随后应力衰减较为迅速。除钢纤维掺量为1%的曲线峰值较低外,其余钢纤维掺量曲线的黏结强度大体相等,当钢纤维掺量在2%以上时,其对构件黏结性能的提升才较为明显。

### 2.3 粗骨料粒径、掺量和钢纤维掺量对UHPC-CA黏结强度的影响

在UHPC-CA与钢筋的整个锚固长度范围内,二者间的黏结应力呈非均匀分布。为了简化计算,通常假设沿锚固长度的黏结应力是均匀分布的<sup>[17]</sup>。计算平均黏结强度 $\tau_u$ 的公式如下:

$$\tau_u = \frac{F}{\pi dL} \quad (1)$$

式中: $F$ 为极限荷载; $d$ 为钢筋直径; $L$ 为锚固长度。

可运用黏结强度与立方体抗压强度 $f_c$ 的1/4次方之比来表征超高性能混凝土各参数对钢筋黏结强度的影响,以便排除这些参数所导致的抗压强度变化对黏结强度的潜在干扰。下文围绕 $\tau_u$ 和 $\tau_u/f_c^{1/4}$ 两个参数展开分析。图6绘制了粗骨料掺量、粒径与不同钢纤维掺量组合下UHPC-CA的 $\tau_u$ 和 $\tau_u/f_c^{1/4}$ 的变化情况。

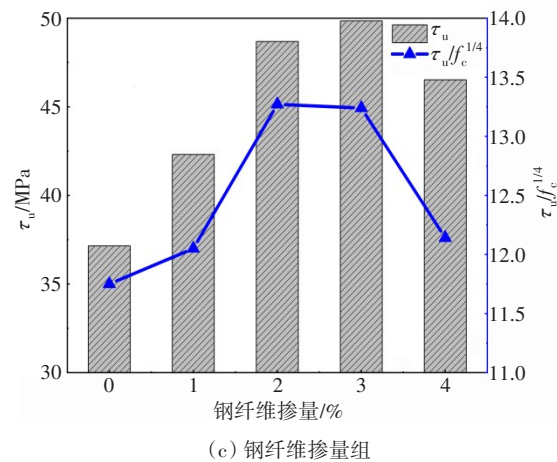
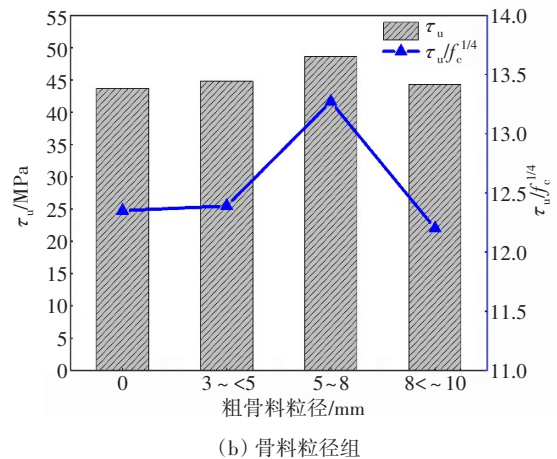
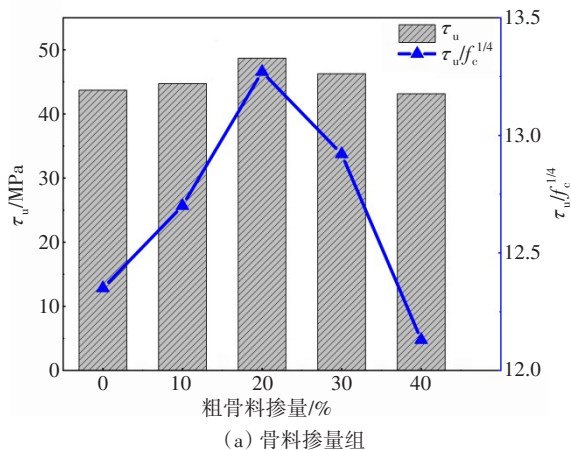


图6 各参数对 $\tau_u$ 和 $\tau_u/f_c^{1/4}$ 的影响

Fig. 6 Influence of each parameter on  $\tau_u$  and  $\tau_u/f_c^{1/4}$

由图6(a)可知,当粗骨料掺量为20%时,拉拔试件 $\tau_u$ 和 $\tau_u/f_c^{1/4}$ 均达到最大值,相较于未掺入粗骨料时分别增加了10.23%和7.45%。原因是适量粗骨料的掺入,增加了钢筋肋间区域界面的局部刚度,强化了粗骨料与基体的“互锁效应”,阻止和延缓了结合区内微裂纹的发展,进而提高了黏结强度。当粗骨料掺量为10%时, $\tau_u$ 和 $\tau_u/f_c^{1/4}$ 相较于未掺入粗骨料时分别增加了2.83%和2.38%。这表明,当粗骨料掺量较低时,骨料难以集中分布于钢筋肋间区域,因此无法有效提升黏结强度。而当粗骨料掺量为40%时, $\tau_u$ 和 $\tau_u/f_c^{1/4}$ 相较于粗骨料掺量为20%时分别降低了11.36%和8.59%。这一现象可能归因于随着粗骨料掺量的进一步增加,新拌混凝土的流动性降低,钢纤维在混凝土中的分布变得不均匀了。钢纤维结团现象的增多,降低了钢纤维与基体之间的有效黏结力,进而减弱了钢纤维对钢筋黏结强度的增强作用。

由图6(b)可知,当粗骨料最大粒径小于8 mm

时,  $\tau_u$  和  $\tau_w/f_c^{1/4}$  随着粗骨料粒径的增加而增加。这是由于大粒径骨料的比表面积比小粒径骨料的小, 在掺量相同时, 粒径越大的骨料对应的浆骨界面过渡区越少, 骨料对钢筋肋间区域局部刚度增强效果越明显, 进而增强了混凝土与钢筋之间的互锁力, 最终提升了黏结强度。当粒径为 3 ~ <5 mm 时, 拉拔试件的  $\tau_u$  和  $\tau_w/f_c^{1/4}$  相较于粒径为 5 ~ 8 mm 时分别降低了 7.95% 和 6.63%。而相较于不掺入粗骨料的 UHPC-CA, 拉拔试件的  $\tau_u$  和  $\tau_w/f_c^{1/4}$  仅提高了 2.54% 和 0.32%。这可能是由于粒径为 3 ~ <5 mm 的粗骨料与基体材料之间的浆骨界面过渡区相对较多, 进而其薄弱环节较多, 互锁效应有限, 因而黏结强度提升不明显。当粒径为 8 < ~ 10 mm 时, 拉拔试件的  $\tau_u$  和  $\tau_w/f_c^{1/4}$  相较于粒径为 5 ~ 8 mm 时分别降低了 9.02% 和 8.06%, 这可能是由于骨料粒径接近于钢筋肋间距, 增大了骨料棱角不在肋间的可能性, 进而黏结破坏过程中的互锁效应变得较弱。

由图 6(c) 可知, 适当增加钢纤维的掺量能够显著提升黏结强度。当钢纤维掺量为 1% 时, 拉拔试件的  $\tau_u$  和  $\tau_w/f_c^{1/4}$  相较于未掺入钢纤维时分别提升了 13.89% 和 2.55%; 当钢纤维掺量为 3% 时, 拉拔试件的  $\tau_u$  和  $\tau_w/f_c^{1/4}$  相较于未掺入钢纤维时分别提升了 34.16% 和 12.68%。这可能是由于适量的钢纤维能够有效发挥桥接作用, 抑制混凝土内部微裂缝的扩展, 促进混凝土内应力的有效传递与增强, 进而提升了钢筋与混凝土之间的界面黏结性能<sup>[17-18]</sup>。当钢纤维掺量从 2% 增长到 3% 时, 尽管试件的  $\tau_u$  提升了 2.38%, 但  $\tau_w/f_c^{1/4}$  却下降了 0.23%。此时黏结强度的提高归因于混凝土强度的增加, 而非钢纤维骨架作用的进一步加强。当钢纤维掺量为 4% 时, 试件的  $\tau_u$  和  $\tau_w/f_c^{1/4}$  相较于钢纤维掺量为 3% 时分别下降了 6.66% 和 8.31%。这可能是由于过大的钢纤维掺量使钢纤维之间产生了交叉和纠缠, 进而钢筋与混凝土之间产生了较大的空隙和缺陷, 降低了黏结强度。

### 3 结论

本文研究了含粗骨料的 UHPC-CA 的黏结性能, 以及粗骨料粒径、掺量和钢纤维掺量对含粗骨料的超高性能混凝土 (UHPC-CA) 与钢筋之间黏结性能的影响。主要结论如下:

1) 粗骨料的粒径与掺量对黏结强度的影响并

非简单地单调递增, 而是存在最优范围。只有在这个范围内, 粗骨料才能显著提升 UHPC-CA 的钢筋黏结强度。

2) 在一定范围内, 黏结强度随着钢纤维掺量的增加而提高。但掺量过高会导致黏结强度增幅减小, 尽管如此, 其黏结强度仍远高于未掺入钢纤维时的情况。

3) 当使用粒径为 5 ~ 8 mm 的粗骨料, 且掺量为 20%, 同时搭配 2% 的钢纤维掺量时, 可以获得最佳的 UHPC-CA 钢筋黏结强度。

### 参考文献 (References):

- [1] DU J, MENG W N, KHAYAT K H, et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC) [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 224: 109220. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109220.
- [2] SHAFIEIFAR M, FARZAD M, AZIZINAMINI A. Experimental and numerical study on mechanical properties of ultra high performance concrete (UHPC) [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 156: 402-411. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.170.
- [3] 赵继之, 辛公锋, 陶慕轩, 等. 超高性能混凝土单轴拉、压循环作用下力学性能及其本构模型研究 [J]. *工程力学*, 2022, 39: 1-13. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.04.0339.  
ZHAO Jizhi, XIN Gongfeng, TAO Muxuan, et al. Mechanical properties and constitutive model of ultra-high performance concrete material under uniaxial tension and compression cycles [J]. *Engineering Mechanics*. 2022, 39: 1-13. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.04.0339.
- [4] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2014, 31(3): 1-24. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2049.2014.03.002.  
CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of research on ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2014, 31(3): 1-24. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2049.2014.03.002.
- [5] ZHANG Y S, SUN W, LIU S F, et al. Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static - dynamic behaviors [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(9): 831-838. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.06.008.
- [6] YANG S L, MILLARD S G, SOUTSOS M N, et al. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(6): 2291-2298. DOI:



- 10.1016/j.conbuildmat.2008.11.012.
- [7] WILLE K, NAAMAN A E, EL-TAWIL S, et al. Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing [J]. *Materials and Structures*, 2012, 45(3): 309-324. DOI: 10.1617/s11527-011-9767-0.
- [8] 赵灿晖,李浩稻,邓开来. 钢筋与粗骨料超高性能混凝土黏结性能试验研究[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(5): 937-944. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20170513. ZHAO Canhui, LI Haodao, DENG Kailai. Experimental study on the bonding performance between rebar and coarse aggregate ultra-high performance concrete [J]. *Southwest Jiaotong University*. 2019, 54(5): 937-944. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20170513.
- [9] HU A X, LIANG X W, SHI Q X. Bond characteristics between high-strength bars and ultrahigh-performance concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(1): 32-35. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002919.
- [10] 李艳艳,赵银磊,武凯,等. 高强钢筋与超高性能混凝土黏结性能及可靠度分析[J]. *工程力学*, 2023, 40: 1-10. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2023.04.0234. LI Yanyan, ZHAO Yinlei, WU Kai, et al. Bond property and reliability analysis between high strength rebar and ultra-high performance concrete [J]. *Engineering Mechanics*. 2023, 40: 1-10. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2023.04.0234.
- [11] 张文华. 超高性能水泥基复合材料微结构形成机理与动态力学行为研究[D]. 南京: 东南大学, 2013. ZHANG Wenhua. Study on microstructure formation mechanism and dynamic mechanical behavior of ultra-high performance cement-based composites [D]. Nanjing: Southeast University, 2013.
- [12] 苏捷,史才军,黄泽恩,等. 粗骨料含量对超高性能混凝土抗压强度尺寸效应的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(11): 2416-2422. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20210401. SU Jie, SHI Caijun, HUANG Zeen, et al. Scale effect on cubic compressive strength on ultra-high performance concrete containing coarse aggregate [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(11): 2416-2422. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20210401.
- [13] GARCIA-TAENGUA E, MARTÍ -VARGAS J R, SERNA P. Bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 105: 275-284. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.044.
- [14] LIU J Z, HAN F Y, CUI G, et al. Combined effect of coarse aggregate and fiber on tensile behavior of ultra-high performance concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 121: 310-318. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.039.
- [15] 牛国强. 含粗骨料超高性能混凝土与高强钢筋黏结性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2022. NIU Guoqiang. Experimental study on bond performance of ultra-high performance concrete with coarse aggregate and high strength steel bar [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.
- [16] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. GUO Zhenhai, SHI Xudong. Reinforced concrete theory and analyse [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2003.
- [17] ALKAYSI M, EL-TAWIL S. Factors affecting bond development between ultra high performance concrete (UHPC) and steel bar reinforcement [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 144: 412-422. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.091.
- [18] 毛强,苏振宏,周晨林,等. 基于碱熔法的玄武岩活性影响因素研究[J]. *交通科学与工程*, 2022, 38(4): 41-45. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.011. MAO Qiang, SU Zhenhong, ZHOU Chenlin, et al. Research on factors affecting the reactivity of basalt based on alkali fusion method [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2022, 38(4): 41-45. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.011.

(责任编辑:薛仪)