

# 混凝土与双相体不锈钢钢筋黏结性能试验研究

Comparative Experimental Study on the Bonding Performance of Concrete with Duplex Stainless Steel Reinforcement

王 静<sup>1</sup>, 张天宇<sup>1</sup>, 高荣丽<sup>2</sup>, 李海云<sup>1</sup>, 李 然<sup>1</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 中铁建安工程设计院有限公司, 石家庄 050000)

**摘要:** 对 17 组普通混凝土和超高性能混凝土 (UHPC) 与双相体不锈钢筋黏结性能的中心拉拔试验, 综合考虑试件的混凝土强度等级、钢筋直径、相对保护层厚度及相对锚固长度等影响因素, 分别研究两种不同类型混凝土与双相体不锈钢筋之间的黏结性能。结果表明: 普通混凝土试件破坏现象为钢筋拔出破坏, UHPC 试件破坏现象为钢筋拔出破坏、混凝土劈裂破坏和钢筋拔断破坏。混凝土强度等级越高、相对保护层厚度越大及相对锚固长度越长均能增强混凝土与不锈钢筋的黏结性能。在相同条件下, UHPC 强度高, 内部存在钢纤维, 限制了侧向膨胀, 极大增强了与不锈钢筋的握裹能力。因此, UHPC 与不锈钢筋的黏结性能要明显好于普通混凝土。

**关键词:** 双相体不锈钢筋; UHPC; 普通混凝土; 黏结性能

**中图分类号:** TU375.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-8249 (2025) 06-0128-08

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.022

WANG Jing<sup>1</sup>, ZHANG Tianyu<sup>1</sup>, GAO Rongli<sup>2</sup>, LI Haiyun<sup>1</sup>, LI Ran<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. China Railway Jian'an Engineering Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** This study investigated the bond performance between duplex stainless steel rebar and two types of concrete, ordinary concrete and ultra-high performance concrete (UHPC), using 17 sets of center pull-out tests. Key parameters including concrete strength grade, rebar diameter, relative cover thickness, and relative anchorage length. The results show that ordinary concrete specimens failed primarily by rebar pullout, whereas UHPC specimens exhibited three failure modes: rebar pullout, concrete splitting, and rebar fracture. Enhanced bond performance was observed with higher concrete strength grade, larger relative concrete cover thickness, and longer relative anchorage length. Under identical conditions, UHPC demonstrated significantly superior bond capacity with stainless steel rebar compared to ordinary concrete, attributable to its ultra-high strength and steel fibers that restrict lateral expansion. Thus, UHPC exhibits markedly better bond behavior with duplex stainless steel rebar than ordinary concrete.

**Key words:** duplex stainless steel reinforcement; ultra-high performance concrete; ordinary concrete; bonding performance

## 0 引言

钢筋混凝土结构是我国建筑工程中应用最广泛的结构形式之一, 其良好的受力性能依赖于混凝土与钢筋之间的黏结强度, 然而钢筋锈蚀是影响两者之间黏结强度的重要因素<sup>[1-2]</sup>。一般情况下, 钢筋混凝土构件处于带裂缝状态工作, 空气中的氯离子会破坏钢筋表面的钝化膜并加速锈蚀, 导致钢筋与混

**作者简介:** 王 静 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 高性能混凝土结构设计及理论。

**通信作者:** 高荣丽 (1977—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 结构设计及理论。

收稿日期: 2024-11-19

混凝土之间的黏结性能降低,从而影响结构的耐久性。传统混凝土通常由水泥、砂、骨料和水拌和而成,其力学性能与耐久性存在一定局限,超高性能混凝土(UHPC)因其优异的性能受到广泛关注。陈宝春等<sup>[3]</sup>研究发现,通过优化材料配合比,并采用特殊的细骨料(如硅灰、硅烧结砂等)以及特定比例的化学掺合剂,可明显提升UHPC的力学性能,使结构具有更高的强度和延性。同时,传统钢筋易发生锈蚀,而耐腐蚀性能优异的不锈钢钢筋可从根本上解决该问题,从而提高构件的耐久性。

在钢筋与混凝土间黏结性能研究方面,早期学者毛达岭等<sup>[4]</sup>通过拉拔试验,揭示了钢筋外形、混凝土强度等因素对黏结强度与滑移特性的影响规律;徐有邻等<sup>[5]</sup>基于试验数据,建立了钢筋混凝土黏结滑移本构模型,为后续理论分析奠定了基础。目前,国内外对钢筋与混凝土间黏结性能的研究主要分为两方面:一是钢筋种类<sup>[6-7]</sup>、混凝土强度等级<sup>[8-9]</sup>、钢筋锈蚀率<sup>[10-11]</sup>等关键因素对黏结强度的影响;二是致力于建立精细的黏结滑移本构关系<sup>[12-13]</sup>。随着数值模拟技术发展,利用有限元方法分析钢筋混凝土拉拔试验并研究其黏结滑移本构关系已成为重要研究手段。例如,李晓琴等<sup>[14]</sup>建立FRP-混凝土搭接接头的精细化有限元模型,研究了在准静态

荷载和动力荷载下的黏结性能;袁晓辉等<sup>[15]</sup>通过试验和有限元分析,验证了弹簧单元在模拟复杂界面黏结滑移行为中的有效性,为后续研究提供了理论基础。

尽管上述研究取得了显著进展,但关于不锈钢钢筋与混凝土(特别是UHPC)界面黏结性能的研究尚显不足。因此,制备了普通混凝土、UHPC与不锈钢钢筋拉拔试件,研究混凝土强度、相对保护层厚度、相对锚固长度、钢筋直径以及箍筋配箍率等参数对黏结性能的影响。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 材料性能

根据GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》制作了3组普通混凝土试件(每组3个试件,强度等级分别为C30、C40、C50),和8个UHPC试件,试件尺寸均为100 mm×100 mm×100 mm,各试件配合比见表1,其中UHPC中采用直径为0.18~0.23 mm、长度为12~14 mm的镀铜钢纤维。采用微机屏显式液压试验机,以0.6 MPa/s的速率对标准试件进行加载,测得C30、C40、C50普通混凝土的立方体抗压强度 $f_{cu}$ 分别为34.6、44.1、56.4 MPa,UHPC立方体抗压强度 $f_{cu}$ 为121.2 MPa。

表1 混凝土配合比  
Table 1 Optimize concrete mix proportion

混凝土种类	强度等级	P·O 42.5水泥/kg	水/kg	砂/kg	石子/kg	镀铜钢纤维/kg	减水剂/kg
普通混凝土	C30	5.544	2.664	13.824	13.680		0.101
	C40	6.480	2.592	11.520	13.968		0.144
	C50	6.912	2.448	10.944	14.400		0.216
超高性能混凝土	超高	43.200	4.968			4.752	

试验选用直径分别为10、12和16 mm的1.4362双相体带肋不锈钢钢筋<sup>[16]</sup>,如图1所示。不锈钢钢筋的横肋与普通钢筋大致相同,纵肋略高于普通钢筋。根据GB/T 228.1—2021《金属材料试验拉伸》取样,采用SHT4106-G微机控制电液伺服万能试验机,以10 MPa/s的速率进行拉伸,得到不锈钢钢筋极限抗拉强度,并以残余应变的0.2%所对应的荷载作为屈服强度,测得结果取平均值,其力学性能见表2和图2。



图1 双相体不锈钢钢筋  
Fig. 1 Duplex stainless steel reinforcement

建筑结构

表 2 双相体不锈钢钢筋物理力学性能  
 Table 2 Physical and mechanical properties of duplex stainless steel reinforcement

直径 $d/\text{mm}$	屈服强度 $f_y/\text{MPa}$	极限强度 $f_u/\text{MPa}$
10	611	836
12	688	835
16	704	862

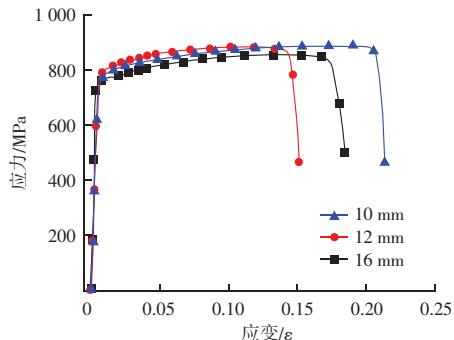


图 2 钢筋应力 - 应变曲线

**Fig. 2** Stress – strain curves of steel reinforcement

## 1.2 中心拉拔试验

### 1.2.1 试件设计

拉拔试验设置 5 个控制变量，分别是混凝土类型、相对保护层厚度、相对锚固长度、钢筋直径和配箍率，共制备了 17 个拉拔试件，各试件信息见表 3，试件加工如图 3 所示。浇筑振捣养护 28 d 后进行中心拉拔试验。

表3 试件分组及设计参数

**Table 3** Sample grouping and design parameters

试件编号	混凝土类别	d/mm	c/d	$l_a/d$	$\rho_{sv}/\%$
S-1	C30	16	2	5	
S-2	C30	16	3.25	5	
S-3	C30	16	4.5	3	
S-4	C30	16	4.5	5	
S-5	C30	16	4.5	6	
S-6	C40	16	4.5	5	
S-7	C50	16	4.5	5	
S-8	C30	12	4.5	5	
S-9	C30	16	4.5	5	0.314
HC-S-1	UHPC	12	4.5	5	
HC-S-2	UHPC	16	4.5	5	
HC-S-3	UHPC	10	4.5	5	
HC-S-4	UHPC	16	2.5	5	
HC-S-5	UHPC	16	3.25	5	
HC-S-6	UHPC	16	4.5	2.5	
HC-S-7	UHPC	16	4.5	5.5	
HC-S-8	UHPC	16	4.5	5	0.314

注:  $c$  为混凝土保护层厚度,  $d$  为钢筋直径,  $c/d$  为相对保护层厚度,  $l$  为锚固长度,  $l/d$  为相对锚固长度,  $\rho_s$  为箍筋配筋率。

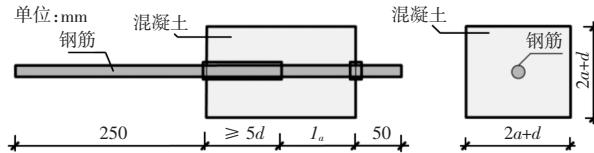


图3 拉拔试件  
Fig. 3 Pull-out specimen

### 1.2.2 加载方案

根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》，拉拔试验采用 SHT4106-G 微机控制电液伺服万能试验机，试验时固定反力架的上加载螺栓，以 0.3 kN/s 的速率对试件进行加载，试验荷载通过计算机采集，如图 4 所示。

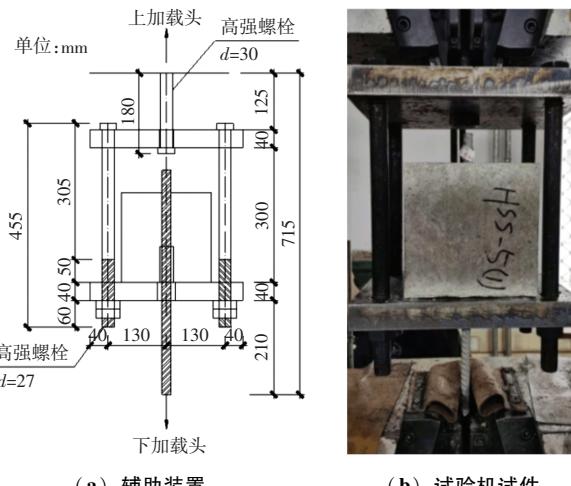


图 4 试验装置示意图  
Fig. 4 Diagram of test device

## 2 试验结果与分析

## 2.1 试验现象

普通混凝土与双相体不锈钢钢筋黏结性能试验的破坏形式有混凝土劈裂破坏和钢筋拔出破坏；而UHPC与双相体不锈钢钢筋黏结性能试验除了混凝土劈裂破坏、钢筋拔出破坏，还出现了钢筋拔断破坏。由于每组试件试验破坏形式一致，因此仅以一组为例，见表4。

普通混凝土各试件均有较好的抗拉强度，但是在水泥浆-细骨料界面区、砂浆-粗骨料界面区均存在薄弱环节，所以宏观来看，普通混凝土的抗拉强度仍处于较低水平，出现微小裂缝后，裂缝迅速蔓延扩展，导致混凝土劈裂为两瓣或三瓣，破坏过程属于脆性破坏。UHPC掺加了钢纤维，当试件出现

表4 中心拉拔试验破坏形式

Table 4 Failure mode of central pull-out test

试件编号	破坏形式	试件编号	破坏形式
S-1	劈裂破坏	HC-S-1	拔出破坏
S-2	劈裂破坏	HC-S-2	拔出破坏
S-3	拔出破坏	HC-S-3	拔出破坏
S-4	拔出破坏	HC-S-4	劈裂破坏
S-5	拔出破坏	HC-S-5	拔出破坏
S-6	拔出破坏	HC-S-6	拔出破坏
S-7	拔出破坏	HC-S-7	拔断破坏
S-8	拔出破坏	HC-S-8	拔出破坏
S-9	拔出破坏		

细小裂缝时，跨越裂缝两边的钢纤维可以提供与受拉方向相反的黏结力，约束裂缝开展，为混凝土提供了良好的塑性性能。随着荷载增加，UHPC 出现裂缝时并未导致试件迅速劈裂，而是裂缝缓慢增长，直到钢筋被拔出也未出现较宽的裂缝，破坏过程类似于延性破坏，如图 5 所示。



(a) 普通混凝土试件



(b) UHPC 试件

图 5 混凝土劈裂破坏对比

Fig. 5 Comparison of splitting failure of concrete specimens

普通混凝土由于局部应力较大，可能会出现试件靠近加载端一侧混凝土被倒锥形拔出，如图 6 (a)。UHPC 强度高，拉应力未超过混凝土的极限拉应力，



(a) 普通混凝土试件



(b) UHPC 试件

图 6 钢筋拔出破坏对比

Fig. 6 Comparison of pull-out failure of steel reinforcement specimens

所以此次试验并未出现此现象，如图 6 (b)，只是少量混凝土碎渣随钢筋被拔出。

随着锚固段的增加，极限拉拔力也随之增加，当极限拉拔力达到钢筋的断裂强度时，试件发生钢筋拔断破坏。UHPC 具备超高的抗压强度和抗拉强度，破坏时更容易发生钢筋拔断破坏。而普通混凝土抗拉强度过低，不足以支持大于钢筋断裂强度的极限拉拔力，所以并未发生钢筋拔断破坏。

## 2.2 试验曲线分析

关于钢筋拔出破坏，普通混凝土和 UHPC 的荷载 - 位移曲线形状相似（图 7），从弹性阶段（上升段）通过滑移阶段过渡到下降阶段，但 UHPC 的极限荷载和峰值位移都高于普通混凝土，可以看出 UHPC 与双相体不锈钢钢筋具有更好的黏结性能。

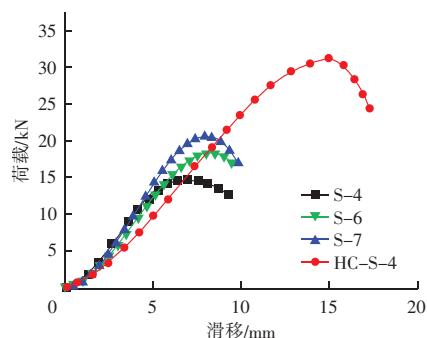


图 7 钢筋拔出破坏荷载 - 位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of extraction failure of steel reinforcement

由图 8 可看出，UHPC 和普通混凝土在上升段斜率基本相同，到普通混凝土发生劈裂破坏时 UHPC 仍处于上升阶段。两者的下降段有明显区别，普通混凝土破坏呈脆性破坏，当荷载达到峰值时下降段呈现断崖式下跌；而 UHPC 添加了钢纤维，试件在荷载作用下开裂到破坏阶段，钢纤维可以吸收部分能量，增加结构的韧性，使构件不发生脆性破坏，依然可以由滑移段过渡到下降段。

试件极限拉拔力与混凝土强度或锚固长度呈正相关，锚固长度足够长或混凝土强度足够大时，极限拉拔力达到钢筋断裂强度就会发生钢筋拔断破坏，且荷载 - 位移曲线与钢筋拉伸荷载 - 位移曲线大致相同（图 9）。普通混凝土因强度过低而未发生钢筋拔断破坏。

## 建筑结构

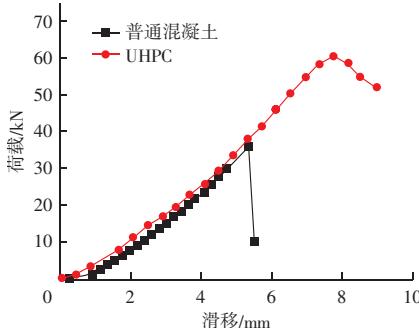


图 8 剪裂破坏荷载 - 位移曲线

Fig. 8 Load - displacement curves of splitting failure

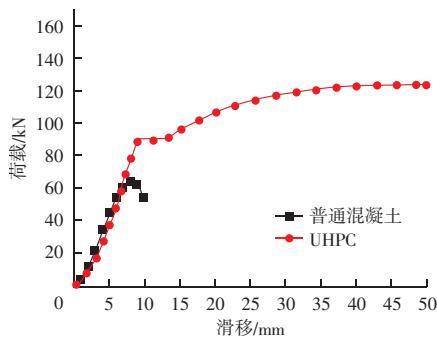


图 9 钢筋拔断破坏荷载 - 位移曲线

Fig. 9 Load - displacement curve of pull off failure of steel reinforcement

### 2.3 黏结强度分析

各试件相关数据见表 5，不同种类混凝土对双相体不锈钢钢筋的极限黏结强度见表 6。双相体带肋不锈钢钢筋的黏结力由机械咬合力、摩阻力和化学胶着力组成，其中摩阻力和化学胶着力占比较小，分析时忽略两者对黏结力的影响。以 C30 为例，双相体带肋不锈钢钢筋的肋壁对 UHPC 的咬合作用优于普通混凝土，其比值为 1.97；并且由于 UHPC 具有更好的韧性，所以 UHPC 的极限滑移量比普通混凝土大，其比值为 2.22。

#### 2.3.1 混凝土强度的影响

C30、C40、C50 三种不同混凝土强度等级及 UHPC 与不锈钢筋间的黏结性能对比结果如图 10 所示。UHPC 的极限拉拔力明显大于普通混凝土。由表 5 可知，普通混凝土强度由 C30 (S-4) 增大到 C40 (S-6) 时，黏结强度由 16.20 MPa 增大到 18.32 MPa，增长约 13.09%；由 C40 增大到 C50 (S-7) 时，黏结强度由 18.32 MPa 增大到 20.67 MPa，增幅为 12.88%；采用 UHPC (HC-S-2) 时，黏结强度增大到 31.98 MPa，比 C50 增大了 54.72%。分析结果表明，黏结锚固强

表 5 试件极限拉拔力及黏结强度试验值  
Table 5 Ultimate drawing force and bond strength test value of samples

试件编号	$F_u/kN$	$\tau_{\text{试}}/\text{MPa}$	$S/\text{mm}$
S-1	28.51	7.09	4.35
S-2	56.34	14.01	5.49
S-3	40.12	16.64	5.53
S-4	65.13	16.20	6.98
S-5	66.06	13.70	7.37
S-6	73.65	18.32	7.56
S-7	83.09	20.67	7.97
S-8	34.85	15.42	4.46
S-9	70.95	17.64	7.92
HC-S-1	59.19	32.72	12.46
HC-S-2	102.85	31.98	15.53
HC-S-3	37.65	29.90	6.45
HC-S-4	63.03	19.69	8.12
HC-S-5	75.70	23.54	7.51
HC-S-6	48.13	23.95	6.53
HC-S-7	174.13	39.38	拉断
HC-S-8	149.48	46.48	17.25

注： $F_u$  为极限拉拔力， $S$  为加载端滑移量， $\tau_{\text{试}}$  为黏结强度。

#### 表 6 不同混凝土对双相体不锈钢钢筋的黏结性能对比

Table 6 Comparison of bonding properties of different concretes to duplex stainless steel reinforcement

黏结指标	C30	C40	C50	UHPC	$\tau_{\text{UHPC}}/\tau_{\text{C30}}$	$\tau_{\text{UHPC}}/\tau_{\text{C40}}$	$\tau_{\text{UHPC}}/\tau_{\text{C50}}$
黏结强度	16.20	18.32	20.67	31.98	1.97	1.75	1.54
极限滑移量	6.98	7.56	7.97	15.53	2.22	2.05	1.94

度随着混凝土强度的提高而提高，并且与抗拉强度成正比。

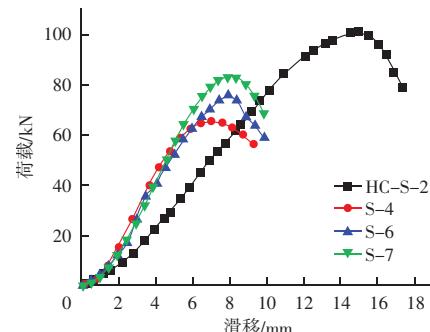


图 10 不同混凝土强度对黏结性能的影响

Fig. 10 Effect of different concrete strength on the bonding performance

#### 2.3.2 相对保护层厚度的影响

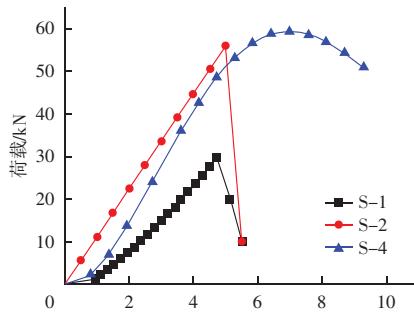
对不同混凝土材料均设计了 3 个相对保护层厚度的试件，来探讨相对保护层厚度对黏结性能的影响。从图 11 和表 5 可以看出，当普通混凝土相对保护层厚度由 2 (S-1) 增大到 3.25 (S-2) 时，黏结强度由 7.09 MPa 增长至 14.02 MPa，增长了 97.7%；而当

相对保护层厚度由 3.25 增大至 4.5 (S-4) 时, 黏结强度仅增长了 10.0%。当 UHPC 试件的相对保护层厚度由 2.5 (HC-S-4) 变为 3.25 (HC-S-5) 时, 其黏结强度由 19.69 MPa 增长至 23.54 MPa, 黏结强度增加了 16.3%; 当相对保护层厚度由 3.25 变为 4.5 (HC-S-2) 时, 其黏结强度由 23.54 MPa 增长至 31.98 MPa, 黏结强度增加了 26.3%。试验结果表明, 两组试验的黏结强度均随相对保护层厚度的增大而增大, 但普通混凝土相对保护层厚度在 4 左右时, 黏结强度增加幅度逐渐平缓, 因此普通混凝土受保护层厚度的影响可能存在一个临界值, 当保护层厚度到达临界值时黏结强度将不再增加, 而 UHPC 黏结强度保持上涨趋势。

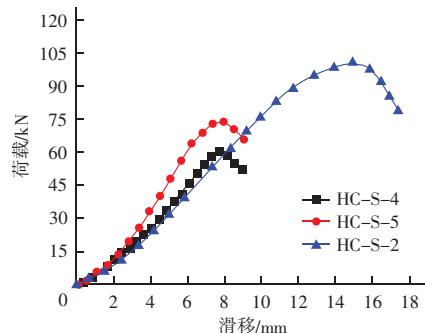
### 2.3.3 相对锚固长度的影响

由表 5 和图 12 可以看出, 当普通混凝土的钢筋

相对锚固长度由 3 (S-3) 增大到 5 (S-4) 时, 极限拉拔力增长了 62%, 而平均黏结强度仅降低了 2.6%; 当相对锚固长度由 5 增大到 6 (S-5) 时, 极限拉拔力仅增长了 1.4%, 而平均黏结强度降低了 15.4%。当 UHPC 的钢筋相对锚固长度由 2.5 (HC-S-6) 增加至 5 (HC-S-2) 时, 极限拉拔力与黏结强度分别增长 113.3% 和 33.4%; 当相对锚固长度由 5 增加至 5.5 (HC-S-7) 时, 极限拉拔力与黏结强度分别增长 69.6% 和 23.5%; 但相对锚固长度增加至 5.5 时, 试件破坏形式为钢筋拔断, 极限拉拔力大于钢筋的破断拉力。试验表明, 随着钢筋相对锚固长度的增加, 普通混凝土试件的极限拉拔力逐渐增大, 但黏结强度有减小趋势; UHPC 试件随着钢筋相对锚固长度增加, 黏结强度呈稳定增长的趋势。



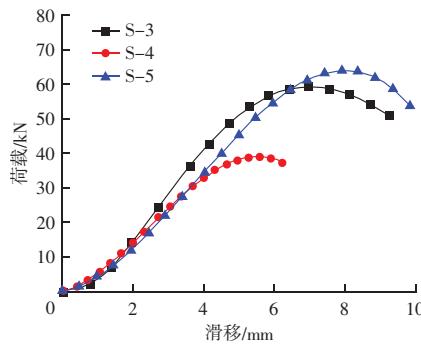
(a) 普通混凝土试件



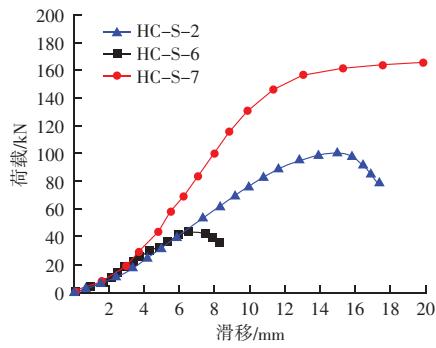
(b) UHPC 试件

图 11 相对保护层厚度与黏结强度的关系

Fig. 11 Relationship between relative cover thickness and bond strength



(a) 普通混凝土试件



(b) UHPC 试件

图 12 相对锚固长度与黏结强度的关系

Fig. 12 Relationship between relative anchorage length and bond strength

### 2.3.4 不锈钢钢筋直径的影响

图 13 为 3 种不同直径不锈钢钢筋对混凝土黏结性能的影响曲线。不同直径的不锈钢钢筋从普通混

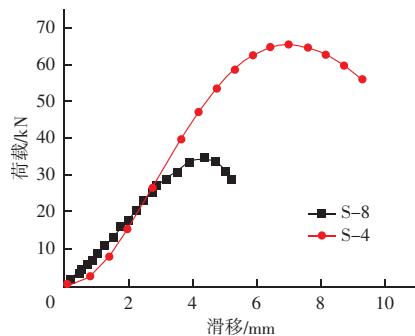
凝土和 UHPC 试件中拔出时, 前期的极限拉拔力上升趋势基本一致, 并且不锈钢钢筋直径越大, 极限拉拔力越大, 荷载到达各自峰值的 80% 时, 曲线

## 建筑结构

斜率开始下降；当荷载达到最大值时，普通混凝土及 UHPC 试件均发生明显滑移，极限拉拔力下降。

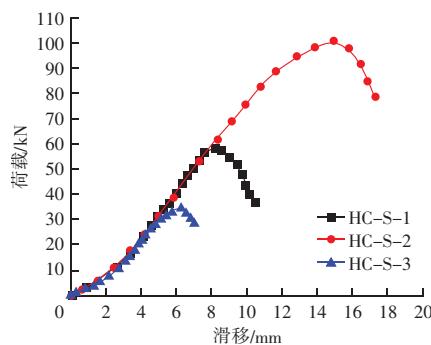
### 2.3.5 篦筋配箍率的影响

图 14 为篦筋配箍率对混凝土黏结性能的影响曲线。从图 14 和表 5 可以看出，与无配箍率（S-4）相比，当配箍率为 0.314%（S-9），普通混凝土极限黏结强度从 16.20 MPa 增加到 17.64 MPa，涨幅为



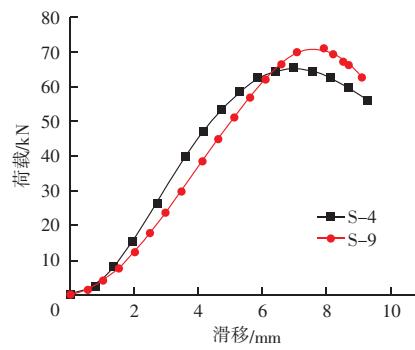
(a) 普通混凝土试件

8.9%。与无配箍率（HC-S-2）相比，当配箍率为 0.314%（HC-S-8）时，UHPC 极限黏结强度从 31.98 MPa 增加至 46.48 MPa，涨幅为 31.1%。结果表明，随配箍率增大，普通混凝土和 UHPC 与不锈钢钢筋试件的黏结性能都会增强，但普通混凝土试件增加幅度要小于 UHPC 试件。

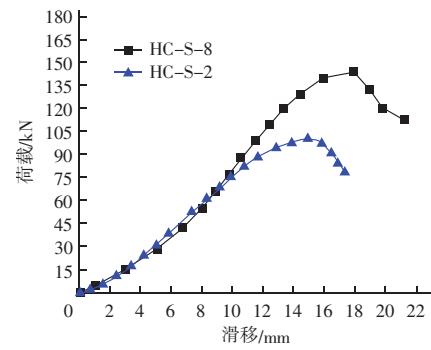


(b) UHPC 试件

图 13 钢筋直径与黏结强度的关系  
Fig. 13 Relationship between steel reinforcement diameter and bond strength



(a) 普通混凝土试件



(b) UHPC 试件

图 14 配箍率对黏结强度的影响  
Fig. 14 Effect of stirrup ratio on bond strength

## 3 结论

通过对普通混凝土和 UHPC 与双相体不锈钢钢筋黏结试件的中心拉拔试验，考虑混凝土强度、钢筋直径、相对保护层厚度、相对锚固长度以及配箍率对试件黏结性能的影响，分析普通混凝土和 UHPC 与不锈钢钢筋的黏结性能，得出以下主要结论：

(1) UHPC 破坏形式有钢筋拔出破坏、混凝土劈裂破坏和钢筋拔断破坏，普通混凝土破坏形式只出现了钢筋拔出破坏和混凝土劈裂破坏；UHPC 中钢纤维能提供与受拉方向相反的黏结力，提供良好的塑

性性能，发生塑性破坏；而普通混凝土抗拉强度仍处于较低水平，发生脆性破坏。

(2) 同等条件下，UHPC 与不锈钢钢筋的黏结强度要高于普通混凝土与不锈钢钢筋的黏结强度；当相对保护层厚度和相对锚固长度增加时，普通混凝土的黏结强度可能存在一个临界值，而 UHPC 试件破坏前的黏结强度始终保持上涨趋势；随着钢筋直径的增加，普通混凝土与 UHPC 极限拉拔力均逐渐增大，但黏结强度变化不大；随着配箍率的增加，试件的极限拉拔力均有所增加，但普通混凝土试件的增加幅度要小于 UHPC 试件。

- [14] 高润东, 张永群, 李向民. 砖砌体结构耐久性劣化与加固修复的抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2024, 54 (16): 151–158.

- [15] 张倚天, 解圆聪, 张望喜, 等. 考虑现浇楼板影响的砖砌墙体抗震性能研究 [J]. 重庆大学学报, 2023, 46 (4): 64–77.

(上接第 108 页)

- [5] 邹桂莲, 王华新, 方帅. 水泥稳定再生碎石路用性能研究 [J]. 公路工程, 2018, 43 (5): 28–32.
- [6] 杨三强, 陈康康, 全刚. 低等级道路建筑垃圾再生料力学性能研究 [J]. 公路, 2023, 68 (10): 300–306.
- [7] ZHI X, YANG T, ZHANG X, et al. Experimental study on the mechanical properties and permeability of cement – stabilized permeable recycle aggregate materials [J]. Sustainability, 2023, 15 (19): 14062.
- [8] 辛懿韬, 刘学义. 废旧无机水泥混合料再生利用性能研究 [J]. 公路, 2024, 69 (1): 329–335.
- [9] 李强, 温华梦, 李国芬, 等. 再生集料强化方法和掺量对水泥稳定碎石性能的影响 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (5): 1188–1195.
- [10] 田源, 牛冬瑜. 铣刨料掺量及掺配方式对再生水稳碎石路用性

- 能的影响 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2020, 40 (4): 39–49.

- [11] 安新正, 郭永民, 张龙娇, 等. 再生粗骨料取代率及粒径对混凝土抗压性能影响试验研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2024, 41 (2): 30–35.
- [12] 刘慈军, 吴子杨, 程书凯, 等. 再生细骨料对超高性能混凝土的力学与自收缩性能影响 [J]. 无机盐工业, 2024, 56 (9): 75–81.
- [13] 汪京. 废旧基层材料水泥稳定再生利用技术研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
- [14] 郑甲佳, 张来君, 王曦辉, 等. 水泥稳定建筑固废再生集料抗冻性能研究 [J]. 中外公路, 2024, 44 (3): 95–103.
- [15] 兰雪江, 张翛, 王永宝, 等. 水泥稳定再生碎石物理力学性能研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38 (2): 69–80.

(上接第 134 页)

## 参 考 文 献

- [1] 梁新亚, 何飞龙, 李相坡, 等. 锈蚀钢筋强度及粘结性能研究进展 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (增刊1): 1571–1575.
- [2] 莫齐伟, 商怀帅, 徐芹文. 加速锈蚀与持续荷载对钢筋混凝土粘结性能的影响 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (14): 112–116, 93.
- [3] 陈宝春, 杨简, 吴香国, 等. UHPC 力学性能的多指标分级 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 (8): 23–34.
- [4] 毛达岭, 刘立新, 范丽. HRB500 级钢筋粘结锚固性能的试验研究 [J]. 工业建筑, 2004 (12): 67–69, 90.
- [5] 徐有邻, 沈文都, 汪洪. 钢筋砼粘结锚固性能的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 1994 (3): 26–37.
- [6] 宋泽鹏, 陆春华, 宣广宇, 等. 螺纹 CFRP 筋与混凝土粘结性能试验与理论计算 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (4): 8–16.
- [7] 付瑞佳, 刘璐, 王亚楠, 等. 不锈钢筋混凝土粘结锚固性能试验研究 [J]. 建筑科学, 2019, 35 (11): 72–77, 142.
- [8] KHAKEFIDI S, GHALEHNOVI M, DEBRITO J. Bond behaviour of high – strength steel rebars in normal (NSC) and ultra – high performance concrete (UHPC) [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33: 101592.
- [9] 侍刚, 邵旭东, 高立强, 等. HRB400 钢筋与超高性能混凝土粘结性能试验研究 [J]. 桥梁建设, 2021, 51 (6): 61–67.

- [10] LAW D W, TANG D, MOLYNEAUX T K C, et al. Impact of crack width on bond: confined and unconfined rebar [J]. Materials and structures, 2011, 44: 1287–1296.
- [11] TARIQ F, BHARGAVA P. Post corrosion bond – slip models for super ductile steel with concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 285: 122836.
- [12] ELIGEHaus R, POPOV E P, BETERO V V. Local bond stress – slip relationships of deformed bars under generalized excitations [J]. Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering, 1982, 4: 69–80.
- [13] HE Z J, CHEN Y, MA Y N, et al. The study on bond – slip constitutive model of steel – fiber high – strength recycled concrete [J]. Structures, 2021, 34: 2134–2150.
- [14] 李晓琴, 陈建飞, 陆勇, 等. 基于局部损伤混凝土模型的 FRP – 混凝土界面有限元分析研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2015, 47 (1): 62–65.
- [15] 袁晓辉, 卢哲安, 任志刚, 等. 无机聚合物混凝土 – 钢筋拉拔有限元分析 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2013, 45 (2): 209–215.
- [16] FU J Y, GE X, CHEN L, et al. Low – cycle fatigue behaviour of ribbed 1.4362 duplex stainless steel reinforcement [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e03218.