

高强不锈钢筋与 UHPC 的粘结锚固性能研究

李海云¹, 吴文辉¹, 侯楠², 李然¹, 邓瑞婷¹, 赵晶³

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 旭阳工程有限公司邢台分公司, 河北 邢台 054000;

3. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 为了研究不锈钢筋与超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 的粘结性能, 制作了 12 组 36 个试样进行中心拉拔试验, 研究了保护层厚度、锚固长度、配箍率、钢筋直径及钢筋品种对不锈钢筋与 UHPC 的粘结锚固性能的影响。研究不锈钢与 UHPC 在锚固段的粘结应力分布, 分析导致试件劈裂破坏的原因。通过统计回归对钢筋混凝土粘结强度表达式进行了修正, 得到了更加适用于不锈钢筋 UHPC 粘结强度计算公式。结果表明, 修正的粘结强度表达式可较为准确地求出不锈钢筋与 UHPC 的粘结强度。

关键词: 不锈钢筋; 超高性能混凝土; 粘结强度; 拉拔试验

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)05-0633-10

Study on bonding and anchoring properties of stainless steel bar and UHPC

LI Haiyun¹, WU Wenhui¹, HOU Nan², LI Ran¹, DENG Ruiting¹, ZHAO Jing³

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

2. Xingtai branch of Xuyang Engineering Co., Ltd., Xingtai 054000, China;

3. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to study the bonding properties of stainless steel rebar and ultra-high performance concrete (UHPC), 12 groups of 36 specimens were made for central pull-out test. The effects of protective layer thickness, anchorage length, stirrup ratio, steel bar diameter and steel bar variety on the bond performance between stainless steel bars and UHPC were studied. The bond stress distribution of stainless steel and UHPC in the anchorage section was studied, and the cause of splitting failure of the specimen was analyzed. The expression of reinforced concrete bond strength was revised through statistical regression, and a more suitable formula for UHPC bond strength of stainless steel bars was obtained. The results show that the modified bond strength expression can accurately calculate the bond strength between stainless steel bars and UHPC.

Key words: stainless steel bar; UHPC; bond strength; pull-out bond test

钢筋混凝土构件抗力计算的前提是二者之间无相对滑移, 这就需要钢筋与混凝土之间有充足的粘结力, 而钢筋锈蚀是影响二者之间粘结力的重要因素。在一般情况下钢筋混凝土构件都是以带裂状态工作, 空气中的二氧化碳会破坏钢筋表面的钝化膜^[1], 加速钢筋锈蚀降低钢筋与混凝土之间的粘结力, 影响钢筋混凝土结构的耐久性^[2]。超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 具有超高的强度和良好的塑性性能^[3], 将普通混凝土用 UHPC 代替, 可以有效的解决混凝土开裂的问题。不锈钢筋具有优良的耐腐蚀性能,

将普通钢筋用不锈钢筋代替, 可从根本上解决钢筋的锈蚀问题^[4], 提高构件的耐久性。早期就有学者对二者之间的粘结性能进行试验研究^[5], 并在试验研究的基础上建立粘结滑移本构模型^[6-7]。目前, 国内外对粘结性能的研究主要从钢筋种类^[8-12]、混凝土等级^[13-16]、钢筋锈蚀率^[17-18]等影响因素对粘结强度的影响, 和建立钢筋混凝土的粘结滑移本构关系^[19-23]。随着科技发展, 新的科研手段不断涌现, 也有部分学者尝试利用有限元的方法研究钢筋与混凝土之间的粘结滑移本构关系^[24-25]。

本次试验设计了 12 组共 36 件不锈钢筋与超高

收稿日期: 2022-05-01

修回日期: 2023-08-15

基金项目: 河北省建设科技研究项目指导性计划项目 (2021-2066)

第一作者: 李海云 (1978—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为钢结构设计理论。E-mail: lihy1215@outlook.com

通信作者: 侯楠 (1996—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为钢筋混凝土粘结性能。E-mail: hounan126100@163.com

性能混凝土的拉拔试样,研究钢筋种类、钢筋直径、相对保护层厚度、相对锚固长度、配箍率等参数对不锈钢筋和超高性能混凝土粘结性能的影响。

1 拉拔试验

1.1 材料性能试验

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[26]制作了 6 个边长 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体超高性能混凝土试块,采用微机屏显式液压压力试验机,以 0.6 MPa/s 的速率对标准试块进行加载,测得混凝土的立方体抗压强度(取测试值的平均值) f_{cu} 为 120 MPa。

本次试验采用三种带肋钢筋和一种光圆钢筋(如图 1 所示),三种带肋钢筋的横肋间距都为 10 mm,BS-R 不锈钢筋的横肋与普通钢筋大致相同,纵肋略高于普通钢筋;AS-R 不锈钢筋的横肋不是标准的月牙形状,而是中间与两端等宽的矩形横肋,其宽度略宽于普通钢筋与 DS-R 不锈钢筋,但高度略低于两者,纵肋尺寸与 HRB-600-S 大致相同。

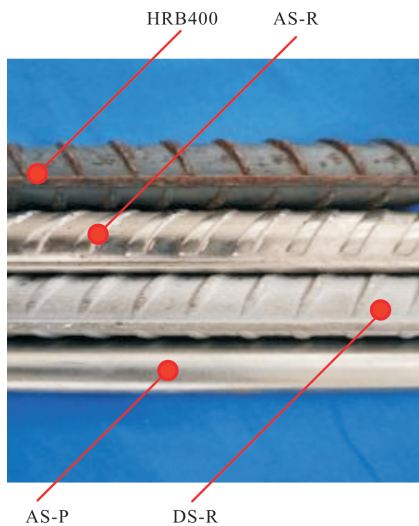


图 1 试验所选用钢筋

Fig. 1 Steel bars selected for the test

根据《金属材料试验拉伸》^[27](GB/T 228.1-2015)对钢筋进行取样,每种钢筋取 2 个试样,采用 SHT4106-G 微机控制电液伺服万能试验机,以 10 MPa/s 的速率对钢筋试样进行拉伸,得到钢筋的极限抗拉强度,并以残余应变的 0.2% 所对应的荷载作为不锈钢的屈服强度,其力学性能见表 1,不锈钢分为双相体不锈钢和奥氏体不锈钢,除普通钢筋外钢筋编号中 D 代表双相体不锈钢, A 代表奥氏体不锈钢, R 代表带肋钢筋, P 代表光圆钢筋, d 为钢筋直径, f_y 为钢筋屈服强度, f_u 为钢筋极限强度。

表 1 钢筋的物理力学性能

Tab. 1 Physical and mechanical properties of steel bars

钢筋种类	编号	d/mm	f_y/MPa	f_u/MPa
普通钢筋	HRB400	16	452	635
	DS-R	10	611	836
双相体带肋不锈钢	12	688	835	
	16	704	862	
奥氏体带肋不锈钢	AS-R	16	752	885
奥氏体光圆不锈钢	AS-P	16	460	657

注:不锈钢筋由浙江富钢金属制品有限公司提供。

1.2 试样设计

拉拔试验试样分为 5 个控制变量(钢筋类型、钢筋直径、相对保护层厚度、相对锚固长度和配箍率)对照组,试样加工示意如图 2 所示(以 HC-HSS-2 为例),为了测试粘结应力的分布,将钢筋沿轴线切割成两瓣,在每瓣的中心进行铣槽(如图 3),凹槽贯穿整个钢筋,在凹槽内贴应变片并引出导线,用环氧树脂将两瓣钢筋进行粘合使其恢复原貌(如图 4 所示)。每个试样配置三个相同的试块,以免发生偶然情况造成数据异常,各试样参数如表 2 所示。

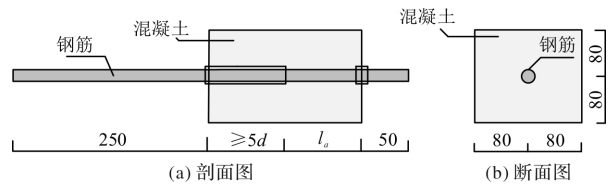


图 2 拉拔试件(mm)

Fig. 2 Pulling test piece (mm)

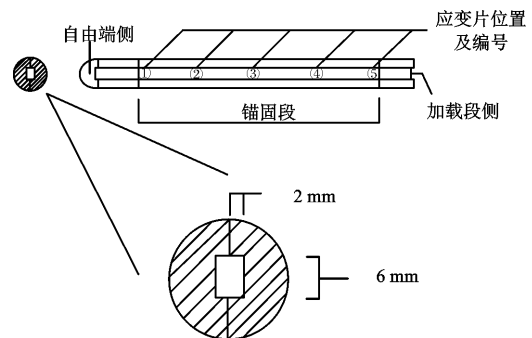


图 3 钢筋加工示意图以及应变片位置(mm)

Fig. 3 Schematic diagram of steel bar processing and position of strain gauge (mm)

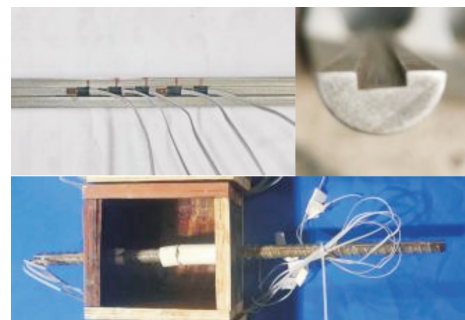


图 4 钢筋加工与粘合后实物图

Fig. 4 Physical picture of steel bar after processing and bonding

表 2 试样分组及设计参数

Tab. 2 Sample grouping and design parameters

试件编号 mber	钢筋编号	d/mm	c/d	l_a/d	c/mm	$\rho_{sv}/\%$	截面尺寸/ mm
HC-S-1	HRB400	16	5	4	72	0	160×160
HC-SS-1	AS-R	16	5	4	72	0	160×160
HC-SS-2	AS-P	16	5	4	72	0	160×160
HC-HSS-1	BS-R	12	5	4	54	0	120×120
HC-HSS-2		16	5	4	72	0	160×160
HC-HSS-3		10	5	4	45	0	100×100
HC-HSS-4		16	2.5	4	32	0	80×80
HC-HSS-5		16	3.75	4	52	0	120×120
HC-HSS-6		16	5	2.5	72	0	160×160
HC-HSS-7		16	5	5.5	72	0	160×160
HC-HSS-8		16	5	4	72	0.314	160×160
HC-HSS-9		16	5	4	72	0.628	160×160

注： c 为混凝土保护层厚度， c/d 为相对保护层厚度， l_a 为锚固长度， l_a/d 为相对锚固长度， ρ_{sv} 为配箍率。

为了避免反力板对试样内部的锚固段造成伤害，将直径略大于钢筋的 PVC 管套在试样的加载端，并将其密封防止 PVC 管灌浆导致锚固长度增加。浇筑并振捣之后养护 28 d 后开始拉拔试验。

1.3 加载方案

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019)，拉拔试验采用 SHT4106-G 微机控制电液伺服万能试验机，为方便试样在试验机上的安装，制作了放置试样的辅助反力架，在反力架内设置位移计测量试件钢筋的自由端滑移，辅助反力架和安装在试验机上的试样分别如图 5 所示。试验时固定反力架的上加载螺栓，以 0.3 kN/s 的速率对试件钢筋进行加载，试验荷载通过计算机采集。

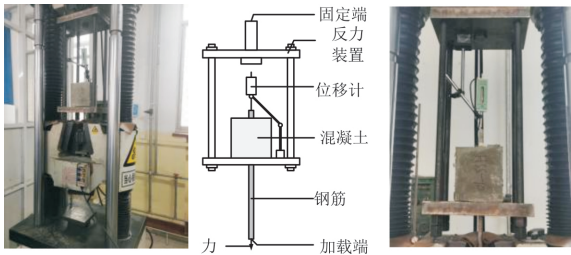


图 5 试验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the test device

2 试验现象及结果

2.1 破坏形态

表 3 给出了本次拉拔试验各试样的破坏形式，可以看出，试样的主要破坏形式为钢筋拔出破坏，

有少量试件破坏形式为钢筋拉断或混凝土劈裂破坏。

表 3 中心拉拔试验破坏形式

Tab. 3 Failure modes of central pull-out test

试件编号	破坏形式		
	Sample 1	Sample 2	Sample 3
HC-S-1	拔出破坏	钢筋拔断	拔出破坏
HC-SS-1	拔出破坏	拔出破坏	拔出破坏
HC-SS-2	拔出破坏	拔出破坏	拔出破坏
HC-HSS-1	拔出破坏	拔出破坏	拔出破坏
HC-HSS-2	拔出破坏	拔出破坏	拔出破坏
HC-HSS-3	拔出破坏	拔出破坏	拔出破坏
HC-HSS-4	劈裂破坏	拔出破坏	劈裂破坏
HC-HSS-5	拔出破坏	拔出破坏	拔出破坏
HC-HSS-6	拔出破坏	拔出破坏	拔出破坏
HC-HSS-7	钢筋拔断	钢筋拔断	拔出破坏
HC-HSS-8	拔出破坏	钢筋拔断	拔出破坏
HC-HSS-9	拔出破坏	拔出破坏	拔出破坏

本次试验以钢筋拔出破坏为主，存在少量混凝土劈裂破坏和钢筋拔断破坏。对于混凝土劈裂破坏，当荷载加载至约峰值荷载的 80% 时，试样混凝土开始出现裂缝，同时混凝土土体内部发出钢纤维拉扯产生的声响，随着荷载增大，裂缝逐渐扩展至贯穿混凝土体，此时荷载达到峰值，该过程较为缓慢，试样被劈裂为 2 瓣或 3 瓣，试样的侧面出现贯通的裂缝，图 6 为其中的典型破坏图片；而钢筋拔出破坏，试验过程中随着荷载的增加，开始时试样无变化，当荷载达到峰值荷载时，钢筋和少量混凝土慢慢被拔出(如图 7)，随后荷载逐渐下降，该下降过程同样较为缓慢；钢筋拔断

破坏是钢筋与混凝土之间的锚固力超过了钢筋自身的强度,其荷载位移曲线类似于钢材拉伸试验的应力—应变曲线(如图 8),破坏时比较突然.



图 6 劈裂破坏试件

Fig. 6 Splitting failure specimen



图 7 拔出破坏试件

Fig. 7 Pulling out failure specimen

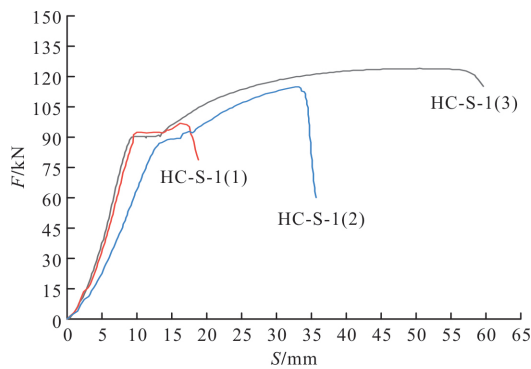


图 8 HC-S-1 试验曲线

Fig. 8 HC-S-1 test curve

2.2 试验结果

试样的粘结强度计算公式如式(1)所示.

其中, τ 为平均粘结应力, MPa; F_u 为极限拉拔力, kN, 其余字母含义同前.

$$\tau = \frac{F_u}{\pi d l_a} \quad (1)$$

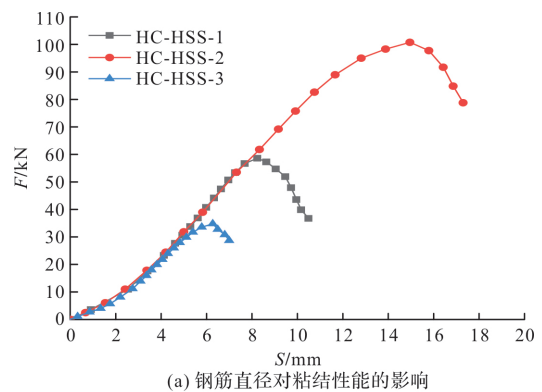
分析试验结果可得每组数据的变异系数范围介于 0.04 与 0.21 之间, 差别较小, 故取每组 3 个试样的平均值作为其粘结强度. 各试样相关数据如表 4. 不同影响因素下试样的粘结-滑移曲线如图 9 所示.

表 4 试样极限拉拔力及粘结强度试验值

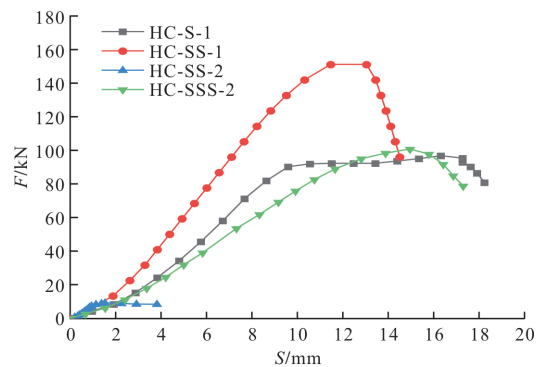
Tab. 4 Test values of ultimate pull-out force and bond strength of samples

影响因素	试件编号	F_u/kN	$\tau_{\text{试}}/\text{MPa}$	c_v	S/mm	S_0/mm
钢筋种类	HC-S-1	97.77	30.40	0.08	17.52	16.11
	HC-SS-1	156.82	48.77	0.17	13.51	11.52
	HC-SS-2	10.07	3.13	0.09	1.65	1.60
钢筋直径	HC-HSS-2	102.85	31.98	0.08	15.53	13.25
	HC-HSS-1	59.19	32.72	0.04	12.46	10.68
	HC-HSS-2	102.85	31.98	0.08	15.53	13.88
c/d	HC-HSS-3	37.65	29.90	0.14	6.45	5.72
	HC-HSS-2	102.85	31.98	0.12	15.53	13.57
	HC-HSS-4	63.03	19.69	0.09	8.12	7.54
l_a/d	HC-HSS-5	75.70	23.54	0.14	7.51	7.02
	HC-HSS-2	102.85	31.98	0.19	15.53	14.06
	HC-HSS-6	48.13	23.95	0.17	6.53	5.89
ρ_{sv}	HC-HSS-7	174.13	39.38	0.08	拉断	0
	HC-HSS-2	102.85	31.98	0.05	15.53	14.38
	HC-HSS-8	149.48	46.48	0.16	17.25	15.64
	HC-HSS-9	155.17	48.25	0.21	16.14	14.52

注: c_v 为变异系数, S 为加载端滑移量, S_0 为自由端滑移量.



(a) 钢筋直径对粘结性能的影响



(b) 钢筋种类对粘结性能的影响

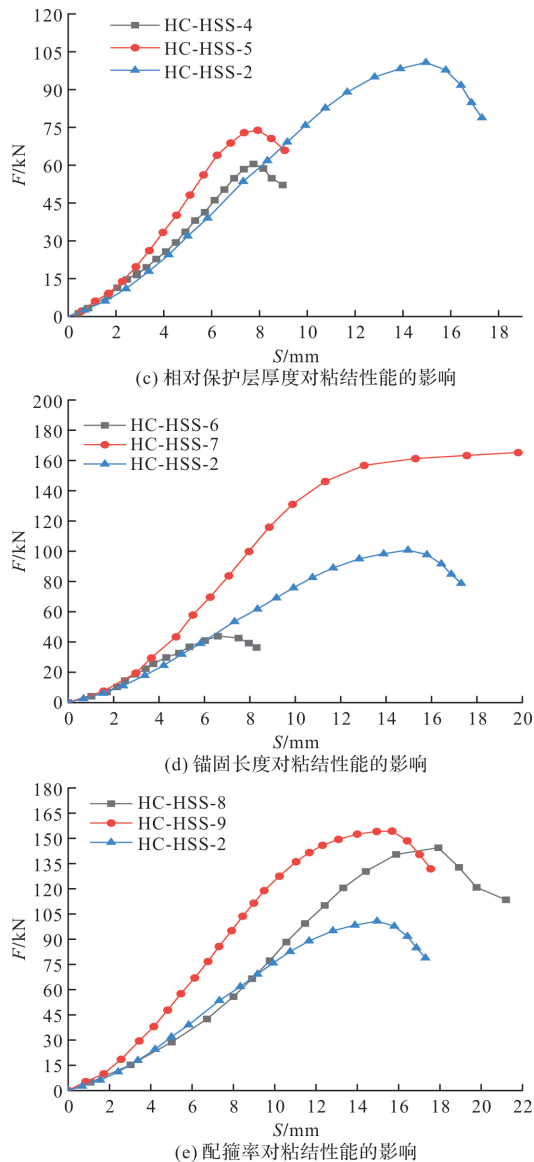


图9 不同参数下的粘结-滑移对比曲线

Fig. 9 Bond-slip contrast curves under different parameters

2.2.1 钢筋直径对粘结性能的影响

钢筋直径越大锚固力越大, 但粘结应力基本相同(表4)。不同直径的钢筋从 UHPC 中拔出时, 前期的锚固力上升趋势基本一致, 如图 9(a)所示, 钢筋直径越大, 锚固力越大, 荷载达到各自峰值的 80% 时, 曲线斜率开始下降, 当荷载达到最大值时, 钢筋与 UHPC 试块脱胶, 锚固力下降。

2.2.2 钢筋种类对粘结性能的影响

钢筋种类对粘结性能影响较大, 如图 9(b)所示, 四种不同肋壁的变形钢筋中奥氏体不锈钢螺纹钢筋与 UHPC 的粘结性能最好, 高强不锈钢筋和普通钢筋对 UHPC 的粘结力试验结果较为接近, 但普通钢筋与 UHPC 脱胶发生在钢筋屈服之后, 如果增大普通钢筋的强度, 粘结强度增加, 光圆钢筋对 UHPC 的粘结性最差, 其粘结强度不足三

种螺纹钢筋的 10%。

2.2.3 相对保护层厚度对粘结性能的影响

相对保护层厚度对钢筋与 UHPC 的粘结性能有一定影响, 如图 9(c)和表 4 所示。相对保护层厚度由 5 变为 3.75 时, 其粘结强度由 31.98 MPa 降至 23.54 MPa, 粘结强度下降了 26.3%, 当相对保护层厚度由 3.75 变为 2.5 时, 其粘结强度由 23.54 MPa 降至 19.69 MPa, 粘结强度仅下降了 16.3%, 因此, 随着相对保护层厚度的减小, 粘结强度下降趋势逐渐变缓。随着相对保护层厚度的减小, 混凝土体难以抵抗钢筋对其施加的环向拉应力, 试件的破坏形式由钢筋拔出破坏逐渐转向混凝土劈裂破坏, 说明相对保护层厚度的大小决定了试件破坏的形式。

2.2.4 相对锚固长度对粘结性能的影响

如图 9(d)和表 4 所示, 增加相对锚固长度, 极限拉拔力增大, 粘结强度也随之增加。当相对锚固长度由 2.5 增加至 4 时, 极限拉拔力与粘结强度分别增长 113.3% 与 33.4%; 当相对锚固长度由 4 增加至 5.5 时, 极限拉拔力与粘结强度分别增长 69.6% 与 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, 极限锚固力大于钢筋的破断拉力, 如增加钢筋强度, 测试值增长。

2.2.5 配箍率对粘结性能的影响

在 UHPC 试块中配制箍筋可以有效增加钢筋与 UHPC 的粘结强度, 如图 9(e)和表 4。没有配制箍筋的试件极限粘结强度为 31.98 MPa, 箍筋配筋率为 0.314% 时粘结强度增加至 46.48 MPa, 涨幅为 31.1%, 而配箍率从 0.314% 增加至 0.628% 时, 粘结强度增加至 48.25 MPa, 涨幅仅为 3.8%, 随配箍率增大, 配箍率对粘结性能的增强效果逐渐减弱, 原因是在钢筋拔出时, 箍筋可以为核心混凝土提供环向压应力, 从而提高核心混凝土的强度。

2.3 粘结滑移本构关系

2.3.1 粘结应力分布

保护层厚度是改变混凝土破坏形式的重要因素^[11], 因此为了得到不同相对保护层厚度下锚固段的粘结应力分布, 通过钢筋应变计算钢筋应力, 进而得到粘结应力, 如表 5。锚固段不同位置的粘结应力 τ_n 可根据式(2)式确定

$$\begin{cases} \tau_n = \frac{(\sigma_{n+1} - \sigma_n) A_s}{\pi d l} \\ \sigma_n = E \epsilon_n \end{cases} \quad (2)$$

式中: τ_n 编号为 n 的应变片处钢筋与混凝土粘结应力, MPa; σ_n 为第 n 个应变片处的钢筋应力, MPa; d 为钢筋直径, mm; l 为两个应变片之间

的距离, mm; A_s 为钢筋截面面积, mm^2 ; E 为钢筋弹性模量, MPa; ε_n 为第 n 个钢筋应变的应变。

表 5 钢筋应变片数值
Tab. 5 Reinforcement strain gauge value

试件编号	应变片编号				
	1	2	3	4	5
HC-HSS-2	5.73E-05	1.93E-04	3.86E-04	5.68E-04	9.16E-04
HC-HSS-4	1.39e-04	1.95e-04	2.72e-04	4.19e-04	7.13e-04
HC-HSS-5	1.75e-05	1.60e-04	3.09e-04	4.49e-04	6.74e-04
HC-SS-2	5.52e-06	1.28e-05	2.06e-05	3.09e-05	6.10e-05

由图 9(c)可知, 相对保护层厚度越大平均粘结应力越大, 所以 HC-HSS-5 的平均粘结应力大于 HC-HSS-4 的平均粘结应力, 但由图 10 所示, 在 5 号应变片位置 HC-HSS-4 的局部粘结应力反而大于 HC-HSS-5, 而混凝土劈裂破坏均发生在 HC-HSS-4, 以此得出局部粘结应力是影响试件破坏形式的因素之一。

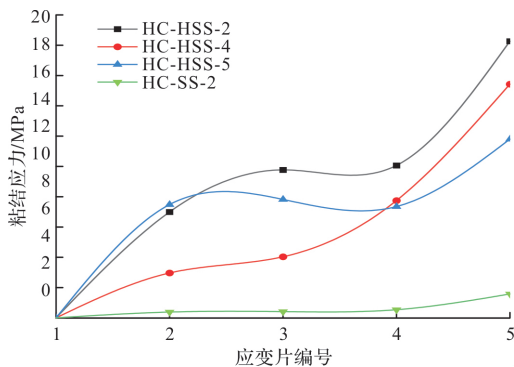


图 10 粘结应力分布

Fig. 10 Bonding stress distribution

2.3.2 本构关系

由表 5 和图 10 可知, 粘结应力在钢筋的锚固段并不是均匀分布的, 因此需要考虑位置对粘结滑移本构关系的影响。国内外学者采用下述方法对普通钢筋混凝土的粘结滑移本构关系进行过一些研究。在平均粘结强度条件下求出粘结滑移本构关系 $\bar{\tau}=f(s)$, 再用一个位置函数 $\phi(x)$ 数来确定沿锚固长度各个位置的粘结强度, 最后用两者的积来表达最终的高强不锈钢筋与 UHPC 混凝土的 τ - s 本构关系:

$$\tau=\phi(y)f(s) \quad (3)$$

2.3.2.1 平均粘结强度-滑移本构关系

徐有邻等按照粘结滑移曲线特点将普通混凝土粘结滑移本构关系分为五段表达式, 每段由各段特征强度和特征滑移值控制, 但从曲线的整体

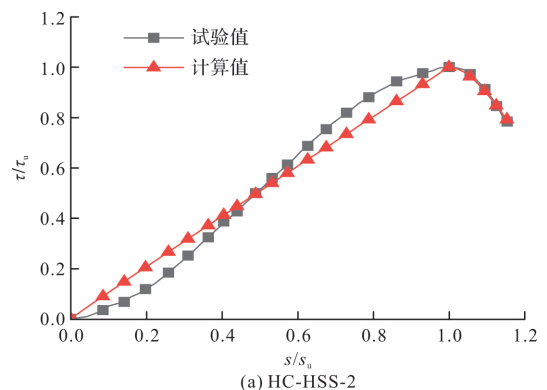
走势来看, 可简单划分为上升段和下降段两部分, 以峰值平均粘结应力对应的位移 S_u 为界, $0 \sim S_u$ 为上升段, S_u 之后则为下降段, 如式(4)。

$$\begin{cases} f(s)=\frac{\tau}{\tau_u}=\left(\frac{s}{s_u}\right)^{\alpha} & (0 \leq s \leq s_u) \\ f(s)=\frac{\tau}{\tau_u}=\frac{s/s_u}{\beta(s/s_u-1)^2+s/s_u} & (s_u \leq s) \end{cases} \quad (4)$$

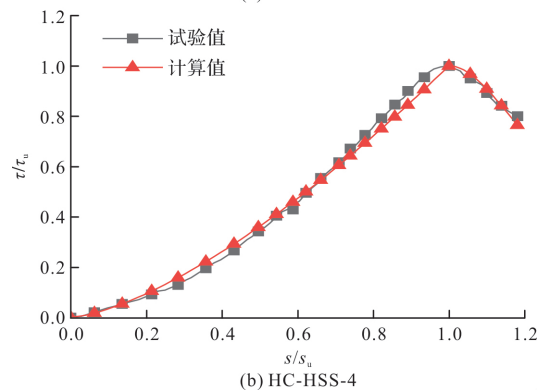
式中: τ_u 为峰值平均粘结应力; S_u 为峰值平均粘结应力所对应的滑移量; α 、 β 为待拟合参数。

表 6 参数对比
Tab. 6 Comparison of parameters

参数	试件编号		
	HC-HSS-2	HC-HSS-4	HC-HSS-5
α	1.01	1.46	1.13
β	12.81	11.05	5.71



(a) HC-HSS-2



(b) HC-HSS-4

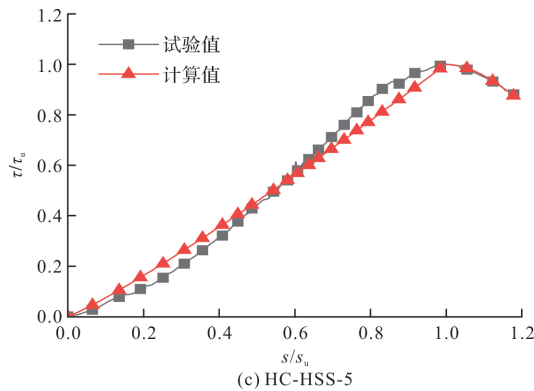


图 11 无量纲化后对各曲线参数进行拟合

Fig. 11 Fitting of each curve parameter after dimensionless

对试验曲线进行无量纲化分析后(图 11), 用 MATLAB 软件对式(4)中的 α 、 β 进行拟合, 得到参数如表 6 所示. 各试件在上升段参数较为统一取值范围在 1.01~1.46 之间, 故取平均值 1.20 作为 α 值, 即 $\alpha=1.20$; 随着相对保护层厚度减小试件破坏形式逐渐由拔出破坏转变为劈裂破坏, 故下降段 β 的取值可根据 HC-HSS-2 的试验数据拟合得到, 即 $\beta=12.81$. 将 $\alpha=0.120$ 、 $\beta=12.81$ 带入式(4)中与各组试件试验曲线的对比如图 12.

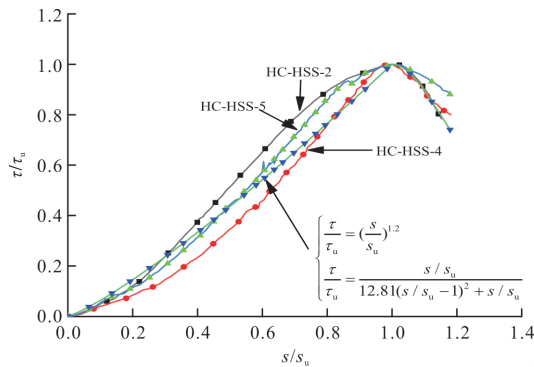


图 12 平均粘结-滑移曲线试验值与计算值对比

Fig. 12 Comparison of experimental value and calculated value of average bond-slip curve

2.5.2.2 位置函数 $\psi(y)$

钢筋的锚固段各个位置的粘结强度并非均匀分布, 根据式(4)求得的粘结强度只是平均粘结强度极限值, 不能体现锚固段位置不同粘结强度也不同的特点, 若将试件沿锚固段粘结应力无量纲化($\psi=\tau/\tau_u$, $y=x/l_a$), 如图 13 所示.

由上图可知三条曲线走势大致相同, 加载端粘结应力最大, 距离加载端越远, 粘结应力则越小, 该位置函数可采用四阶多项式拟合:

$$Y=a_0+a_1X+a_2X^2+a_3X^3+a_4X^4 \quad (5)$$

式中: a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为待拟合参数.

使用 ORIGIN 软件对式(5)中的参数进行拟合, 如表 7 和图 14 所示.

表 7 位置函数参数拟合值

Tab. 7 Fit value of position function parameter

参数	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
拟合值	2.1	-6.03	11.82	-9.38	1.49
相关性	0.804 5	0.998 6	0.997 5	0.993 2	0.994 1

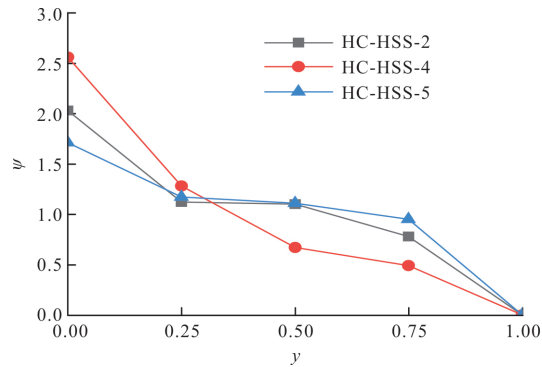


图 13 不同锚固位置处粘结强度无量纲化曲线

Fig. 13 Non-dimensional curve of bond strength at different anchoring positions

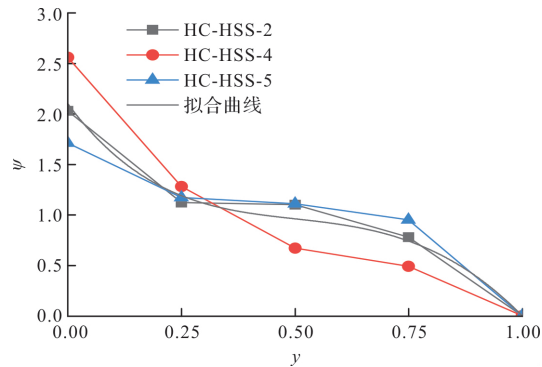


图 14 试验曲线与拟合曲线对比

Fig. 14 Comparison of test curve and fitting curve

由图 14 中的拟合曲线可以看出, 曲线整体沿锚固段加载端到自由端呈下降趋势, 当 y 值在(0~0.25)和(0.75~1)区间时, 下降较快, 在(0.25~0.75)区间时下降较平缓. 拟合曲线只表示粘结强度沿锚固长度的变化规律, 即位置函数 $\psi(y)$. 结合位置函数曲线特点, 自由端和加载端附近粘结强度变化较为剧烈, 锚固段中间部分变化平缓, 为了工程应用方便, 本文提出三折线段模型, 如图 15. 整个模型有四个特征点: $A_1(0, 2)$ 、 $A_2(0.25, 1.25)$ 、 $A_3(0.75, 0.75)$ 、 $A_4(1, 0)$.

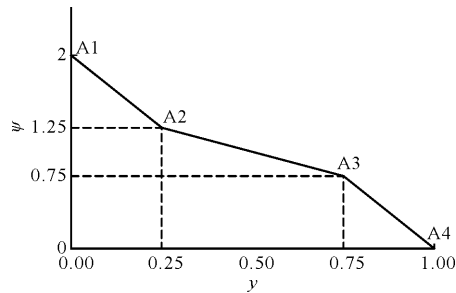


图 15 高强不锈钢筋与 UHPC 粘结滑移位置函数模型

Fig. 15 Bond-slip position function model of high strength stainless steel bar and UHPC

3 粘结强度计算式

通过分析影响不锈钢带肋钢筋与 UHPC 粘结性能的各项因素,以用 BS-R 钢筋的试件为例,利用 Matlab 软件进行统计回归,对普通钢筋混凝土平均粘结应力表达式进行修正,得到不锈钢带肋钢筋与 UHPC 的平均粘结应力的计算式,如式(5)所示。

$$\tau = (1.27 - 1.69d/l_a)(0.85 + 1.19c/d + 5.58\rho_{sv})f_t \quad (6)$$

式中: f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值^[28], MPa; ρ_{sv} 为配箍率。

按照式(6)计算得到粘结强度的计算值 τ_2 与试验值对比见表 8 所示。在不同影响参数下,试样的试验值与计算值的比值最大值和最小值分别为 1.10 和 0.90,说明利用修正后的不锈钢筋与 UHPC 平均粘结应力表达式求得的计算值与试验值吻合较好,可用于计算不锈钢筋与 UHPC 的平均粘结应力。

表 8 平均粘结应力试验值与计算值对比

Tab. 8 Comparison of average bond stress test value and calculated value

试件编号	τ_1 /MPa	τ_2 /MPa	τ_1/τ_2
HC-HSS-2	31.89	33.93	0.93
HC-HSS-4	16.69	18.30	0.91
HC-HSS-5	23.54	26.12	0.90
HC-HSS-6	23.95	23.61	1.01
HC-HSS-7	39.38	38.56	1.02
HC-HSS-8	46.48	41.88	1.10
HC-HSS-9	48.25	49.83	0.97

4 结论

此次拉拔试验共 12 组 36 个试件,考虑了影响钢筋与 UHPC 粘结性能的五种因素,得出以下结论:

(1)本次试验主要破坏形式为钢筋拔出,少量试件存在混凝土劈裂和钢筋拔断;

(2)相对保护层厚度和局部粘结应力影响试件的破坏形式,相对保护层厚度较小或局部粘结应

力过高会导致试件劈裂破坏,增加相对保护层厚度可以提高粘结强度;钢筋肋壁的形状尺寸对粘结性能有重要影响;随着相对锚固长度的增加,粘结强度逐渐增大,直到钢筋被拔断;一定的配箍率可以有效提高粘结性能;

(3)粘结应力在锚固段并不是均匀分布的,靠近加载端一侧的粘结应力高于自由端一侧;

(4)对钢筋混凝土粘结强度计算式进行了修正,该计算式可以很好的计算不锈钢筋与 UHPC 的粘结强度。

参考文献 References

- [1] 钟小平,金伟良,张宝健. 氯盐环境下混凝土结构的耐久性设计方法[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(3): 544-549.
ZHONG Xiaoping, JIN Weiliang, ZHANG Baojian. Durability design method of concrete structure in chloride environment[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(3):544-549.
- [2] 施锦杰,孙伟. 混凝土中钢筋锈蚀研究现状与热点问题分析[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(9):1753-1764.
SHI Jinjie, SUN Wei. Research status and hot issues analysis of steel bar corrosion in concrete[J]. Acta Silicate, 2010, 38(9):1753-1764.
- [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.
CHEN Baochun, YANG Jian, WU Xiangguo, et al. Multi-index classification of mechanical properties of UHPC [J]. Chinese Journal of Highways, 2021, 34(8): 23-34.
- [4] 黄有栋. 不锈钢筋在混凝土中的研究进展[J]. 居舍, 2021(19):25-26.
HUANG Youdong. Research progress of stainless steel reinforcement in concrete [J]. Jushe, 2021(19): 25-26.
- [5] 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.
MAO Daling, LIU Lixin, FAN Li. Experimental study on bonding and anchoring properties of HRB500 grade steel bars[J]. Industrial building, 2004(12):67-69, 90.
- [6] 徐有邻. 变形钢-混凝土粘结性能试验研究[D]. 北京:

- 清华大学,1990.
- XU Youlin. Experimental study on bonding properties of deformed steel and concrete[D]. Beijing: Tsinghua University,1990.
- [7] 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.
- XU Youlin, SHEN Wendu, WANG Hong. Experimental study on bond anchoring Performance of Reinforced Concrete[J]. Journal of Building Structures, 1994(3): 26-37.
- [8] 宋泽鹏,陆春华,宣广宇,等. 螺纹 GFRP 筋与混凝土黏结性能试验与理论计算[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):8-16.
- SONG Zepeng, LU Chunhua, XUAN Guangyu, et al. Experiment and theoretical calculation of bond performance between threaded GFRP bars and concrete [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):8-16.
- [9] 刘云雁,范颖芳,李秋超. 锈蚀钢绞线与混凝土的黏结性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1208-1215.
- LIU Yunyan, FAN Yingfang, LI Qiuchao. Bonding properties of corroded steel strands and concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1208-1215.
- [10] 王威,李元刚,苏三庆,等. 波形钢板混凝土界面间粘结滑移力学性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2018,50(1):5-12,50.
- WANG Wei, LI Yuangang, SU Sanqing, et al. Study on Mechanical properties of bond slip between corrugated steel sheet concrete interfaces [J]. J. of Xi 'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2018, 50(1):5-12, 50.
- [11] 谢群,赵永强,唐仕霖. 无机胶植筋构件粘结滑移性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015, 47(6):838-842.
- Xie Qun, ZHAO Yongqiang, TANG Shilin. Study on bond slip Performance of inorganic cemented reinforced structure [J]. J. of Xi 'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(6): 838-842.
- [12] 付瑞佳,刘璐,王亚楠,等. 不锈钢筋混凝土黏结锚固性能试验研究[J]. 建筑科学,2019,35(11):72-77,142.
- FU Ruijia, LIU Lu, WANG Yanan, et al. Experimental Research on Bonding and Anchorage Performance of Stainless Steel Reinforced Concrete [J]. Building Science, 2019, 35(11): 72-77, 142.
- [13] 郑七振,让梦,李鹏. 超高性能混凝土与钢筋的黏结性能试验研究[J]. 上海理工大学学报,2018,40(4): 398-402.
- ZHENG Qizhen, RANG Meng, LI Peng. Experimental study on bonding properties of ultra-high performance concrete and steel bars [J]. Journal of Shanghai University of Science and Technology, 2018, 40(4): 398-402.
- [14] KHAKSEFIDI S, GHALEHNOVI M, BRITO J D. Bond behaviour of high-strength steel rebars in normal (NSC) and ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33,101592.
- [15] 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.
- SHI Gang, SHAO Xudong, GAO Liqiang, et al. Experimental study on bonding properties of HRB400 steel bar and ultra-high performance concrete [J]. Bridge Construction, 2021, 51(6):61-67.
- [16] SAIKALI R-E, PANTAZOPOULOU S J, PALERMO D. Local Bond-Slip Behavior of Reinforcing Bars in High-Performance Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams[J]. ACI Structural Journal, 2022, 119(2).
- [17] DAVID W. LAW, DENGLEI TANG, THOMAS K C. MOLYNEAUX, REBECCA GRAVINA. Impact of crack width on bond: confined and unconfined rebar [J]. Materials and Structures, 2011, 44(7): 1287-1296.
- [18] FARAZ T, PRADEEP B. Post corrosion bond-slip models for super ductile steel with concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 285.
- [19] TASSIOS T P, KORONEOS E G. Preliminary Results of Local Bond-Slip Relationships by Means of Moire Method[C]//AICAP CEB Symposium on Structural Concrete Under Seismic Action (Rome, 1979), eEB Bulletin d'Information. 1979, 132: 85-94.
- [20] HAWKINS N M, LIN I J, JEANG F L. Local bond strength of concrete for cyclic reversed loadings[J]. Bond in concrete. 1982:151-161.

- [21] ELIGEHAUSE 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.
- [22] HASKETT M, OEHLERS D J, ALI M S M. Local and Global Bond Characteristics of steel Reinforcing Bars [J]. Steel Construction. 2008, 30(2): 376-383.
- [23] HE Zhenjun, CHEN Ying, MA Yanni, et al. The study on bond-slip constitutive model of steel-fiber high-strength recycled concrete [J]. Structures, 2021, 34: 2134-2150.
- [24] 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.
- LI Xiaoqin, CHEN Jianfei, LU Yong, et al. Finite element Analysis of FRP-Concrete interface based on local damaged concrete model [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(1): 62-65.
- [25] 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.
- YUAN Xiaohui, LU Zhean, REN Zhigang, et al. Finite element Analysis of Inorganic Polymer concrete-Steel Bar Drawing [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2013, 45(2): 209-215.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods for mechanical properties of concrete: GB/T 50081-2019[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料拉伸试验第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Tensile Test of Metal Materials Part 1: Test Method at Room Temperature: GB/T 228.1-2015[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [28] 梁兴文, 汪萍, 徐明雪, 等. 配筋超高性能混凝土梁受弯性能及承载力研究[J]. 工程力学, 2019, 36(5): 110-119.
- LIANG Xingwen, WANG Ping, XU Mingxue, et al. Research on flexural properties and bearing capacity of reinforced ultra-high performance concrete beams [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(5): 110-119.

(编辑 桂智刚)