

基于梁式试验的UHPC-高强钢筋搭接黏结性能

邓明科 姚昕 张阳玺 靳梦娜 曹继涛

Bonding properties of UHPC-high strength rebar based on beam test

DENG Mingke, YAO Xin, ZHANG Yangxi, JIN Mengna, CAO Jitao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240011.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

变形钢筋/超高性能混凝土搭接黏结性能

Bond behavior of deformed steel bars lap-splice in ultra high performance concrete

复合材料学报. 2021, 38(11): 3912–3924 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201229.006>

再生钢纤维增韧超高性能混凝土的力学性能

Mechanical properties of recycled steel fiber reinforced ultra-high-performance concrete

复合材料学报. 2019, 36(8): 1949–1956 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180921.001>

钢纤维类型对超高性能混凝土高温爆裂性能的影响

Influence of different types of steel fiber on explosive spalling behavior of ultra-high-performance concrete exposed to high temperature

复合材料学报. 2018, 35(6): 1599–1608 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.009>

GFRP筋与自密实混凝土黏结性能的试验研究

Experimental study on bond properties between GFRP bars and self compacting concrete

复合材料学报. 2021, 38(10): 3484–3494 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210207.001>

CFRP筋-高强钢筋/高强混凝土柱的抗震性能

Seismic behavior of high-strength concrete columns reinforced with CFRP tendons and high-strength steels

复合材料学报. 2021, 38(10): 3463–3473 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201222.001>

高强箍筋约束超高性能混凝土柱轴压性能

Axial compression behavior of ultra-high performance concrete columns confined by high-strength stirrups

复合材料学报. 2020, 37(10): 2590–2601 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200203.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

基于梁式试验的 UHPC-高强钢筋搭接黏结性能



分享本文

邓明科¹, 姚昕¹, 张阳奎^{*1}, 靳梦娜², 曹继涛³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065;

3. 西安五和建筑科技研究院有限公司, 西安 710055)

摘要: 为了研究高强钢筋与超高性能混凝土 (UHPC) 的黏结性能, 通过梁式搭接试验, 设计制作了 9 根搭接梁, 分析了钢筋搭接长度、钢纤维掺量、机械锚固措施对搭接梁中高强钢筋与 UHPC 黏结性能的影响。结果表明: 采用 UHPC 连接的搭接梁, 搭接段受拉钢筋与混凝土具有更优异的黏结性能; 随着钢筋搭接长度的增加, 搭接梁的峰值荷载提高, 但平均黏结强度逐渐减小; 搭接梁的峰值荷载和黏结强度随着钢纤维掺量的增大而增大; 采用机械锚固措施处理后的搭接梁, 具有更高的峰值荷载和黏结强度, 其中采用弯钩处理的搭接梁峰值荷载和黏结强度提升最为明显, 分别提高了 212.4%、199.4%, 并且搭接钢筋发生屈服。根据搭接梁达到峰值荷载时轴力和弯矩的平衡条件, 计算出搭接梁中钢筋的最大拉应力, 进一步建立钢筋与 UHPC 平均黏结强度的计算方法, 并与中心拉拔试验、对拉搭接试验结果进行对比。

关键词: 超高性能混凝土; 高强钢筋; 梁式搭接试验; 黏结强度; 搭接性能

中图分类号: TU528; TU317.1; TB333

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2024)10-5527-13

Bonding properties of UHPC-high strength rebar based on beam test

DENG Mingke¹, YAO Xin¹, ZHANG Yangxi^{*1}, JIN Mengna², CAO Jitao³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Powerchina

Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 3. Xi'an Wuhe Building Technology Research

Institute CO., LTD., Xi'an 710055, China)

Abstract: To study the bonding properties of high-strength steel bars and ultra-high-performance concrete (UHPC), nine groups of lap beams were designed and fabricated. The influences of specific variables on the bonding properties were analyzed, including lap length, steel fiber volume content, and mechanical anchoring measures. The experimental results show that the tensile steel bars in the lap section of the lap beams connected with UHPC have better performance on the bonding properties with concrete. Increasing the lap length promotes peak load but the average bonding strength of the lap beams on the contrary. With the increase of steel fiber volume content, the peak load and bond strength of the lap beams increase. Mechanical anchoring adopted lap beams show a higher peak load and bonding strength, where bent hooks treated lap beam shows the highest enhancement, with peak load and bond strength improved by 212.4% and 199.4%, respectively, and it is worth mentioning that the hooked lap steel bars yielded. Based on the equilibrium condition of axial force and bending moment at the peak point, the maximum tensile stress of the steel bar in the lap beam was calculated. A calculation method of the average bonding strength between the steel bar and UHPC was then established. The proposed method calculation results were compared with the centre pull-out test and brace lap test results subsequently.

收稿日期: 2023-11-09; 修回日期: 2023-12-24; 录用日期: 2024-01-03; 网络首发时间: 2024-01-12 17:12:13

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240011.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (52108173)

National Natural Science Foundation of China (52108173)

通信作者: 张阳奎, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新材料及结构加固 E-mail: yangxizhang@xauat.edu.cn

引用格式: 邓明科, 姚昕, 张阳奎, 等. 基于梁式试验的 UHPC-高强钢筋搭接黏结性能 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(10): 5527-5539.

DENG Mingke, YAO Xin, ZHANG Yangxi, et al. Bonding properties of UHPC-high strength rebar based on beam test[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(10): 5527-5539(in Chinese).

Keywords: ultra-high-performance concrete; high strength steel reber; beam lap test; bond strength; lap-spliced behavior

超高性能混凝土 (Ultra-high-performance concrete, UHPC) 是一种新型水泥基复合材料, 具有超高强度、超高韧性、超高耐久性, 被广泛应用于桥梁工程、建筑工程、军事防护工程等领域^[1-3]。与普通混凝土相比, UHPC 与钢筋具有更优异的黏结性能^[4-5], 从而可以解决实际工程中搭接区段钢筋搭接强度不足的问题, 有效缩短钢筋的搭接长度, 延缓搭接区裂缝的发展。因此, UHPC 被广泛应用于桥面板连接^[6-8]、钢筋搭接缺陷加固^[9]和预制混凝土构件连接^[10]等。

钢筋与混凝土之间的黏结是保证钢筋混凝土构件充分发挥作用的关键, 中心拉拔试验、对拉搭接试验和梁式试验是目前研究钢筋与 UHPC 黏结性能的主要方法。通过中心拉拔试验发现^[11-17], 钢筋锚固长度、钢纤维掺量、保护层厚度是影响其黏结强度的主要参数。随着黏结长度的增加, 钢筋应力分布越不均匀, 钢筋与 UHPC 的平均黏结强度逐渐减小; 随着混凝土保护层厚度的增加, 钢筋与 UHPC 的黏结性能显著提高, 但钢筋直径以及钢纤维掺量对其的影响尚未有统一的结论。

中心拉拔试验因其操作简便、易于实现而被广泛的应用于黏结试验中, 但中心拉拔试验存在“拱效应”, 测得的黏结强度往往偏高, 因此许多学者采用对拉搭接试验对钢筋与 UHPC 的黏结性能进行研究。Lagier 等^[18]通过对拉拔出试验研究了钢纤维掺量对搭接接头黏结强度的影响, 研究表明: 相比于普通混凝土, 钢纤维增强 UHPC 可以有效缩短钢筋的搭接长度; 纤维体积分数为 4vol% 时, 直径为 25 mm 的钢筋在 12d 的搭接长度 (d 为钢筋直径) 下即可达到屈服, 且劈裂裂纹得到了有效控制。方志等^[19]通过 39 个对拉搭接试验, 研究了纵筋搭接长度、搭接钢筋间距、配箍率和活性粉末混凝土 (Reactive powder concrete, RPC) 强度对 RPC 与钢筋之间的黏结性能的影响, 研究表明: 搭接长度是影响其破坏模式的主要因素; 随着搭接长度的增加会导致搭接强度稍有降低, 而 RPC 强度、配箍率和钢筋净距的增加会导致搭接强度的提高。马福栋等^[20]设计了 21 组对拉搭接试验和 3 组直接拔出锚固试验, 研究了搭接长度、纤维掺量、配箍率对变形钢筋和 UHPC 黏结性能的影响, 结论与文献^[19]基本一致, 并

且建立了钢筋/UHPC 锚固和搭接长度的简化算法。

中心拉拔试验和对拉搭接试验均未考虑实际梁构件中弯曲应力的影响, 梁式搭接试验是最接近实际受力的试验方法, 课题组前期工作^[20]发现, 对拉搭接试验与中心拉拔试验得出的黏结强度比值为 0.66~0.69, 说明中心拉拔试验会高估钢筋与 UHPC 的黏结强度, 而对拉搭接试验未考虑实际梁构件中弯曲应力的影响。为此, 有学者通过整浇 UHPC 梁式搭接试验来研究钢筋与 UHPC 的搭接黏结性能^[21-24], 研究表明: UHPC 可以有效减小钢筋搭接长度; 钢纤维掺量、钢筋搭接长度是影响搭接黏结强度的重要因素。本文通过 8 根局部后浇 UHPC 连接的搭接梁和 1 根局部后浇 C80 混凝土连接的搭接梁, 研究钢筋搭接长度、钢纤维掺量和机械锚固措施对搭接梁中高强钢筋与 UHPC 黏结性能的影响, 并与其他两种试验方法进行对比, 研究弯矩作用对受拉钢筋黏结强度的影响, 为后浇 UHPC 搭接梁应用于装配式建筑提供依据。

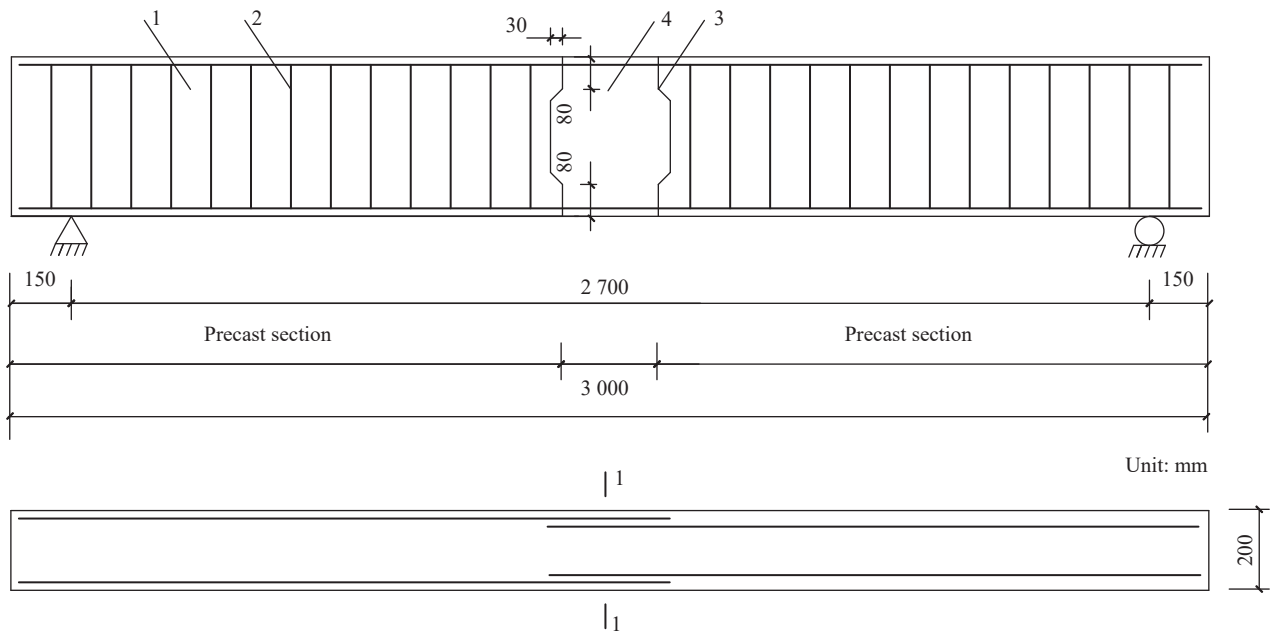
1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验共设计了 8 根 UHPC 搭接梁和 1 根 C80 混凝土搭接梁, 试验变参为钢筋搭接长度 (3d、8d、12d)、钢纤维掺量 (2vol%、3vol%)、机械锚固措施 (90°弯钩、锚固板、单面贴焊、两面贴焊)。梁截面尺寸为 200 mm×400 mm, 梁纵筋采用 HRB500 级钢筋, 直径为 20 mm, 箍筋及架立筋采用 HPB300 级钢筋, 其直径均为 8 mm, 为保证搭接梁后浇界面新旧混凝土良好的黏结性能, 设置了 6 mm 的粗糙面。

梁构件的尺寸和配筋图见图 1 和图 2, 锚固措施见图 3, 试件的设计参数及钢筋应力计算结果详见表 1, 根据文献^[17-19, 23-24], 本文取搭接长度 3d 为主变参, 保证搭接梁发生黏结破坏。

试件的制作主要分为两步: (1) 先浇筑预制梁部分, 采用 C40 混凝土浇筑而成, 用隔板与泡沫胶将搭接区和预制梁分隔开, 预留出后浇部分; (2) 待普通混凝土部分硬化后, 取掉搭接区的隔板, 并用高压水枪将泡沫胶清洗干净, 将两侧键槽 (图 4(b)) 处的普通混凝土面进行凿毛处理, 清洗干净后安装侧模, 将制备好的 UHPC 在此区段进



1—C40 precast concrete sections; 2—A8@100; 3—Rough surface concave and convex depth 6 mm; 4—Post-cast section
图1 梁大样图及俯视图

Fig. 1 Sample and top view of beam

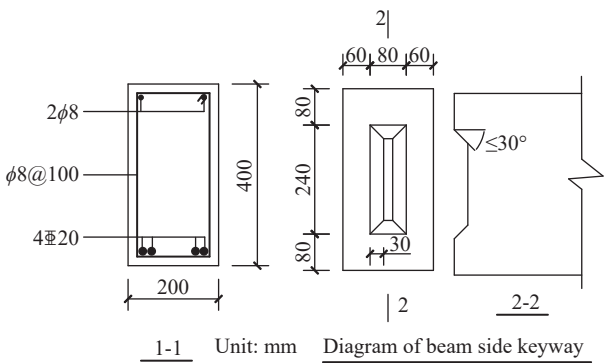


图2 梁截面配筋图及键槽示意图

Fig. 2 Beam cross-section reinforcement diagram and keyway schematics

行浇筑，待收面抹平之后覆盖保鲜膜防止产生干缩裂缝。为保证其足够的黏结强度，试件搭接区养护 28 天之后进行加载。

1.2 试验材料性能

试验采用的 UHPC 主要由水泥、粉煤灰、硅灰、石英砂和水组成。水泥选用 P·O 52.5 级硅酸盐水泥；粉煤灰为 I 级粉煤灰；考虑纤维随机分布的影响，采用级配石英砂，粒径范围为 0.08~3.25 mm；硅灰选用无定型超细灰白色球状粉末；减水剂采用某公司的聚羧酸高效减水剂；使用端勾型镀铜钢纤维，长度为 13 mm，直径是 0.22 mm，长径比为 60，抗拉强度大于 2 850 MPa。测得新拌 UHPC 的坍落度大于 220 mm，扩展度约为 560 mm。

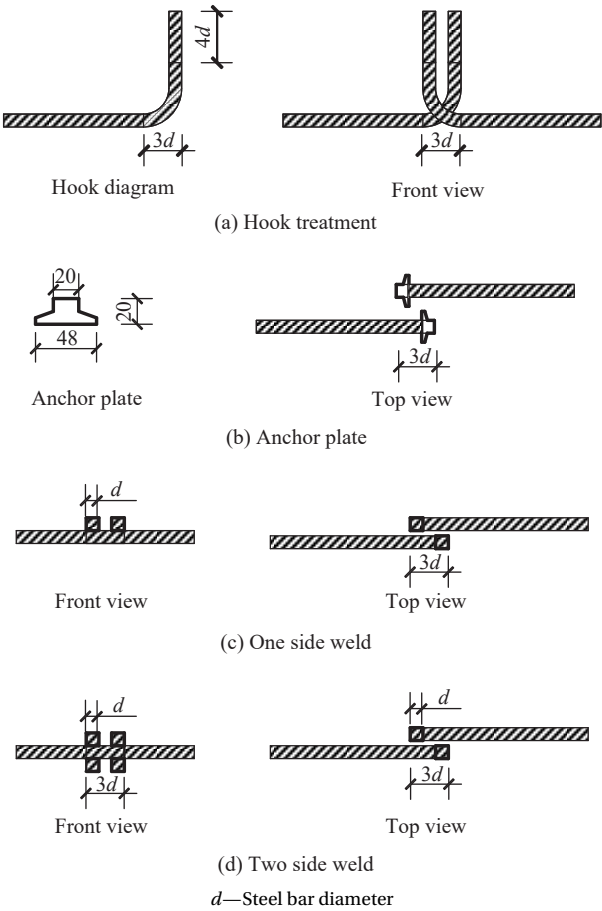


图3 机械锚固措施图

Fig. 3 Mechanical anchorage measure diagram

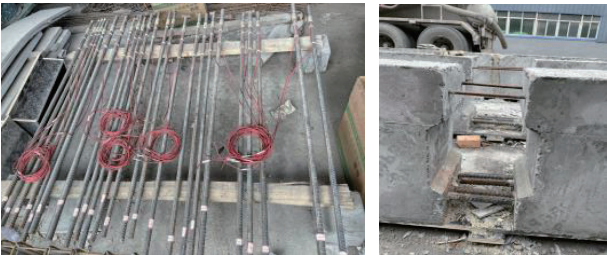
采用边长为 100 mm 的立方体试块和 100 mm×

表 1 梁式搭接试验试件参数设计及钢筋应力计算结果

Table 1 Parameter design of beam lap test specimen and results of reinforcement stress calculation

Number	Type	L	Lap form	$V_f/\text{vol}\%$	Peak load/kN	f_s/MPa	Yield or not
B1	C80	$3d$	Straight rebar lap	2	23.5	—	Not
B2	UHPC	$3d$	Straight rebar lap	2	95.2	187	Not
B3	UHPC	$8d$	Straight rebar lap	2	207.8	449	Not
B4	UHPC	$12d$	Straight rebar lap	2	231.1	494	Not
B5	UHPC	$3d$	Straight rebar lap	3	145.3	302	Not
B6	UHPC	$3d$	Hook treatment	2	297.4	560	Yield
B7	UHPC	$3d$	Anchor plate	2	124.1	257	Not
B8	UHPC	$3d$	One side weld	2	124.3	257	Not
B9	UHPC	$3d$	Two side weld	2	188.0	403	Not

Notes: Type—Type of post-cast concrete in lap section; UHPC—Ultra-high-performance concrete; L —Lap length (Lap form-different mechanical anchorage measures); V_f —Fibre volume fraction; f_s —Calculated tensile strength of rebar.



(a) Strain gauge bonding (b) Beam keyway

图 4 试件制作图

Fig. 4 Specimen fabrication diagram

100 mm×300 mm 的棱柱体试块分别测量 UHPC 的立方体抗压强度和棱柱体抗压强度。采用“哑铃型”试块测试 UHPC 的单轴抗拉强度，厚度为 130 mm，试件尺寸及加载装置见图 5，UHPC 的力学性能见表 2，钢筋的力学性能见表 3。

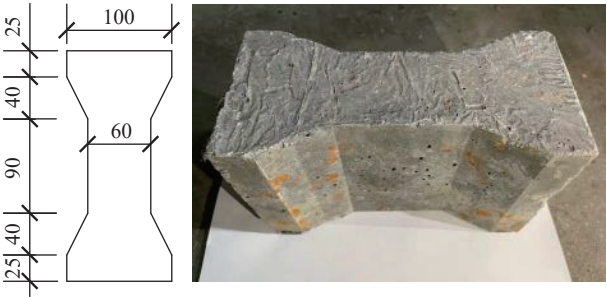


图 5 哑铃型试件示意图 (单位: mm)

Fig. 5 Schematic diagram of dumbbell type specimen (Unit: mm)

1.3 加载制度与测点布置

1.3.1 加载制度及装置

本次试验在冠腾自动化技术有限公司制造的 YAS-1000 型微机控制电液伺服压力试验机上进行，加载方式为三分点静力加载。采用位移控制加载，加载速率为 0.2 mm/min，当荷载降至极限荷载的 85% 时，停止加载。试验加载装置如图 6 所示。

表 2 超高性能混凝土 (UHPC) 材料性能

Table 2 Material properties of UHPC

$V_f/\text{vol}\%$	f_{cu}/MPa	f_c/MPa	f_t/MPa
2	123.3	113.2	6.22
3	135.6	122.7	7.01

Notes: f_{cu} —Cubic compressive strength; f_c —Prismatic compressive strength; f_t —Tensile strength.

表 3 钢筋力学性能

Table 3 Mechanical properties of reinforcement

Strength grade	Diameter/mm	Yield strength/MPa	Ultimate strength/MPa
HPB300	8	357	529
HRB500	20	560	715

1.3.2 测点布置

为测量梁受力过程中，梁跨中混凝土应变是否满足平截面假定，在梁跨中等间距布置 5 个混凝土应变片，间距为 80 mm，最上端应变片距顶面为 40 mm；为了得到搭接梁在加载过程中的挠度变化情况，在跨中、两加载点下方和两侧支座上方处各布置 1 个位移传感器，共 5 个，具体布置如图 6 所示。

在搭接段每根受拉纵筋上均布置应变片，考虑到搭接段长度为 $3d$ (60 mm) 时，搭接长度过小，因此将应变片布置在预制混凝土梁靠近键槽处，共布置了 4 个测点，应变片布置示意图如图 7 所示。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象及破坏模式

2.1.1 后浇 C80 混凝土 (B1)

如图 8(a) 所示，加载初期试件处于弹性工作阶段，当加载至 19 kN 时，后浇界面开始出现明显的裂缝，继续加载，后浇界面裂缝变宽，其他未出现明显裂缝；当加载至 24 kN 时，达到峰值荷载；随着加载位移增大，后浇界面裂缝宽度逐

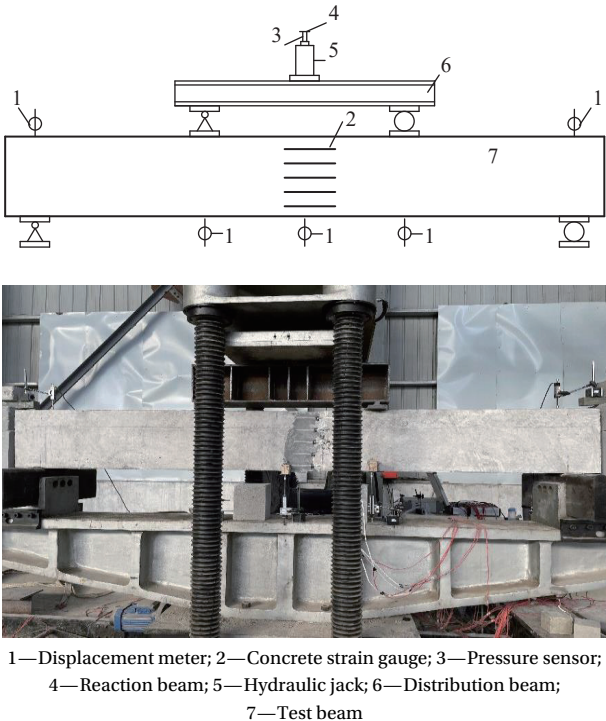


图6 试验加载装置及测点布置图
Fig. 6 Layout of test loading device and measuring point

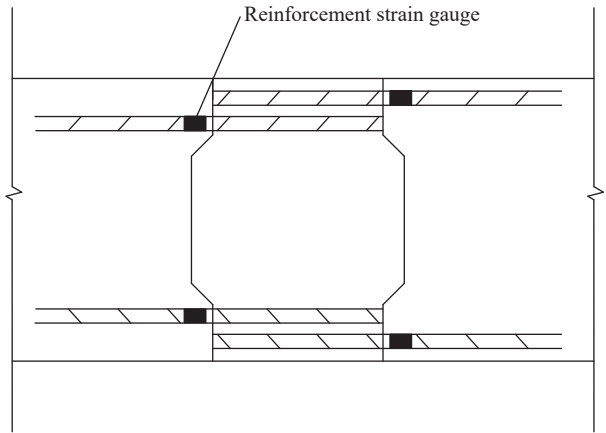


图7 钢筋测点布置
Fig. 7 Layout of reinforcement measuring points

渐增大，钢筋与后浇混凝土的黏结性能不断劣化，梁式试件承载力显著下降，试件后浇区发生黏结破坏。

2.1.2 后浇 UHPC (B2~B9)

(1) 不同钢筋搭接长度 (B2、B3、B4)

如图 8(b) 所示，试件 B2 (3d) 加载至 41 kN 时，梁底后浇接缝处出现第一条裂缝；继续加载，混凝土梁段受拉区亦出现弯曲裂缝，后浇接缝处裂缝向上延伸；加载至 95 kN (峰值荷载) 时，试件裂缝数量不再增加；继续加载，后浇界面处裂缝

变宽，钢筋与 UHPC 黏结强度退化并发生滑移，受拉纵筋没有屈服，跨中挠度增加，试件破坏。

如图 8(c)、图 8(d) 所示，试件 B3 (8d) 和 B4 (12d) 的破坏过程基本相似，均经历了后浇区接缝开裂、混凝土梁段开裂、剪跨区出现斜裂缝、钢筋与 UHPC 黏结退化和滑移。破坏模式的差异主要体现在混凝土梁段的弯曲裂缝数量，裂缝数量与梁的受弯承载力呈正相关，受 UHPC 搭接区域提供的总黏结力控制。3 个试件中受拉纵筋均未屈服，原因主要是搭接长度的不足导致钢筋的抗拔能力较低，钢筋还未发挥作用可能已经产生了滑移，而由于搭接钢筋间净距过小，使钢筋没有被 UHPC 充分包裹，导致钢筋与 UHPC 的有效黏结面积减小，从而未能充分发挥 UHPC 的高黏结特性，因此内部裂缝还未扩展至 UHPC 面层表面，试件就已经发生了破坏。

(2) 不同钢纤维掺量 (B2、B5)

如图 8(e) 所示，试件 B5 (3vol%) 加载至 54 kN 时，右加载点附近处出现第一条裂缝，随后，后浇接缝处才出现竖向裂缝；随着荷载继续增加，表现出与试件 B2 (2vol%) 相似的破坏特征；加载至 145 kN (峰值荷载) 时，试件破坏，受拉纵筋没有屈服，在梁端可以观察到一定数量的弯曲裂缝，但与 B2 试件相比并未明显增多。钢纤维掺量的增加，可以提高后浇界面与梁端普通混凝土的黏结性能，因此第一条裂缝出现在了加载点处附近，相比于钢筋搭接长度，钢纤维掺量对钢筋与 UHPC 黏结性能的影响有限，试件表面弯曲裂缝数量没有明显增加。

(3) 不同锚固措施 (B6~B9)

如图 8(f)~8(i) 所示，试件 B6、B7、B8 和 B9 分别采用 90°弯钩、锚固板、单面贴焊和双面贴焊 4 种不同的机械锚固措施处理。

试件 B6 加载至 37 kN 时，梁底部后浇界面处首先出现对称竖向裂缝；继续加载，混凝土梁段不断出现新的弯曲裂缝，裂缝逐渐延伸变宽；加载至 264 kN 时，受拉钢筋屈服，梁段裂缝宽度明显增大；加载至 297 kN (峰值荷载) 时，试件裂缝不再增加，继续加载，最后受压区混凝土被压碎，试件表现出典型的适筋梁破坏特征。试件 B6 搭接区所提供的黏结力由平直段、弯钩段和竖直段三部分提供，有效黏结面积明显增大，总黏结力显著高于试件 B7、B8 和 B9，因此受拉纵筋能够发



图8 UHPC-高强钢筋梁式搭接试件破坏示意图

Fig. 8 Schematic diagram of UHPC-high strength rebar beam lap test specimen failure

生屈服，表现出明显不同于 B7、B8 和 B9 试件的破坏模式。

试件 B7、B8、B9 表现出相似的破坏过程，与试件 B2(直筋搭接)相比，锚具的设置主要增强了钢筋与 UHPC 后期的黏结强度储备，只有在试件发生较大变形的情况下才能发挥作用，因此在前期破坏过程上并没有显著的区别，梁段弯曲裂缝的数量也没有明显增加。但锚具会对周围 UHPC 产生一定的压力作用，在最后破坏时，可以观察到搭接段 UHPC 面层处有黏结裂缝产生。同时，锚具的设置增强了钢筋与 UHPC 的黏结强度，因此记录到的钢筋应变更大，但此时受拉纵筋仍没有屈服。试件 B7、B8、B9 破坏模式的主要差异体现在双面贴焊进一步减小了试件 B9 混凝土的保护层厚度，因此在最终呈现的破坏模式上，可以在搭接区面层上观察到更多的黏结裂缝。

综上，试件 B1 的破坏源于后浇区钢筋和混凝土的黏结破坏；除试件 B6 因受压区混凝土压碎导致破坏以外，其余试件的破坏均由 UHPC 浇筑区的黏结退化引起。

2.2 荷载-挠度曲线分析

搭接梁的荷载-挠度曲线如图 9 所示，各个搭接梁的峰值荷载及钢筋屈服情况见表 1。

(1) 试件 B2 的峰值荷载是 B1 的 4.05 倍，可认为搭接长度为 $3d$ 时 UHPC 与钢筋的黏结强度较混凝土提高了 3 倍；峰值荷载后，C80 混凝土搭接区混凝土保护层发生劈裂破坏后残余黏结强度约为峰值黏结强度的 40%，而 UHPC 搭接区表现出更高的残余黏结强度比(约 68%)，其原因是 UHPC 中的钢纤维桥连作用延缓了保护层的劈裂。

(2) 试件 B2、B3 和 B4 的荷载-挠度曲线见图 9(b)。加载初期试件处于弹性阶段，曲线基本

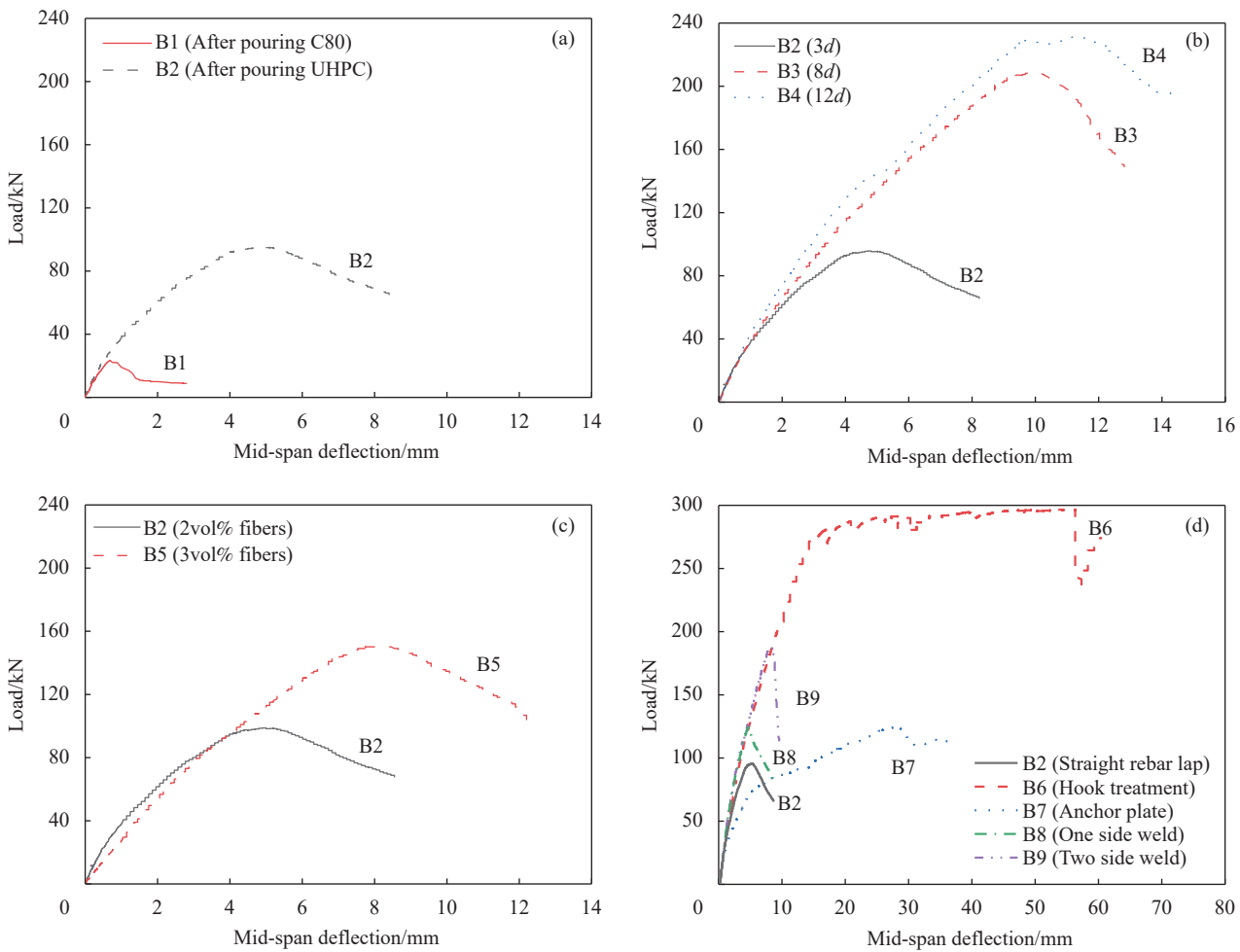


图9 UHPC-高强钢筋梁式搭接试件荷载-挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curves of UHPC-high strength rebar beam lap test specimen

重合，试件开裂后刚度下降，搭接长度越大黏结强度退化越缓慢，刚度下降越缓慢。由表1可知，与试件B2相比，试件B3和B4的峰值荷载分别提高了118.3%和142.8%，但单位黏结长度提供的黏结力下降，与常规中心拉拔和对拉搭接试验结果吻合。

(3) 由图9(c)可见，试件未开裂前均处于弹性阶段，B5试件开裂后刚度并无明显下降。由表1可得，当钢纤维掺量从2vol%增长到3vol%，试件的峰值荷载提高了52.6%。随着钢纤维掺量的增加，提高了UHPC的抗拉强度和抗裂性能，乱向分布的钢纤维可以抑制内部微裂纹的发展，缓冲裂缝端部的应力集中，从而提高了钢筋与UHPC的黏结性能，试件的峰值荷载更高，但明显小于钢筋搭接长度的增加对搭接梁力学性能的影响。

(4) 由表1可知，与试件B2相比，采用不同机械锚固措施的试件B6~B9，峰值荷载分别提高

了212.4%、97.5%、30.4%、30.6%。荷载-挠度曲线见图9(d)，试件B6~B9在开裂前均处于弹性阶段，开裂后的荷载-挠度曲线表现出明显的不同。试件B6在达到峰值荷载前钢筋已经屈服，并且峰值荷载显著高于其他试件，由于焊点的失效，B8、B9试件在达到峰值荷载后，黏结强度出现了明显的退化，荷载突然下降，采用锚固板措施的B7试件，在达到峰值荷载后，仍然有着足够的黏结强度储备，并未出现黏结强度的迅速退化。

2.3 应变分析

2.3.1 跨中混凝土应变分析

图10所示为搭接梁在较小的搭接长度(3d)和不同的机械锚固措施下跨中混凝土的应变变化情况，开裂之前，应变沿截面高度分布基本成线性增长，开裂之后，略有波动，但仍呈现线性增长的趋势，因此搭接梁跨中混凝土应变情况基本符合平截面假定。

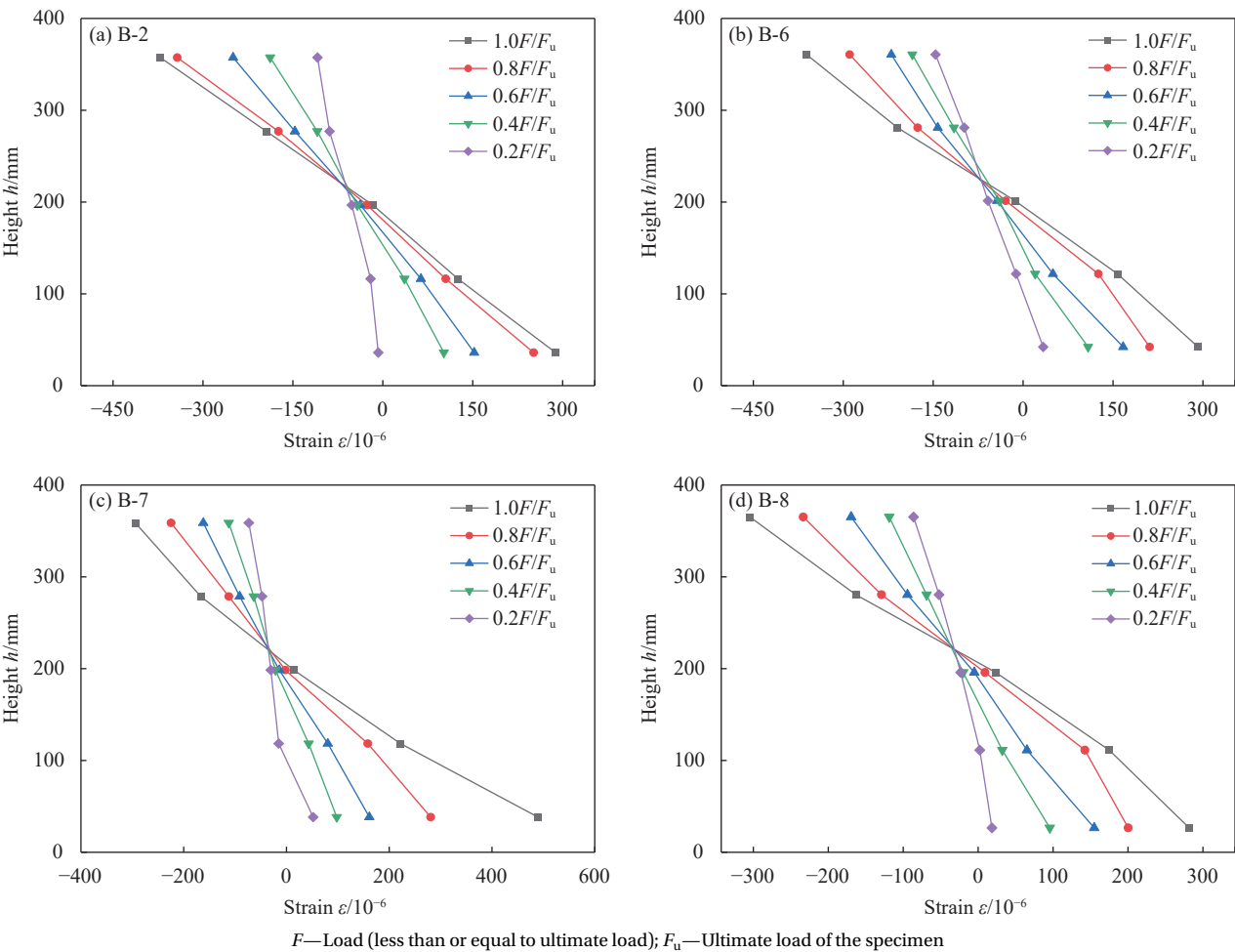


图 10 UHPC-高强钢筋梁式搭接试件跨中混凝土应变分析

Fig. 10 Strain analysis of plane section of UHPC-high strength rebar beam lap test specimen

2.3.2 搭接段钢筋应变分析

图 11 所示为搭接梁荷载-跨中钢筋应变曲线，在这里选取了 3 组峰值荷载较高的试件进行分析，

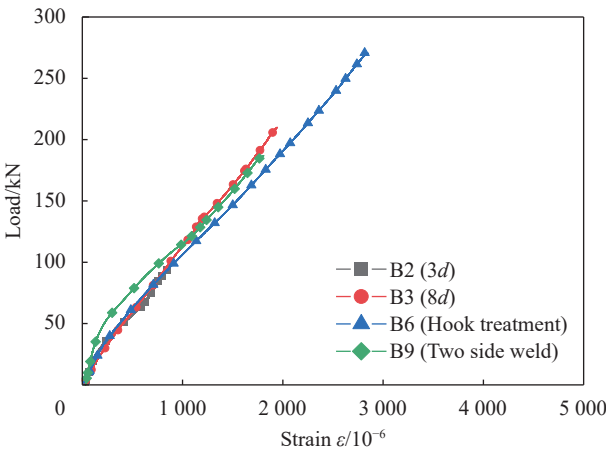


图 11 UHPC-高强钢筋梁式搭接试件搭接段钢筋应变分析

Fig. 11 Strain analysis of steel bar in lap section of UHPC-high strength rebar beam lap test specimen

B2 为对比试件。可以看到，峰值荷载最高的 B6 搭接梁，钢筋应变达到了屈服应变，符合前述搭接梁的破坏模式，而峰值荷载低于 B6 的其余搭接梁，钢筋均未屈服。

2.4 钢筋应力计算

2.4.1 计算假定

本文根据搭接梁达到峰值荷载时轴力与弯矩的平衡条件计算出搭接梁中钢筋的最大拉应力^[23, 25]，基本假定如下：

- (1) 搭接梁跨中 UHPC 正截面平均应变按照线性规律分布，即截面应变符合平截面假定；
- (2) 受压区 UHPC 取三角形应力分布，即处于弹性工作阶段；
- (3) UHPC 与受拉钢筋在受拉区共同承担拉应力，UHPC 的应力-应变曲线采用理想弹塑性模型，UHPC 初裂以后其拉应力保持不变^[25]。

2.4.2 计算过程

根据截面的应力以及应变分布图 12，可以得

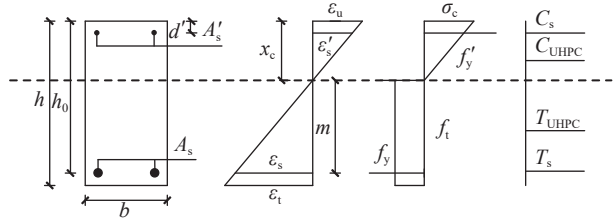
到两个平衡方程:

$$C_{\text{UHPC}} + C_s = T_{\text{UHPC}} + T_s \quad (1)$$

$$M = C_{\text{UHPC}} \left(\frac{2}{3} x_c \right) + C_s (x_c - d') + T_{\text{UHPC}} \left(\frac{m}{2} \right) + T_s (h_0 - x_c) \quad (2)$$

$$m = x_c \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_u} \leq h - x_c \quad (3)$$

式中: T_{UHPC} 为受拉区 UHPC 的合拉力; T_s 为受拉钢筋的合力; C_{UHPC} 为受压区 UHPC 的合压力; C_s 为受压钢筋的合力; M 为搭接梁所受的外力矩; x_c 为梁截面的受压区高度; d' 为受压钢筋合力作用点到梁外边缘的距离; ε_t 为 UHPC 的计算拉应变; ε_u 为极限压缩纤维处 UHPC 的压应变; h 为搭接梁截面高度; h_0 为搭接梁截面有效高度, 即受拉钢筋合力作用点到梁外边缘的距离; m 为受拉钢筋合力点到中和轴的距离, 即 UHPC 的有效受拉区高度。



h —Beam height; b —Beam width; h_0 —Effective height of beam; d' —Distance from the point of action of the combined forces of the compression reinforcement to the outer edge of the beam; A_s —Cross-sectional area of tensile reinforcement; A'_s —Cross-sectional area of compression reinforcement; x_c —Height of compression zone of beam section; m —The depth of the extreme UHPC tensile fiber below the neutral axis; ε_t —Calculated tensile strain of UHPC; ε_u —Compressive strain of UHPC at the extreme compression fiber; ε_s —Actual strain in tensile reinforcement; ε'_s —Actual strain in compression reinforcement; f_y —Yield stress of tensile reinforcement; f'_y —Yield stress of compression reinforcement; f_t —Measured uniaxial tensile strength of dumbbell specimens; σ_c —Compressive stress of UHPC at the extreme compression fiber; T_s —Combined force of tensile reinforcement; T_{UHPC} —Combined force of UHPC in the tension zone; C_s —Combined force of compression reinforcement; C_{UHPC} —Combined pressure of UHPC in the pressure zone

图 12 钢筋应力计算示意图

Fig. 12 Schematic diagram of reinforcement stress calculation

受压区 UHPC 的合力 C_{UHPC} 可按下式进行计算:

$$C_{\text{UHPC}} = \frac{1}{2} x_c \varepsilon_u E_c b \quad (4)$$

式中: b 为搭接梁截面宽度; E_c 为 UHPC 弹性模量, 采用文献 [26] 中所拟合出来的 f_{cu} 与 E_c 之间的关系式进行计算:

$$E_c = \frac{10^5}{1.76 + 73.34/f_{cu}} \quad (5)$$

受拉区 UHPC 的合力 T_{UHPC} 可按下式进行计算:

$$T_{\text{UHPC}} = f_t b m \quad (6)$$

式中, f_t 为哑铃型试件实测出的单轴抗拉强度。

受压钢筋的合力 C_s 可用下式进行计算:

$$C_s = \begin{cases} A'_s f'_y, f'_s \geq f'_y \\ A'_s f'_s = A'_s \varepsilon'_s E'_s = A'_s \varepsilon_u \left(\frac{x_c - d'}{x_c} \right) E'_s, f'_s \leq f'_y \end{cases} \quad (7)$$

式中: A'_s 为受压钢筋的截面面积; f'_y 为受压钢筋的屈服应力; f'_s 为受压钢筋的实际应力; ε'_s 为受压钢筋的实际应变; E'_s 为受压钢筋的弹性模量, 取 210 GPa。

受拉钢筋的合力 T_s 可用下式进行计算:

$$T_s = \begin{cases} A_s f_y, f_s \geq f_y \\ A_s f_s = A_s \varepsilon_s E_s = A_s \varepsilon_u \left(\frac{h_0 - x_c}{x_c} \right) E_s, f_s \leq f_y \end{cases} \quad (8)$$

式中: A_s 为受拉钢筋截面面积; f_y 为受拉钢筋的屈服应力; f_s 为受拉钢筋的实际应力; ε_s 为受拉钢筋的实际应变; E_s 为受拉钢筋的弹性模量, 取 200 GPa。

2.4.3 计算结果分析

表 1 为搭接梁达到峰值荷载时的钢筋应力计算结果, 从表 1 和图 9 可以看出, 仅有 B6 试件钢筋发生了屈服, 表明在 3d 的搭接长度下, 同时采用 90°弯钩这一机械锚固措施, 可以充分发挥出高强钢筋的作用。

3 黏结性能分析及对比

3.1 黏结强度计算

搭接梁中钢筋与 UHPC 的平均黏结强度 τ_u 可以用搭接梁达到峰值荷载时的钢筋应力计算 [9, 23]:

$$\tau_u = \frac{A_b f_s}{\pi d_b l_{sp}} \quad (9)$$

式中: A_b 为钢筋的横截面积; d_b 为受拉钢筋的直径; f_s 为峰值荷载时钢筋的最大拉应力; l_{sp} 为钢筋的搭接长度。

课题组前期进行了 5 组中心拉拔试验和 9 组对拉搭接试验研究 [27], 钢筋与 UHPC 的黏结强度采用下式进行计算:

$$\tau_u = \frac{F}{\pi d_b l_{sp}} \quad (10)$$

式中: τ_u 为对拉搭接试验的黏结强度; F 为试验的峰值荷载。

由表 4 可得，在混凝土保护层厚度和钢筋直径相同的情况下，对拉搭接试验得出的黏结强度

与中心拉拔试验比值平均值为 0.69；梁式搭接试验与对拉搭接试验得出的黏结强度比值平均值为 0.84。

表 4 UHPC-高强钢筋梁式试验对比
Table 4 Test comparison of UHPC-high strength rebar beam lap test

Number	Type	L	V _f /vol%	Lap form	Center pull-out test		Brace lap test		Beam lap test		τ_{u2}/τ_{u1}	τ_{u3}/τ_{u2}
					τ_{u1} /MPa	Failure mode	τ_{u2} /MPa	Failure mode	τ_{u3} /MPa	Failure mode		
B1	C80	3d	0	Straight rebar lap	19.2	SPF	12.1	SPF	—	BOF	0.63	—
B2	UHPC	3d	2	Straight rebar lap	35.6	SPF	23.1	SPF	15.6	BOF	0.65	0.68
B3	UHPC	8d	2	Straight rebar lap	20.8	SPF	16.2	SPF	14.0	BOF	0.78	0.86
B4	UHPC	12d	2	Straight rebar lap	14.4	RF	12.3	RF	10.3	BOF	0.85	0.84
B5	UHPC	3d	3	Straight rebar lap	49.7	SPF	27.6	SPF	25.2	BOF	0.56	0.91
B6	UHPC	3d	2	Hook treatment	—	—	50.7	RF	46.7	BEF	—	0.92
B7	UHPC	3d	2	Anchor plate	—	—	25.2	SPF	21.4	BOF	—	0.85
B8	UHPC	3d	2	One side weld	—	—	27.1	SPF	21.4	BOF	—	0.79
B9	UHPC	3d	2	Two side weld	—	—	28.4	SPF	33.6	BOF	—	1.18

Notes: All the above specimens are made of HRB500 grade rebar, diameter is 20 mm, the concrete protective layer is 1.5d; τ_{u1} —Bond strength obtained by center poll-out test; τ_{u2} —Bond strength obtained by brace lap test; τ_{u3} —Bond strength obtained by beam lap test; SPF and RF represent the splitting pull-out failure and steel bar rupture failure respectively; BOF and BEF represent the bonding failure of steel bars and the bending failure of lap beams respectively.

中心拉拔试验无法准确模拟钢筋搭接时真实的受力状况，在钢筋拉拔过程中 UHPC 受压，受 UHPC 内部“拱作用”产生挤压力的影响，使钢筋拉拔过程中的机械咬合力和摩阻力增大，同时加载端 UHPC 还受到加载装置中钢板的端部约束，故中心拉拔试件所得到的黏结强度高于对拉搭接试验；课题组前期^[27]进行的 4 根钢筋对拉搭接试验，消除了中心拉拔试验中拱作用和端部约束作用的影响，使 UHPC 在钢筋拉拔过程中受到拉应力的作用，是一种改进的试验方法，但以上两种试验方法均无法反映出实际构件中弯曲应力对钢筋与 UHPC 黏结强度的削弱作用，因此得出的黏结强度仍高于贴近实际受力情况的梁式搭接试验。

对于两面贴焊试件，出现了梁式搭接试验得出的黏结强度高于对拉搭接试验，可能是由于对拉搭接试验加载过程中，钢筋出现偏心的影响，从而削弱了钢筋与 UHPC 的黏结强度，受限于试验数据较少，无法得出具体的原因，因此取平均值时排除 B9 试件，后续通过进一步试验分析其原因。

3.2 不同试验方法下各因素对黏结强度的影响

3.2.1 钢筋搭接长度 (B2、B3、B4)

由图 13 可见，随着黏结长度增大，3 种试验方法得到的黏结强度差异越小，原因主要是黏结长度越大，中心拉拔试件受“压力拱”效应影响越小，荷载偏心 and 界面弯曲应力的不利影响也变小；3 种试验方法得到的黏结强度均随黏结长度的增大而减小，由于随着搭接长度的增加，黏结

应力的分布越不均匀，采用直筋搭接的方式，越靠近搭接钢筋末端，黏结应力越小，搭接长度的增加导致黏结应力较小的区域增加，从而钢筋的平均黏结强度相应降低。

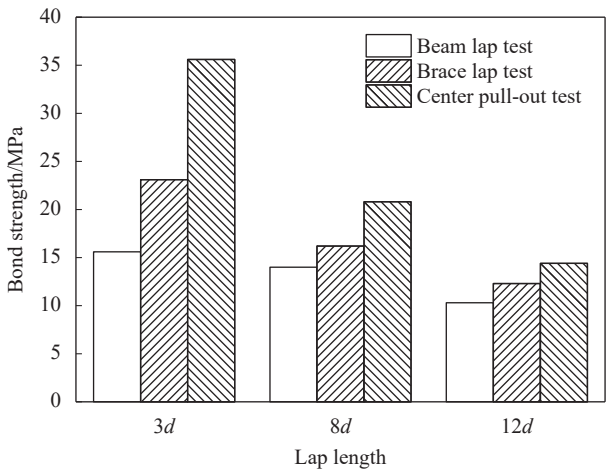


图 13 钢筋搭接长度对黏结强度的影响
Fig. 13 Influence of lap length on bond strength

3.2.2 钢纤维掺量 (B2、B5)

由图 14 可以看出，随着钢纤维掺量的增大，3 种试验方法下得到的黏结强度均随之增大，这是由于随着钢纤维掺量的增加，提高了 UHPC 的抗拉强度和抗裂性能，乱向分布的钢纤维可以抑制内部微裂纹的发展，缓冲裂缝端部的应力集中；但随着钢纤维掺量的增大，中心拉拔试验与其他种试验方法所得到的黏结强度差异较大，这是因为单根钢筋的拔出试验中，钢筋被 UHPC 充分包

裹，所以这种作用效应更能充分发挥，而搭接钢筋则由于钢筋间净距较小，提升并不明显。

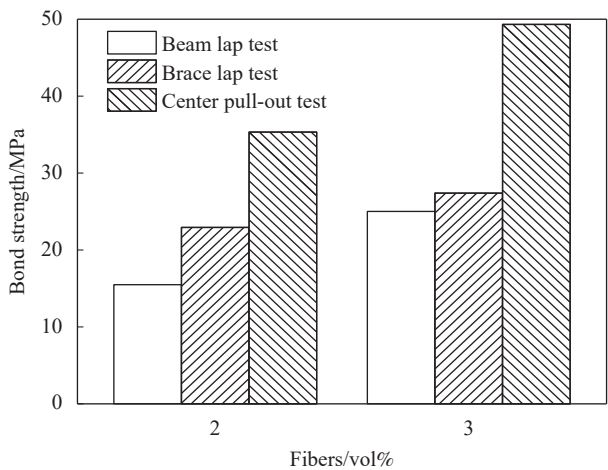


图 14 钢纤维掺量对黏结强度的影响

Fig. 14 Infuence of steel fiber content on bonding strength

3.2.3 机械锚固措施 (B2、B6、B7、B8、B9)

设置了机械锚固措施以后，钢筋与 UHPC 的黏结强度主要由两部分组成，即直锚段和锚头段两部分，因此在相同的搭接长度下，采取机械锚固措施处理后的的试件，钢筋与 UHPC 具有更高的黏结强度。由表 4 和图 15 可以看出，对拉搭接试验和梁式搭接试验具有相同的规律性，以梁式搭接试验为例，采用 90°弯钩处理后的试件 B6 黏结强度提升最为明显，提升了 199.4%，原因是采用弯钩处理后的试件，弯钩处的 UHPC 受到局部挤压作用，得益于 UHPC 较高的抗压强度，钢筋与 UHPC 的黏结强度显著提高。

采用锚固板、单面贴焊、两面贴焊处理后的试件 B7、B8 和 B9，黏结强度提高幅度均小于 90°弯钩处理后的试件，分别提高了 37.2%、115.4%。从对拉搭接试验中试件的破坏模式来看，在 3d 的搭接长度下，上述 3 个试件均发生劈裂破坏，劈裂裂缝的产生削弱了钢筋与 UHPC 的黏结强度，发生劈裂破坏的原因一方面是由于锚板和短筋的存在会减小混凝土保护层厚度，另一方面是由于钢筋搭接长度过小，锚板和短钢筋与周围 UHPC 的局部挤压作用在受力前期就十分明显，虽然试件 B6 也会出现局部挤压作用，但弯钩处锚固面积较大，并不会在前期就产生显著的应力集中现象，导致前期黏结刚度不足，而发生劈裂破坏。在梁式搭接试验中，B6 试件并未在搭接区段观察到劈裂裂缝，但 B7、B8 和 B9 试件均在搭接区段

观察到了少量的劈裂裂缝。

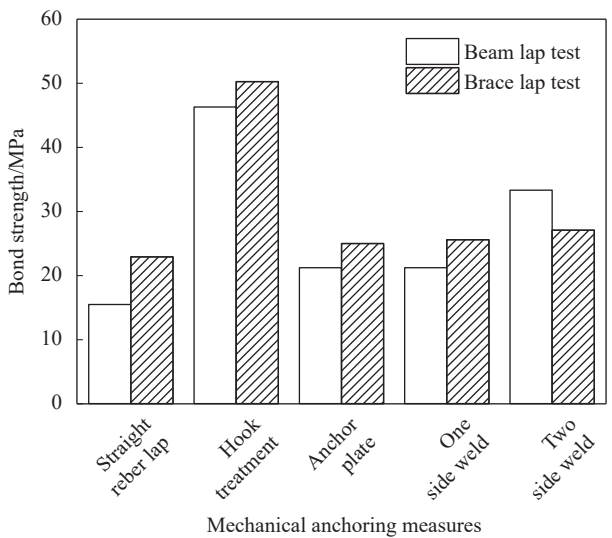


图 15 机械锚固措施对黏结强度的影响

Fig. 15 Influence of mechanical anchoring measures on bond strength

3.3 高强钢筋与 UHPC 临界搭接长度计算

结合式 (9) 和对拉搭接试验拟合得出的钢筋搭接黏结强度计算公式 (11)^[27]，并考虑弯矩对黏结强度的影响，可以得到梁式搭接试验中高强钢筋与 UHPC 的临界搭接长度计算公式 (13)，计算结果见表 5。

表 5 UHPC-高强钢筋搭接长度计算

Table 5 Lap length calculation of UHPC-high strength rebar

Lap length	$V_f/\text{vol}\%$	Mechanical anchoring measures			
	3	Straight rebar lap	Hook treatment	Anchor plate	One side weld
l_{sy}	9.8d	11.6d	6.7d	9.4d	8.6d
l_{su}	13.7d	16.0d	10.9d	13.6d	12.6d

Notes: l_{sy} —Minimum lap length of steel bar yield; l_{su} —Minimum lap length of steel bar rupture.

$$\tau_{ul} = \begin{cases} \left(0.39 + 1.69 \frac{d}{l_s}\right) \left(3.22 + 0.72 \frac{c}{d}\right) f_t \\ \phi \left(0.39 + 1.69 \frac{d}{l_s}\right) \left(3.22 + 0.72 \frac{c}{d}\right) f_t + \psi \frac{f_t d}{\pi l_s} \end{cases} \quad (11)$$

$$\tau_u = k \tau_{ul} \quad (12)$$

式中： τ_u 为梁式搭接试验的黏结强度； l_s 为钢筋搭接长度； τ_{ul} 为对拉搭接试验的黏结强度； c 为 UHPC 保护层厚度； $k = \tau_{u3}/\tau_{u2}$ ，取平均值 0.84； ϕ 为带端部锚固措施钢筋的黏结应力折减系数，带弯钩和锚固板的 ϕ 为 1.05、贴焊短筋的 ϕ 取为 1.10；锚固板系数 ψ 取 8，弯钩系数 ψ 取 23、贴焊短筋 ψ 取 9。

$$\frac{l_s}{d} = \begin{cases} \frac{f}{4kf_t(1.26+0.28c/d)} - 4.33 \\ \frac{f}{4kf_t\phi(1.26+0.28c/d)} - \frac{\psi}{\pi\phi(1.26+0.28c/d)} - 4.33 \end{cases} \quad (13)$$

式中： l_s/d 为相对搭接长度， f 取钢筋的屈服强度 f_y ，可以得到临界屈服搭接长度 l_{sy} ； f 取钢筋的极限强度 f_u ，可以得到临界极限搭接长度 l_{su} 。

由式(13)可得，本文采用HRB500级钢筋所计算出直筋的临界和极限搭接长度分别为 $11.6d$ 和 $16d$ ，详细计算结果见表5。

4 结论

通过9根梁式搭接试验，研究了钢筋搭接长度、钢纤维掺量、机械锚固措施对搭接梁中高强钢筋与超高性能混凝土(UHPC)黏结性能的影响，所得到的结论如下：

(1) 与搭接区后浇C80混凝土相比，高强钢筋与UHPC具有更优异的黏结性能，可以更好发挥出高强钢筋的性能，提升搭接梁的受力性能；

(2) 随着钢筋搭接长度的增加，搭接梁的峰值荷载逐渐提高，但搭接长度越长，钢筋与UHPC的黏结应力分布越不均匀，平均黏结强度逐渐降低；

(3) 钢纤维掺量从2vol%增加到3vol%，UHPC的增韧、阻裂效果增强，搭接梁的黏结强度以及峰值荷载相应提高；

(4) 采用机械锚固措施处理后的搭接梁具有更高的黏结强度和峰值荷载，其中采用90°弯钩处理的搭接梁，峰值荷载和黏结强度最高，最后破坏时钢筋屈服，因此在 $3d$ 的搭接长度下(d 为钢筋直径)，同时采用钢筋弯钩处理可以充分发挥高强钢筋的作用，以用于实际工程中；

(5) 根据搭接梁在峰值荷载下轴力与弯矩的平衡条件，计算出受拉钢筋的最大应力，进一步得出钢筋与UHPC的平均黏结强度，并与中心拉拔和对拉搭接试验结果进行对比，为梁式搭接试件中钢筋与UHPC的黏结强度计算提供准确的理论依据。

参考文献：

- [1] 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): 1-13.
SHAO Xudong, FAN Wei, HUANG Zhengyu. Application of ultra-high-performance concrete in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(1): 1-

13(in Chinese).

- [2] 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.
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(in Chinese).
- [3] LI J, WU Z, SHI C, et al. Durability of ultra-high performance concrete—A review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 255: 119296.
- [4] TSIOTSIAS K, PANTAZOPOULOU S J. Bond behavior of high-performance fiber reinforced concrete (HPFRC) under direct tension pullout[J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112701.
- [5] KOOK K H, SHIN H O, KWAHK I J, et al. Bond characteristics of ultra high performance concrete[J]. Journal of the Korea Concrete Institute, 2010, 22(6): 753-760.
- [6] DENG E F, ZHANG Z, ZHANG C X, et al. Experimental study on flexural behavior of UHPC wet joint in prefabricated multi-girder bridge[J]. Engineering Structures, 2023, 275: 115314.
- [7] LI L, JIANG Z. Flexural behavior and strut-and-tie model of joints with headed bar details connecting precast members[J]. Perspectives in Science, 2016, 7: 253-260.
- [8] JIANG H, HU Z, FENG J, et al. Flexural behavior of UHPC-filled longitudinal connections with non-contacting lap-spliced reinforcements for narrow joint width[J]. Structures, 2022, 39: 620-636.
- [9] DAGENAIS M A, MASSICOTTE B. Tension lap splices strengthened with ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(7): 04014206.
- [10] 冯军晓, 郑七振, 龙莉波, 等. 超高性能混凝土连接的预制梁受弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(8): 59-65.
FENG Junxiao, ZHENG Qizhen, LONG Libo, et al. Experimental studies of flexural behavior of precast ultra-high-performance concrete beam[J]. Industrial Construction, 2017, 47(8): 59-65(in Chinese).
- [11] 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.
- [12] BAE B I, CHOI H K, CHOI C S. Bond stress between conventional reinforcement and steel fibre reinforced reactive powder concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 112: 825-835.
- [13] HU A, LIANG X, SHI Q. Bond characteristics between high-strength bars and ultrahigh-performance concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(1):

04019323.

[14] 梁芮, 黄远. 高强钢筋与超高性能混凝土黏结性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 294-302.

LIANG Rui, HUANG Yuan. Experimental study on the bond performance between high strength steel rebar and ultra-high-performance concrete [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(9): 294-302(in Chinese).

[15] 邓宗才, 袁常兴. 高强钢筋与活性粉末混凝土黏结性能的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 69-78.

DENG Zongcai, YUAN Changxing. Experimental study on bond capability between high strength rebar and reactive powder concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 69-78(in Chinese).

[16] 韩方玉, 刘建忠, 刘加平, 等. 基于超高性能混凝土的钢筋锚固性能研究 [J]. 材料导报, 2019, 33(S1): 244-248.

HAN Fangyu, LIU Jianzhong, LIU Jiaping, et al. Study on anchorage behavior of steel bar in ultra-high-performance concrete [J]. Materials Reports, 2019, 33(S1): 244-248(in Chinese).

[17] 李艳艳, 赵银磊, 武凯, 等. 高强钢筋与超高性能混凝土粘结性能及可靠度分析 [J/OL]. 工程力学, 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230731.1427.026.html>.

LI Yanyan, ZHAO Yinlei, WU Kai, et al. Bond property and reliability analysis between high strength rebar and ultra-high-performance concrete [J/OL]. Engineering Mechanics, 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230731.1427.026.html>. (in Chinese).

[18] LAGIER F, MASSICOTTE B, CHARRON J P. Bond strength of tension lap splice specimens in UHPFRC [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 84-94.

[19] 方志, 陈潇, 张门哲, 等. 活性粉末混凝土中带肋钢筋搭接性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(3): 20-28, 49.

FANG Zhi, CHEN Xiao, ZHANG Menzhe, et al. Experimental study on performance of lap-spliced ribbed steel bars in reactive powder concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(3): 20-28, 49(in Chinese).

[20] 马福栋, 邓明科, 孙宏哲, 等. 变形钢筋/超高性能混凝土搭接黏结性能 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(11): 3912-3924.

MA Fudong, DENG Mingke, SUN Hongzhe, et al. Bond behavior of deformed steel bars lap-splice in ultra-high-performance concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(11): 3912-3924(in Chinese).

[21] AL-QURAIISHI H, AL-FARTTOOSI M, ABDULKHUDHUR R. Tension lap splice length of reinforcing bars embedded in reactive powder concrete (RPC) [J]. Structures, 2019, 19: 362-368.

[22] RONANKI V S, AALETI S, VALENTIM D B. Experimental investigation of bond behavior of mild steel reinforcement in UHPC [J]. Engineering Structures, 2018, 176: 707-718.

[23] HUNG C C, YUEN T Y, HUANG C W, et al. Tension lap splices in UHPC beams: Influence of rebar size, steel fibers, splice length, and coarse aggregate [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 55: 104716.

[24] 梁芮, 黄远. 超高性能混凝土与钢筋劈裂黏结强度试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2024, 45(6): 254-261.

LIANG Rui, HUANG Yuan. Experimental study on bond splitting strength of ultra-high-performance concrete with steel bars [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(6): 254-261(in Chinese).

[25] 邱明红, 邵旭东, 胡伟业, 等. 钢筋 UHPC 矩形截面受弯构件的钢筋应力简化计算 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 106-116.

QIU Minghong, SHAO Xudong, HU Weiye, et al. Simplified calculation of reinforcement stress in reinforced UHPC bending members with rectangular sections [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 106-116(in Chinese).

[26] 徐明雪, 梁兴文, 汪萍, 等. 超高性能混凝土梁正截面受弯承载力理论研究 [J]. 工程力学, 2019, 36(8): 70-78.

XU Mingxue, LIANG Xingwen, WANG Ping, et al. Theoretical investigation on normal section flexural capacity of UHPC beams [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(8): 70-78(in Chinese).

[27] 靳梦娜. 高强钢筋与超高性能混凝土黏结性能试验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.

JIN Mengna. Experimental study on bonding performance concrete between high strength steel bar and ultra-high-performance concrete [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022(in Chinese).