第 49 卷第 11 期
2021 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 11
November，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210198

超高性能混凝土湿接缝界面粘结性能

冯 峥，李传习，李海春，周佳乐，潘仁胜，刘高成

(长沙理工大学，桥梁与建筑绿色建造与维护湖南省重点实验室，桥梁工程安全控制教育部重点实验室，长沙 410004)

摘 要：研究了超高性能混凝土(UHPC)湿接缝界面破坏特性、拉伸强度以及拉伸强度比(接缝试件界面拉伸强度相对于整体试件的比值)等。结果表明：所有 UHPC 湿接缝试件的破坏模式均为脆性破坏；相比于未掺纤维湿接缝试件(界面拉伸强度 2.24 MPa)，掺纤维 UHPC 湿接缝试件具有更好的界面粘结性能(界面拉伸强度可达 6.64 MPa，拉伸强度比可达 68.6%)；当纤维体积掺量不大于 2.5%时，湿接缝试件的界面拉伸强度、拉伸强度比以及界面断裂韧性均随纤维体积掺量的增大而增大，最佳纤维体积掺量为 2.5%；长纤维对 UHPC 湿接缝界面拉伸强度、拉伸强度比以及界面断裂韧性的提升效果优于短纤维，异形纤维优于平直形纤维；配筋 UHPC 湿接缝试件延性特征显著优于未配筋试件，增加钢筋锚固长度、界面配筋率是提高 UHPC 湿接缝延性特征和界面拉伸强度的较有效方法；当钢筋锚固长度达到 6 倍钢筋直径时，湿接缝处界面拉伸强度大于整体浇筑 UHPC 拉伸强度。此外，构建了不同纤维参数下 UHPC 湿接缝界面拉伸应力–相对位移简化模型。

关键词：超高性能混凝土；湿接缝；界面粘结性能；钢纤维；钢筋；锚固长度
中图分类号：U443.32　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2393–12
网络出版时间：2021–10–12



Interfacial Bond Performance of Ultrahigh Performance Concrete Wet Joints

FENG Zheng, *LI Chuanxi*, *LI Haichun*, *ZHOU Jiale*, *PAN Rensheng*, *LIU Gaocheng*

(Key Laboratory of Green Construction and Maintenance of Bridges and Buildings of Hu'nan Province, Key Laboratory of Safety Control for Bridge Engineering of the Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The interfacial failure characteristic, tensile strength and tensile-strength ratio (the ratio of interfacial tensile strength of wet-joint specimen to that of monolithic specimen) of the ultrahigh performance concrete (UHPC) wet joints were investigated. The results indicate that all the UHPC wet-joint specimens exhibit the brittle failure. Compared to the specimens without steel fiber (the interfacial tensile strength is 2.24 MPa), UHPC wet-joint specimens with steel fiber show a better interfacial bond performance with the interfacial tensile strength of 6.64 MPa and the tensile-strength ratio of 68.6%. When the fiber volume fraction is no more than 2.5%, the interfacial tensile strength, tensile-strength ratio and interface fracture toughness of wet-joint specimens increase with increasing the fiber volume fraction, and the optimum fiber volume fraction is 2.5%. The long fibers have better performances than the short fibers in improving the interfacial tensile strength, tensile-strength ratio and interface fracture toughness of UHPC wet joints, and the profiled fibers perform better than the straight fibers. The ductility of the steel-rebar-reinforced wet-joint specimens is better than that of the unreinforced wet-joint specimens. Increasing the embedment length and interfacial reinforcement ratio is an efficient way to improve the ductility and interfacial tensile strength of UHPC wet joints. When the embedment length of the reinforcement is 6 times as the rebar diameter, the interfacial tensile strength of the wet joints is greater than that of monolithic UHPC. In addition, the simplified tensile stress–relative displacement models were proposed for the UHPC wet-joint interface at different fiber parameters.

Keywords: ultra-high performance concrete; wet joints; interfacial bond performance; steel fiber; reinforcement; embedment length

收稿日期：2021–03–27。　修订日期：2021–04–14。
基金项目：国家自然科学基金项目(51778069，52078059，51808055)。
第一作者：冯 峥(1992—)，男，博士研究生。
通信作者：李传习(1963—)，博士，教授。

Received date: 2021–03–27.　**Revised date:** 2021–04–14.
First author: FENG Zheng (1992–), male, Doctoral candidate.
E-mail: fzllufr@163.com
Correspondent author: LI Chuanxi (1963–), male, Ph. D., Professor.
E-mail: lichuanxi2@163.com

超高性能混凝土(UHPC)材料的抗拉强度与韧性受到纤维种类、掺量、分布、取向等影响[1–3]。UHPC 材料的抗拉强度远高于普通混凝土，且具有稳定的裂后拉伸强度，因此 UHPC 结构在设计中往往将抗拉强度作为可靠的力学性能予以考虑[4–6]。但受 UHPC 拌合、运输、养生能力的限制，大型 UHPC 结构均不可避免会存在连接接缝[7–9]，这使得结构在接缝处容易受拉开裂[8–9]。普通混凝土结构抗拉强度低，相应结构的承载能力极限状态和正常使用极限状态设计中往往忽略混凝土的抗拉强度[10–11]。UHPC 本身具有较好的抗拉能力，保证 UHPC 结构接缝断面抗拉承载性能的关键是接缝界面处钢纤维的连续性。湿接缝是工程中最常用的结构形式之一[7–9,12–13]。工程中，普通混凝土结构湿接缝界面处理方式主要以人工机械凿毛方式为主[14]，但是 UHPC 的强度高且早期强度增长迅速，这给人工处理界面带来较大的困难。为此，国内外一般采用高压水射流凿毛工艺进行 UHPC 界面凿毛[12,15–16]，这不但可以达到去除 UHPC 表面浮浆的效果，还能尽可能地保留接缝界面处分布的钢纤维以保证钢纤维在界面处能够连续。因此，纤维种类、掺量应是影响 UHPC 湿接缝抗拉性能的重要因素。

UHPC 因其优异的力学性能和耐久性能，被广泛应用于普通混凝土预制结构湿接缝的填充材料[17]。张永涛等[18]、张阳等[19]开展了 UHPC 作为普通混凝土(NC)结构湿接缝材料的弯、拉性能研究，结果表明 UHPC 能显著提升湿接缝的抗裂能力，普通凿毛处理的 UHPC-NC 接缝界面拉伸性能弱于原有普通混凝土。Hussein 等[20]的研究表明 UHPC-HSC 界面拉伸性能随界面粗糙度的增大而增大，通过界面处理可以使得破坏面发生在 HSC 基体母材处而非接缝部位。上述研究中普通混凝土界面无论从材料强度、界面粗糙度还是界面处钢纤维分布情况均与 UHPC 界面存在显著区别，因此其研究结果对高压水凿毛处理的新老 UHPC 界面拉伸性能的指导意义有限。陈德宝等[12]开展了 4 个钢-UHPC 组合桥面板湿接缝的界面拉伸试验，研究了人工凿毛、环氧树脂和高压水凿毛 3 种界面处理方式对湿接缝拉伸性能的影响，研究结果表明高压水凿毛处理的湿接缝具有开裂晚、裂缝发展慢的特点。邵旭东等[21]开展了 2 片钢-UHPC 组合桥面板结构湿接头的弯曲性能试验，研究表明加密钢筋配筋率越高，湿接头的抗裂性能越好，但试验中未考虑 UHPC 接缝界面自身的拉伸性能。已有研究未涉及钢纤维特性对 UHPC 湿接缝拉伸性能的影响，亟需开展不同纤维特征参数下 UHPC 湿接缝的抗拉性能研究。

在接缝处设置锚固钢筋是提升湿接缝抗拉性能的最重要手段[17,21]。Yuan 等[22]研究表明钢筋与 UHPC 的锚固能力主要来自于机械粘结力。UHPC 基体与钢筋的机械粘结力和钢筋埋深基本呈线性关系[23–25]。为保证钢筋能够屈服断裂而不是界面脱粘，钢筋在 UHPC 中的锚固长度宜在 4d (d 为钢筋直径)以上[26]。邵旭东等[27]的研究表明采用含有钢纤维的 UHPC 灌浆料能减小钢筋锚固长度至 5.5d。方志等[28]、马栋福等[29]、Choi 等[30]开展了 UHPC 中带肋钢筋搭接接头的拉拔试验研究，结果表明影响 UHPC 与钢筋锚固性能的主要因素有 UHPC 强度、钢纤维掺量、钢筋搭接长度等。综上所述，虽开展了部分 UHPC 与锚固钢筋间的拉拔试验研究，但侧重点均限于 UHPC 与钢筋界面间的粘结性能，未综合考虑新老 UHPC 界面间的粘结性能。忽略新老 UHPC 界面间的粘结强度可能造成构造上的不经济，因而亟需开展配筋 UHPC 湿接缝的粘结性能试验研究。

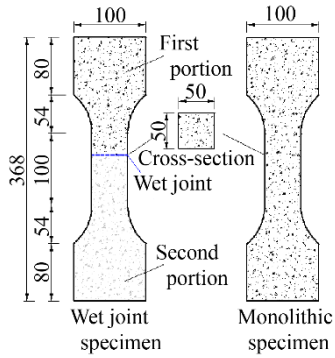
为此，本研究开展了 28 个整体浇筑 UHPC 试件、28 个分次浇筑 UHPC 湿接缝试件以及 10 个配筋 UHPC 湿接缝试件的直接拉伸试验，研究参数包括钢纤维形状、体积掺量、钢筋锚固长度以及界面配筋率等，旨在得到不同钢纤维特性以及配筋情况下 UHPC 湿接缝界面拉伸强度、破坏特征、粘结性能以及拉伸强度比等，为 UHPC 湿接缝结构的设计施工奠定一定的基础。

1 实验

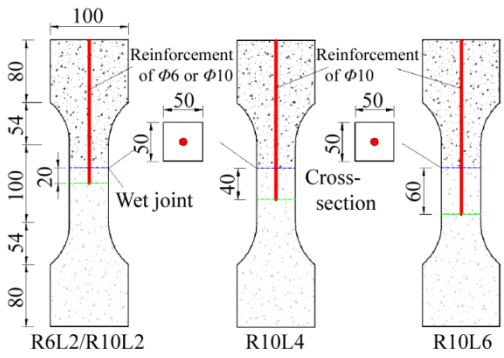
1.1 试件设计

UHPC 试件均采用 368 mm×50mm×50mm 的狗骨头形状[31]，如图 1 所示。试件变量参数包括浇筑方式、钢纤维掺量、纤维形状以及界面配筋情况等。

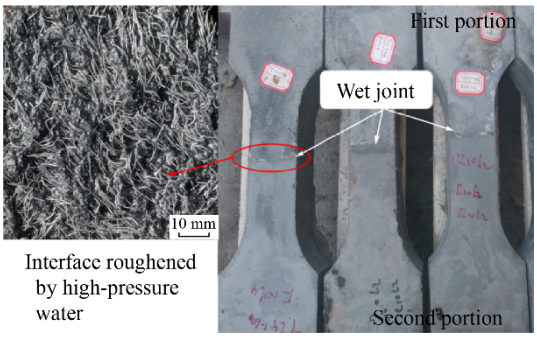
采用的 UHPC 混合料[32]依据最大密实度理论[33]及正交试验结果进行配置，各成分的质量比为 m (水泥):m(硅粉):m(矿粉):m(石英砂):m(减水剂)=1:0.37:0.25:1.1:0.04，胶凝材料化学成分见表 1。基于二次饱和 D-最优设计法的 MAA 模型[33–34]进行验证，采用的 UHPC 混合料具有较高的密实度。湿拌料均采用 0.18 的水胶比。为研究钢纤维形状、纤维长度对 UHPC 湿接缝界面(拉伸)粘结性能的影响，钢纤维选用工程中常用的长 13 mm 平直形钢纤维(13SSF)、长 13 mm 端勾形钢纤维(13HSF)和长 16 mm 端勾形钢纤维(16HSF)等 3 种，其特征参数如表 2 所示。



(a) Monolithic specimen and wet-joint specimen



(b) Steel-rebar-reinforced wet-joint specimen



(c) Photo of the wet-joint specimens

图 1　UHPC 试件设计示意图(单位：mm)

Fig. 1　Design diagram of the UHPC specimens (Unit: mm)

表 1　胶凝材料化学组分

Table 1　Chemical compositions of the utilized cementitious materials　　*w*/%

Material	SiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3	Al_2O_3	SO_3	MgO
Cement	19.30	59.860	3.070	0.890	0.320	5.670	6.040	3.060	2.070
Silica fume	95.20	0.180	0.120	0.090	0.110	0.150	0.120		0.250
Mineral powder	99.62	0.032	0.004	0.008	0.004	0.032	0.065		0.004

w is mass fraction.

表 2　钢纤维的力学性能

Table 2　Mechanical properties of the steel fibers

Sample	Length/mm	Diameter/mm	Length-diameter ratio	Tensile strength/MPa	Steel fiber type
16HSF	16	0.2	80	2 850	Hooked-end type
13HSF	13	0.2	65	2 850	Hooked-end type
13SSF	13	0.2	65	2 850	Straight type

浇筑方式分为整体浇筑和分次浇筑(先浇筑一半试件，达到一定强度并进行界面处理后再浇筑另一半)。整体浇筑 UHPC 试件(简称为“整体试件”)和分次浇筑 UHPC 湿接缝试件(简称为“湿接缝试件”)选用的钢纤维体积掺量分别为 0、1.5%、2.0%、2.5%和 3.0%；其中体积掺量为 2.5%的试件钢纤维种类有 3 种(16HSF、13SSF、13HSF)，1.5%、2.0%、3.0%的试件钢纤维种类只有 1 种 16HSF，详见表 3。每组试件均制作 4 个，7 种湿接缝试件共计 28 个(界面均为粗糙界面)。为得到适用于 UHPC 湿接缝的钢筋锚固长度，在 T25H16-WJ 参数的基础上(即以掺 2.5%长 16 mm 端勾型纤维的湿接缝试件为基础)开展 UHPC 配筋湿接缝试件(简称为“配筋湿接缝试件”)的直接拉伸试验。选用直径为 6 mm 和 10 mm

的 HRB400 带肋钢筋，钢筋锚固长度分别取 2 cm、4 cm 和 6 cm (锚固长度指钢筋穿过接缝界面伸出长度的较小值)，具体参数及钢筋布置情况见表 4 和图 1b。配筋湿接缝试件每组试件制作 2 个，共计 10 个。

整体试件浇筑、养护流程为：一次性浇筑完成后，采用标准养护[温度(20±2) ℃、相对湿度 95%]方式养护 48 h，脱模后再进行 90 ℃以上高温蒸汽养护 48 h。湿接缝试件和配筋湿接缝试件的浇筑养护流程为：先浇筑一半试件，标准养护 48 h，采用高压水射流对接缝界面进行凿毛处理，后进行 90 ℃以上高温蒸汽养护 48 h，养护完后浇筑另一半试件，之后采用同样的养护方式处理。由于 UHPC 骨料均为细骨料，试件在空间位置上的基体强度基本一致，因此在相同水压的均匀作用下基体表面的粗糙度也基本一致。因界面处不同的钢纤维特性(数量、形状、长度)，接缝试件的粘结强度有所区别。因此试验中以钢纤维露出程度达到纤维原长的 1/3~2/3 作为控制凿毛工艺的标准，即界面处露出大量钢纤维的界面称为粗糙界面[15]，仅去除了界面处表面浮浆而钢纤维基本未露出的界面称为光滑界面。

表 3 UHPC 整体试件和湿接缝试件参数

Table 3 Parameters of the UHPC monolithic specimens and wet-joint specimens

Specimen type	Sample	φ(Fiber)/%	Fiber type	Specimen type	Specimen number	φ(Fiber)/%	Fiber type
Monolithic specimen	T-NN-MP	0		Wet-joint specimen	T-NN-WJ	0	
	T15H16-MP	1.5	16HSF		T15H16-WJ	1.5	16HSF
	T20H16-MP	2.0	16HSF		T20H16-WJ	2.0	16HSF
	T25H16-MP	2.5	16HSF		T25H16-WJ	2.5	16HSF
	T30H16-MP	3.0	16HSF		T30H16-WJ	3.0	16HSF
	T25H13-MP	2.5	13HSF		T25H13-WJ	2.5	13HSF
	T25S13-MP	2.5	13SSF		T25S13-WJ	2.5	13SSF

T means tensile; NN represents the specimens without steel fiber; 15, 20, 25 and 30 all represents fiber volume fraction; H is hooked end fiber; S is straight fiber; 16 and 13 all represents fiber length; MP is monolithic specimen; WJ is wet-joint specimen. φ is volume fraction.

表 4 配筋湿接缝试件参数

Table 4 Parameters of the steel-rebar-reinforced wet-joint specimens

Sample	φ(Fiber)/%	Fiber type	Reinforcement diameter/mm	Reinforcement embedment length/cm	Reinforcement type	Interface roughness	Embedment length	Interface reinforcement ratio/%	Amount
T25H16-R6L2A	2.5	16HSF	6	2	HRB400	Rough	3.3*d*	1.1	2
T25H16-R10L2A	2.5	16HSF	10	2	HRB400	Rough	2.0*d*	3.1	2
T25H16--R10L2B	2.5	16HSF	10	2	HRB400	Smooth	2.0*d*	3.1	2
T25H16-R10L4A	2.5	16HSF	10	4	HRB400	Rough	4.0*d*	3.1	2
T25H16-R10L6A	2.5	16HSF	10	6	HRB400	Rough	6.0*d*	3.1	2

R6 and R10 refers to the diameter of steel reinforcement; L2, L4, and L6 refers to the anchorage length of steel reinforcement; A represents rough interface; B represents smooth interface; *d* is the diameter of steel reinforcement.

1.2 测点布置及加载方案

所有试件在接缝部位或标距中间部位沿拉伸方向粘贴 4 个长 5 cm 的应变片。为得到试件接缝部位的相对位移量和裂纹开展情况，在试件顶底面的接缝部位分别设置位移传感器(LVDT，测量精度 0.001 mm)进行位移测量，测试标距 l_b 严格控制在 60 mm。加载设备采用单轴拉伸试验机进行加载，加载方式严格按照规范[31]要求进行，加载速率为 0.1 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 未配筋试件

2.1.1 开裂破坏特征 从试验破坏过程看，湿接缝试件不论钢纤维掺量及形状如何，破坏时均为脆性破坏。其中，未掺纤维湿接缝试件一旦开裂即完全丧失承载力。掺纤维湿接缝试件开裂后应力仍能达到其峰值应力的 1/3~2/3，接缝处钢纤维起到了桥连作用。相比于湿接缝试件，整体试件的破坏面更

为粗糙，纤维拔出过程中带动的基体破损痕迹明显，钢纤维分布更密集(见图 2)。

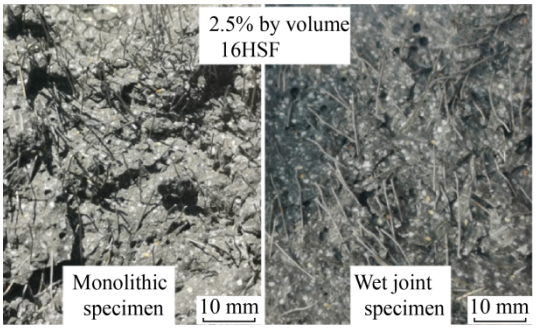


图 2　湿接缝试件和整体试件的破坏面对比

Fig. 2　Comparison of failure surface between the wet-joint specimen and monolithic specimen

湿接缝试件的破坏位置均位于接缝部位，UHPC 基体部位未见可视裂纹，验证了接缝位置是受力的最薄弱部位。图 3 为掺纤维和未掺纤维湿接缝试件的界面破坏情况。从图 3 可以看出，掺纤维试件破坏面更为粗糙，破坏部位新老 UHPC 相互交融在一起，块体剥落现象明显。而未掺纤维试件破坏面光滑平整，新老 UHPC 骨料间的结合效果较差。这表明钢纤维的加入极大提升了新老 UHPC 间的结合能力。

2.1.2　界面拉伸强度　　UHPC 整体界面和湿接缝界面的名义拉伸应力(强度)均根据式(1)进行计算：

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{1}$$

式中：σ 为横截面的名义拉伸应力，MPa；P 为试验拉伸荷载，kN；A 为试件测试区标准横截面面积，mm^2。

图 4 为各湿接缝试件和整体试件的名义拉伸峰值强度(简称为“拉伸强度”，下同)。如图 4a 所示，未掺纤维的湿接缝试件的界面拉伸强度达到 2.24 MPa。掺入钢纤维后，湿接缝试件的界面拉伸强度得到显著提升，最大达到 6.64 MPa。其他条件相同时，T25H16-WJ 界面拉伸强度为 T25H13-WJ 的 1.25 倍，T25H13-WJ 界面拉伸强度为 T25S13-WJ 的 1.23 倍。长纤维对 UHPC 湿接缝界面拉伸强度的提升效果优于短纤维，异形纤维优于平直形纤维。

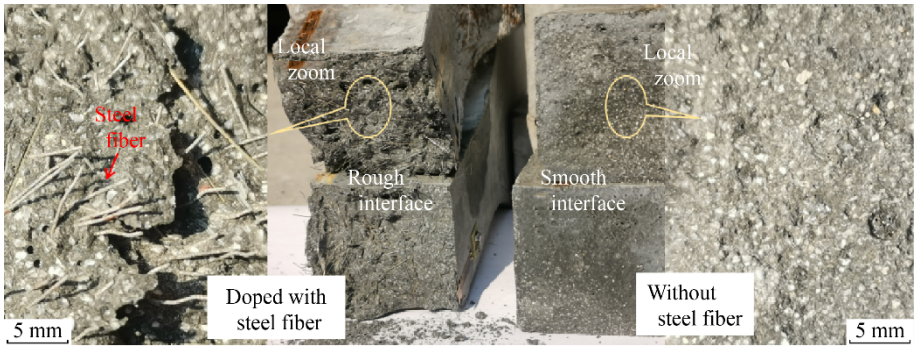
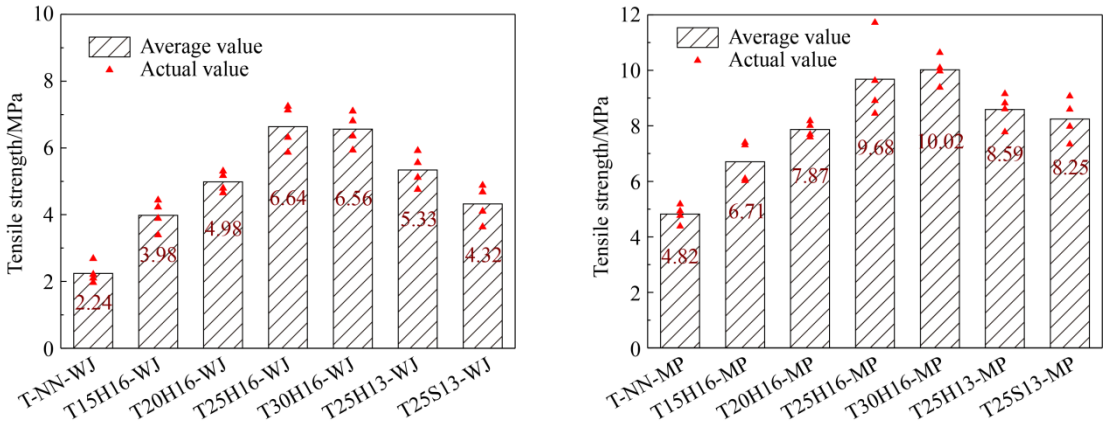


图 3　湿接缝试件破坏面对比情况

Fig. 3　Comparison of the failure surface of wet-joint specimens



(a) Wet-joint specimens　　(b) Monolithic specimens

图 4　UHPC 湿接缝试件和整体试件界面拉伸强度

Fig. 4　Interfacial tensile strength of the UHPC wet-joint specimens and monolithic specimens

图 5 为 UHPC 试件拉伸强度增量(与未掺纤维试件的差值)随纤维掺量的变化曲线。由图 5 可知，当纤维掺量不大于 2.5%时，湿接缝试件的界面拉伸强度随纤维掺量的增大而增大，纤维掺量每增加 0.5%，拉伸强度增量平均增加 1.44 MPa。当纤维掺量超过 2.5%后，拉伸强度增量无法进一步提高。这是由于增加 UHPC 纤维掺量虽然会使得界面处纤维有所增加，但也导致先浇段 UHPC 界面纤维间的间隙减小，这不利于新浇段 UHPC 的钢纤维及基体进入与之粘结。

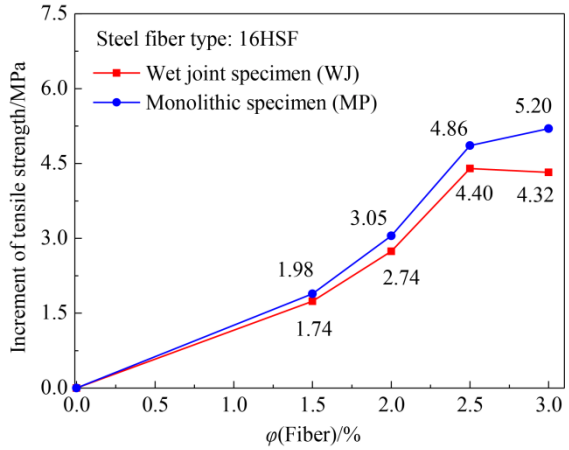


图 5 UHPC 拉伸强度增量随纤维掺量的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of the increment of the interfacial tensile strength with fiber contents

UHPC 整体试件的拉伸强度随纤维体积掺量的增加而增加(见图 4b)。同纤维体积掺量下，掺长纤维和异形纤维对 UHPC 界面拉伸性能的提升作用更为显著。由图 5 可知，纤维掺量不超过 2.5%时，整体试件拉伸强度增量随纤维掺量增加基本成线性增长，在纤维掺量超过 2.5%后，拉伸强度增量增长幅度有所下降。

2.1.3 拉伸强度比 图 6 为 UHPC 整体试件和湿接缝试件的界面拉伸强度及拉伸强度比 ξ。ξ 为同类型湿接缝试件的界面拉伸强度相对于整体试件的比值[见式(2)]。如图 6 所示，未掺纤维试件的拉伸强度比仅为 46.5%，而掺纤维湿接缝试件的拉伸强度比最大达到了 68.6%，表明当 UHPC 浇筑不连续时，基体的粘结强度大幅度降低，但高压水凿毛工艺由于保留了界面处的部分钢纤维，使得湿接缝界面拉伸强度得到了大部分保留。当纤维掺量不高于 2.5%时，拉伸强度比随着纤维掺量的增加而增加。掺入长纤维和异形纤维对拉伸强度比的提升作用更为显著，这与湿接缝试件的界面拉伸强度变化规律相似。

$$\xi = f_{\mathrm{ct,WJ}} / f_{\mathrm{ct,MP}} \tag{2}$$

式中：ξ 为拉伸强度比；$f_{\mathrm{ct,WJ}}$ 为 UHPC 湿接缝试件的界面拉伸强度，MPa；$f_{\mathrm{ct,MP}}$ 为同类型 UHPC 整体试件的拉伸强度，MPa。

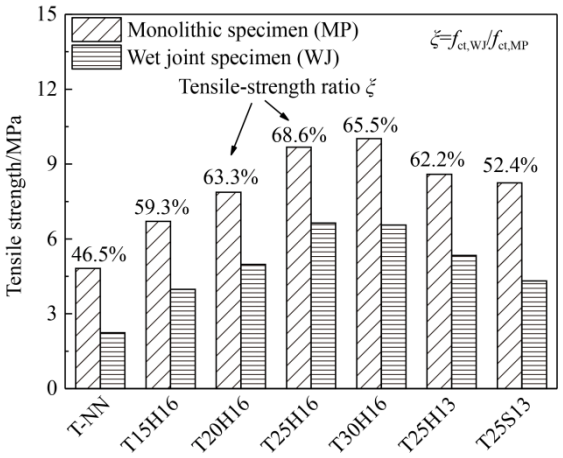


图 6 UHPC 试件的界面拉伸强度及拉伸强度比

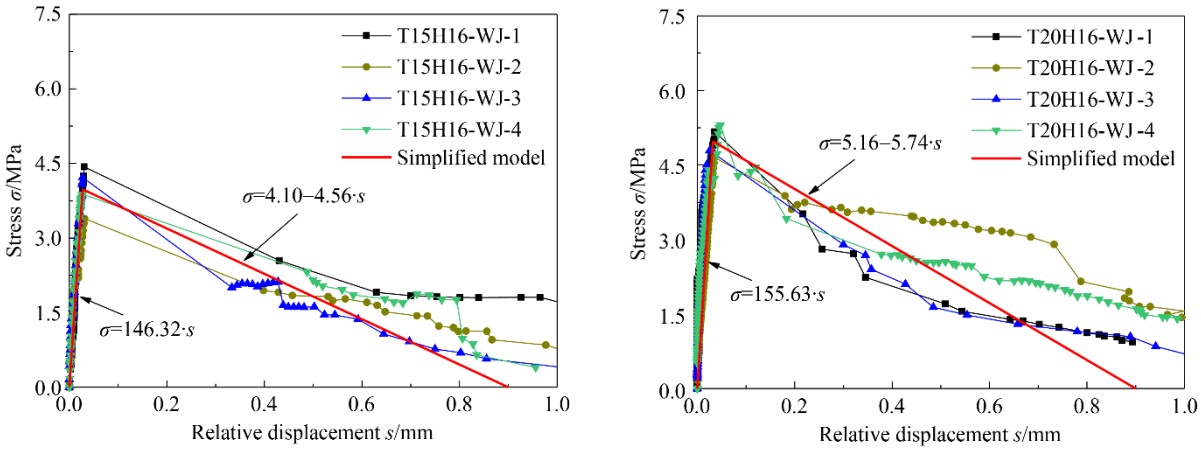
Fig. 6 Interfacial tensile strength and tensile-strength ratio of UHPC specimens

2.1.4 拉伸应力–相对位移曲线 不同纤维掺量下测量标距 60 mm 的 UHPC 湿接缝试件界面拉伸应力–相对位移曲线(扣除了非接缝部分的变形影响)如图 7 所示。由图 7 可知：试件在达到峰值应力之前，应力随相对位移量的增加基本线性增加(界面刚度基本保持不变)；当达到峰值应力后，相对位移量急速增大并在界面处形成主裂纹，应力随即下降；随着进一步的拉伸，界面拉伸应力逐渐降至 0。其原因为湿接缝界面拉伸强度由新老 UHPC 骨料间粘结强度和钢纤维拉拔强度两部分组成，当试件应力达到峰值应力后骨料间粘结强度迅速衰退，大部分荷载由钢纤维粘结强度提供，导致接缝处相对位移量急剧增大，进而丧失全部承载力。

对 UHPC 湿接缝界面应力–相对位移曲线的下降段进行简化，其应力发展历程基本满足上升-下降双线性变化模型。利用双线性拉伸应力–相对位移简化模型(即 $\sigma - s$ 曲线，见图 8)来表征 UHPC 湿接缝界面受力与粘结失效历程，见式(3)。

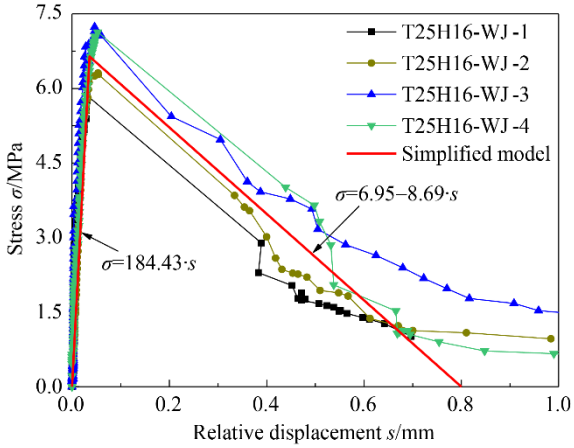
$$\begin{cases} \sigma = K \cdot s & 0 < s \leqslant s_1 \\ \sigma = A - B \cdot s & s_1 < s < s_{\max} \end{cases} \tag{3}$$

式中：σ 为界面拉伸应力，MPa；s 为界面相对位移量，mm；s_1 为界面拉伸应力达到峰值应力时的相对位移量，mm；$s_{\max}$ 为界面拉伸应力衰减至 0 时的极

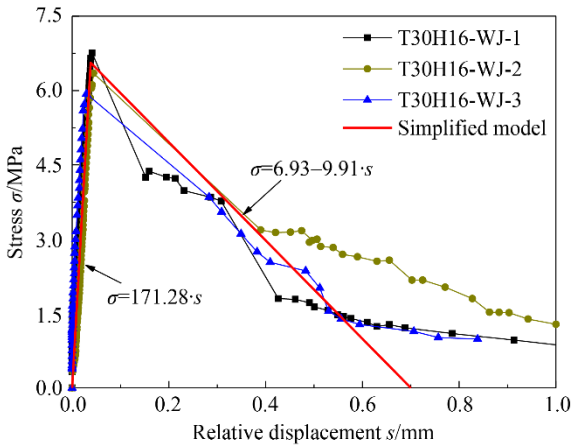


(a) T15H16-WJ

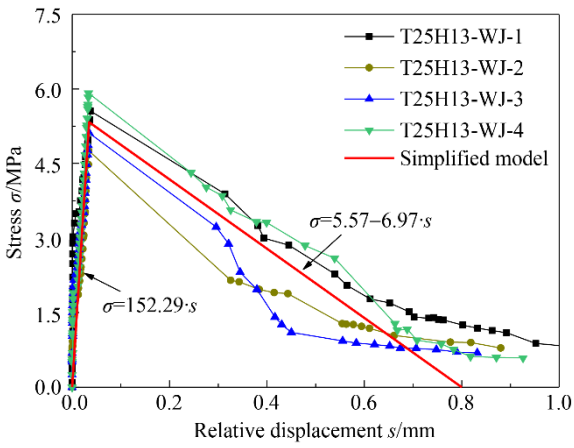
(b) T20H16-WJ



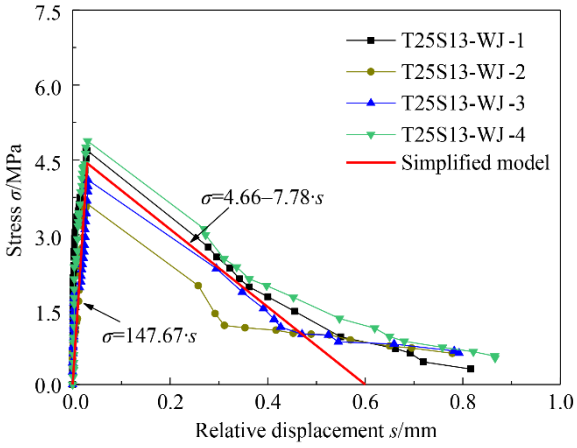
(c) T25H16-WJ



(d) T30H16-WJ



(e) T25H13-WJ



(f) T25S13-WJ

图 7　UHPC 湿接缝界面拉伸应力–相对位移曲线

Fig. 7　Interfacial tensile stress–relative displacement curves of UHPC wet joints

限位移量，mm；K 为上升段界面刚度[见式(4)]，MPa/mm；A、B 为下降段待定系数，根据试验结果获得。

$$K = \sigma_{\max} / s_1 \tag{4}$$

式中：$\sigma_{\max}$ 为界面最大拉伸应力(界面拉伸强度)，MPa。

表 5 给出了各 UHPC 湿接缝试件界面应力–相对位移简化模型参数。据此参数以及式(3)可得到各 UHPC 湿接缝试件界面拉伸应力–相对位移简化模型，见图 7。接缝界面断裂韧性指标 G_f 可由 σ–s 曲线与 s 轴包含的面积来表征，即式(5)，计算结果见表 5。总体而言，在纤维掺量未超过 2.5%时，UHPC 湿接缝

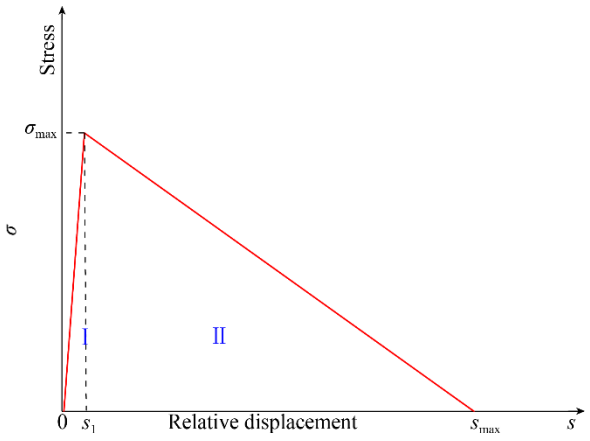


图 8 UHPC 湿接缝界面拉伸应力–相对位移简化模型

Fig. 8 Simplified tensile stress–relative displacement model for UHPC wet-joint interface

的界面断裂韧性随纤维掺量的增加而增强；在 T25H16-WJ 的参数下，G_f达到最大值；相同条件下，掺长纤维湿接缝试件的界面断裂韧性大于掺短纤维试件，掺端勾形纤维试件大于掺平直形纤维试件(见表 5)。

$$G_f = 0.5\sigma_{max}s_{max} \quad (5)$$

式中：G_f为界面界面断裂韧性指标，MPa·mm。

表 5 UHPC 湿接缝界面应力–相对位移简化模型参数

Table 5 Parameters of the simplified stress-relative displacement model for UHPC wet-joint interfaces

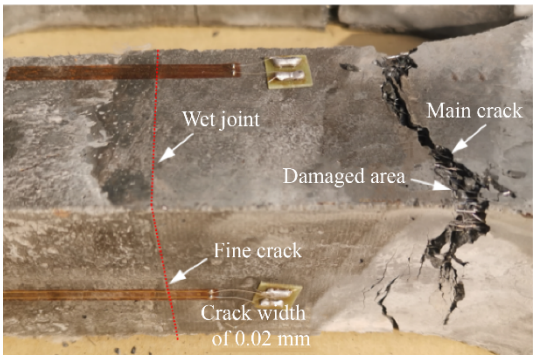
Sample	σ_{max}/MPa	s_{max}/mm	K/(MPa·mm^{-1})	G_f/(MPa·mm)
T15H16-WJ	3.98	0.9	146.32	1.79
T20H16-WJ	4.98	0.9	155.63	2.24
T25H16-WJ	6.64	0.8	184.43	2.66
T30H16-WJ	6.56	0.7	171.28	2.30
T25H13-WJ	5.33	0.8	152.29	2.13
T25S13-WJ	4.32	0.6	147.67	1.32

2.2 配筋试件

2.2.1 裂纹开展情况 配筋湿接缝试件的裂纹开展情况如图 9 和表 6 所示。从图 9 可以看出，配筋湿接缝试件表现出钢筋-UHPC 界面脱粘、界面脱粘+UHPC 基体断裂(UHPC 基体指未配筋段 UHPC)以及 UHPC 基体断裂 3 种破坏模式。R6L2A 试件(为便于表述，所有配筋试件编号均省略 T25H16 前缀，下同)和 R10L2A 试件的主裂纹及破坏部位均位于湿接缝位置，破坏时钢筋与 UHPC 完全脱粘。这表明当界面配筋率和钢筋锚固长度均较低时，钢筋-UHPC 界面粘结强度无法满足湿接缝的抗拉能力。R10L4A 试件钢筋锚固长度为 4d，其拉伸破坏面位于湿接缝界面和 UHPC 整体界面。R10L6A 试件钢筋锚固长度为 6d，破坏时主裂纹和破坏面均位于 UHPC 整体部分，湿接缝处仅有一条细小裂纹(见图 9b)。通过裂纹观测仪进行测量，细小裂纹裂纹宽度仅 0.02 mm，对结构耐久性的影响可以忽略[2]。因此，当钢筋锚固长度达到 6d 时，接缝界面拉伸强度大于 UHPC 基体强度。



(a) Failure mode as a whole



(b) Failure mode of T25H16-R10L6A

图 9 T25H16 试件破坏形态

Fig. 9 Failure mode of T25H16 specimens

2.2.2 界面拉伸强度分析 根据界面处的材料组成，配筋试件接缝界面拉伸强度主要由新老 UHPC 骨料粘结力、钢纤维拉拔力以及钢筋锚固力 3 部分组成。图 10 为配筋湿接缝试件的界面拉伸强度试验结果。由图 10 可知，R10L2A 的界面拉伸强度比 R10L2B 高出 1.93 MPa，进一步说明界面处钢纤维能够提升湿接缝处界面拉伸强度。当其他条件相同时，R6L2A 和 R10L2B 界面拉伸强度反而低于未配筋试件 T25H16-WJ。这是由于当钢筋锚固长度不足、界面配筋率较低时，UHPC 湿接缝界面抗拉性能与钢筋锚固抗拉性能未能同步发挥作用(新老 UHPC 骨料粘结力过早衰退)，钢筋与 UHPC 界面粘结强度有限，钢筋的加入反而削减了 UHPC 接缝界面处粘结面积。而锚固长度达到 4d 时，试件的界面拉伸

表 6　配筋试件拉伸试验结果

Table 6　Tensile test results of the reinforced specimens

Serial number	Sample	Anchorage length	Interface reinforcement ratio/%	Collaborative-stress stage		Debonding-degradation stage		s_3/s_1	Failure mode
				First peak stress f_{t1} /MPa	Relative displacement s_1 /mm	Second peak stress f_{t3} /MPa	Relative displacement s_3 /mm		
1	T25H16-R6L2A	3.3*d*	1.1	4.91	0.068	4.40	0.251	3.69	Interfacial debonding
2	T25H16-R6L2A	3.3*d*	1.1	5.85	0.070	5.27	0.260	3.71	Interfacial debonding
3	T25H16-R10L2A	2*d*	3.1	4.89	0.048	7.26	0.702	14.63	Interfacial debonding
4	T25H16-R10L2A	2*d*	3.1	4.56	0.051	7.57	0.616	12.08	Interfacial debonding
5	T25H16--R10L2B	2*d*	3.1	2.34	0.044	5.17	0.561	12.75	Interfacial debonding
6	T25H16--R10L2B	2*d*	3.1	2.80	0.041	5.79	0.522	12.73	Interfacial debonding
7	T25H16-R10L4A	4*d*	3.1	5.33	0.033	9.04	0.659	19.97	Interfacial debonding Matrix fracture
8	T25H16-R10L4A	4*d*	3.1	4.91	0.038	9.18	0.825	21.71	Interfacial debondin Matrix fracture
9	T25H16-R10L6A	6*d*	3.1	6.20	0.020				Matrix fracture
10	T25H16-R10L6A	6*d*	3.1	8.12	0.020				Matrix fracture

The maximum crack width at the wet-joint interface of T25H16-R10L6A specimen is 0.02 mm according to the crack observation instrument with an accuracy of 0.01 mm.

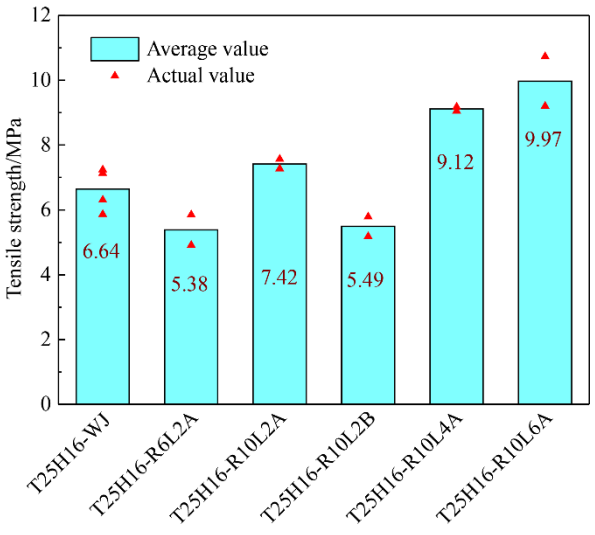


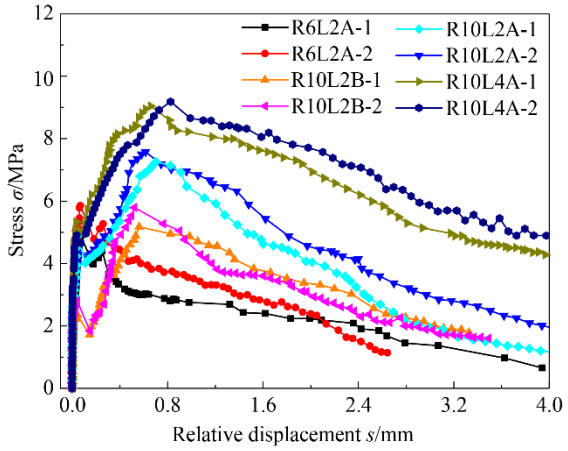
图 10　配筋湿接缝试件的界面拉伸强度

Fig. 10　Interfacial tensile strength of the steel-rebar-reinforced wet-joint specimens

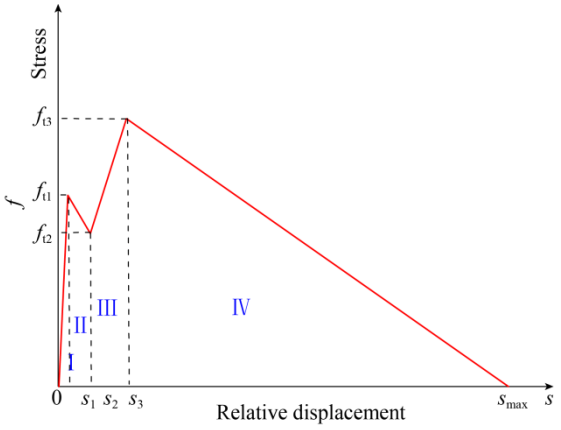
强度超过 9.12 MPa，为未配筋湿接缝 T25H16-WJ 的 1.37 倍。锚固长度达到 6*d* 时，试件的界面拉伸强度超过 9.97 MPa。综上所述，当钢筋的锚固长度得到保证时(≥4*d*)，钢筋能够与湿接缝界面协同受力。当锚固长度大于 6*d* 时，湿接缝界面拉伸强度大于 UHPC 基体强度。因此，工程中湿接缝处钢筋锚固长度不应小于 6*d*。

2.2.3　拉伸应力–相对位移曲线　　测量标距 60 mm 的各配筋湿接缝试件的拉伸应力–相对位移曲线如图 11 所示(R10L6A 的拉伸应力–相对位移曲线暂未列出)。结合图 7 可知，配筋试件的延性均得到显著增强，钢筋与 UHPC 界面的粘结性能较好。由图 11 可知，配筋湿接缝试件的应力阶段变化特征明显：(1) 加载前期，应力均随相对位移量的增加而线性增加(协同受力阶段)；(2) 当试件应力达到某一应力值(称为第 1 峰值应力)后继续加载应力急剧下降，伴随着相对位移量急速增加并形成主裂纹(界面退化阶段)；(3) 随后由于钢筋锚固作用，钢筋–UHPC 界面粘结能力随着相对位移量的增加而增加，直到达到第 2 峰值应力(锚固增强阶段)；(4) 继续拉伸，钢筋–UHPC 界面粘结强度随着相对位移量的增加而

减小，直至完全脱粘应力降至 0 (脱粘退化阶段)。配筋 UHPC 湿接缝界面简化的拉伸应力–相对位移曲线见图 11b。需要指出的是当钢筋锚固长度超过 4d 后，f_{t2} 与 f_{t1}、s_2 与 s_1 的值较为接近，即界面退化阶段和锚固增强阶段基本同步发生。



(a) Stress-relative displacement



(b) Typical tensile stress-relative displacement

图 11 配筋试件的拉伸应力–相对位移曲线

Fig. 11 Tensile stress–relative displacement curves of the steel-rebar-reinforced specimens

表 6 示出了配筋试件第 1 峰值应力 f_{t1} 及其相对位移量 s_1、第 2 峰值应力 f_{t3} 及其相对位移量 s_3。由表 6 可知，R6L2A 试件的 f_{t1} 大于 f_{t3}，而其他试件的 f_{t1} 小于 f_{t3}。这进一步验证了当钢筋锚固长度不足、界面配筋率较低时，设置锚固钢筋试件界面拉伸强度较未配筋试件低。参考 UHPC 梁受弯延性系数的定义方法(峰值荷载下试件挠度与初裂荷载下挠度的比值)，采用第 2 峰值应力下的相对位移量 s_3 与第 1 峰值应力下的相对位移量 s_1 的比值来体现配筋湿接缝试件的延性特征，比值结果见表 6。由表 6 可知，R10L2A、R10L4A 的 s_3/s_1 比值分别为 R6L2A 的 3.61 和 5.63 倍。比值随钢筋锚固长度、界面配筋率的增加而增加，即增加钢筋锚固长度、界面配筋率可以防止湿接缝发生脆性破坏。

3 结论

1) UHPC 湿接缝试件破坏位置均位于接缝部位，破坏时均为脆性破坏，与钢纤维特征参数无关。其应力–相对位移曲线呈现上升–下降两阶段线性变化特征。未掺纤维湿接缝试件破坏面光滑平整，而掺纤维湿接缝试件的破坏面粗糙，新老 UHPC 相互交融在一起。

2) 未掺纤维 UHPC 湿接缝试件的界面拉伸强度为 2.24 MPa，而掺纤维湿接缝试件的界面拉伸强度最大达到 6.64 MPa。当纤维体积掺量不大于 2.5%时，湿接缝试件的界面拉伸强度、拉伸强度比以及界面断裂韧性均随纤维掺量的增大而增大，反之，随纤维体积掺量的增大而减小，最佳纤维掺量为 2.5%。长纤维对湿接缝界面拉伸强度、拉伸强度比以及界面断裂韧性的提升效果优于短纤维，异形纤维优于平直形纤维。掺纤维试件的拉伸强度比均在 50%以上，最大达到了 68.6%。此外，还构建了不同纤维参数下的 UHPC 湿接缝界面拉伸应力–相对位移简化模型。

3) 与未配筋 UHPC 湿接缝试件相比，配筋湿接缝试件的延性得到显著增强。增加钢筋锚固长度、界面配筋率可以增强配筋 UHPC 湿接缝的延性特征和界面拉伸强度。当钢筋锚固长度达到 6d (d 为钢筋直径)时，湿接缝界面拉伸强度大于 UHPC 整体界面拉伸强度，工程中湿接缝的钢筋锚固长度不应小于 6d。

4) 配筋 UHPC 湿接缝试件的破坏模式表现为钢筋–UHPC 界面脱粘、界面脱粘+UHPC 基体断裂以及 UHPC 基体断裂 3 种。配筋 UHPC 湿接缝试件拉伸应力–相对位移曲线可划分为协同受力阶段、界面退化阶段、锚固增强阶段和脱粘退化阶段。当湿接缝界面钢筋锚固长度超过 4d 后，界面退化阶段和锚固增强阶段基本同步发生。

参考文献:

[1] 朱平, 池颜海, 易笃韬, 等. 混杂钢纤维对钢纤维-超高性能混凝土界面黏结性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(10): 1668–1681.
ZHU Ping, CHI Yanhai, YI Dutao, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(10): 1668–1681.

[2] 张哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015(8): 50–58.
ZHANG Zhe, SHAO Xudong, LI Wenguang, et al. China J Highway Transport (in Chinese), 2015(8): 50–58.

[3] ABRISHAMBAF A, PIMENTEL M, NUNES S. Influence of fibre orientation on the tensile behaviour of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites[J]. Cem Concr Res, 2017, 97: 28–40.

[4] Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Recommendations for Design and Construction of Ultrahigh Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft)[S]. JSCE Guideline for Concrete No. 9, Tokyo, Japan, 2006.

[5] NF P18-710 National addition to Eurocode 2 — Design of concrete structures: specific rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC)[S]. France: AFNOR, 2016.

[6] Swiss Society of Engineers and Architects (SIA). Ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) materials, design and execution[S]. Final draft, Zurich, Switzerland, 2016.

[7] 张策, 邵旭东, 张阳. 超大跨径 UHPC 连续箱梁桥接缝设计及模型试验[J]. 土木工程学报, 2015, 48(4): 52–58.
ZHANG Ce, SHAO Xudong, ZHANG Yang. China Civ Eng J (in Chinese), 2015, 48(4): 52–581.

[8] PAN W H, FAN J S, NIE J G, et al. Experimental study on tensile behavior of wet joints in a prefabricated composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin reactive-powder concrete layer[J]. J Bridge Eng, 2016, 21(10): 04016064–1–13.

[9] 邵旭东, 胡伟业, 邱明红, 等. 组合梁负弯矩区 UHPC 接缝抗弯性能试验研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 246–260.
SHAO Xudong, HU Weiye, QIU Minghong, et al. China J Highway Transport (in Chinese), 2021, 34(8): 246–260.

[10] AASHTO. AASHTO LRFD bridge design specifications[S]. 7th Ed. Washington, DC, 2015.

[11] JTG 3362–2018. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 中华人民共和国交通部, 北京, 2018.
JTG 3362–2018. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S] (in Chinese). Ministry of Transport of the People's Republic of China, Beijing, 2018.

[12] 陈德宝, 曾明根, 苏庆田, 等. 钢-UHPC 组合桥面板湿接缝界面处理方式[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 154–162.
CHEN Debao, ZENG Minggen, SU Qingtian, et al. China J Highway Transport(in Chinese), 2018, 31(12): 154–162.

[13] 王莉莉. 钢－混组合桥梁预制桥面板湿接缝构造及传力研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
WANG Lili. Research on the wet joints structure and force transfer of prefabricated deck in steel and concrete composite bridge (dissertation, in Chinese). Xi'an: Chang'an University, 2017.

[14] 韩菊红. 新老混凝土粘结断裂性能研究及工程应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
HAN Juhong. Study on fracture performance and engineering application of adherence of new and old concrete(dissertation, in Chinese). Dalian: Dalian University of Technology, 2002.

[15] 李传习, 冯峥, 潘仁胜, 等. UHPC 直剪性能试验与直剪承载力计算方法[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 78–90.
LI Chuanxi, FENG Zheng, PAN Rensheng, et al. China J Highway Transport, 2021, 34(8): 78–90.

[16] JANG H O, LEE H S, CHO K, et al. Experimental study on shear performance of plain construction joints integrated with ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. Constr Build Mater, 2017, 152: 16–23.

[17] GRAYBEAL B. Design and construction of field-cast UHPC connections[S]. No. FHWA-HRT-14-084, Federal Highway Administration, Washington, DC, 2014.

[18] 张永涛, 田飞. 预制桥面板 UHPC-U 形钢筋湿接缝受力性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 48–52.
ZHANG Yongtao, TIAN Fei. Bridge Constr (in Chinese), 2018, 48(5): 48–52.

[19] 张阳, 霍书亚. 装配式 NC 板 UHPC 湿接缝轴拉性能试验研究[J]. 公路工程, 2020, 45(4): 13–23.
ZHANG Yang, HUO Shuya.. Highway Eng (in Chinese), 2020, 45(4): 13–23.

[20] HUSSEIN H H, WALSH K K, SAEGAND S W, et al. Interfacial properties of ultrahigh performance concrete and high-strength concrete bridge connections[J]. J Mater Civ Eng, 2016, 28(5): 04015208.

[21] 邵旭东, 陈 斌, 周绪红. 钢-RPC 轻型组合桥面结构湿接头弯曲试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 210–217.
SHAO Xudong, CHEN Bin, ZHOU Xuhong. China J Highway Transp(in Chinese), 2017, 30(3): 210–217.

[22] YUAN J, BENJAMEN A. Bond behavior of reinforcing steel in ultra-high performance concrete[R]. 2014.

[23] BAE B II, CHOI H K, CHOI C S. Bond stress between conventional reinforcement and steel fibre reinforced reactive powder concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 112: 825–835.

[24] ALKAYSI M, EI-TAWIL S. Factors affecting bond development between ultra high performance concrete (UHPC) and steel bar reinforcement[J]. Constr Build Mater, 2017, 144: 412–422.

[25] SALEEM M A, MIRMIRAN A, XIA J, et al. Development length of high-strength steel rebar in ultrahigh performance concrete[J]. J Mater Civ Eng, 2013, 25(8): 991–998.

[26] 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(Z): 244–248.
HAN Fangyu, LIU Jianzhong, LIU Jiaping, et al. Mater Rep (in Chinese), 2019, 33(Z): 244–248.

[27] 邵旭东, 刘也萍, 邱明红, 等. 采用 UHPC 灌浆材料大口径全灌浆连接套筒接头的性能研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(2): 81–91.
SHAO Xudong, LIU Yeping, QIU Minghong, et al. China Civ Eng J (in Chinese), 2020, 53(2): 81–91.

[28] 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): 21–49.
FANG Zhi, CHEN Xiao, ZHANG Menzhe, et al. China Civ Eng J (in Chinese), 2019, 52(3): 21–49.

[29] 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): 3929–3941.
MA Fudong, DENG Mingke, SUN Hongzhe, et al. Acta Mater Compos Sin (in Chinese), 2021, 38(11): 3929–3941.

[30] CHOI W C, JANG S J, YUN H D. Bond and cracking behavior of lap-spliced reinforcing bars embedded in hybrid fiber reinforced strain-hardening cementitious composite (SHCC)[J]. Compos Part B, 2017, 108: 35–44.

[31] T/CBMF37–2018. 超高性能混凝土基本性能与试验方法[S]. 中国建筑材料协会标准, 2018.
T/CBMF37–2018. Fundamental characteristics and test methods of ultra-high performance concrete[S]. Standards of China Building Materials Association, 2018. (in Chinese)

[32] 聂洁, 李传习, 钱国平, 等. 钢纤维形状与掺量对 UHPC 施工及力学特性的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(4): 04042–04052.
NIE Jie, LI Chuanxi, QIAN Guoping, et al. Mater Rep (in Chinese), 2021, 35(4): 4042–4052.

[33] 余睿, 范定强, 水中和, 等. 基于颗粒最紧密堆积理论的超高性能混凝土配合比设计[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1145–1154.
YU Rui, FAN Dingqiang, SHUI Zhonghe, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1145–1154.

[34] WANG X P, YU R, SONG Q L, et al. Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density[J]. Cem Concr Res, 2019, 126: 105921.