

文章编号: 1000-4750(2017)09-0167-08

# 非蒸养 UHPC-钢板结构界面的 受拉和剪切性能试验研究

孙启力<sup>1</sup>, 路新瀛<sup>1,2</sup>, 聂鑫<sup>1</sup>, 韩治健<sup>1</sup>, 樊健生<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 超高性能混凝土(UHPC)在组合结构和钢结构加固领域具有很大的应用潜力, 其中 UHPC-钢板界面的力学行为对整体结构组合性能的发挥起到关键作用。该文通过一系列受拉试验和推出试验, 对五种常见的非蒸养 UHPC-钢板界面形式进行了研究, 包括光滑钢板界面、花纹钢板界面、撒入骨料的环氧胶粘剂界面、焊接弯起钢筋界面和栓钉连接界面。试验结果表明 UHPC 直接粘结强度较低且并不可靠; 花纹钢板界面和环氧胶粘剂界面的粘结强度较高, 但在受拉或无约束受剪时发生脆性破坏; 焊接弯起钢筋界面和栓钉连接界面具有明显的规律性和延性, 然而施加约束带来的承载力提升并不明显。该文重点研究了栓钉连接界面的力学性质, 发现经典理论和现有规范严重低估了 UHPC 锥形破坏的承载力, 提出更符合实际情况的变角度破坏面假设; 此外, 该文通过试验结果标定和验证了 UHPC 中栓钉连接件荷载-滑移关系的指数函数模型。

**关键词:** 非蒸养 UHPC; 界面行为; 受拉试验; 推出试验; 粘结强度

中图分类号: TU398<sup>+</sup>.9; TU528.31 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.05.0361

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON TENSILE AND SHEAR BEHAVIOUR OF THE INTERFACE BETWEEN NON-STEAM-CURED UHPC AND STEEL PLATE STRUCTURE

SUN Qi-li<sup>1</sup>, LU Xin-ying<sup>1,2</sup>, NIE Xin<sup>1</sup>, HAN Zhi-jian<sup>1</sup>, FAN Jian-sheng<sup>1,2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Ultra-High Performance Concrete (UHPC) has a great potential for the application in composite construction and steel structure strengthening. The interface between UHPC and steel plate is important to the composite behaviour of the entire structure. In this paper, five kinds of interface between non-steam-cured UHPC and steel plate were investigated through a series of pure-tensile and push-out tests. The interface treatments included smooth plate; embossed plate; epoxy based adhesive with sprinkled-in aggregates, pre-bent steel rebar welding; and headed stud connecting. The results shows that UHPC has low and unreliable adhesion to the steel plate; the embossed steel-plate interface and the epoxy based adhesive interface have higher adhesion strength but brittle failure under tensile or shear loads without constraint; the pre-bent steel rebar welding and headed stud connecting treatments demonstrate evident regularity and ductility after initial interface adhesive failure, but little increase on shear capacity is observed by imposing constraint. Furthermore, the behavior of stud connection

收稿日期: 2016-05-11; 修改日期: 2016-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478245)

通讯作者: 樊健生(1975—), 男, 山东人, 教授, 博士, 博导, 主要从事组合结构教学与研究工作(E-mail: fanjsh@tsinghua.edu.cn).

作者简介: 孙启力(1992—), 男, 辽宁人, 博士生, 主要从事组合结构研究工作(E-mail: sunqili987@sina.com);

路新瀛(1966—), 男, 山东人, 教授, 博士, 主要从事建筑材料教学与研究工作(E-mail: luxy@tsinghua.edu.cn);

聂鑫(1986—), 男, 湖南人, 博士后, 主要从事组合结构研究工作(E-mail: nienie12@gmail.com);

韩治健(1989—), 男, 广西人, 硕士生, 主要从事建筑材料研究工作(E-mail: hanzj14@163.com).

interface was specially discussed in this paper. It was found that classic theory and current codes of practice significantly underestimate the capacity of cone failure of UHPC, and an assumption of variable angle failure surface was suggested. In addition, an exponential function model for the load-slip relationship of headed studs in UHPC was calibrated and verified by the test results.

**Key words:** non-steam-cured UHPC; interface behaviour; pure-tensile test; push-out test; bond strength

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, 以下简称 UHPC)是一种高强度、高韧性和高耐久性的水泥基复合材料。UHPC 由级配良好的石英细砂、水泥、石英粉、硅灰、高效减水剂以及钢纤维等配制而成。其组分具有高细度和高活性,充分水化后内部的孔隙与微裂缝少,经过高温蒸汽养护可获得超高强度及优异的耐久性。掺入的钢纤维可以限制混凝土内部微裂缝的扩展,使 UHPC 表现出良好的塑性特征<sup>[1]</sup>。目前,对于 UHPC 制备方法、材料性能和工程案例的研究国内外已有很多报导<sup>[2-3]</sup>。

将 UHPC 与钢结构进行组合,可以获得受力性能优越的新型结构形式,界面的连接程度是影响这种组合作用的关键。普通混凝土与钢板直接粘结的抗剪强度很低<sup>[4]</sup>,在理想受力环境及钢板无锈的条件下约为 0.4 MPa,开裂后摩擦系数仅为 0.2 左右<sup>[5]</sup>,因此实际应用时一般忽略两者的粘结作用,依靠布置栓钉等连接件保证协同工作。考虑到 UHPC 具有更高的抗拉强度和延性,粘结性也优于普通混凝土,如能采用合理的界面构造来保证粘结性能的充分发挥,将大量减少连接件设计量和施工难度,进一步促进其在大跨桥梁和钢结构加固中的应用<sup>[6]</sup>。

Buitelaar 等<sup>[7]</sup>就 UHPC 应用于钢结构桥面铺装的问题进行了研究。试验表明,UHPC 与钢板间的连接构造对结构整体表现影响显著,如将钢筋网与钢板直接焊接会造成应力集中,相较而言,增加环氧树脂和粗糙层的界面处理方式更为有效。采用撒入花岗岩(或矾土)的环氧胶粘剂处理后,在纯拉条件下界面粘结强度为 3 MPa~5 MPa,在受弯作用下界面剪切粘结强度则可达 11 MPa~13 MPa。

高温蒸养是 UHPC 制备过程中的重要环节,可以提高强混凝土强度并减少后期收缩量<sup>[8]</sup>。然而在实际工程中,蒸汽养护显著增加了施工难度和成本。为了促进非蒸养 UHPC 的应用,本文采用一种具有早强性和微膨胀性的 UHPC 配合比,设计了五种非蒸养条件下的 UHPC-钢板界面形式的受拉和推出试验,主要探究界面承载力、受剪滑移量、裂

缝发展及破坏模式的规律,并综合延性、施工便捷性等因素,对不同界面处理方式进行了对比。最后,本文对栓钉连接界面进行了较为深入的研究,提出受拉试验中 UHPC 锥形破坏模式下变角度破坏面假设;通过试验标定和验证了栓钉连接件荷载-滑移关系的指数函数模型。本文成果可为非蒸养 UHPC 在组合结构及钢结构加固领域中的推广应用提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 界面形式

本文选取的五种 UHPC-钢板结构界面处理形式包括光滑钢板界面、花纹钢板界面、环氧胶粘剂界面、焊接弯起钢筋界面和栓钉连接界面。

除花纹钢板界面外,其他四种界面都在 16 mm 厚普通钢板的基础上进行处理。普通钢板预先打磨干净,使得表面无可见锈迹且粗糙度控制为  $6.3 \mu\text{m} < R_a < 12.5 \mu\text{m}$ (图 1),作为光滑钢板界面。

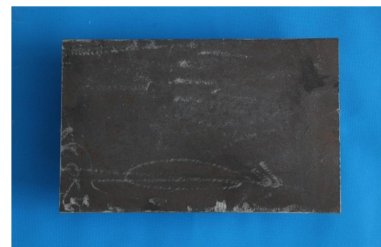


图 1 除锈后的钢板表面

Fig.1 De-rusted steel plate surface

花纹钢板界面所用钢材表面为扁豆形,钢板厚度 8 mm,表面凸起高度为 1.2 mm(图 2(a))。为防止板材屈曲,在光滑面焊接两条窄肋板以增加局部稳定性。

在撒入石灰石的环氧胶粘剂界面中,环氧胶采用 WSR618 环氧树脂和 TY651 低分子量聚酰胺树脂以 3:2 比例混合而成。处理时分两层涂抹,第一层厚度约为 0.5 mm,待其初步形成强度后涂抹第二层,层厚约为 1 mm,并撒布单粒径(5 mm~10 mm)石灰石(图 2(b))。

焊接弯起钢筋界面选用 8 mm 直径 HRB335 钢筋,弯起形状如图 2(c)所示。钢筋与钢板的焊接采

用 5 mm 双面角焊缝, 保证焊接可靠。栓钉连接件直径为 13 mm; 标准组栓钉长度为 35 mm; 有效锚固深度  $h_{ef}$  即栓杆长度为 27 mm。栓钉钢材极限强度由材性试验测得为 517 MPa。受拉试件正中焊接一枚栓钉, 推出试件两侧钢板各焊接两枚栓钉(图2(d))。

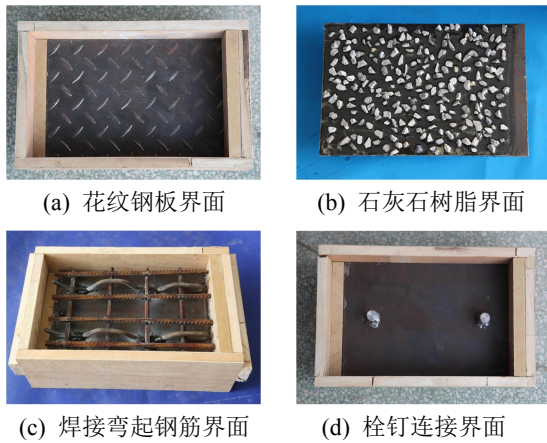


图 2 推出试件界面形式

Fig.2 Interface of push-out specimen

### 1.2 受拉试验

如图 3 所示, 受拉试件设计为 200 mm 直径的圆柱体以使界面受力均匀。被研究界面位于试件下部, 其钢板面与夹持钢结构焊为一体, 试件顶部通过预埋螺栓与特别设计的夹持装置连接。为除去预埋件对界面性能的影响, 预埋螺栓末端距离被研究界面至少为 4 cm。

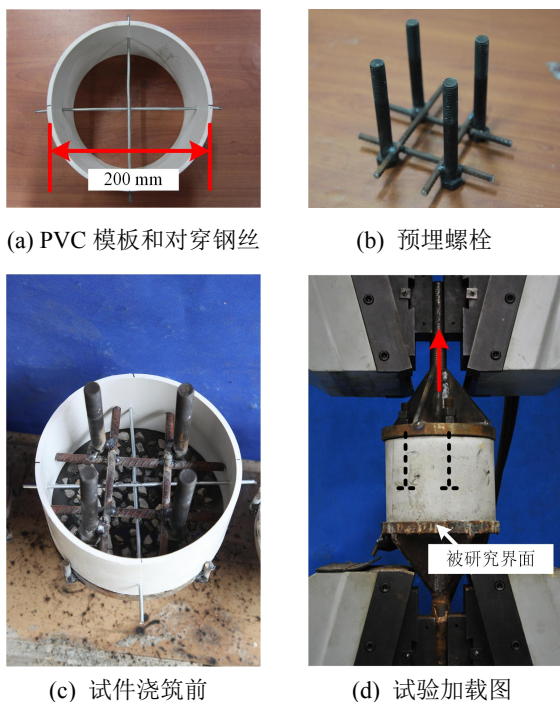


图 3 受拉试件准备及试验方法

Fig.3 Preparation and loading method of pure-tensile test

采用 PVC 管节段作为浇筑 UHPC 的模板, 其上对穿两条细钢丝(图 3(a))控制预埋螺栓在 UHPC 中的位置, 预埋螺栓通过井字形钢筋焊接为整体(图 3(b))。为了尽可能消除加工误差导致试件受弯的影响, 加载前先夹紧试件上下两端, 再拧紧预埋螺栓与顶部夹持钢结构连接的螺母, 控制四个螺栓受力相近以释放端部弯矩。受拉试验使用 1000 kN 拉伸试验机加载。

栓钉连接界面中设计三组试件初步探究钢纤维掺量( $v_f=1\%, 2\%$ )和栓钉高度( $h=35\text{ mm}, 60\text{ mm}$ )对栓钉连接界面受拉行为的影响, 标准组为 2%钢纤维掺量和 35 mm 短栓钉。受拉试验共计 7 组, 每组试验的试件编号、数量和参数变化整理于表 1(编号前缀 PT-受拉 Pure Tensile)。试验中通过架设在界面处的位移计测量裂缝的开展(图 4(a))。

表 1 受拉试件变化参数

Table 1 Variable of pure-tensile specimens				
序号	试件编号	界面形式	变化参数	数量
1	PTSP	光滑钢板 (Smooth Plate)	对照组	2
2	PTEP	花纹钢板 (Embossed Plate)	处理方式	3
3	PTEA	环氧胶粘剂 (Epoxy with Aggregate)	处理方式	3
4	PTPR	焊接弯起钢筋 (Pre-bent Rebar)	处理方式	3
5	PTHS	栓钉连接	栓钉标准组	3
6	PTHS1	(Headed Stud)	钢纤维掺量(1%)	3
7	PTHSL		栓钉长度(60 mm)	3

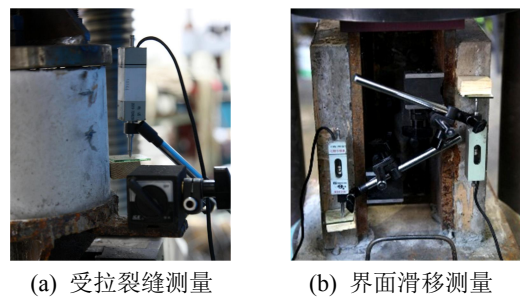


图 4 试验中位移计设置图

Fig.4 Setup of displacement meters in test

### 1.3 推出试验

工程中钢桥面铺装所用的 UHPC 板较薄且无粗骨料, 参考 Eurocode 4<sup>[9]</sup>中推出试验设计建议和 Papastergiou<sup>[10]</sup>研究所采用的试件尺寸, 确定如图 5(a)所示的推出试件, 其中 UHPC 板厚度为 50 mm。特别地, 将传统试件的钢结构一分为二, 同时浇筑两侧 UHPC 板以保证龄期和性能一致。经过一周的标准养护后, 通过缀板和螺栓将两部分连

为整体。试验时于 UHPC-钢板界面设置两个位移计(图 4(b)), 将其平均值作为界面滑移量, 试验过程中两位移计示数几乎相同, 表明试件具有良好的整体性。

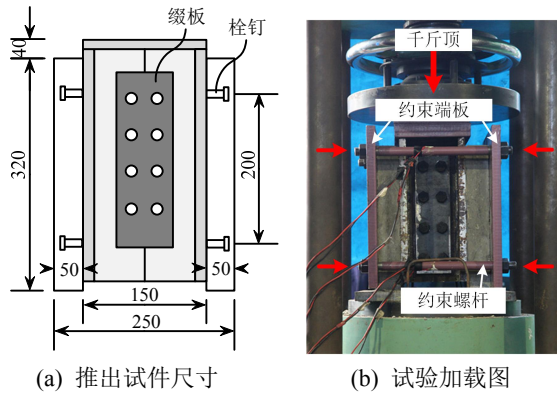


图 5 推出试件及试验方法

Fig.5 Push-out specimen and the test method

为考察法向约束对界面受剪性能的影响, 制作两块 20 mm 厚钢板和四根直径 20 mm 螺杆限制加载过程中混凝土板和钢结构的分离(图 5(b))。在每根约束螺杆上对称布置两组应变片, 将其测量结果平均值用于界面正应力的计算。特别地, 为使测量结果更接近界面压力, 加载前将约束钢板抬高底座后初始化应变仪, 再将螺杆两端的螺栓拧紧。推出试验采用 2000 kN 压缩试验机加载, 各组试验的试件编号、数量和参数变化情况整理于表 2(编号前缀 PO-推出 Push Out, 后缀-C 施加约束 Constraint)。

表 2 推出试件变化参数

Table 2 Variable of push-out specimens

推出试验	试件编号	界面形式	变化参数	数量
1	POSP	光滑钢板	对照组	2
2	POSPC	(Smooth Plate)		
3	POEP	花纹钢板	处理方式	3
4	POEPC	(Embossed Plate)		
5	POEA	环氧胶粘剂	处理方式	2
6	POEAC	(Epoxy with Aggregate)		
7	POPR	焊接弯起钢筋	处理方式	1
8	POPRC	(Pre-bent Rebar)		
9	POHS	栓钉连接	处理方式	3
10	POHSC	(Headed Stud)		

#### 1.4 材性试验

试验采用的 UHPC 配比具有早强性和微膨胀性, 可免去蒸养环节。掺入的钢纤维为鞍山昌宏生产的 RPC 专用钢纤维, 直径约 0.2 mm, 长度 12 mm~14 mm, 抗拉强度 2850 MPa, 体积掺量为 2%。该 UHPC 的水胶比约为 0.18, 各组分质量见表 3。

表 3 UHPC 配合比

Table 3 Mix proportion of UHPC

组分	数量
水泥/(kg/m <sup>3</sup> )	1022
矿物掺合料/(kg/m <sup>3</sup> )	147
石英砂/(kg/m <sup>3</sup> )	886
沉降剂/(kg/m <sup>3</sup> )	73.8
高性能减水剂/(kg/m <sup>3</sup> )	5.7
添加剂(减缩剂、消泡剂等)/(kg/m <sup>3</sup> )	13
水/(kg/m <sup>3</sup> )	215
钢纤维/(kg/m <sup>3</sup> )	156

材性试验测得钢板、钢筋和非蒸养 UHPC 的主要力学性质整理于表 4。混凝土受压材性件为 100 mm 立方体, 因为免去高温蒸养环节, 其受压强度  $f_{cu}$  略低于一般 UHPC, 但一周左右即达到稳定且并无收缩开裂问题, 材性试验中测得其弹性模量  $E_c=4.03 \times 10^4$  MPa。

表 4 材料性质表

Table 4 Material properties

	主要位置	厚度/mm	$f_y$ /MPa		$f_u$ /MPa	
			$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa	$f_u$ /MPa	$E_c$ /GPa
钢板	普通钢板	10	383.3	514.4		
		16	441.1	604.6		
		20	321.3	558.3		
钢筋	主要位置	花纹钢板	8	285.7	509.0	
		弯起钢筋	直径/mm	$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa	
			8	381.9	531.2	
UHPC	钢纤维	$f_{cu}$ /MPa	$f_t$ /MPa	$E_c$ /GPa		
		$v_f=1\%$	106.9	2.5	—	
		$v_f=2\%$	116.4	4.9	40.3	

## 2 试验现象和结果

### 2.1 受拉试验

光滑钢板界面平均界面粘结应力为 0.46 MPa, 在试验加载初期, UHPC 和钢板之间无明显现象。达到极限承载力后, 试件在界面处裂开, 瞬间丧失承载力, 呈现出脆性破坏, 破坏后钢板界面如图 6(a) 所示。

类似地, 花纹钢板界面的试验现象也属脆性破坏, 破坏面上有少量 UHPC 残留(图 6(b)), 且粘连量与试件极限承载力正相关, 平均粘结应力为 1.65 MPa, 是光滑钢板界面粘结力的 3 倍, 然而试验结果变异系数较高。

撒入石灰石的环氧胶粘剂界面也表现出脆性特征, 破坏现象为树脂层裂开, 部分石灰石被拉断, 如图 6(c)所示, 平均界面粘结应力 2.03 MPa,

为无连接件界面形式中强度最高的，且离散性很小。

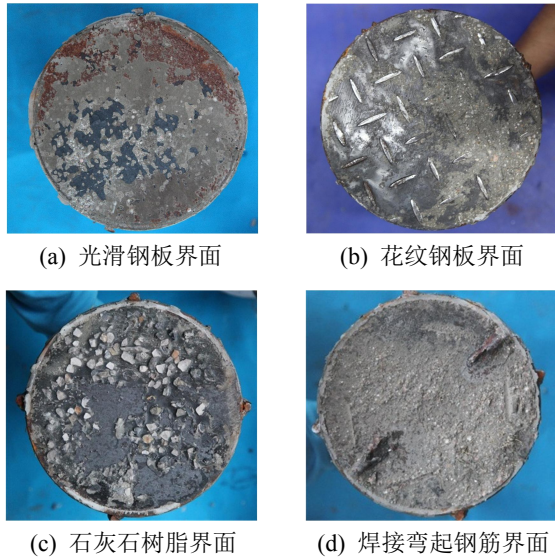


图 6 受拉试件破坏界面

Fig.6 Failure modes of pure-tensile specimens

焊接弯起钢筋试件在初始粘结破坏后显示出良好的延性，典型破坏模式的荷载-裂缝宽度曲线( $P-u$  曲线)如图 7 所示，随着荷载的增加，达到极限承载力后界面粘结失效，弯筋承受拉剪复合作用，弯起处的焊缝被撕裂，试件进入第一屈服平台，此时承载力约为 30 kN。随后一侧焊缝处的钢筋被剪断，承载力降为一半并进入第二屈服段(PTPR-1)，破坏后的界面如图 6(d)所示。试验中也观察到钢筋弯起处拉断(PTPR-3)的破坏模式，按照钢筋抗剪极限强度计算得到的承载力可作为工程设计值，偏于保守。

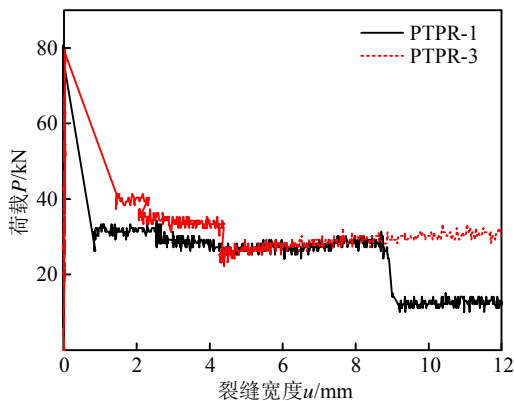


图 7 焊接弯起钢筋界面典型  $P-u$  曲线

Fig.7 Typical  $P-u$  curve of the pre-bent rebar welding interface

在栓钉连接界面的试验过程中，观察到两种破坏模式(图 8)。在钢纤维体积掺量为 1% 时，随着荷

载增加，裂缝宽度逐渐增大，至 0.5 mm 左右达到极限承载力。该模式具有较好的延性，极限承载力平均值为 55.51 kN，破坏形态为典型的混凝土锥形破坏。钢纤维体积掺量为 2% 的试件破坏较为突然，在达到极限承载力前裂缝不开展，随后瞬间丧失粘结力，栓钉开始发挥作用，曲线进入延性下降段，这种模式下极限承载力平均值达到 85.10 kN。两种破坏的曲线具有很强的规律性，且在下降段重合度很高(图 9)。破坏模式 II 中钢板残留较多 UHPC，说明存在贯穿 UHPC 内部的横向裂面。类似地，在长栓钉试验 PTHSL 中也观察到两种破坏曲线，最后钉杆截面进入屈服，发生颈缩断裂。7 组受拉试验结果整理于表 5。

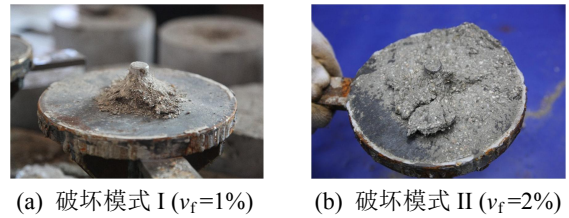


图 8 栓钉连接界面两种典型破坏现象

Fig.8 Two failure modes in the stud connecting interface

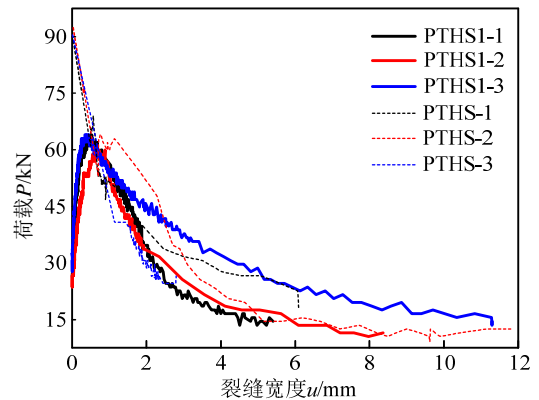


图 9 栓钉连接界面典型  $P-u$  曲线

Fig.9  $P-u$  Curves of the two failure modes of the stud interface

表 5 受拉试验结果

Table 5 Pure-tensile test results

界面形式	极限承载力/kN	平均粘结应力/MPa	变异系数/(%)
光滑钢板界面	14.50	0.46	1.5
花纹钢板界面	51.79	1.65	35.1
环氧树脂粘剂界面	63.79	2.03	4.0
焊接弯起钢筋界面	75.00	2.39	12.1
栓钉连接界面	$v_f=1%$ $h=35$ mm	55.51	1.77
	$v_f=2%$ $h=35$ mm	85.10	2.71
	$v_f=2%$ $h=60$ mm	68.62*	2.18*

注：含有连接件的界面平均粘结应力为等效值；\*表示钉杆截面发生颈缩时的承载力。

## 2.1 推出试验

每组试验都设计了施加钢板约束和不约束两种情况,作为对照组的光滑钢板界面粘结应力为 0.51 MPa,施加约束使其增大至 0.58 MPa,残余承载力稳定时约束正应力为 0.15 MPa。试验为脆性破坏,达到极限承载力后界面粘结瞬间失效,两侧 UHPC 板依次脱落。

类似地,花纹钢板试件和树脂胶粘剂界面的破坏也呈现脆性(图 10(a)和图 10(b)),但承载力和滑移能力都比光滑钢板界面大。花纹钢板无约束时界面粘结应力为 0.90 MPa,是光滑界面的 2 倍,施加约束后承载力可提升 60.3%;树脂界面无约束时界面粘结应力为 1.71 MPa,施加约束可提升 21.2%。树脂胶粘剂界面的破坏现象为树脂层发生剪切破坏,石灰石均完整地埋入 UHPC 板中,未发挥出预期的抗剪作用。

焊接弯起钢筋界面的破坏具有延性,但弯起钢筋被整体包裹在混凝土板中,最终焊缝发生破坏,如图 10(c)所示,弯筋连接件的延性也未得到充分利用。

栓钉连接界面具有很好的延性,在发生较大滑移时也可以保持很高的承载力,最后钉杆受到拉剪复合作用断裂(图 10(d))。施加约束后栓钉根部应力最大,破坏时焊脚被平齐剪断,平均承载力较无约束时略有降低。UHPC 板除栓钉根部位置发生少量局部压溃外,整体性良好,无开裂现象。推出试验结果见表 6。

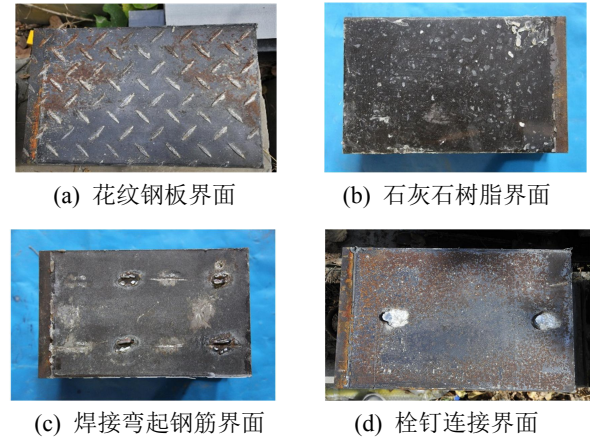


图 10 推出试件破坏界面

Fig.10 Failure modes of push-out specimens

表 6 推出试验结果  
Table 6 Push-out test results

界面形式	极限承载力/ kN	平均粘结强度/ MPa	变异系数/ %	极限承载力*/ kN	平均粘结强度*/ MPa	变异系数*/ (%)	约束效应/ (%)	约束力/ MPa
光滑钢板界面	61.35	0.51	30.8	69.30	0.58	—	13.0	0.15
花纹钢板界面	108.26	0.90	22.7	173.54	1.45	16.7	60.3	0.80
环氧胶粘剂界面	205.34	1.71	15.1	249.03	2.08	7.7	21.2	0.17
焊接弯起钢筋界面	311.11	2.59	—	320.94	2.67	—	3.2	0.80
短栓钉连接界面	377.32	3.14	5.5	357.46	2.98	21.4	-5.3	0.90

注:含有连接件的界面平均粘结强度为等效值; \*表示存在约束时的试验结果。

## 3 讨论

### 3.1 延性连接件影响

根据受拉试验的结果(表 5),当存在连接件(焊接弯起钢筋或栓钉连接件)时,界面极限承载力明显提高。例如,长栓钉栓杆颈缩时承载力为 68.62 kN,光滑钢板界面粘结力为 14.50 kN,但在钢纤维掺量为 2%的短栓钉试验中,极限承载力达到 85.10 kN。分析其中原因,一方面,粘结力存在较大离散性,受到混凝土龄期和受力模式影响。在受拉试验中,由于对中误差的存在,试件处于拉弯受力状态,无埋入连接件界面(光滑钢板界面、花纹钢板界面和环氧胶粘剂界面)在其偏心受拉的一侧边缘处首先开裂,粘结瞬间破坏,无法充分发挥界面整体性能。对于这种界面,延性连接件的存在可使其受力重分

布。另一方面,埋入 UHPC 的连接件起到了锚固作用,约束住部分混凝土与粘结面共同受力,而钢纤维的加入增大了约束范围和延性。所以实际工程中采用粘接界面时,布置一定的延性连接件可以极大提高表现。

### 3.2 约束效应

由表 6 中约束效应可以得出,无埋入连接件界面施加约束后极限粘结强度提升较大,达到 13%以上,而提升的幅度主要取决于破坏后界面的表面粗糙度。花纹钢板界面由于表面有扁豆形突起,施加约束后界面承载力提升最为显著。对于焊接弯起钢筋和短栓钉连接件界面,施加约束使得连接件只发生纵向变形,而 UHPC 的高韧度和高强度保证了埋入连接件与混凝土的协调变形,于是最危险点由无约束时承受拉剪复合作用的栓杆或钢筋弯起位置

转移到焊脚或焊缝。由于焊接部分有效截面减小以及热影响区存在初始应力的缘故,试件宏观承载力提高不多,甚至有所下降。

另外从表 6 的约束力数值可见,在推出试验过程中当钢板上存在连接件或花纹凸起时,钢板与 UHPC 间存在较大的横向分离。而树脂界面断裂位置为树脂层,所以破坏后表现与光滑钢板相似。

### 3.3 栓钉锚固模型

经典的栓钉连接件在混凝土中的锚固承载力计算方法是由 Fuchs 等学者提出的 CCD 法<sup>[11]</sup>,该方法回归了大量混凝土锥体破坏试验,具有较高准确性,也是美国规范 ACI318<sup>[12]</sup>的理论模型:

$$T_0 = 16.7 \times \sqrt{f'_c} \times h_{ef}^{1.5} = \frac{5.56}{\sqrt{h_{ef}}} \times \frac{\sqrt{f'_c}}{3} \times 9h_{ef}^2 \quad (1)$$

其中,等式右端的第一项为考虑混凝土尺寸效应的系数,第二项为平均混凝土受拉强度,第三项为混凝土破坏锥体的投影面积。

然而将式(1)应用于计算 UHPC 中栓钉抗拔承载力时却出现明显的低估,其他经典理论<sup>[13]</sup>和国内外规范<sup>[12,14-15]</sup>也存在类似的保守,造成 UHPC 组合桥面连接件设计的极大浪费(表 7)。

表 7 栓钉抗拔经典理论、规范值与试验值比较

Table 7 Comparison of classic theory, codes and test results

	试验值	Fuchs <sup>[11]</sup>	Farrow <sup>[13]</sup>	GB50367 <sup>[14]</sup>	JGJ145 <sup>[15]</sup>	ACI 318 <sup>[12]</sup>
PTHS1	55.51	24.22	26.81	3.86	14.22	18.13
PTHS'	85.10	25.28	27.98	4.03	14.83	18.92

观察发生混凝土锥形破坏的试件,发现破坏锥体为变角度曲面,而非经典的四棱锥<sup>[11]</sup>或圆锥<sup>[13]</sup>,栓钉的影响范围超过两倍的钉杆长度(图 11)。分析锥形破坏的机理,由于裂面是从栓钉钉头边缘沿着一定开裂角展开,随着荷载增加,裂面范围逐渐变大,在稳定开裂阶段其开展方向趋于与受力方向垂直。UHPC 掺入钢纤维后表现出类似钢材的塑形,这一现象将更为明显。将 UHPC 受拉强度  $f_t$  和变角度破坏面的投影面积代入式(1)右端第二项、第三

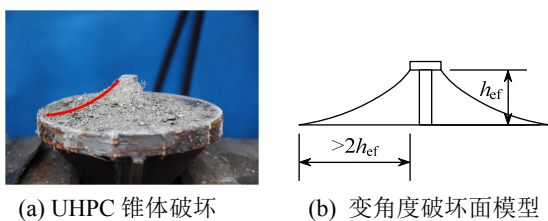


图 11 UHPC 锥形破坏面模型

Fig.11 Variable angle failure surface of UHPC cone failure

项,计算结果接近试验值。然而定量的栓钉影响范围规律需要更多的试验回归和参数分析。

### 3.4 栓钉荷载-滑移模型

Ollgaard<sup>[16]</sup>提出了经典的栓钉荷载-滑移模型:

$$V = V_u(1 - e^{-ns})^m \quad (2)$$

其中,  $V_u$  为栓钉的极限抗剪承载力。欧洲规范<sup>[9]</sup>中规定的栓钉抗剪承载力公式为:

$$V_u = 0.29d^2 \sqrt{f'_c E_c} \leq 0.8 \frac{\pi d^2}{4} f_u \quad (3)$$

对于本文栓钉连接界面,式(3)不等号左端结果为 94.4 kN,右端为 54.9 kN,平均每个栓钉承载力试验值为 90.6 kN,说明尽管最后破坏模式为栓钉剪断,但栓钉和 UHPC 可协同受力,发挥超出本身强度的承载力。

根据六个栓钉连接界面推出试验曲线,对式(2)关键参数  $m$ 、 $n$  进行标定,考虑工程设计的便捷性及保守性,拟合得到  $n=3 \text{ mm}^{-1}$ ,  $m=0.5$ ,如图 12 所示,初始阶段的刚度较普通混凝土中的经验函数明显增大( $n=1 \text{ mm}^{-1}$ ,  $m=0.558$ <sup>[17]</sup>),这是由于 UHPC 的高强度和 high 韧度,栓钉周围的混凝土不易压溃,增大了变形刚度, Kim 等<sup>[18]</sup>学者在 UHPC 栓钉推出试验中也观察到类似的现象。标定后的指数模型与推出试验曲线吻合良好( $P_u$  统一为发生 2 mm 滑移时的承载力)。

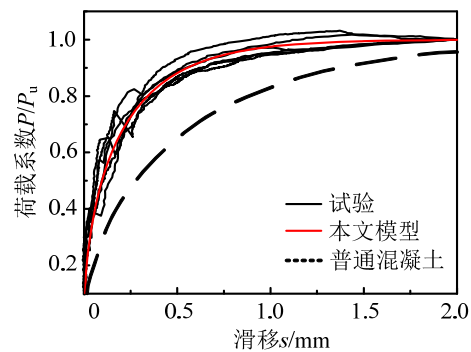


图 12 指数函数模型与试验结果对比图

Fig.12 Comparison of exponential function model and test results

将模型写入通用有限元程序 ABAQUS 的扣件单元(Fastener Element),并应用到 UHPC 组合梁负弯矩试验的有限元模拟中进行验证<sup>[19]</sup>。该试验中 UHPC 组合梁梁高 400 mm,跨度为 3100 mm,几何尺寸和加载模式如图 13 所示。在有限元建模时,钢和 UHPC 采用壳单元进行模拟,其材料参数均按照材性试验结果设置,  $f_{cu}=155 \text{ MPa}$ ,  $E_c=42600 \text{ MPa}$ 。组合梁界面上的栓钉连接件采用扣件单元模拟,其纵向荷载-滑移关系由标定后的式(2)定义。

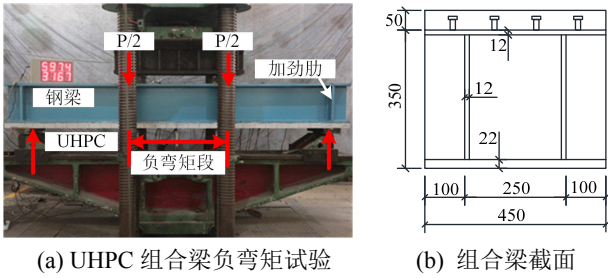


图 13 UHPC 组合梁负弯矩试验

Fig.13 Details of the negative bending test of a UHPC-steel composite beam

当组合梁跨中挠度( $\Delta$ )为 70 mm 时, UHPC-钢板界面在梁端的滑移量为 0.10 mm, 而有限元模拟结果为 0.11 mm。由荷载-挠度曲线可见( $P-\Delta$ 曲线, 图 14(b)), 有限元结果与试验结果非常吻合, 证明了该数学模型的有效性。

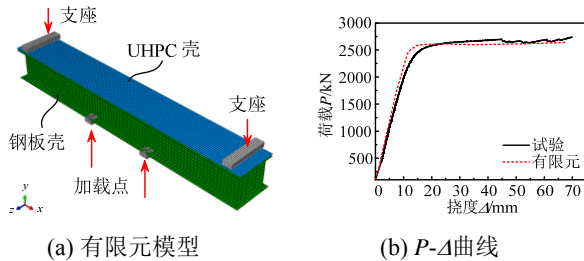


图 14 有限元模型验证

Fig.14 Simulation and verification of FE model

## 4 结论和建议

本文设计并进行了五种不同 UHPC-钢界面形式的受拉和推出试验, 分析总结了试验现象和结果, 主要结论如下:

(1) UHPC-光滑钢板界面具有 0.5 MPa 左右的抗拉和抗剪粘结强度, 强度较低且受到 UHPC 龄期和结构受力模式影响, 所以直接用于工程并不可靠, 进一步的规律研究则需要更多的试验数据。

(2) 五种被研究的界面中, 花纹钢板界面和撒入石灰石的环氧胶粘剂界面表现出较好的粘结性能, 抗拉和有约束抗剪强度达到 2 MPa 左右, 但在无约束时发生脆性破坏。栓钉连接界面和焊接弯起钢筋界面则呈现出明显的规律性和界面粘结破坏后的延性, 但是约束对其抗剪承载力的提高很小。

(3) 当界面承受拉力作用时, 埋入连接件(焊接弯起钢筋或栓钉连接件)可显著提升界面承载力, 甚至超过连接件自身破坏强度和界面粘结力之和, 因而实际工程中采用粘接界面时宜增加一定数量的延性连接件。

(4) 增加钢板表面粗糙度可提升界面粘结力, 而这一影响在界面受剪且存在约束时更为显著, 花纹钢板界面在受拉和约束受剪时的粘结强度都达到光滑钢板情况的 3 倍。然而树脂骨料层并不能增加界面粗糙度, 连接件则会造成界面分离。

(5) 经典理论与国内外规范对 UHPC 锥形破坏模式的承载力存在明显的低估, 本文提出了栓钉连接件在 UHPC 中受拉时的变角度破坏面假设; 此外, 通过试验结果标定和验证了 UHPC 中栓钉连接件荷载-滑移关系的指数函数模型。

### 参考文献:

- [1] Graybeal B A. Material property characterization of ultra-high performance concrete [R]. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-HRT-06-103, 2006.
- [2] 阎培渝. 超高性能混凝土(UHPC)的发展与现状[J]. 混凝土世界, 2010(9): 36—41.  
Yan Peiyu. The development and current situation of ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. World of Concrete, 2010(9): 36—41. (in Chinese)
- [3] Walraven J. High performance concrete: A material with a large potential [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2009, 7(2): 145—156.
- [4] Tassios T P. Properties of bond between concrete and steel under load cycles idealizing seismic actions [C]// Rome: Proceeding of the AICAP-CEB Symposium, CEB Bulletin d'Information, 1979, 131: 67—122.
- [5] 徐有邻. 变形钢筋-混凝土粘结锚固性能的试验研究 [D]. 北京: 清华大学, 1990.  
Xu Youlin. Experimental study of anchorage properties for deformed bars in concrete [D]. Beijing: Tsinghua University, 1990. (in Chinese)
- [6] 陈斌, 邵旭东, 曹君辉. 正交异性钢桥面疲劳开裂研究 [J]. 工程力学, 2012, 29(12): 170—174.  
Chen Bin, Shao Xudong, Cao Junhui. Study of fatigue cracking for orthotropic steel bridge deck [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 170—174. (in Chinese)
- [7] Buitelaar P, Braam C R, Kaptijn N. Reinforced high performance concrete overlay system for steel bridges [C]// Istanbul, Turkey: 5th International CROW Workshop on Fundamental Modelling of the Design and Performance of Concrete Pavements 1&2 April, 2004.
- [8] Garas V Y, Kahn L F, Kouris K E. Short-term tensile creep and shrinkage of ultra-high performance concrete [J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 31(3): 147—152.

(参考文献[9]—[19]转第 192 页)



- algorithm and analysis of perforation tests at moderate projectile velocities [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(8): 779—796.
- [23] Wang YX. Numerical wave channel with absorbing wave-maker [J]. *Hydrodynamic, Series A*, 1994, 9(2): 205—214.
- [24] 高睿. SPH 强非线性水动力学数值模型的应用与改进 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.  
Gao Rui. Application and correction of high nonlinear SPH hydrodynamic model [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [25] 李玉成, 滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 北京: 海洋出版社, 2002: 16—17.  
Li Yucheng, Teng Bin. Effect of waves on offshore structures [M]. Beijing: Ocean Press, 2002: 16—17. (in Chinese)
- [26] Souto-Iglesias A, Idelsohn S R, Marti J, Zamora-Rodriguez R, Oiate E. Modeling of free surface flows with elastic bodies interactions [C]. 27th Symposium on Naval Hydrodynamics Seoul, Korea, 2008: 5—10.
- [27] E Botia-Vera, A Souto-Iglesias, G Bulian L, Lobovsky L. Three SPH novel benchmark test cases for free surface flows [C]. Proceedings of the 5th ERCOFTAC SPHERIC workshop on SPH applications, 2010: 1—8.
- [28] Qing Yang, Van Jones, Leigh McCue. Free-surface flow interactions with deformable structures using an SPH-FEM model [J]. *Ocean Engineering*, 2012, 55(1): 136—147.
- [29] Tang Xiaocheng, Jiang Feng, Chen Hongzhou, Jin Zhao, Zhang Li, Hao Dongxue. Numerical calculation of total horizontal wave force on a perforated caisson with a top cover based on smoothed particle hydrodynamics method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2017, 231(1): 31—45.

(上接第 174 页)

- [9] EN 1994-1-1:2004, Eurocode 4: Design of composite and concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings [S]. European Committee for Standardization, 2004.
- [10] Papastergiou D. Connections by adhesion, interlocking and friction for steel-concrete composite bridges under static and cyclic loading [D]. Switzerland: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2012.
- [11] Fuchs W, Eligehausen R, Breen J E. Concrete capacity design (CCD) approach for fastening to concrete [J]. *ACI Structural Journal*, 1995, 92(1): 73—94.
- [12] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary [S]. American Concrete Institute, 2011.
- [13] Farrow C B, Klingner R E. Tensile capacity of anchors with partial or overlapping failure surfaces: Evaluation of existing formulas on an LRFD basis [J]. *ACI Structural Journal*, 1995, 92(6): 698—710.
- [14] GB50367-2013, 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
GB50367-2013, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [15] JGJ 145-2013, 混凝土结构后锚固技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
JGJ 145-2013, Technical specification post-installed fastenings in concrete structures [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [16] Ollgaard J, Slutter R, Fisher J. Shear strength of stud connectors in lightweight and normal-weight concrete [J]. *AISC Engineering Journal*, 1971, 8(2): 55—64.
- [17] 陶慕轩, 聂建国. 预应力钢-混凝土连续组合梁的非线性有限元分析[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(2): 8—20.  
Tao Muxuan, Nie Jianguo. Nonlinear finite element analysis of prestressed continuous steel-concrete composite beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(2): 8—20. (in Chinese)
- [18] Kim J S, Kwark J, Joh C, et al. Headed stud shear connector for thin ultrahigh-performance concrete bridge deck [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 108(2): 23—30.
- [19] 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]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(10): 04016064-1—04016064-13.