

不同参数下UHPC永久模板与现浇混凝土的黏结-滑移性能试验研究

周明 温小栋 龚文波 秦令林

Experimental study on adhesion slip performance between UHPC permanent formwork with different parameters and cast-in-place concrete

ZHOU Ming, WEN Xiaodong, GONG Wenbo, QIN Linglin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241122.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

预制键槽式UHPC与后浇混凝土界面粘结抗剪性能

Interface shear resistance of precast keyway UHPC and post-cast normal concrete

复合材料学报. 2024, 41(5): 2633–2644 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230926.001>

基于梁式试验的UHPC-高强钢筋搭接黏结性能

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

复合材料学报. 2024, 41(10): 5527–5539 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240011.002>

UHPC与混凝土基体间界面剪切强度的影响因素

Factors influencing interfacial shear strength between UHPC and concrete substrate

复合材料学报. 2024, 41(12): 6507–6516 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240322.001>

冲击作用下CFRP光圆筋与UHPC粘结性能的试验研究

Experimental study on bonding behavior between CFRP smooth bar and UHPC under impact loading

复合材料学报. 2024, 41(2): 858–870 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230612.002>

预制UHPC-RAC组合梁受弯性能试验与理论计算

Experimental and theoretical study on flexural behavior of precast UHPC-RAC composite beams

复合材料学报. 2024, 41(3): 1420–1435 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230704.001>

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>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

不同参数下 UHPC 永久模板与现浇混凝土的黏结-滑移性能试验研究



分享本文

周明, 温小栋*, 龚文波, 秦令林

(宁波工程学院 建筑与交通工程学院, 宁波 315211)

摘要: 永久模板的使用可实现混凝土结构的快速施工, 缩短周期, 提高整体结构的承载能力和耐久性, 界面黏结抗剪性能是确保永久模板与混凝土协同工作的关键。本文设计并制作了超高性能混凝土 (UHPC)-普通混凝土 (NC) 复合试件, 通过双面剪切试验和理论分析, 系统研究了 UHPC 模板表面处理方式 (凸或凹剪力钉、横或竖式剪力槽)、模板类型 (底模、侧模) 等对 UHPC-NC 界面抗剪性能的影响。研究结果表明, 试件典型破坏形态主要有 3 类: a 类破坏, 仅发生黏结面剪切破坏; b 类破坏, 发生黏结面剪切破坏及 NC 剪切破坏; c 类破坏, 核心区普通混凝土发生轴心受压破坏。模板表面处理后试件承载力均有所提高, 其中凸式剪力钉的构件极限承载力最高可达 355 kN, 远高于采用凹式剪力钉和横式剪力槽的构件, 处理效果最好; 对于剪力槽措施来看, 横式剪力槽效果要好于竖式剪力槽。其次, UHPC-NC 界面黏结性能随凹式剪力钉孔深的增加而增强, UHPC 永久模板用作底模时, 试件的极限承载力比用作侧模的试件高 122.9%, 其效果要好于用作侧模; 最后基于现有黏结-滑移模型分析, 考虑模板表面处理方式的影响, 建立了 UHPC-NC 界面黏结-滑移模型。

关键词: UHPC 永久模板; 双剪试验; 界面处理方法; 界面黏结-滑移性能; 理论分析

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)09-5203-13

Experimental study on adhesion slip performance between UHPC permanent formwork with different parameters and cast-in-place concrete

ZHOU Ming, WEN Xiaodong*, GONG Wenbo, QIN Linglin

(School of Civil and Transportation Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: The use of permanent formwork can realize the rapid construction of concrete structures, shorten the cycle time, and improve the overall structural load-bearing capacity and durability, and the interface bond shear performance is the key to ensure that the permanent formwork and concrete work together. In this paper, ultra-high-performance concrete (UHPC)-normal concrete (NC) composite specimens were designed and fabricated, and the effects of the formwork inner surface shear bond treatment (convex or concave shear nails, horizontal or vertical shear grooves), the formwork type (bottom molding, side molding) on the shear resistance of the UHPC-NC bonding surface were systematically investigated through double-sided shear tests and theoretical analysis. The results show that the typical damage patterns of the specimens are as follows: a type of damage, only bond surface shear damage; b type of damage, bond surface shear damage and NC shear damage; c type of damage, axial compression failure of ordinary concrete in core zone. After the surface treatment of the formwork, the bearing capacity of the specimen has been improved. Among them, the ultimate load-bearing capacity of the components with protruding

收稿日期: 2024-09-04; 修回日期: 2024-11-12; 录用日期: 2024-11-15; 网络首发时间: 2024-11-22 15:47:13

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241122.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (51569035); 宁波市科技创新 2025 重大专项 (2024Z017; 2020Z034); 浙江省公益基金项目 (LGG21E080007); 宁波市自然科学基金项目 (202003N4170)

National Natural Science Foundation of China (51569035); 2025 Major Project of Science and Technology Innovation in Ningbo (2024Z017; 2020Z034); Basic Public Welfare Research Project of Zhejiang Province, China (LGG21E080007); Ningbo Natural Science Foundation in China (202003N4170)

通信作者: 温小栋, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为绿色建筑材料 E-mail: wenziaodong8@163.com

引用格式: 周明, 温小栋, 龚文波, 等. 不同参数下 UHPC 永久模板与现浇混凝土的黏结-滑移性能试验研究 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(9): 5203-5215.

ZHOU Ming, WEN Xiaodong, GONG Wenbo, et al. Experimental study on adhesion slip performance between UHPC permanent formwork with different parameters and cast-in-place concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(9): 5203-5215(in Chinese).

shear studs can reach up to 355 kN, which is far higher than that of components with recessed shear studs and transverse shear slots, the convex shear stud setting effect is the best; Moreover, for the shear groove measures, the effect of horizontal shear groove is better than that of vertical shear groove. Secondly, the bonding performance of UHPC-NC interface increases with the increase of the hole depth of concave shear studs. When UHPC permanent formwork is used as bottom formwork, the ultimate load-bearing capacity of the specimen is 122.9% higher than that of the specimen used as the side formwork, its effect is better than that of side formwork; Finally, based on the existing bond slip model analysis, considering the influence of template surface treatment, the bond slip model of UHPC-NC interface is established.

Keywords: UHPC permanent formwork; double shear test; interfacial treatment methods; interfacial bond-slip properties; theoretical analysis

传统建筑模板一般采用钢模、木模或铝模,模板拆除导致人工成本增加,虽然可以多次利用但作为损耗性材料造成资源浪费。永久模板即在施工阶段起到支撑、定型的作用,在使用阶段与后浇混凝土形成整体参与受力的构件。使用永久模板可节省施工时间,降低工程造价,减少施工工序,节约能源和保护环境^[1]。与此同时,随着建筑工业化的推广,预制整体混凝土结构体系在工业厂房和住宅结构中得到了不断的应用。预制装配整体式结构是在预制梁、板等构件上(内)后浇混凝土形成的一种叠合结构^[2-5]。同时,也开发出一种外壳预制、核心现浇的新型预制装配整体式结构构件^[6]。这为永久模板技术推广应用注入新动力。超高性能混凝土(UHPC)是一种性能优异的新型复合材料,其极限压应变可达0.004~0.008,抗压强度可达170~800 MPa,弯曲开裂应变可达0.00075^[7-10]。UHPC用作永久模板材料,可以提高模板承载力、减轻模板的厚度及质量,因此得到广泛关注。

UHPC永久模板结构体系中,模板与现浇普通混凝土的黏结界面是复合结构的最薄弱环节。为了改善界面的黏结性能,工程上对黏结界面进行高压水枪喷砂、凿毛及开槽等方式以保证界面的黏结及抗剪强度的可靠性,但该工艺较为粗犷,其粗糙度难以精细控制,同时UHPC强度高难以达到满意的效果。而且现有研究中采用的试验方法多为劈裂抗拉试验,这些试验方法虽然能够提供一定的数据支持,但对于实际工程中复杂受力状态下的界面性能评估仍然存在局限性。此外,UHPC与普通混凝土(NC)黏结界面也属于新老混凝土黏结问题。现有的新旧混凝土黏结性能研究成果主要是针对低强度混凝土构件受损部采用高强度混凝土修补而形成的黏结界面^[11-13],但是现有研究UHPC与NC界面的试验构件,多采用单

剪的形式而单剪试验方法存在无法全面模拟实际工程中UHPC与NC的受力情况的问题。然而在UHPC永久模板体系中,后浇混凝土强度低于预制UHPC模板强度,因此现有的研究成果不宜直接使用。

近年来,针对UHPC与普通混凝土的界面性能出现了少量的试验研究。如:Munoz等^[14]开展的劈裂和斜剪试验,以混凝土湿润度和表面粗糙度等作为可变条件,研究了两种材料之间的黏结性能。试验结果表明,在混凝土基材的粗糙程度、复合试件的龄期、冻融循环的暴露程度以及不同的加载配置等不同试验条件下,UHPC和NC之间的黏结性能都足以用于桥梁覆盖层。控制因素是早期UHPC相对于衬底强度的强度增益。Bassam等^[15]进行的劈裂和斜剪试验,研究了两种材料间的黏合强度和渗透性。试验结果表明,UHPC-NC界面的抗渗透特性良好,UHPC层与NC基体的黏接强度较高,可显著改善混凝土基体的抗渗透性。周尚猛等^[16]进行的UHPC-NC组合界面的双面剪切试验,得到了不同组合结构抗剪性能和在破坏时的形态。由此可见,对UHPC模板表面处理形式及类型等参数对UHPC-NC界面黏结破坏机制、应力传递及黏结-滑移规律等方面缺乏系统的研究。

因此,本文拟通过UHPC永久模板增强混凝土结构保护层,同时针对永久模板与内部混凝土间界面黏结问题,提出基于工厂预制化技术的UHPC模板表面处理办法,通过双面剪切试验研究后浇普通混凝土(NC)和预制超高性能混凝土(UHPC)的黏结性能,分析UHPC模板类型及其表面处理方式等参数对界面黏结破坏形态、应力传递及黏结-滑移规律,以期对UHPC永久模板-混凝土界面抗剪性提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

试件设计过程中主要考虑预制 UHPC 模板表面处理方式、模板厚度与类型对界面黏结性能的影响。每个试件由普通混凝土内芯、UHPC 模板组成。普通混凝土设计强度等级为 C30，其配合

比如表 1 所示，实测抗压强度值为 38.5 MPa。UHPC 的配合比如表 2 所示，其中粉体由 P·O 52.5 强度等级的普通硅酸盐水泥、硅粉、I 级粉煤灰、石英砂及石英粉(浙江宏日泰耐克新材料科技有限公司)构成。UHPC 实测抗压强度值为 139.6 MPa。试件设计的具体参数见表 3 所示。

表 1 C30 混凝土配合比设计

Table 1 C30 concrete mix proportioning design

Cement/mol%	Water/mol%	Crushed stone/mol%	Fly ash/mol%	Medium sand/mol%	Compressive strength/MPa
0.038	0208	0.432	0.038	0.277	38.5

表 2 超高性能混凝土 (UHPC) 配合比设计

Table 2 Ultra-high-performance concrete (UHPC) proportioning design

Powder/mol%	Water/mol%	Water-reducing/mol%	Steel fiber/mol%	Compressive strength/MPa
0.492	0.392	0.00027	0.115	139.6

表 3 UHPC 试件设计

Table 3 UHPC specimen design

Specimen number	UHPC mold type	UHPC mold thickness/mm	Protrusion height or hole depth/mm
ST-10-30	Side molding	30	10
HT-10-30	Side molding	30	10
AD-10-30-YM	Bottom molding	30	10
TD-10-30	Side molding	30	10
AD-15-30	Side molding	30	15
AD-10-30	Side molding	30	10
PB-0-30	Side molding	30	0

Notes: TD stands for convex shear stud treatment, AD stands for concave shear stud treatment, HT stands for horizontal shear slot treatment, ST stands for vertical shear slot treatment, YM stands for base formwork, and PB stands for smooth formwork; TD-10-30 indicates that the UHPC formwork surface is treated with convex shear studs, with a convex diameter of 10 cm and a slab thickness of 30 cm; HT-10-30 indicates that the UHPC formwork is treated with horizontal shear slots, with a slot depth of 10 cm and a slab thickness of 30 cm.

(1) UHPC 模板制作：为考察预制 UHPC 模板表面处理方式对预制 UHPC-NC 复合试件的界面黏结性能的影响，在 UHPC 模板制作时对其内表面进行不同方式处理，并与自然光滑模板进行对比。UHPC 模板表面处理方法：基于渗透模板与

混凝土转印技术的思路，在事先准备好的模具内平铺一块具有不同图案的衬板，随后将搅拌均匀的 UHPC 浆料灌入模具内并振捣密实，室内静养 24 h 后脱模，随即移入水中养护至 28 d 龄期，制备出表面具有不同形式的 UHPC 模板，如图 1 所示。

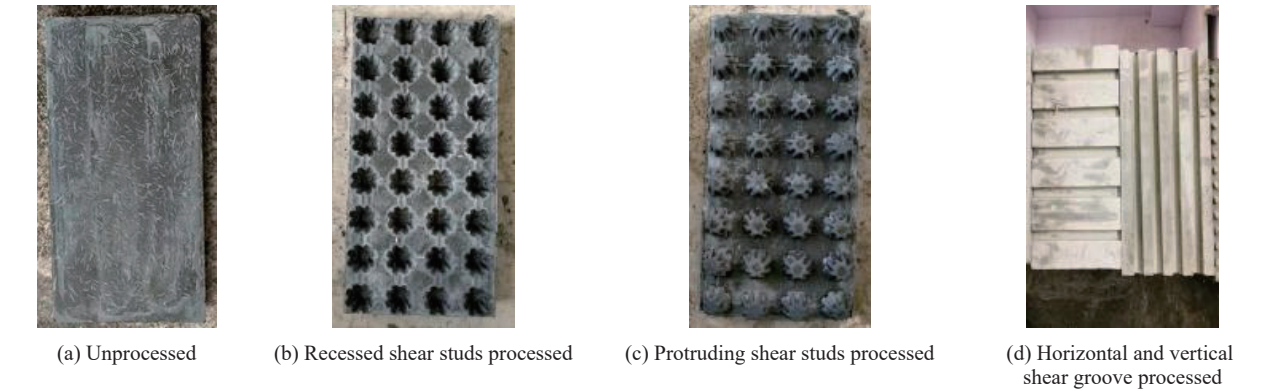


图 1 UHPC 模板表面处理方式

Fig. 1 Surface treatment of UHPC formwork

(2)UHPC-NC 复合试件成型：将预制好的 UHPC 模板安装在已准备好的试模中，使两侧的预制 UHPC 贴紧试模内壁，然后再向中间浇筑混凝土。为确保浇筑质量，每浇筑 1/3 的混凝土，用振捣棒进行插捣，静置 24 h 后进行拆模，并放入标准养护箱中养护至 28 d 龄期。工艺流程图见图 2。

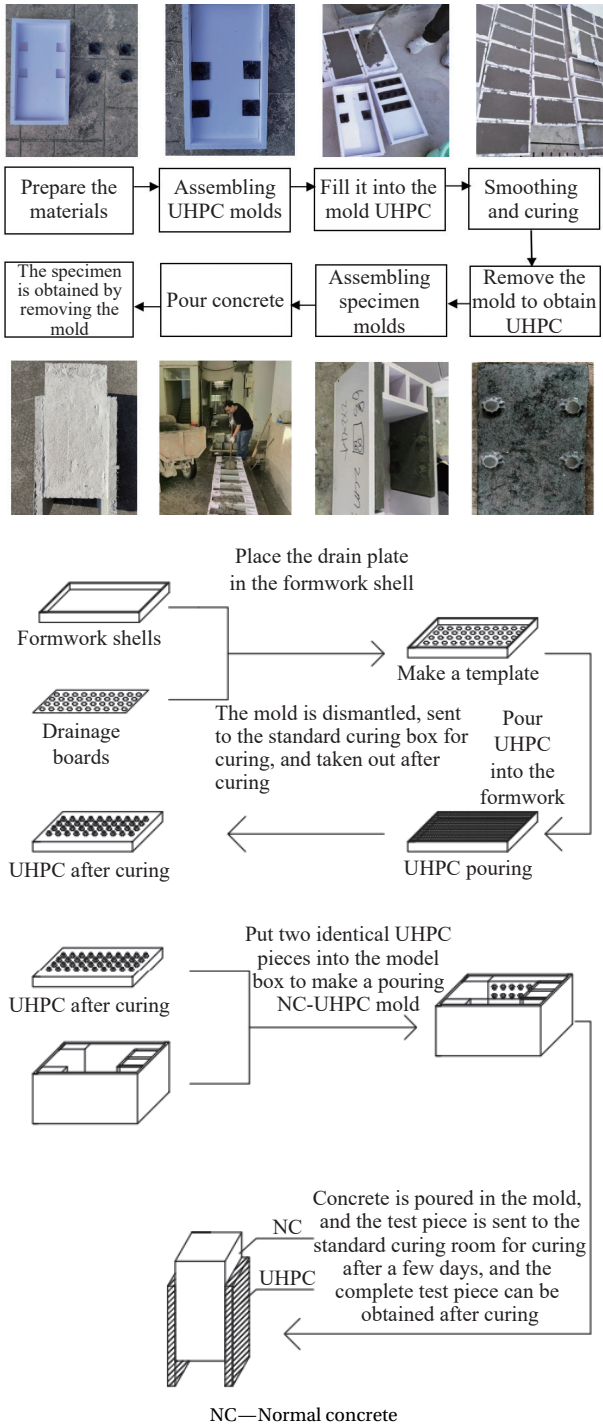


图 2 工艺流程图

Fig. 2 Technological flow sheet

1.2 试验加载装置及测点布置

试验装置由 200 吨邦威静态压力试验机 (MTS-50T, 美国 MTS 公司)、位移计 (5G203, 江苏东华测试技术股份有限公司)、数据采集仪 (FlexTest II 数字化系统, 美国 MTS 公司)、工业摄像机 (CP70-1HS-M-1900, 德国 Optronis 公司)、电液伺服加载系统 (MTS-50T, 美国 MTS 公司)、东华静态采集仪 (DH3816N, 江苏东华测试技术股份有限公司) 等组成, 见图 3。

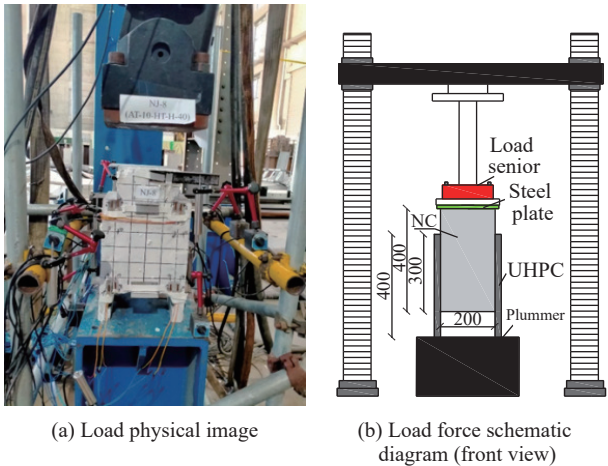


图 3 试验加载装置 (单位: mm)

Fig. 3 Test loading device (Unit: mm)

通过在预制 UHPC 和 NC 表面上粘贴应变片, 以获得 UHPC 模板和 NC 核芯的应变分布规律。应变片布置方案为: 在 UHPC-NC 黏结面附近的 UHPC、NC 上分别粘贴了 10 个应变片 (应变片长度为 20 mm), 以获得沿着应变片长度方向上 UHPC 板和 NC 的应变值, 具体如图 4(a) 所示。同一截面处黏结面上应变片读数的平均值作为该截面处黏结面附近的 UHPC、NC 的应变值, 如: #A 截面处黏结面附近的 UHPC 上应变值记为 U_A 、NC 上应变值记为 C_A 。

此外, 分别在 UHPC、NC 上布置位移计, 以获得 UHPC 模板和 NC 核芯滑移值。其布置方案为: 在 UHPC 模板、NC 核芯上分别布置 4 个和 6 个位移计, 其中 #1 截面对角处 NC 上布置了两个位移计, #2 截面、#3 截面中心处 UHPC、NC 上分别布置了 2 个位移计, 具体如图 4(b) 所示。同一截面处位移计的平均值作为该截面上 UHPC、NC 的位移值, 如: #2 截面的 UHPC 上位移值记为 U_2 、NC 上位移值记为 C_2 。

试验加载前首先进行预加载, 加载速率为

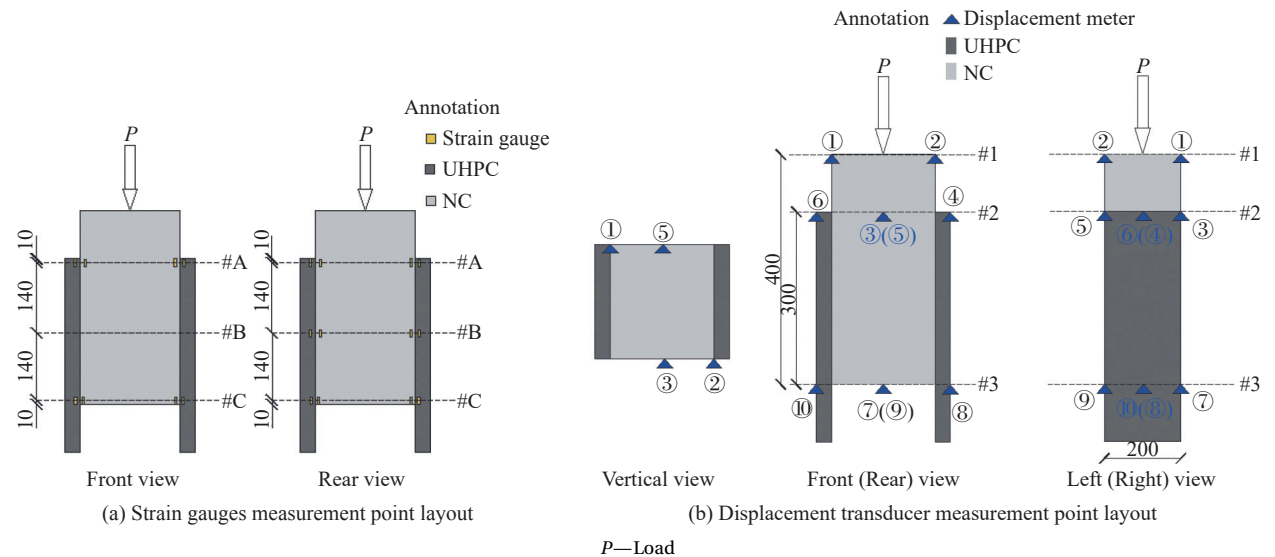


图 4 应变片及位移计测点布置示意图 (单位: mm)

Fig. 4 Schematic diagram of the arrangement of strain gauges and displacement measurement points (Unit: mm)

5 kN/min, 预加载至 5 kN 结束, 卸载至 0 kN, 随后正式加载, 正式加载采用分级加载的方式进行, 每级 5 kN, 加载到预定荷载后持荷 2 min, 记录相关数据, 再继续加载, 直到极限荷载的 70% 后采用位移控制的方式加载, 在临近破坏时开始缓慢持续加载直至试件破坏。

2 试验结果及其分析

2.1 UHPC-NC 复合试件试验过程与破坏形态

试验加载初期, 靠近自由端的 NC 表面应变值随着荷载增加而逐渐增大, 离自由端越近, 应变值越大; 随后, 靠近自由端界面开始出现滑移, 可听到 UHPC 板与普通混凝土的剪切剥离声, 且 UHPC 板表面发生“起皮脱落”现象, 如图 5 所示。随着荷载的进一步增大, 应变值不断增大, UHPC 板表面的脱落现象也越显著; 当试件达到极限荷载时, UHPC 板与普通混凝土界面迅速发生剪切破坏, 试件则无法继续承受荷载。

表 4 列出了极限承载力和破坏形态等测试结果, 试件破坏形态可归纳为 3 种, 具体如下:

a 类破坏: UHPC-NC 黏结面剪切破坏 (图 6(a))。整个加载阶段, 黏结面抗剪性能仅由 UHPC-NC 之间黏结力承担。随着荷载的增加, 黏结面开始发生剪切破坏, 直至完全被剪断, 其断面光滑且平整。

b 类破坏: UHPC-NC 黏结面及 NC 剪力钉 (或 NC 剪力槽) 剪切破坏。加载初期, 黏结面抗剪性能仅由 UHPC-NC 之间黏结力承担; 随后, 抗剪承载力主要由 NC 剪力钉 (或 NC 剪力槽) 提供,

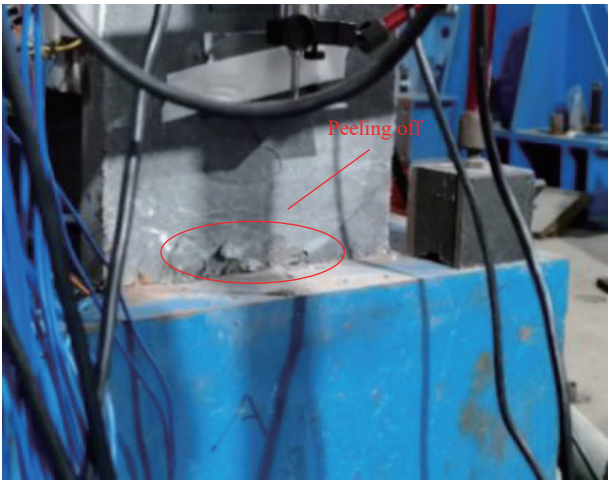


图 5 UHPC 板“起皮脱落”现象示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the "peeling off" phenomenon in UHPC slabs

表 4 UHPC-NC 黏结试件双面剪切试验结果

Table 4 Experimental results of double-sided shear tests for UHPC-NC composite specimens

Specimen number	Ultimate load P_u /kN	Failure mode
PB-0-30	100	a
ST-10-30	216	b
HT-10-30	293	b
AD-10-30-YM	292	b
TD-10-30	355	c
AD-15-30	152	b
AD-10-30	131	b

Notes: a indicates the shear failure of the UHPC-NC bonding surface; b indicates the shear failure of the UHPC-NC bonding surface and the NC shear studs (or NC shear slots); c indicates the concentric compression failure of the core normal concrete.



图6 超高性能混凝土-普通混凝土 (UHPC-NC) 黏结试件典型破坏形态
Fig. 6 Typical failure mode of UHPC-NC specimens

直至其沿根部被剪断 (图 6(b)~6(d))。此类破坏仅发生在 UHPC 模板表面进行了凹式剪力钉及横/竖剪力槽处理的试件上。

c 类破坏：核芯普通混凝土轴心受压破坏。靠近自由端处 UHPC-NC 黏结面出现裂缝，随后裂缝受 UHPC 凸式剪力钉影响，偏向普通混凝土核芯发展 (图 6(e))。加载初期，试件界面抗剪性能主要由 UHPC-NC 之间黏结力承担；此后，界面抗剪性能主要由 UHPC 剪力钉提供，直至被剪断或剥离。此类破坏仅发生在 UHPC 凸式剪力钉处理的试件。

2.2 UHPC-NC 复合试件荷载-应变关系曲线

图 7 典型复合试件 TD-10-30 上各截面的荷载-应变曲线。可知，界面应变均随荷载呈线性关系增长，由于 UHPC 与 NC 之间的界面受到界面法向拉应力和界面切向剪应力的共同作用，导致界面的粘结性能不足，因此构件在受到荷载时，界面粘结力容易突然失效，造成脆性破坏。此外，UHPC-NC 试件的应变-荷载曲线由自由端至加载端曲线的斜率依次增大，说明应力从自由端逐步传递至加载端。

2.2.1 模板表面处理方式的影响

图 8 为模板表面按不同方式进行处理

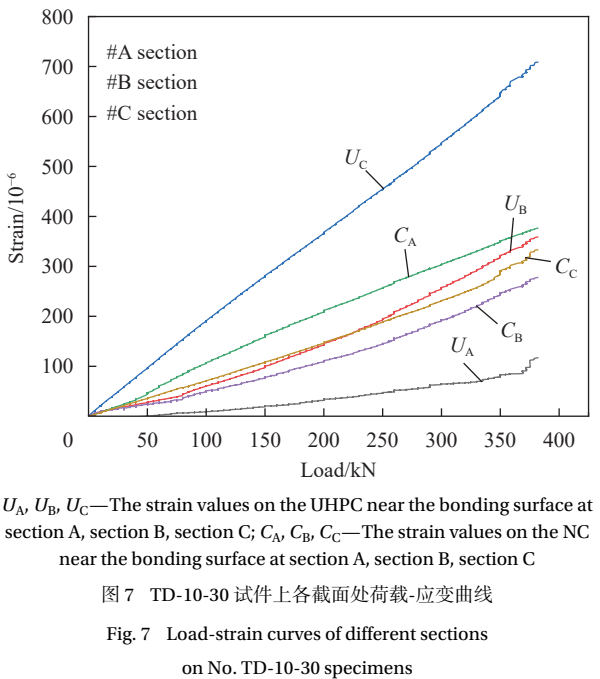


图7 TD-10-30 试件上各截面处荷载-应变曲线
Fig. 7 Load-strain curves of different sections on No. TD-10-30 specimens

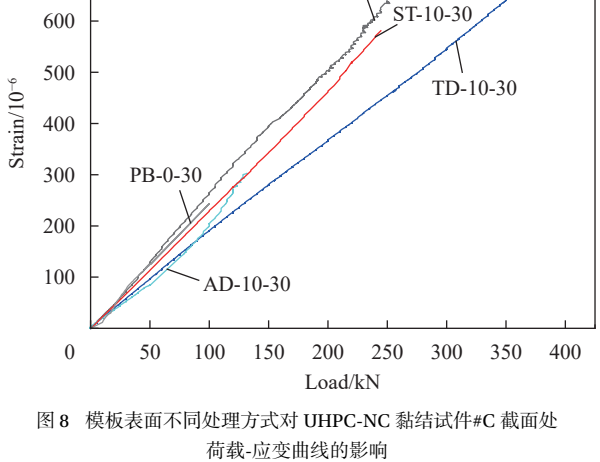


图8 模板表面不同处理方式对 UHPC-NC 黏结试件#C 截面处荷载-应变曲线的影响
Fig. 8 Effect of formwork surface treatment methods on load-strain curves of #C section of UHPC-NC composite specimens

试件上#C 截面的荷载-应变曲线。

从图 8 可见，与基准样 (模板表面未进行处理的复合试件) 相比，模板表面进行处理后复合试件上#C 截面的应变值均得到了增大，即：采用凹式剪力钉、凸式剪力钉、横槽式和竖槽式剪力钉处理后复合试件的应变值由基准样的 240×10^{-6} 左右，依次增加到 300×10^{-6} 、 720×10^{-6} 、 690×10^{-6} 和 580×10^{-6} 。这表明模板表面处理形式对界面抗剪性能增强效果具有差异性，其中凸式剪力钉处理效果最佳，凹式剪力钉处理效果最差。

为了提升凹式剪力钉处理效果,进一步研究了凹式剪力钉孔深对复合试件上#C 截面荷载-应变的影响,如图 9 所示。对于凹式剪力钉处理的复合试件来讲,其剪力钉孔深由编号为 PB-0-30 的基准样(光滑模板剪力钉孔深为 0)依次增加到 10 mm、15 mm 时,其#C 截面应变值由基准样的 240×10^{-6} 依次增加到 300×10^{-6} 、 390×10^{-6} ,表明随着凹式剪力钉孔深增加,其复合试件界面抗剪性能越好。

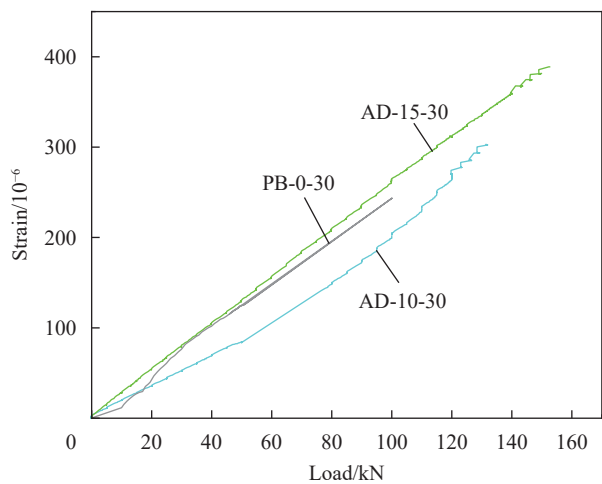


图 9 凹式剪力钉孔深对 UHPC-NC 黏结试件#C 截面处荷载-应变曲线的影响

Fig. 9 Effect of hole depth of concave shear stud on load-strain curves of #C section of UHPC-NC composite specimens

2.2.2 模板类型的影响

工程上模板通常分为底模和侧模两类,为此按模板类型成型复合试件,并进行了荷载-应变测试,其结果如图 10 所示。

与 UHPC 模板用作侧模的复合试件(AD-10-30)相比,虽然最终的破坏仍为受剪破坏,但带 UHPC 底模的复合试件(AD-10-30-YM)上#C 截面应变值由 300×10^{-6} 左右约提高到 570×10^{-6} 。可见 UHPC 永久模板用作底模时,其复合试件的界面抗剪性能更好。

2.3 UHPC-NC 复合试件荷载-滑移关系曲线

通过 UHPC 和 NC 上安放的位移计可获得 UHPC 与 NC 有效黏结段#1、#2 及#3 截面处的荷载-滑移曲线,如图 11 所示。

由图 11 可知,各试件荷载-滑移曲线呈相同规律,可分为 3 个阶段:(1)线性增长阶段。界面处 UHPC 和 NC 协同变形,界面剪切力由 UHPC 与 NC 之间的黏结摩擦力承担,滑移量随荷载增

大呈线性增加;(2)非线性增长阶段。随着荷载增大,界面出现裂缝并逐渐发展,抗剪刚度退化,滑移量随荷载呈非线性增长;此时,界面承载力在 UHPC 粗糙表面-骨料互锁机制作用下进一步提高;(3)破坏阶段,界面无法承受更大荷载,试件迅速发生破坏。此外,相同荷载下,相较于曲线 C_2 和 U_2 ,曲线 C_3 和曲线 U_3 的滑移值差值的绝对值更大,因此,试件自由端处界面最早破坏。

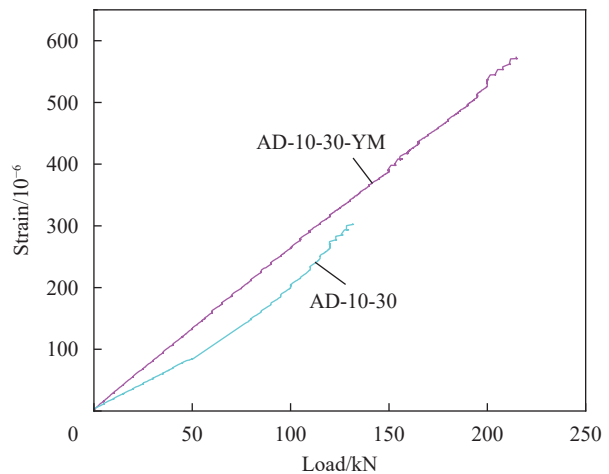
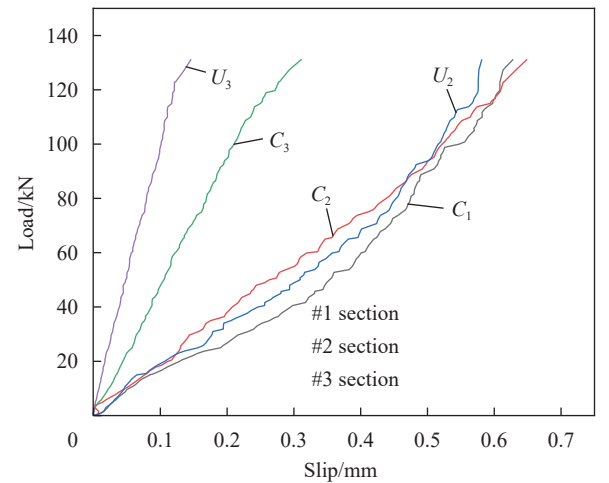


图 10 模板类型对 UHPC-NC 黏结试件#C 截面处荷载-应变曲线的影响

Fig. 10 Effect of formwork type on load-strain curves of #C section of UHPC-NC composite specimens



C_1, C_2, C_3 —Displacement values on NC at cross-section #1, #2 and #3; U_2, U_3 —Displacement values on UHPC at cross-section #2 and #3

图 11 ST-10-30-YM 试件的荷载-滑移曲线

Fig. 11 Load-slip curves of No. ST-10-30-YM specimens

2.3.1 模板表面处理方式的影响

图 12 为模板表面按不同方式处理的复合试件上#C 截面的荷载-位移曲线。

由图 12 可知,较其他模板表面处理方式的试

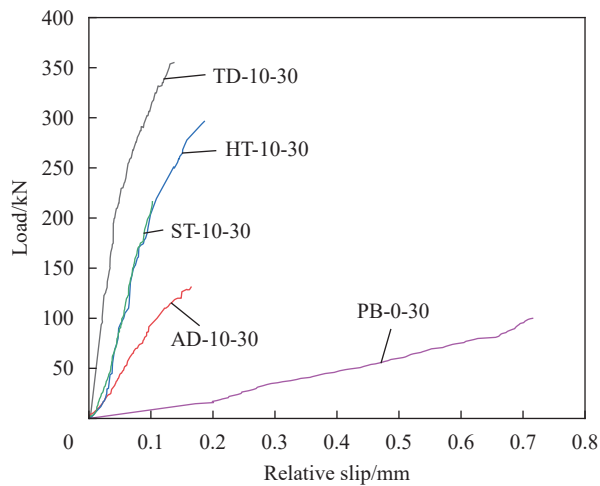


图 12 模板表面不同处理方式对 UHPC-NC 黏结试件#C 截面处荷载-滑移曲线的影响

Fig. 12 Effect of formwork surface treatment methods on load-slip curves of #C section of UHPC-NC composite specimens

件，凸式剪力钉处理的试件相同荷载下位移值最小、极限荷载最大，而凹式剪力钉处理的试件则相反。王鹏刚等^[17]认为荷载滑移曲线中位移值越小、极限荷载越大的则界面黏结性能越好。试验结果表明模板表面采用凸式剪力钉处理方式的界面黏结性能最好，而凹式剪力钉处理方式的效果最差。

为此，进一步研究了凹式剪力钉孔深对试件上#C 截面荷载-滑移的影响，如图 13 所示。

可知，与凹式剪力钉孔深为 0 mm 的基准样(编号：PB-0-30)、孔深为 10 mm 的 AD-10-30 试件相比，孔深为 15 mm 的试件位移值最小、极限荷载最大，表明在相同条件下，随着凹式剪力钉孔

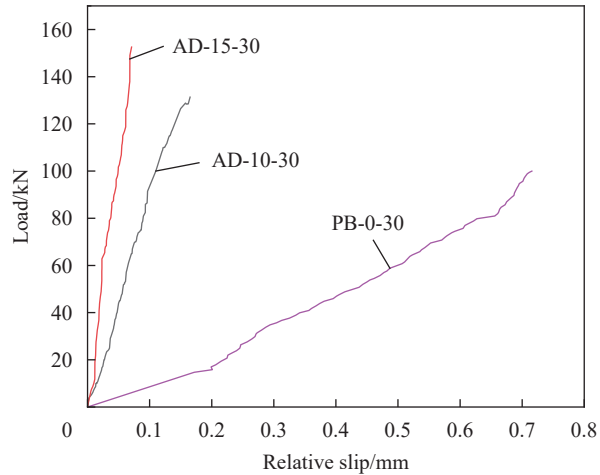


图 13 凹式剪力钉孔深对 UHPC-NC 黏结试件#C 截面处荷载-滑移曲线的影响

Fig. 13 Effect of hole depth of concave shear stud on load-slip curves of #C section

深的增加，试件的黏结性能随之提升。

2.3.2 模板类型的影响

同样成型的带 UHPC 侧模、底模的复合试件，并进行了荷载-滑移曲线试验，其结果见图 14。

可知，较带 UHPC 侧模的复合试件，带底模的复合试件在相同荷载下位移值小、极限荷载大。这也说明了 UHPC 永久模板用作底模时，其复合试件界面黏结性能要好于用作侧模的试件。

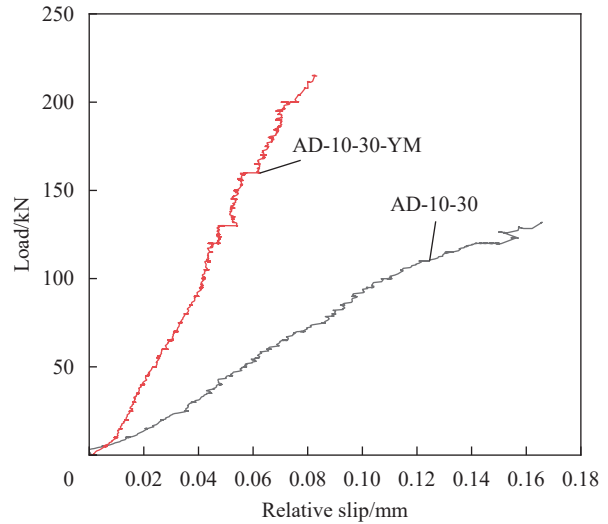


图 14 模板类型对 UHPC-NC 黏结试件#C 截面处荷载-滑移曲线的影响

Fig. 14 Effect of formwork type on load-slip curves of #C section of UHPC-NC composite specimens

2.4 UHPC-NC 复合试件界面极限承载力

2.4.1 模板表面处理方式的影响

模板表面不同处理方式下的复合试件界面极限承载力如表 2 所示。可知，与基准样(模板表面未进行处理的复合试件，No. PB-0-30)相比，模板表面进行处理后复合试件的极限荷载均得到提高，即：UHPC 模板表面按横式剪力槽、竖式剪力槽、凸式剪力钉、凹式剪力钉处理后复合试件的极限荷载由基准样的 100 kN，依次提高到 293 kN、216 kN、355 kN 和 131 kN，如图 15 所示。极限荷载试验结果表明，横式剪力槽处理的效果要好于竖式剪力槽处理，且 4 种处理方式中凸式剪力钉处理对界面黏结性能改善最好、凹式剪力钉处理效果最差。主要原因是表面的粘结性能差异，凹式剪力钉破坏是由混凝土间断导致的，混凝土抗剪强度较低，试件的承载力较弱。

随后，进一步分析了凹式剪力钉孔深对复合试件极限荷载的影响，其结果如图 16 所示。可知，凹式剪力钉孔深为 15 mm 的复合试件其极限承载

力为 152 kN，比孔深为 10 mm 的试件高 16.0%。试验结果说明，凹式剪力钉孔深加大，试件的极限承载力越大，界面黏结效果越好。

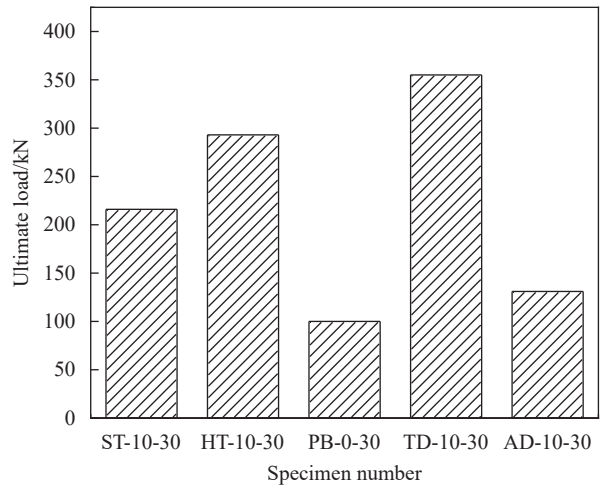


图 15 模板表面不同处理方式下 UHPC-NC 黏结试件极限荷载
Fig. 15 Effect of formwork surface treatment methods on ultimate bearing capacity of UHPC-NC composite specimens

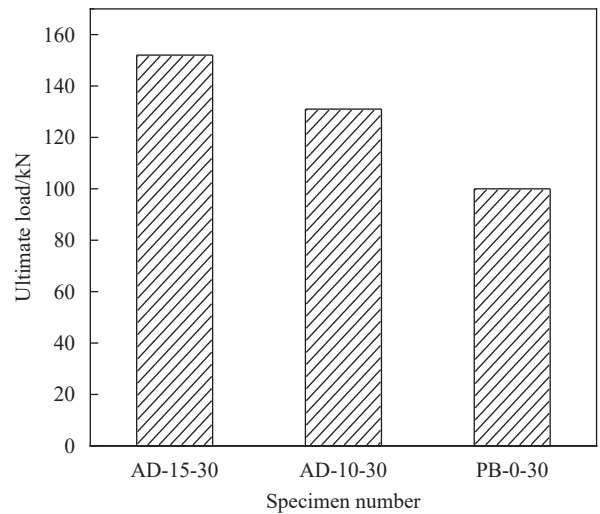


图 16 凹式剪力钉孔深对 UHPC-NC 黏结试件极限荷载的影响
Fig. 16 Effect of hole depth of concave shear stud on ultimate bearing capacity of UHPC-NC composite specimens

2.4.2 模板类型的影响

图 17 为带 UHPC 侧模、底模的复合试件极限承载力柱状图。可知，UHPC 永久模板用作底模时，其试件的极限承载力为 292 kN，比用作侧模的试件高 122.9%。这同样表明 UHPC 永久模板用作底模时，其复合试件界面黏结性能要好于用作侧模的试件。

3 UHPC-NC 界面黏结-滑移本构

UHPC-NC 界面黏结-滑移本构关系是该复合

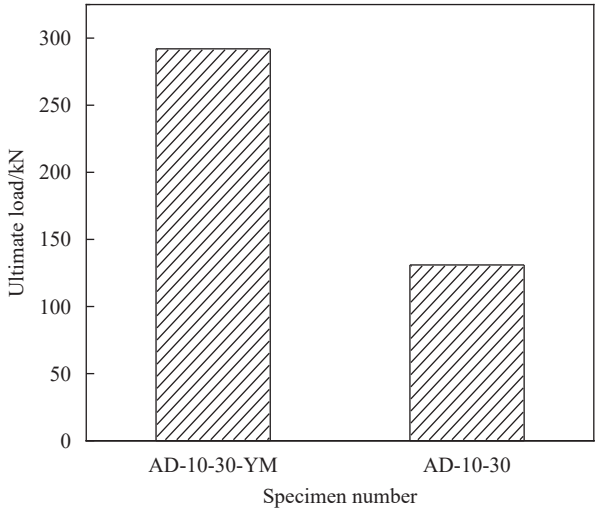


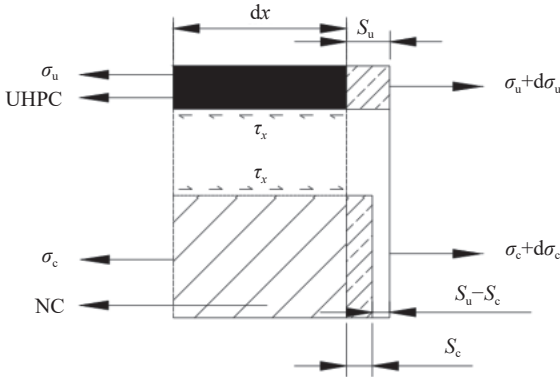
图 17 模板类型对 UHPC-NC 黏结试件极限承载力的影响
Fig. 17 Effect of formwork type on ultimate bearing capacity of UHPC-NC composite specimens

结构受力分析的基础，为了得到界面黏结-滑移本构曲线，需要获得 UHPC 界面某点的剪应力和滑移量。常用的方法是通过沿黏结长度方向在 UHPC 板上粘贴应变片，根据相邻应变片的读数计算出局部黏结剪应力，再利用应变片的读数采用叠加的方法得到局部滑移量的大小，进而求得界面的黏结-滑移关系试验曲线，图 18 为 UHPC 混凝土界面受力示意图。

局部黏结剪应力 (τ_i) 可按照图 18 微段单元受力平衡得^[18]

$$\tau_i = \frac{E_u t_u (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{\Delta d} \tag{1}$$

其中： E_u 为 UHPC 的弹性模量； t_u 为 UHPC 的计算厚度； ε_i 为 i 截面处的应变值； Δd 为 UHPC 板上相邻两个应变片的距离。



τ_x is the shear stress; S_c is the concrete slip amount; S_u is the UHPC slip amount; σ_c is the stress on concrete; σ_u is the stress on UHPC

图 18 UHPC/NC 单元体受力示意图

Fig. 18 Stress diagram of UHPC/NC unit body

试件各截面处滑移量采用姜德文等^[19]提出的参考公式：

$$S_i = \left[\frac{(\varepsilon_0 + \varepsilon_i)}{2} + \sum_{j=1}^{i-1} \varepsilon_j \right] \Delta x \tag{2}$$

其中： S_i 为*i*点滑移量； ε_0 为自由端*X*=0处的应变值； ε_i 为*i*点处应变值； ε_j 为*j*点处应变； Δx 为相邻应变片之间距离。根据式(1)、式(2)可以得到*i*截面位置处的局部剪应力和滑移值，因为本文试件破坏为脆性破坏，所以本文本构模型应为线性。

图19是试件HT-10-30界面黏结-滑移的示意图。其余试件界面黏结-滑移拟合的结果如下图20所示。结合已有文献^[20]，构建出其UHPC-NC界面黏结-滑移本构模型，如下式所示：

$$\begin{cases} \tau = \frac{k_0 \tau_{\max} S}{S_0} & (S \leq S_0) \\ \tau = 0 & (S > S_0) \end{cases} \tag{3}$$

其中： $\tau_{\max}$ 为最大剪应力； S_0 为 $\tau_{\max}$ 所对应的滑移量； k_0 为常数值； S 为滑移量； τ 为剪应力。由式(3)拟合可得 k_0 值，如表5所示。

同理，对所有试件的黏结-滑移曲线进行绘

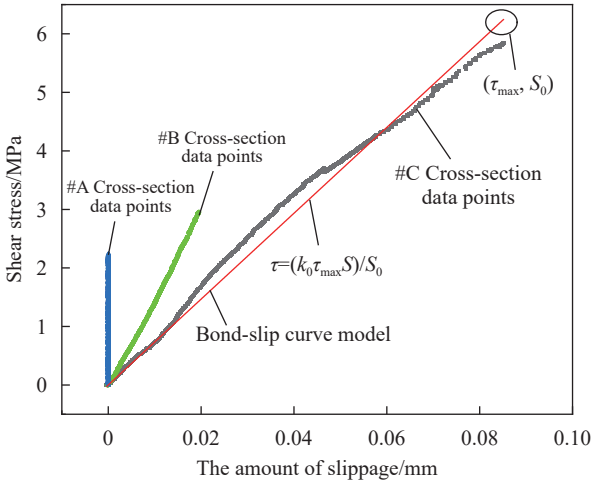


图19 HT-10-30试件界面黏结-滑移曲线拟合示意图

Fig. 19 Fitting diagram of the interface bond-slip curves for No. HT-10-30 specimens

制，并将所得参数列于表5。可知，各复合试件黏结-滑移曲线斜率(拟合系数 k_0)取值范围为0.960~1.166。

为了进一步构建模板表面处理后复合试件界面黏结-滑移本构模型，在式(3)基础上引入UHPC模板不同表面处理黏结-滑移影响系数 $\varphi(\tau)$ 、 $\varphi(S)$ ，

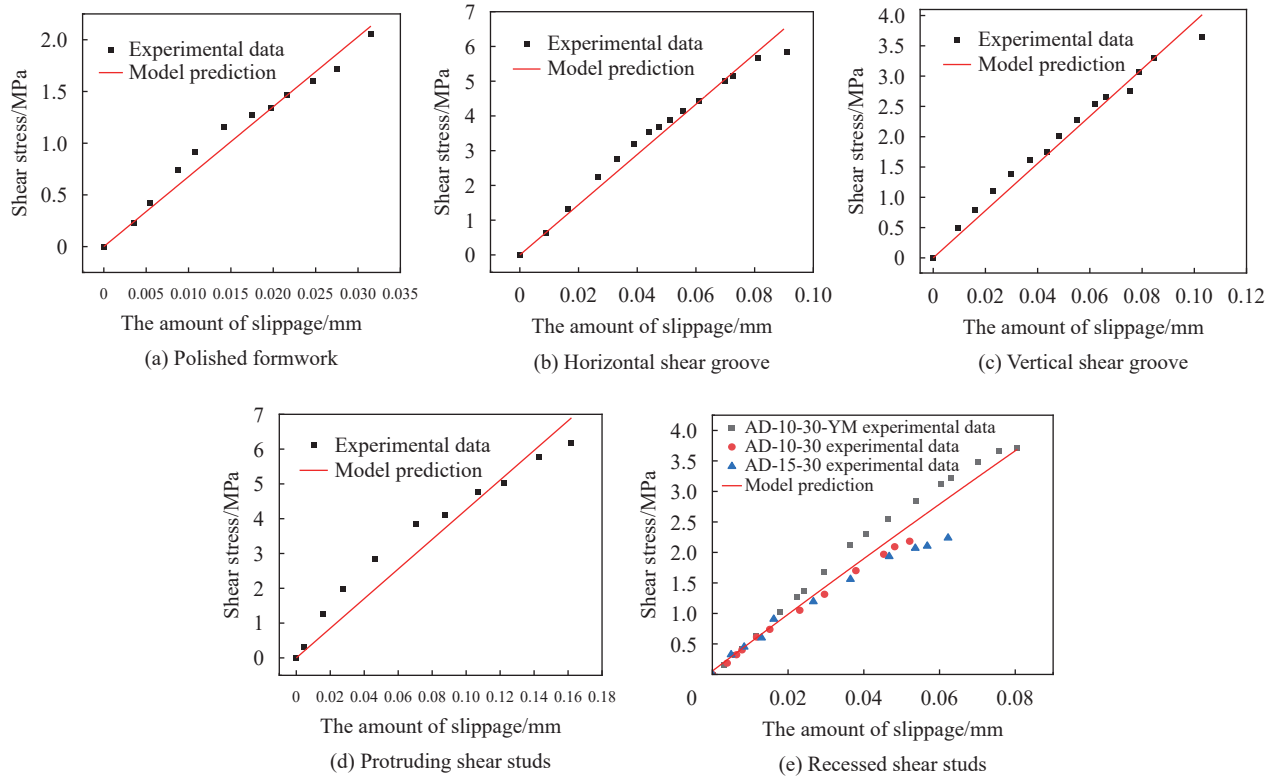


图20 各UHPC-NC黏结试件#C截面处各类模板试验值与模型计算值结果对比

Fig. 20 Comparison between test value and model calculated value at #C section of each UHPC-NC composite specimen

表 5 UHPC-NC 黏结试件黏结-滑移曲线参数

Table 5 Bond slip curve parameters for UHPC-NC bonded specimens

Specimen number	$\tau_{\max}$ /MPa	S_0 /mm	k_0
PB-0-30	2.055	0.032	0.960
ST-10-30	3.640	0.103	1.102
HT-10-30	5.828	0.093	1.124
AD-10-30-YM	3.720	0.081	1.109
TD-10-30	5.917	0.162	1.166
AD-15-30	2.239	0.062	1.085
AD-10-30	2.183	0.052	1.040

Notes: $\tau_{\max}$ is the maximum shear stress; S_0 is the corresponding slip amount; k_0 is a constant value.

其计算公式分别如下式所示，通过计算可得表 6 数据：

$$\varphi(\tau) = \frac{\tau_{(\max,i)}}{\tau_{(\max,0)}} \tag{4}$$

$$\varphi(S) = \frac{S_{(\max,i)}}{S_{(\max,0)}} \tag{5}$$

其中： $\tau_{(\max,i)}$ 为 UHPC 表面处理过试件最大剪应力； $\tau_{(\max,0)}$ 为 UHPC 表面未处理过试件最大剪应力。

表 6 UHPC-NC 黏结试件黏结-滑移综合影响系数

Table 6 Bond-slip comprehensive influence coefficient of UHPC-NC composite specimens

Specimen number	$\tau_{\max}$ /MPa	S_0 /mm	$\varphi(\tau)$	$\varphi(S)$
PB-0-30	2.055	0.032	1.000	1.000
ST-10-30	3.640	0.103	1.771	3.219
HT-10-30	5.852	0.093	2.848	2.906
AD-10-30-YM	3.720	0.081	1.810	2.531
TD-10-30	5.917	0.162	2.879	5.063
AD-15-30	2.239	0.062	1.090	1.938
AD-10-30	2.183	0.052	1.062	1.625

Notes: $\varphi(\tau)$ is the ratio of the maximum shear stress of UHPC specimens with surface treatment to that of UHPC specimens without surface treatment; $\varphi(S)$ is the ratio of the corresponding slip amount of UHPC specimens with surface treatment to that of UHPC specimens without surface treatment.

由表 6 中的数据可知，本文 UHPC 模板表面处理后试件黏结-滑移综合影响系数均大于 1，故对 UHPC 表面进行凸或凹剪力钉、横或竖式剪力槽处理均能提高 UHPC-NC 表面的黏结性能，且采用 TD-10-30 试件黏结-滑移综合影响系数增长幅度最大，故推荐对 UHPC 模板表面采用凸式剪力钉处理。

试验所得剪应力-滑移量分布曲线与模型计算所得分布曲线的吻合良好。因此可以用此模型来分析 UHPC 模板-NC 间界面粘结性能。

相比文献 [21-23] 中 UHPC-NC 界面抗剪性能和黏结-滑移试验结果，本文利用剪力钉或剪力槽作为界面，界面制作简单，材料用量更便宜，且本文的抗剪性能更强，黏结性能更好，滑移量更小(图 21)，大约只有传统 L 型构件的 1/6，更具有工程应用和进一步推广的潜力。

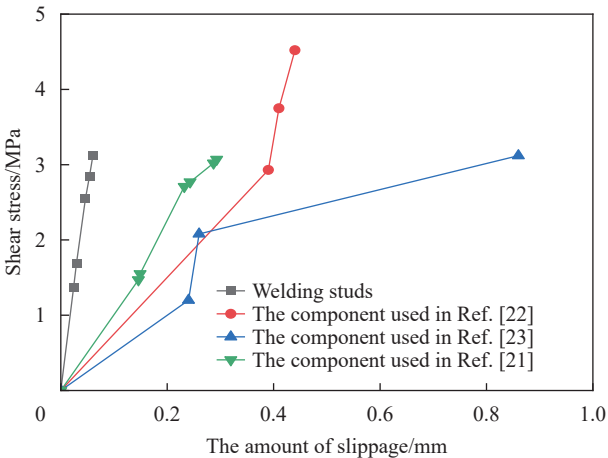


图 21 相近应力下不同 UHPC-NC 黏结试件滑移量

Fig. 21 Slip amount of different UHPC-NC composite specimens under similar stress

4 结论与展望

(1) 与带光滑模板的复合试件相比，模板表面

进行凸式或凹式剪力钉、横式或竖式剪力槽处理后均可以提高超高性能混凝土 (UHPC)-普通混凝土 (NC) 界面黏结性能。注意的是, 模板表面处理形式对界面抗剪性能增强效果具有差异性, 其效果由强到弱依次是凸式剪力钉、横式剪力槽、竖式剪力槽及凹式剪力钉处理。同时综合黏结-滑移性能和极限承载力来看, 采用凸式剪力钉的构件极限承载力最高可达 355 kN, 远高于采用凹式剪力钉和横式剪力槽的构件, 可见如果模板表面采用凸式剪力钉更有利于提高抗剪性能, 在实际工程应用中也能更好的保护结构稳定性, 尤其是对于桥梁和高层建筑的模板有重要意义。

(2) 对于模板表面凹式剪力钉处理来看, UHPC-NC 界面黏结性能随凹式剪力钉孔深的增加而增强; 此外, UHPC 永久模板用作底模时, 其 UHPC-NC 界面黏结性能要好于用作侧模的试件。

(3) 考虑模板表面处理方式的影响, 建立了 UHPC-NC 界面黏结-滑移模型。通过研究 UHPC-NC 界面黏结-滑移模型, 有利于理解在 UHPC 混凝土在荷载作用下各个界面的协同工作性能, 提高结构整体的承载能力和延性。有助于保障结构在极端荷载下的性能和安全性。

(4) 在后续将要开展的试验中, 将进一步研究往复荷载下 UHPC-NC 复合试件界面黏结性能及其构造设计; 此外, 从构件层面研究组合结构的受力性能, 进一步分析 UHPC-NC 界面黏结-滑移本构关系。

参考文献:

- [1] 王德弘, 沈彤, 鞠彦忠, 等. 后浇普通混凝土与预制 UHPC 的黏结受剪性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(Suppl.2): 411-419.
- WANG Dehong, SHEN Tong, JU Yanzhong, et al. Study on the shear properties of post-cast ordinary concrete and precast UHPC[J]. Journal of Architecture, 2020, 41 (Suppl.2): 411-419(in Chinese).
- [2] 聂建国, 陈必磊, 陈戈, 等. 钢筋混凝土叠合板的试验研究 [J]. 工业建筑, 2003, 33(12): 43-46.
- NIE Jianguo, CHEN Bilei, CHEN Ge, et al. Experimental study on shear behavior of RC laminated slabs[J]. Industrial Construction, 2003, 33(12): 43-46(in Chinese).
- [3] 吴方伯, 刘彪, 邓利斌, 等. 预应力混凝土叠合空心楼板静力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(2): 10-19.
- WU Fangbo, LIU Biao, DENG Libin, et al. Experimental study of static behavior of prestressed concrete composite hollow floors[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(2): 10-19(in Chinese).
- [4] 李国强, 黄小坤, 田春雨, 等. 配置组合封闭箍筋的钢筋混凝土叠合梁受扭性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(3): 116-122.
- LI Guoqiang, HUANG Xiaokun, TIAN Chunyu, et al. Experimental study on shear performance of reinforced concrete superposed beams with overlapping hoops[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(3): 116-122(in Chinese).
- [5] 章红梅, 吕西林, 段元锋, 等. 半预制钢筋混凝土叠合墙 (PPRC-CW) 非线性研究 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(Suppl.2): 93-100.
- ZHANG Hongmei, LYU Xilin, DUAN Yuanfeng, et al. Non-linear behavior of prefabricated reinforced concrete composite walls (PPRC-CW)[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Suppl.2): 93-100(in Chinese).
- [6] 张大长, 郭雁, 李布辉. 外壳预制核心现浇装配式 T 型钢筋混凝土节点抗震性能试验研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(1): 156-162.
- ZHANG Dachang, GUO Yan, LI Buhui. Experimental studies on aseismic performance of T-shape fabricated concrete joints with precast external shell and cast-in-place core concrete[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 156-162(in Chinese).
- [7] 郑文忠, 吕雪源. 活性粉末混凝土研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 44-58.
- ZHENG Wenzhong, LYU Xueyuan. Literature review of reactive powder concrete[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 44-58(in Chinese).
- [8] 鞠彦忠, 王德弘, 李秋晨, 等. 钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学性能的影响 [J]. 实验力学, 2011, 26(3): 254-260.
- JU Yanzhong, WANG Dehong, LI Qiuchen, et al. On the influence of steel fiber volume fraction on mechanical properties of reactive powder concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(3): 254-260(in Chinese).
- [9] ALBERTI M G, ENFEDAQUE A, GALVEZ J C. Fibre reinforced concrete with a combination of polyolefin and steel-hooked fibers[J]. Composite Structures, 2017, 171: 317-325.
- [10] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [11] DIAB A M, ELMOATY A E M, ELDIN M R. Slant shear bond strength between self-compacting concrete and old concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 130: 73-82.
- [12] HE Y, ZHANG X, HOOTON R D, et al. Effects of interface roughness and interface adhesion on new-to-old concrete bonding[J]. Construction and Building Materials, 2017,

151: 582-590.

[13] 王楠, 徐世烺. 超高韧性水泥基复合材料与既有混凝土黏结性能 [J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(3): 317-323.
WANG Nan, XU Shilang. Bonding performance between ultra-high toughness cementitious composites and existing concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(3): 317-323(in Chinese).

[14] MUNOZ M A C, DEVIN A M A, THERESA P M A, et al. Bond performance between ultrahigh-performance concrete and normal-strength concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(8): 04014031.

[15] BASSAM A T, ABU B H B, MEGAT M A, et al. Microstructural analysis of the adhesion mechanism between old concrete substrate and UHPFC[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2014, 28(8): 1846-1864.

[16] 周尚猛, 王伟, 郝聪龙. UHPC-NC 组合界面连接及抗剪性能研究 [J]. *铁道建筑*, 2021, 61(5): 10-13.
ZHOU Shangmeng, WANG Wei, HAO Conglong. Study on UHPC-NC combined interface connection and shear resistance[J]. *Railway Construction*, 2021, 61(5): 10-13(in Chinese).

[17] 王鹏刚, 赵明海, 田砾, 等. 预制键槽式 UHPC 与后浇混凝土界面粘结抗剪性能 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(5): 2633-2644.
WANG Penggang, ZHAO Minghai, TIAN Li, et al. Interface shear resistance of precast keyway UHPC and post-cast normal concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(5): 2633-2644(in Chinese).

[18] 潘毅, 任宇, 郭瑞, 等. FRP 网格-ECC 复合层加固混凝土界面量化处理及黏结性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2024, 45(5): 207-217.
PAN Yi, REN Yu, GUO Rui, et al. Experimental study on quantitative treatment and bonding properties of reinforced concrete reinforced by FRP grid-ECC composite layer[J]. *Journal of Building Structures*, 2024, 45(5): 207-217(in Chinese).

[19] 姜德文, 黄海林, 刘光伟, 等. 铝合金板混凝土界面的粘结滑移性能及其本构关系 [J]. *土木与环境工程学报 (中英文)*, 2020, 42(3): 80-89.
JIANG Dewen, HUANG Hailin, LIU Guangwei, et al. Bond-slip properties and constitutive relationship of aluminum alloy slab concrete interface[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(3): 80-89(in Chinese).

[20] 董磊, 赵坤, 靳文强, 等. 硫酸盐干湿循环作用下 CFRP-黏土砖界面粘结性能退化规律分析 [J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(12): 4290-4299.
DONG Lei, ZHAO Kun, JIN Wenqiang, et al. Analysis on the degradation of interfacial bonding performance of CFRP-clay bricks under the action of sulfate drying-wet cycle[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(12): 4290-4299(in Chinese).

[21] 万志勇, 陈健平, 贺绍华, 等. UHPC-NC 界面抗剪性能试验研究 [J]. *中外公路*, 2024, 44(4): 138-147.
WAN Zhiyong, CHEN Jianping, HE Shaohua, et al. Experimental study on shear performance of UHPC-NC interface[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2024, 44(4): 138-147(in Chinese).

[22] 程文强, 耿健, 柳根金, 等. 界面处理对预制 UHPC 与现浇 NC 界面抗剪性能的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(1): 76-83.
CHENG Wenqiang, GENG Jian, LIU Genjin, et al. Effect of interfacial treatment on shear properties of precast UHPC and cast-in-place NC[J]. *Journal of Building Materials*, 2024, 27(1): 76-83(in Chinese).

[23] 周建庭, 胡天祥, 杨俊, 等. 键槽构造 UHPC-NC 界面黏结性能试验研究 [J]. *材料导报*, 2021, 35(16): 16050-16057, 16064.
ZHOU Jianting, HU Tianxiang, YANG Jun, et al. Experimental investigation on bonding behavior of UHPC-NC interface in keyway structure[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(16): 16050-16057, 16064(in Chinese).