



考虑粗糙度和尺寸效应的 UHPC-NC 界面黏结性能研究

欧阳波¹, 李迅², 王成², 彭建新¹

(1. 长沙理工大学土木与环境工程学院; 桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 长沙 410114;

2. 中交路桥华南工程有限公司, 广东 中山 528400)

摘要:新浇筑 UHPC 与既有混凝土间的黏结性能决定了加固结构的可靠程度, 而界面粗糙度和尺寸效应对 UHPC-NC 的黏结强度有着显著的影响。基于 UHPC-NC 界面黏结破坏机理提出界面极限剪切强度的理论模型; 通过总结和筛选已有的直剪试验数据, 研究不同界面粗糙度和界面高度下 UHPC-NC 结合面的剪切黏结性能。对试验数据和结果分析发现: UHPC-NC 界面黏结强度随粗糙度的增大呈增强趋势, 界面粗糙度大于 3.0 后, 构件易发生基体破坏; 在相同粗糙度下, 界面黏结强度随界面高度的增加出现先增强后降低的变化, 相比 100 mm 的界面高度, 250 mm 界面高度的黏结强度提高了 34.28%, 而界面高度 440 mm 相较于 250 mm 的黏结强度大幅降低了 23.55%, 界面高度从 100 mm 增加到 440 mm, 平均剪切刚度下降了 54.09%; 最后基于试验数据和分析结果, 建立了考虑粗糙度和界面高度的 UHPC-NC 界面黏结强度模型, 与现有剪切模型和外部数据对比验证了模型的有效性。

关键词:破坏机理; 界面黏结性能; 界面粗糙度; 尺寸效应; 黏结强度模型

中图分类号: TU528.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Study of adhesion properties of UHPC-NC interface considering roughness and size effects

OU Yangbo¹, LI Xun², WANG Cheng², PENG Jianxin¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering; Key Laboratory of Bridge Engineering Safety Control, Ministry of Education, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, P. R. China; 2. China

Communications Construction Road & Bridge Engineering Co., Ltd., Zhongshan 528400, Guangdong, P. R. China)

Abstract: The bond performance between newly cast UHPC and existing concrete determines the reliability of the reinforced structure, while interfacial roughness and size effects significantly influence the bond strength between UHPC and existing concrete (NC). Based on the bonding failure mechanism at the UHPC-NC interface, a theoretical model for the ultimate shear strength at the interface was proposed. By summarizing and selecting existing direct shear test data, the shear bonding performance of the UHPC-NC interface under

收稿日期: 2025-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(52378125)

作者简介: 欧阳波(2001-), 男, 主要从事混凝土桥梁加固研究, E-mail: oyb_csust@163.com。

彭建新(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: jianxinpeng@csust.edu.cn。

Received: 2025-09-15

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52378125)

Author brief: OU Yangbo (2001-), main research interest: reinforcement of concrete bridges, E-mail: oyb_csust@163.com.

PENG Jianxin (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: jianxinpeng@csust.edu.cn.

different interface roughness and interface height conditions was investigated. Analysis of experimental data and results indicates: UHPC-NC interface bond strength increases with rising roughness; however, when roughness exceeds 3.0, components become prone to matrix failure. At the same roughness level, the interfacial bond strength first increases and then decreases with increasing interfacial height. Compared to a 100 mm interfacial height, the bond strength at 250 mm increases by 34.28%, while at 440 mm, it significantly decreases by 23.55% relative to 250 mm. The average shear stiffness decreased by 54.09% when the interface height increased from 100 mm to 440 mm. Finally, based on experimental data and analysis results, a UHPC-NC interface bond strength model considering roughness and interface height was established, the model's validity was verified through comparison with existing shear models and external data. The interfacial bonding performance and bonding strength model of UHPC-NC studied in this paper can provide reference for engineering structural design and application.

Keywords: damage mechanism; interface adhesion performance; interface roughness; size effect; bond strength model

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)因其卓越的性能,如高强度、高抗渗透性和高耐久性,常用于加固桥梁工程、海港建筑、水工结构等混凝土结构,其中最常见的方法是将 UHPC 浇筑在既有普通混凝土(Normal Concrete, NC)上。加固界面黏结强度受到界面内聚力、摩擦力和机械咬合力等因素的影响,这些因素的影响程度取决于加固的具体工艺,故新旧混凝土界面通常成为加固结构中的薄弱位置^[1]。在加固结构的实际受力中,如桥梁梁体腹板,新旧材料界面将产生显著的剪应力集中,其破坏往往表现为沿界面的滑移或剥离,而这种滑移或剥离主要是由剪切力主导的。因此,直剪试验通过直接施加平行于界面的剪切力,这种面内剪切作用导致的试件破坏结果直接反映了界面的黏结性能^[2]。

已有许多学者对 UHPC-NC(超高性能混凝土-普通混凝土)界面剪切黏结强度的影响因素进行了研究,如界面粗糙度、剪力钉、NC 基体强度、UHPC 养护温度等^[3-6],此外,方志等^[7]、He 等^[8]和 Pan 等^[9]等发现 UHPC-NC 界面的黏结性能均表现出明显的尺寸效应,剪应力沿剪切面的非线性且不均匀导致极限抗剪强度随剪切面高度的增加而出现非线性变化。大量直剪试验^[10-17]表明,结合面粗糙度会对 UHPC-NC 界面黏结性能产生显著的影响,吴玥等^[18]、张阳等^[19]通过直剪试验,研究了 NC 表面光滑、凿毛、露筋、刻槽、钻孔和植筋等 UHPC-NC 界面的抗剪性能,发现 NC 表面粗糙度的改变会引起破坏模式的变化。Harris 等^[20]通过试验证明了在对现有混凝土基体表面进行粗糙化处理后,界面抗剪强度高于现有混凝土基体的剪切强度。Zhang 等^[21]通过 Z 型剪切试验研究了粗糙度密度、粗糙度、粗糙度处理对界面剪切强度的影响,发现界面的粗糙度密度

对剪切强度的影响最大,其次是粗糙度,粗糙度处理方法的影响最小。

在理论研究方面,有学者对界面黏结强度预测模型进行了研究,Zanotti 等^[22]通过推出剪切试验验证了构件尺寸和纤维的影响,分析了不同预测模型之间所计算界面内聚强度和界面摩擦角的差别。Gao 等^[23]考虑纤维微抗拉强度和 UHPC 在压缩区和的贡献,提出了有无腹板配筋的 UHPC 加固梁承载力的计算公式。Chen 等^[24]通过黏结强度直剪试验,研究钢纤维掺量、界面粗糙度和 NC 强度对剪切性能的影响,建立了预制 UHPC 和现浇 NC 的界面剪切强度计算方法并验证了其有效性。

有关 UHPC-NC 界面的剪切试验已相当多,证明了界面粗糙度对 UHPC-NC 界面黏结性能的显著影响。各剪切试验中的构件界面尺寸差异较大,而有关尺寸效应对界面黏结性能的影响研究却相对有限,且大部分研究仅聚焦于单一因素,缺乏对界面粗糙度和构件尺寸等多因素影响下 UHPC-NC 的界面黏结性能研究。有关黏结界面剪切破坏的理论研究也相对有限,仅有少部分学者基于试验结果对黏结强度模型进行了研究。赵志方等^[25]对新老普通混凝土的界面破坏进行研究,利用极限分析的上限定理推出了新旧普通混凝土的黏结剪切强度上限解,但未知数较多导致公式难以应用。笔者在此研究基础上提出 UHPC-NC 界面的破坏机制,基于不连续曲面理论对黏结界面进行塑性极限分析,并提出了简化型黏结强度极限值的表达式。考虑到粗糙度对界面黏结性能产生的影响以及实际工程中不同 NC 基体尺寸带来的尺寸效应,通过总结和分析已有的直剪试验的界面破坏数据,研究界面粗糙度和构件尺寸对 UHPC-NC 界面黏结性能的影响,提出考虑界面粗糙度和尺寸效应的界面黏结强

度的计算模型。

1 UHPC-NC 界面破坏机制

从大部分 UHPC 加固 NC 梁的剪切试验结果^[2,18-19]来看,低于 3.0 mm 界面粗糙度的 UHPC-NC 破坏面多出现在 NC 基体与 UHPC 的黏结界面上,也有少部分表现出 NC 过渡区域的部分界面破坏,伴随着混凝土碎屑脱落或一层薄薄的 NC 块粘附在 UHPC 上。针对该类典型的界面破坏形式,赵志方等^[25]通过新老混凝土的直接剪切试验进行了验证,并提出了 NC-NC 的剪切破坏机理,以新旧混凝土黏结层的相对位移来描述界面滑移,笔者在此基础上提出 UHPC-NC 界面的破坏机制,区别体现于界面剂与黏结强度表达式的处理上。所提出的 UHPC-NC 界面的破坏机制如图 1 所示。

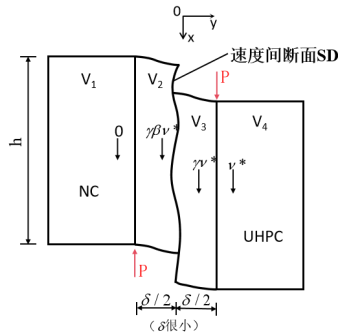


图 1 UHPC-NC 界面剪切破坏机制 (文献[25])

Fig.1 UHPC-NC interface shear damage mechanism (Reference[25])

该破坏模型由无剪切变形的 NC 基体 (V_1)、NC 粘连界面层 (V_2)、UHPC 粘连界面层 (V_3)、无剪切变形的 UHPC (V_4) 和速度间断面 SD 组成。根据 NC-UHPC 的界面破坏形态,作如下假设:

1) 混凝土为理想的刚塑性材料,NC 表示混凝土基体,UHPC 为加固材料;

2) 结构在达到极限状态时由 4 部分组成, V_1 、 V_4 为刚体, V_2 、 V_3 为塑性体;

3) SD 为界面剂层,也为速度间断面,厚度为零, γ 和 β 为塑性体 V_2 和 V_3 的速度折减系数, $0 < \gamma \leq 1, 0 \leq \beta < 1$;

4) 在破坏模型中的运动许可的应变速率场 (简称机动场 $\dot{\epsilon}_{ij}^*$) 满足条件:在塑性区的几何条件满足 $\dot{\epsilon}_{ij}^* = 0.5(\dot{\nu}_{i,j}^* + \dot{\nu}_{j,i}^*)$,即应变速率张量 $\dot{\epsilon}_{ij}^*$ 可由速度场表示;速度边界满足边界条件 $\dot{\nu}_i^* = \dot{\bar{\nu}}_i$;满足结构体积不可压缩条件 $\dot{\epsilon}_{ii}^* = 0$ 。

速度场 $\dot{\nu}_i^*$ 可以不连续,但在速度间断面上的法向速度连续。由塑性极限分析的上限定理可以求

出剪力 P ,如式(1)所示。

$$P\dot{\nu}^* = \int_V D(\dot{\epsilon}_{ij}^*) dV + \sum \int_{S_D} \tau_s^0 [\dot{\nu}_i^*] dS \quad (1)$$

式中: $D(\dot{\epsilon}_{ij}^*)$ 为界面层能量耗散率密度; τ_s^0 为速度间断面上的剪应力; $D(\dot{\epsilon}_{ij}^*) = \sigma_{ij}^* \dot{\epsilon}_{ij}^*$, $V = V_2 + V_3$ 。

屈服条件使用 Drucker-Prager 模型,见式(2),该模型作为一个连续体模型,非常适合描述这种薄层区域的整体屈服行为。

$$f(I_1, J_2) = mI_1 + (J_2)^{1/2} - n = 0 \quad (2)$$

式中: m 和 n 均为正的常数; I_1 为应力张量的第一不变量; J_2 为应力偏张量的第二不变量。

根据图 1 的破坏模型,间断面 SD 的速度间断值为: $[\dot{\nu}_i^*] = \gamma\dot{\nu}^* - \beta\dot{\nu}^* = (1 - \beta)\gamma\dot{\nu}^* = \frac{1 - \beta}{1 + \beta}\dot{\nu}^*$ 。

界面黏结强度的上限解的进一步推导过程可参考文献[25],上限解 τ 的表达式如式(3)所示。

$$\tau_u = \left[\frac{1}{\sqrt{6a_2^2 + 1}} (J_2)_{V_2}^{1/2} + \frac{1}{\sqrt{6a_3^2 + 1}} (J_2)_{V_3}^{1/2} \right] \frac{\beta}{1 + \beta} + \tau_s^0 \frac{1 - \beta}{1 + \beta} \quad (3)$$

由于式(2)引入了一个与静水压力相关的线性项 I_1 ,使得式(3)中的系数难以确定,屈服由剪应力主导,当静水压力较小时,式(3)中的 a_2 和 a_3 近似为 0。最后,式(3)中 τ_u 表达式简化为公式(4)。

$$\tau_u = \frac{\sqrt{3}}{3} (\sigma_{s1} + \sigma_{s2}) \frac{\beta}{1 + \beta} + \tau_s^0 \frac{1 - \beta}{1 + \beta} \quad (4)$$

τ_s^0 取库伦剪破条件,即 $\tau_s^0 = f(C, \sigma_{s1, s2}, \mu)$,其中 $\sigma_{s1, s2}$ 分别为 UHPC 和 NC 的抗压强度, C 为内聚力, μ 为摩擦系数。由于 UHPC 与 NC 基体的抗压强度已知,则 τ_s^0 的表达式可近似简化为 $\tau_s^0 = (\sigma_{s1} + \sigma_{s2}) f(C, \mu)$,因此,式(4)转换为式(5)。

$$\tau_u = (\sigma_{s1} + \sigma_{s2}) \left[\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{\beta}{1 + \beta} + f(C, \mu) \frac{1 - \beta}{1 + \beta} \right] \quad (5)$$

在式(5)中, $f(C, \mu)$ 是与摩擦系数 μ 和内聚力 C 有关的函数, C 是与界面黏结剂有关的综合黏聚力,包括界面间的化学胶结力^[25],摩擦系数 μ 受界面粗糙度水平影响^[26],粗糙度的增加会增强界面机械连锁力,从而提高界面摩擦水平。由图 1 的 UHPC-NC 界面剪切破坏机制可知,在界面达到极限剪切强度之前,UHPC-NC 界面会发生滑移,滑移导致界面裂纹的产生,从而造成界面黏结剂的化学胶结力消失,因此,在界面到达极限滑移时,可以忽略内聚力 C 对 UHPC-NC 界面黏结强度的影响,此时

$f(C, \mu)$ 变成只有一个自变量的函数, 即界面粗糙度水平。从文献[7-9]开展的 Z 形新旧混凝土试件直剪试验的结果来看, 新旧混凝土界面的黏结性能均表现出明显的尺寸效应, 界面粗糙度和剪应力沿剪切面的非线性且不均匀导致极限抗剪强度随剪切面高度的增加而出现非线性变化, 且考虑到实际的 UHPC 加固工程中, UHPC-NC 黏结界面尺寸往往有较大差别, 这些影响表现为机械性能指标随着结构尺寸的增加而降低^[8-9], 故在式(5)中需考虑尺寸效应行为以完善 UHPC-NC 界面极限剪切强度的理论模型。

2 已有试验基础与结果分析

2.1 试验方式与材料属性

试验数据均来源于已完成的 UHPC-NC 界面抗剪试验, 对材料属性进行了筛选控制, 试验方式为 Z 形剪切和双面剪切, 具体见图 2 所示, 这两种方法是常见的界面剪切方法, 试验结果具有一致性和对比性^[22]。对固化后的现浇 NC 基体表面进行凿毛, 形成特定粗糙度的黏结界面, 再浇筑 UHPC 并养护形成试件。固化时间 60 d 以上, 养护 7d 以上然后进行测试。外荷载通过试件顶部的钢板来向下传递, Z 形剪切的荷载中心线对齐黏结界面, 双面剪切的荷载中心对齐 NC 基体的中心, 界面滑移通过 LVDT 测得。相关材料参数如表 1 所示, NC 和 UHPC 的抗压强度实测值如图 3 所示。

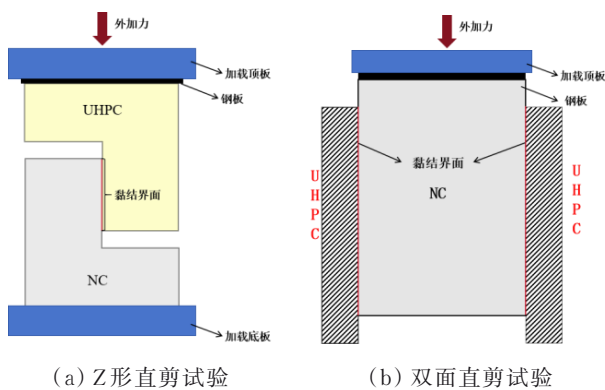


图 2 UHPC-NC 界面剪切试验方式

Fig.2 UHPC-NC interface shear test method

表 1 材料参数和试验方式

Table1 Material parameters and test methods

试验数据源	试验设置	界面处理 方式	NC 强度 等级	UHPC 强度 等级
[8, 10-12, 18]	Z 形	凿毛	C50	U120
[13-17]	双面	凿毛	C50	U120

界面粗糙度通过式(6)填砂法^[27]测量表面的平均宏观纹理深度来获取。

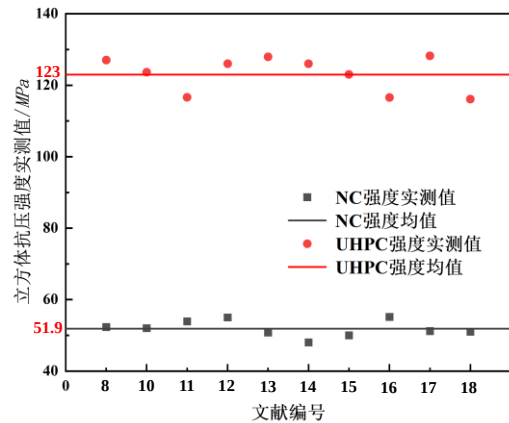


图 3 混凝土强度实测值

Fig.3 Actual measured concrete strength

$$R_h = \frac{V_s}{A_s} \quad (6)$$

式中: V_s 为沙子的体积; A_s 为 UHPC-NC 黏结界面表面积。

需要说明的是, 由于黏结界面的剪应力沿宽度方向分布较均匀^[28], 尺寸效应主要原因在于界面高度的不同, 所以试件的黏结宽度存在一定可忽略的差别。根据文献[15, 19]的研究结果, NC 基体强度过低(低于 C50)易造成 NC 基体破坏, 故选取的所有试件的 NC 强度等级为 C50, UHPC 的强度等级为 U120, 钢纤维含量为 2%, 试验结果均为界面破坏。由图 3 可知, NC 的立方体抗压强度实测平均值为 51.9 MPa, 标准差为 2.25 MPa, 变异系数 CV_1 为 4.3%; UHPC 实测平均值为 123.1 MPa, 标准差为 4.89 MPa, 变异系数 CV_2 为 3.9%, NC 与 UHPC 强度的 CV 值均远低于 10%, 属于低离散性范畴, 且当发生界面破坏时, 黏结强度尚未达到 NC 或 UHPC 的强度, 此时的界面黏结强度主要取决于界面间粗糙度提供的机械咬合力, 混凝土的强度等级确保了破坏发生于界面而非加固层内部, 因此, 尽管各试件中材料强度在狭窄范围内波动, 但不影响界面粗糙度等参数对界面性能的影响规律。对于后浇 UHPC, 钢纤维对于界面处的桥接作用可忽略^[29], 故钢纤维的选取对界面黏结强度的影响可忽略。

2.2 试验结果分析

选取的所有试件破坏形态均为典型的 UHPC-NC 界面破坏, 加载过程中未出现 UHPC 或 NC 试件表面裂缝, 达到峰值荷载时黏结界面顶部突然开裂并迅速延伸贯穿至界面底部, 整个界面从开裂到破坏的过程极短, 为明显的脆性破坏。破坏后的 NC 基体黏结表面基本保持原样, 少数 UHPC 试件表面残留有极少量的 NC, 从试验结果来看, 该现象随着粗糙度的提高而愈发明显。当粗糙度大于 3.0 时,

界面的破坏形态逐渐演变成界面-NC破坏和NC基体破坏,故选取界面粗糙度为0~3.0。通过压力传感器测得构件的破坏荷载 P ,界面极限黏结强度 $\tau_u=P/A$, A 为黏结界面面积,界面极限滑移为界面

极限黏结强度对应的滑移量。根据黏结界面高度对表1中各文献的试件进行分组,各组试验结果见表2和图4, τ_u 为界面极限黏结强度; s_u 为界面极限滑移量; K 为剪切刚度,其值等于 τ_u 与 s_u 的比值。

表 2 各分组的试验结果
Table 2 Test results for each subgroup

试件分组	数据来源	粗糙度/mm	τ_u /MPa	s_u /mm	K /(MPa/mm)	$\bar{K}$ /(MPa/mm)	界面高度 h /mm
1	[8]	0.25	2.96	0.191	15.50	14.99	100
	[10]	0.64	3.3	0.210	15.71		
	[10]	1.29	5.12	0.267	14.67		
	[8]	3	5.66	0.455	14.11		
2	[13]	0.2	2.6	0.193	13.47	13.50	150
	[14]	0.25	3.1	0.201	13.19		
	[13]	0.35	3.5	0.251	13.94		
	[14]	0.66	3.92	0.305	12.85		
	[14]	1.12	5.1	0.368	13.86		
	[14]	1.32	5.4	0.395	13.67		
	[13]	2.2	6.2	0.458	13.54		
3	[12]	0	1.55	0.146	12.30	13.14	200
	[11]	1.54	5.82	0.293	13.57		
	[11]	2.54	6.55	0.472	13.88		
	[8]	3	6.28	0.491	12.79		
4	[18]	0	2	0.236	10.15	11.23	250
	[15]	1.8	6.55	0.45	11.91		
	[18]	3.0	7.6	0.550	11.64		
5	[8]	3.0	6.37	0.587	9.27	9.27	330
6	[17]	0	1.20	0.254	6.03	6.34	410
	[16]	2.10	3.17	0.485	6.54		
	[17]	2.12	3.29	0.510	6.45		
7	[8]	3.0	5.81	0.630	6.59	6.59	440

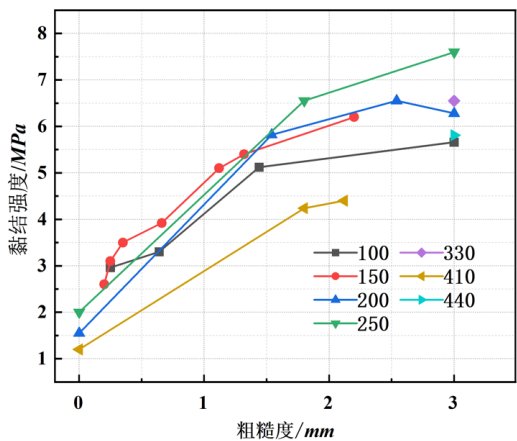


图 4 黏结强度曲线
Fig.4 Bonding Strength Curve

2.3 粗糙度水平影响分析

由图4可以看出,界面黏结强度随粗糙度的增大呈总体增强趋势,在光滑状态下(界面粗糙度为0),界面黏结强度主要靠过渡区分子间作用力(范德华力)提供,机械咬合力基本为0,黏结强度在1~

2之间。随着暴露的粗骨料高度的增加,界面间机械咬合力显著提高,粗糙度的增加使得界面黏结强度值呈近似线性增大,这个趋势随着粗糙度增加到1.5~2.0才停止,在此过程中黏结强度平均提高了172.71%。但在粗糙度大于2时,尽管强度仍在随粗糙度的增加而增大,但增长曲线明显放缓,相比中粗糙度(1.5~2.0)对应的黏结强度,在粗糙度达到3.0时,黏结强度仅平均提升了11.30%,甚至在尺寸高度为200 mm的试件中还出现了黏结强度随粗糙度的增加而下降的情况,这是因为凿毛的粗糙度处理方式在高程度暴露粗骨料的同时,可能会导致基材损伤和微裂纹,不利于黏结强度的提高^[14],这也是当界面粗糙度大于3.0之后试件易发生基体破坏的原因之一。图5显示了粗糙度对黏结强度的增强效果, τ_0 表示界面光滑对应的黏结强度, R_0 表示界面光滑, R_a 表示中粗糙度(1.5~2.0), R_b 表示高粗糙度(3.0)。

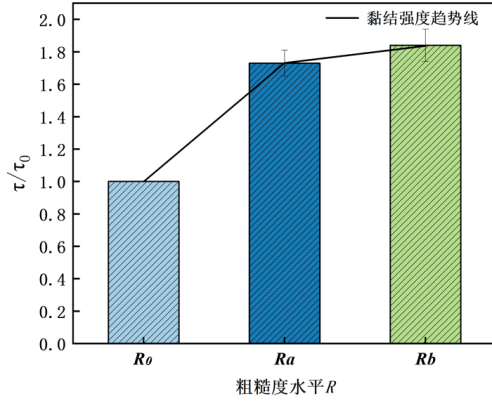


图5 粗糙度水平对黏结强度的影响

Fig.5 Effect of roughness level on bond strength

2.4 界面高度影响分析

图4也显示了界面黏结尺寸对黏结强度的显著影响,从整体而言,在各级粗糙度下,界面高度在100~250 mm范围内的黏结强度表现优于250~440 mm下的黏结强度。具体而言,随着界面高度从100 mm增加到250 mm,3.0粗糙度下的界面黏结强度从5.66 MPa增加到了7.6 MPa,提高了34.28%。黏结强度的提高程度在其他的粗糙度水平下有着相似的体现程度,在中粗糙度(1.5~2.0)下提高程度为27.93%,这种现象可归结于界面黏结高度的增大使得界面抵抗外力的面积增大,从而增强了界面的机械互锁能力。然而,当界面高度从250 mm进一步提高到440 mm时,界面黏结强度出现了衰减的现象,如在3.0粗糙度下从7.6 MPa降低至5.81 MPa,大幅降低了23.55%,410 mm高度下的试件在较低水平粗糙度下的黏结强度变化曲线同样表现出类似的下降趋势,如图6所示。对相关试验结果的分析表明,与250 mm高度相比,界面高度的持续增加导致界面处的法向应力激增,无法充分利用机械连锁来增强剪切应力。

2.5 滑移量分析

表2为各组试件的界面滑移的试验结果,针对

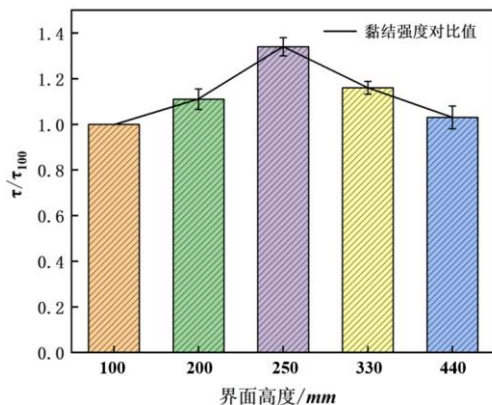


图6 界面高度对黏结强度的影响

Fig.6 Effect of interfacial height on bond strength

UHPC-NC界面破坏的破坏模式,所有试件的黏结-滑移曲线在达到极限黏结强度之前都为近似线性上升,随后界面的剪切荷载急剧下降,表现出明显的脆性破坏特征。如图7所示,每组的界面滑移量都随粗糙度的增大而逐渐增加,表明粗糙度的增大对延缓界面的破坏有着积极的影响,但一些组的数据较少,导致这些组的平均增加率无法预测出中间值的变化规律。同一组试件的剪切刚度表现出相似性,表明界面粗糙度对剪切刚度的影响较小。随着界面高度的增加,剪切刚度呈减小趋势,参考图8,界面高度从100 mm增加到440 mm,平均剪切刚度下降了54.09%,表明黏结界面尺寸对剪切刚度有明显影响,剪切刚度的下降表现为界面抵抗弹性变形能力的减弱,这是由于界面高度的增加会使界面引入额外的缺陷和损伤,从而降低了剪切刚度。

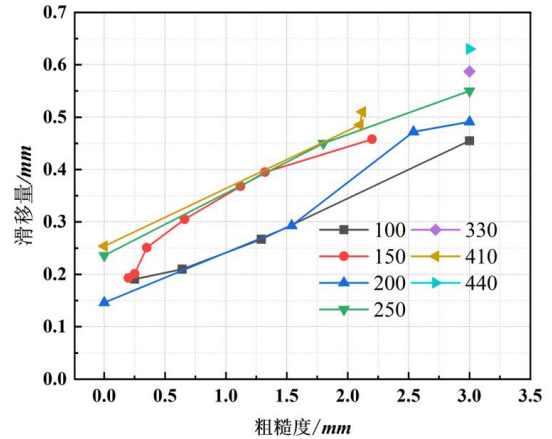


图7 滑移量-粗糙度曲线

Fig.7 Slip-roughness curves

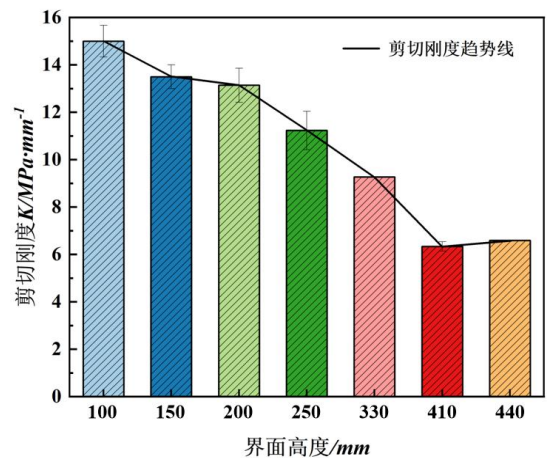


图8 界面高度对剪切刚度的影响

Fig.8 Effect of interface height on shear stiffness

3 UHPC-NC界面剪切强度计算

3.1 界面抗剪强度已有计算公式

目前,已有的混凝土界面抗剪强度计算公式主

要有规范公式和半经验公式。如美国规范 AASHTO^[30]和欧洲规范 Eurcode 2^[31]等不同结构混凝土规范都是基于摩擦理论并通过试验数据进行参数优化得出的。现有的新旧混凝土黏结强度半

经验计算公式,如徐文强等^[32]的模型、郭进军等^[33]的模型和 Patnaik 模型^[34],多为根据试验数据与结果,采用数据分析和拟合的方式得到。所述的计算模型与模型考虑因素列于表 3 中。

表 3 现有抗剪强度模型
Table 3 Existing shear strength models

模型	计算公式	考虑因素
AASHTO	$P_u = cA + \mu(A_v f_v + N) \leq \min(0.2 f_{cu,n} A, 5.51A)$	摩擦系数、内聚力、新混凝土强度
Eurcode 2	$\tau_u = c_f + \mu(\rho_v f_v + \sigma_n) + \rho_v f_v \cos \alpha \leq 0.5 \nu f_{ck}$	摩擦系数、内聚力、抗剪钢筋贡献
徐文强等	$\tau_u = 0.0319k(f_{cu,0}^{0.851} + f_{cu,n}^{0.851})$	摩擦系数、新旧混凝土强度
郭进军等	$\tau_u = (0.0113R_a + 0.0268)f_{cu,m}$	界面粗糙度、新旧混凝土强度
Patnaik	$\tau_u = 0.5 \sqrt{(0.25 + \rho_v f_v) f_{cu,0}} \leq 0.25 f_{cu,0} \text{ and } 8 \text{ MPa}$	抗剪钢筋贡献、旧混凝土强度

注: P_u 和 τ_u 分别为黏结界面极限抗剪承载力和应力; c 和 μ 是与界面的形成有关的内聚力和摩擦系数,均取 0.689; A_v 和 f_v 为抗剪钢筋的面积和屈服强度; ρ_v 为抗剪钢筋配筋率; A 为黏结界面面积; N 为界面上的永久法向力;为界面正应力; R_a 为界面粗糙度; k 为影响系数,取 1.2。

这些界面抗剪强度计算公式大部分都考虑了新旧混凝土强度,但均未考虑混凝土的尺寸效应,且仅有郭进军等的计算模型考虑了界面粗糙度,为了简化计算,采用该模型计算 UHPC-NC 界面剪切强度时,取试验数据的平均粗糙度水平,即 2.0,混凝土强度取值为 NC 和 UHPC 实测强度的平均值,具体数值见图 3。各模型的预测结果如图 9 所示,结果表明,AASHTO 模型预测的界面剪切强度明显低于其他模型,造成该差异的原因为该模型仅考虑了与界面胶结力有关的内聚力系数。

黏结强度计算公式。

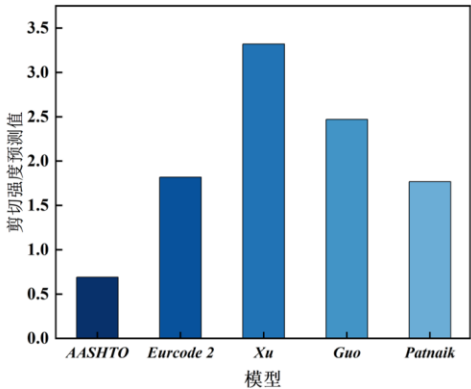


图 9 现有模型的黏结强度预测值
Fig.9 Predicted bond strength values for existing models

由于试验数据较多,为了使对比结果具有代表性,选取界面高度 100、250、410 mm 以及最大、最小和中值粗糙度对应的剪切强度,字母代表粗糙度水平,数字为界面高度,如 100-L 为表 2 中界面高度 100 mm、粗糙度为 0.25 对应的试验剪切强度值。将试验数据与现有模型预测的数值之比如图 10 所示。由图 10 可知,除了 AASHTO 模型表现出的显著离散与差异性外,其他模型的对比结果较为平均,但各模型的预测均值与试验值之比均大于 1,因此,提出考虑粗糙度和界面高度的 UHPC-NC 界面

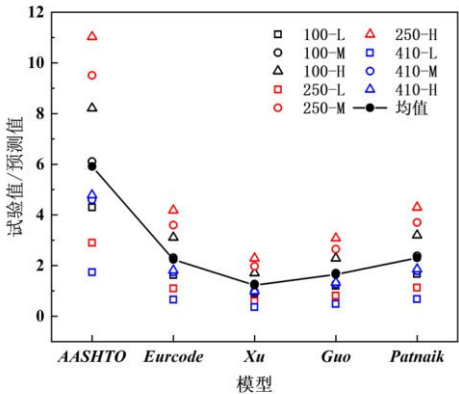


图 10 试验值与预测值的比较
Fig.10 Comparison of test values and predicted values

3.2 UHPC-NC 界面黏结强度模型

根据对 UHPC-NC 界面破坏机理的分析可知, τ_u 的表达式(5)是一个以 UHPC 抗压强度、NC 抗压强度和粗糙度作为自变量的函数。

将与速度折减系数 β 有关的项分别视为参数 a 和 b ,式(5)变换为式(7)。

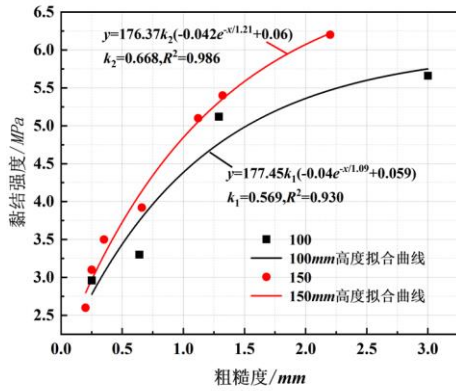
$$\tau_u = (\sigma_{s1} + \sigma_{s2}) [a \cdot f(C, \mu) + c] \tag{7}$$

对试验数据的分析表明,UHPC-NC 界面的剪切黏结强度不仅与粗糙度有关,还存在着明显的尺寸效应,黏结强度随着界面高度的增加出现先增强后减弱的趋势。因此,利用数学上用于表述单指数衰减的 expdec1 模型来表示粗糙度的影响,用界面尺寸的调整系数 k 来描述混凝土的尺寸效应, k 值的确定是以界面高度为 250 mm 的试件作为基准并采用不同尺寸间的相对值进行表达。所提出的 UHPC-NC 界面剪切黏结强度模型,如式(8)所示。

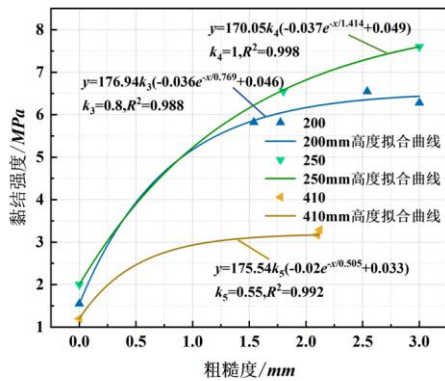
$$\tau_u = k(\sigma_{s1} + \sigma_{s2}) (a \cdot e^{x/b} + c) \tag{8}$$

式中: x 为粗糙度; $k = \left(1 + \left| \frac{h - h_{250}}{h_{250}} \right| \right)^{-1.2}$; h 为界面高度; a 、 b 和 c 是参数。

图 11 显示了试验结果与 UHPC-NC 界面剪切黏结强度模型的回归相关性, 为了将混凝土实测值



(a) 100~150 mm 高度



(b) 200~410 mm 高度

图 11 不同界面高度下黏结强度的试验值与模型对比

Fig.11 Comparison of test values for bond strength at different interface heights with the model

的波动性对分析结果的影响降到最低, 取图中各条拟合线所对应的各数据点的混凝土强度实测均值进行计算, UHPC 的实测强度均值对应于 σ_{S1} , NC 的

实测强度均值对应于 σ_{S2} 。由于试验数据过少, 未对 330 mm 和 440 mm 界面高度的数据作拟合。对于其他的界面高度, 所提出的黏结强度模型表现出了理想的相关性, 表明对 100~250 mm 界面高度的 UHPC-NC 界面黏结强度具有良好的预测能力。随着界面尺寸的增加, 界面处的剪切特性趋于稳定, 所提出的模型对于更高的界面高度的预测能力需更多的试验数据来验证。

采用文献[35-37]数据验证式(8)的普适性, 文献的试验数据如表 4 所示, 这是一个独立的数据集, 目的是评估模型的预测能力, 这些数据与表 2 中的主体数据集存在系统性差异, 主要表现在界面处理方式的不同以及混凝土强度的较大差异。如文献[35]中, 界面采用喷砂的粗糙度处理方式, 而文献[36-37]则采用的是高压水射流的处理方法, 这两种方法造成的界面微观纹理与凿毛有显著差异, 导致模型的预测能力降低。另一方面, 文献[36-37]中的混凝土强度的差别远大于本文主体数据集, 而混凝土强度的巨大差异体现在界面处粗糙凸起的强度差异, 进而影响界面黏结性能, 这也是导致模型的预测能力降低的第 2 个原因。预测值与试验值的对比如图 12 所示。

采用绝对误差和相对误差评价模型的有效性, 绝对误差包括均方根误差(RMSE, E_{RMS})和平均绝对误差(MAE, E_{MA}), 相对误差包括平均绝对百分比误差(MAPE, E_{MAP})和不平等系数(μ)。方程的表达式为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - A_i)^2} \quad (9)$$

$$E_{\text{MA}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - A_i| \quad (10)$$

$$E_{\text{MAP}} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - A_i}{A_i} \right| \quad (11)$$

表 4 文献数据

Table4 Literature Data

文献	试验方式	界面处理	界面高度/mm	NC 实测强度/MPa	UHPC 实测强度/MPa	粗糙度/mm	τ_u 实测值/MPa
[35]	双面	喷砂	150	56.7	113.6	2.04	2.62
				56.7	113.6	2.54	3.75
				56.7	113.6	2.73	4.52
[36]	双面	高压水射流	152	35.7	85.6	1.08	2.80
				52.4	120.8	1.08	4.90
				51.2	153.7	1.08	5.80
				57.0	160.1	1.08	5.80
[37]	Z 型	高压水射流	220	42.6	139.8	1.12	3.01
				42.6	139.8	1.50	4.78
				42.6	139.8	1.80	5.28
				42.6	139.8	2.40	6.50

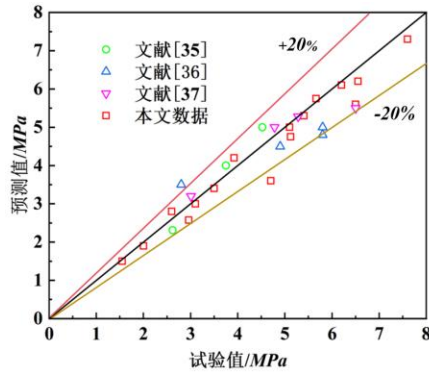


图 12 剪切强度测试值与预测值之间的关系

Fig.12 Relationship between tested and predicted values of shear strength

$$\mu = \frac{E_{RMS}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^2}} \quad (12)$$

式中: P_i 为预测界面黏结强度, MPa; A_i 为实测界面黏结强度, MPa; n 为样本数量。

表 5 为式(8)预测 UHPC-NC 界面黏结强度的有效性。各指标的计算值均处于误差较小的范围内,验证了所提出的 UHPC-NC 界面黏结强度模型有良好的适用性。

表 5 模型预测有效性

Table5 Model Prediction Validity

RMSE	MAE	MAPE	μ
0.72	0.48	11.87	0.14

4 结论

研究了 UHPC-NC 界面剪切破坏机制,通过总结分析已有的 UHPC-NC 界面直接剪切试验数据,研究了界面粗糙度和界面高度对黏结性能的影响,并建立了 UHPC-NC 界面黏结强度模型。所得结论如下:

1) 过高的粗糙度会增加 UHPC-NC 界面缺陷,从而限制界面黏结强度的提高。经过凿毛处理的试件,当界面粗糙度为 1.5~2.0 时,其界面黏结强度相比光滑试件提高了 172.71%,当界面粗糙度提高到 3.0 时,其相对于界面粗糙度为 1.5~2.0 的试件仅提高了 11.30%。此外,粗糙度大于 3.0 之后,界面破坏形态发生变化,随着粗糙度的增大逐渐转变为 NC 基体破坏。

2) 界面高度对黏结强度和剪切刚度有显著影响,推荐 UHPC-NC 剪切试件界面高度取 250 mm。当界面高度从 100 mm 增加到 250 mm,界面黏结强度提高了 34.28%,但从 250 mm 增加到 440 mm,界面黏结强度大幅降低了 25.55%,界面高度从 100

mm 增加到 440 mm,平均剪切刚度下降了 54.09%。

3) 通过对 UHPC-NC 界面剪切破坏机理的研究,提出了考虑粗糙度和界面高度的 UHPC-NC 界面黏结强度模型,与现有的剪切强度模型及外部试验数据作对比验证了模型的有效性。界面处理方式对黏结强度有显著影响,需考虑喷砂、植筋等其他界面处理方式以完善该黏结强度模型。

参考文献

- [1] 冯硕. UHPC-NSC 界面协同服役性能与机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
FENG S. Study on synergistic service performance and mechanism of UHPC-NSC [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023. (in Chinese)
- [2] MÉSZÖLY T, RANDL N. Shear behavior of fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams [J]. Engineering Structures, 2018, 168: 119-127.
- [3] 陈景龙, 王达. 钢-UHPC 组合板栓钉抗剪承载力有限元分析[J]. 公路与汽运, 2025, 41(06): 111-116.
CHEN J L, WANG D. Finite Element Analysis of Shear Capacity of Bolted Steel-UHPC Composite Slabs [J]. Highway and Motor Transport, 2025, 41(06): 111-116.
- [4] JU Y Z, SHEN T, WANG D H. Bonding behavior between reactive powder concrete and normal strength concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 242: 118024.
- [5] FENG S, XIAO H G, LI H. Comparative studies of the effect of ultrahigh-performance concrete and normal concrete as repair materials on interfacial bond properties and microstructure [J]. Engineering Structures, 2020, 222: 111122.
- [6] FENG Z, LI C X, PAN R S, et al. Shear capacity of ultrahigh-performance concrete with monolithic interface and wet-joint interface [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(7): 04022153.
- [7] 方志, 吴荣杰, 裴炳志, 等. 新旧混凝土结合面抗剪性能的尺寸效应[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 92-103.
FANG Z, WU R J, PEI B Z, et al. Size effect of the shear performance on the bonding interface between new and old concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(11): 92-103. (in Chinese)
- [8] HE S H, HUANG X, ZHONG H Q, et al. Experimental study on bond performance of UHPC-to-NC interfaces: Constitutive model and size effect [J]. Engineering Structures, 2024, 317: 118681.
- [9] PAN R S, SONG X B, HE W W, et al. Direct shear strength of UHPC considering size effect: Theoretical model and experimental verification [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 71: 106381.

- [10] FENG S, XIAO H G, LIU M, et al. Shear behaviour of interface between normal-strength concrete and UHPC: Experiment and predictive model [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 342: 127919.
- [11] 范洁伯. 粗糙度作用下 UHPC-NC 界面力学黏结性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
FAN J B. Study on the mechanical bonding performance of the UHPC-NC interface under the influence of surface roughness [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2024. (in Chinese)
- [12] 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 Z Y, CHEN J P, HE S H, et al. Experimental study on shear performance of UHPC-NC interface [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2024, 44(4): 138-147. (in Chinese)
- [13] VALIKHANI A, JAHROMI A J, MANTAWY I M, et al. Experimental evaluation of concrete-to-UHPC bond strength with correlation to surface roughness for repair application [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 238: 117753.
- [14] LYU J J, FENG S, ZHANG Q S. The influence of roughness and bond area size on bond shear performance between UHPC and normal strength concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 448: 138203.
- [15] ZHANG Y, ZHANG C Y, ZHU Y P, et al. An experimental study: various influence factors affecting interfacial shear performance of UHPC-NSC [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 236: 117480.
- [16] ZHANG Y, ZHU P, WANG X W, et al. Shear properties of the interface between ultra-high performance concrete and normal strength concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 248: 118455.
- [17] 张阳, 王兴旺. UHPC 加固 RC 结构交界面抗剪性能试验研究[J]. *中外公路*, 2017, 37(2): 105-111.
ZHANG Y, WANG X W. Experimental study on shear behavior of RC structure interface strengthened by UHPC [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2017, 37(2): 105-111. (in Chinese)
- [18] 吴玥, 张阳, 刘颖峰, 等. 预制 UHPC 与后浇 NC 界面的抗剪性能[J]. *铁道建筑*, 2023, 63(9): 48-53.
WU Y, ZHANG Y, LIU Y F, et al. Experimental and numerical analysis on interfacial shear resistance of prefabricated UHPC-post-cast NC interface [J]. *Railway Engineering*, 2023, 63(9): 48-53. (in Chinese)
- [19] 张阳, 吴洁, 邵旭东, 等. 超高性能混凝土-普通混凝土界面抗剪性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(7): 81-89.
ZHANG Y, WU J, SHAO X D, et al. Experiment on interfacial shear properties between ultra-high performance concrete and normal strength concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(7): 81-89. (in Chinese)
- [20] HARRIS D K, SARKAR J, AHLBORN T T M. Characterization of interface bond of ultra-high-performance concrete bridge deck overlays [J]. *Transportation Research Record*, 2011, 2240(1): 40-49.
- [21] ZHANG W X, YAN B Q, YE Y, et al. Direct shear test study on old and new concrete [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 82: 108391.
- [22] ZANOTTI C, RANDL N. Are concrete-concrete bond tests comparable? [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 99: 80-88.
- [23] GAO C S, JIANG H, ZHANG G Z, et al. Novel calculation method for the shear capacity of a UHPC beam with and without web reinforcement [J]. *Materials*, 2023, 16(21): 6915.
- [24] CHEN K M, LIN Y J, WANG Z Y, et al. Shear and tensile bonding performance of prefabricated UHPC and cast-in-place NC interface in composite girder bridges [J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 462: 139952.
- [25] 赵志方, 周厚贵, 袁群, 等. 新老混凝土黏结机理研究与工程应用[M]. 中国水利水电出版社, 2003: 198.
ZHAO Z F, ZHOU H G, YUAN Q, et al. Research on bonding mechanism between new and old concrete and its engineering application [M]. China Water & Power Press, 2003: 198. (in Chinese)
- [26] MOHAMAD M E, IBRAHIM I S, ABDULLAH R, et al. Friction and cohesion coefficients of composite concrete-to-concrete bond [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 56: 1-14.
- [27] ASTM International. Standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique: ASTM E965-15 (Reapproved 2019) [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- [28] 陈峰, 郑建岚. 自密实混凝土与老混凝土黏结滑移关系的有限元分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2014, 47(6): 774-778.
CHEN F, ZHENG J L. Finite element analysis of bonding-slip relationship between old concrete and freshly cured self-compacting concrete [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2014, 47(6): 774-778. (in Chinese)
- [29] LU K W, PANG Z M, XU Q Z, et al. Bond strength between substrate and post-cast UHPC with innovative interface treatment [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 133: 104691.
- [30] AASHTO LRFD bridge design specifications [M]. 9th edition. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.
- [31] European Committee for Standardization (CEN). Euro-

code 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings: EN 1992-1-1: 2004 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

[32] 徐文强. 新老混凝土结合面抗剪强度计算方法与黏结-滑移本构模型[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.

XU W Q. Calculation method of shear strength and bond-slip constitutive model of the new-to-old concrete interface [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)

[33] 郭进军. 高温后新老混凝土黏结的力学性能研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2003.

GUO J J. Study on mechanics performance of adherence of new and old concrete after high temperature [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2003. (in Chinese)

[34] PATNAIK A K. Behavior of composite concrete beams with smooth interface [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(4): 359-366.

[35] 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 W Q, GENG J, LIU G J, 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)

[36] TIAN J, JIANG X H, YANG X N, et al. Study on shear mechanisms of UHPC-NC reinforced interfaces and grooved & reinforced interfaces [J]. Case Studies in Construction Materials, 2025, 23: e04982.

[37] YANG J, XIA J R, ZHANG Z Y, et al. Mesoscopic shear behavior and strength characteristic of UHPC-NC interface considering the combined effect of mechanical interlocking and dowel action [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 307: 110306.

(编辑 XXX)