

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.1120

UHPC-NC 界面结合状态研究

李萌萌^{1,2}, 杨恒^{1,2}, 黄一昶^{1,2}, 李哲², 陈江瑛^{1,2*}

(1. 宁波大学 压力容器与管道安全浙江省工程研究中心, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为研究超高性能混凝土-普通混凝土(Ultra-High Performance Concrete-Normal Concrete, UHPC-NC)组合体的界面结合强度, 设计并制作了 3 种工况的组合体试件: 浇筑间隔分别为 30 min、1 d 固化及 1 d 固化+48 h 90 °C 高温蒸汽养护试件。采用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置和电液伺服万能试验机对 3 种不同工况的 UHPC-NC 组合体进行动态界面、静态界面结合强度测试, 测试采用巴西圆盘劈裂法。结果表明: 浇筑间隔 30 min 的试件在动态荷载、静态荷载下的黏结强度最强, 其次是 1 d 固化及 1 d 固化+48 h 90 °C 高温蒸汽养护的试件; 浇筑间隔为 30 min 的试件裂纹产生于 NC 端, 而另外 2 种试件裂纹产生于 UHPC-NC 界面, 说明前者的薄弱环节在 NC 端, 而后两者的薄弱环节在 UHPC-NC 界面处; 3 种 UHPC-NC 组合体的结合强度都随应变率的升高而增强, 表现出明显的应变率效应。

关键词: 超高性能混凝土-普通混凝土组合体; 界面结合强度; 应变率; 分离式霍普金森压杆

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 03-0009-07

超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)作为 20 世纪后期诞生的新一代建筑材料^[1-2], 具有超高强、高韧性、高耐久性等优异性能^[3]。与普通混凝土(Normal Concrete, NC)材料相比, UHPC 表现出更好的抗压、抗拉、抗折^[4]、抗冲击抗爆^[5-6]和耐久性能^[7]。新型组合体中, UHPC 可应用于构件受力部位, 提升构件的力学性能和减小组合体的尺寸, 如 UHPC 与普通混凝土的组合体^[8]、湿接缝^[9]等。另外, 在结构的维护与加固中, UHPC 应用于结构的受损薄弱部位, 不仅可保证既有结构的力学性能, 起到增强作用, 而且还能作为保护层抵抗外界有害离子的侵蚀, 如桥面修复^[10]、桥墩加固^[11]等。无论是新建组合体, 还是既有结构的维修加固, 超高性能混凝土-普通混凝土组合体都会受到动荷载的作用。混凝土材料对于外界荷载具有应变率敏感性^[12], 在动荷载下表现出的材料特性与静荷载下不同, 在结构设计与混凝土

结构安全加固中都必须加以考虑。而在加固或修复时, UHPC 与 NC 之间的界面往往是其性能最薄弱的部位, 其界面的破坏往往先于整体结构^[13]。良好的界面黏结性能是保证组合体或加固组合体协同工作的前提, 决定着工程结构的安全性、适用性和耐久性。因此, 研究 UHPC-NC 组合体界面黏结强度对 UHPC 在实际工程中的应用具有重要意义。

混凝土是一种在受拉作用下容易开裂和失效的材料, 因此研究 UHPC-NC 界面在拉伸荷载下的黏合性能十分重要。拉伸试验可分成直接法与间接法两种。直接拉伸试验简单易操作, 但在夹持加载过程中易发生试件偏心, 影响试验结果的可靠性, 且不能反映实际工程结构中的界面黏结情况。劈裂拉伸试验又称巴西圆盘试验, 是 Carneiro 等^[14]首先提出的一种测量混凝土抗拉强度的间接试验方法, 也是现行的国际混凝土标准(如 ASTM C496/C496M-17^[15]、ISO 1920-4:2020^[16])中主要试

收稿日期: 2024-11-21

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市科技创新 2025 重大项目(2022Z209); 国家自然科学基金(11572163, 11832013)

第一作者: 李萌萌, 硕士研究生, 主要研究方向: UHPC 动态力学性能。E-mail: 2211090017@nbu.edu.cn

*通信作者: 陈江瑛, 博士/教授, 主要研究方向: 冲击动力学。E-mail: chenjiangying@nbu.edu.cn

验方法。目前,劈裂 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)技术被广泛用于研究工程材料在高应变率下的劈裂拉伸性能^[17-18]。Tayeh 等^[19]、Mansour 等^[20]以及 Fan 等^[21]基于静态劈裂试验研究了新旧混凝土界面剂、粗糙度、冻融循环等因素对界面黏结性能的影响,结果表明不同界面处理方式能够引起不同的破坏模式,而劈裂拉伸试验法能够较好地体现界面的实际失效方式。但已有研究较少涉及动态荷载下 UHPC-NC 组合体界面性能的研究。

目前超高性能混凝土与普通混凝土间界面结合性能的系统研究较少,因此笔者采用 SHPB 及电液伺服万能试验机对 UHPC-NC 组合体界面进行动态、静态结合强度测试,分别从应变率效应、失效模式等方面对 UHPC-NC 组合体界面结合性能进行研究。

1 试验方案

1.1 试件制备

1.1.1 材料配合比

UHPC 粉料及钢纤维由浙江宏日泰耐克新材料科技有限公司提供,其组分主要包括水泥、砂子、矿粉、膨胀剂、硅灰和偏高岭土,其中粗砂粒径 ≤ 1.18 mm;纤维采用直径 0.2 mm、长度 6 mm 的镀铜钢纤维。质量配合比为粉料:水:钢纤维:减水剂:消泡剂=1.000:0.083:0.088:0.009:0.002。UHPC 设计强度为 120 MPa,实测抗压强度为 119.3 MPa,抗拉强度为 12.3 MPa。

NC 水泥及中砂为诸城市九七建材有限公司的 P.O.42.5 水泥及天然砂。水泥初凝时间为 169 min,终凝时间 234 min,3 d 抗压强度为 26.9 MPa;中砂含泥量 2.6%,级配区属 1 区,细度模数为 2.7。石子为一级玄武岩碎石,粒径 1~3 mm,表观密度 2.975 kg·m⁻³,针片状颗粒含量 8.2%,压碎值 11.9%。质量配合比为水泥:水:中砂:石子=1.00:0.42:1.20:2.40。NC 设计强度等级为 C40,实测抗压强度为 43.2 MPa,抗拉强度为 4.4 MPa。

1.1.2 UHPC-NC 组合体制备方案

为实现 SHPB 试验加载过程中一维应力传播和应力平衡,试件直径按 0.90~0.95 倍杆件直径取值,长径比 0.5,试件尺寸设计为 $\Phi 70$ mm×35 mm,沿直径方向对半分隔为 UHPC 端和 NC 端。

考虑到实际工程中往往是采用 UHPC 覆盖于原有 NC 表面,且 UHPC 具有快凝的特性,故浇筑顺序为先浇筑 NC 端,再浇筑 UHPC 端。通常 NC 试件在制作 10~15 min 后能保证静止状态下基本不再流动,因此固化 1 d 后再进行脱模,脱模后采用 90 °C 高温蒸汽养护 48 h,使其能够达到设计强度最大值。且为保证试验过程中试件的一致性,浇筑时间不宜太长,因此设计如图 1 所示的 3 种不同浇筑间隔时间的试件。

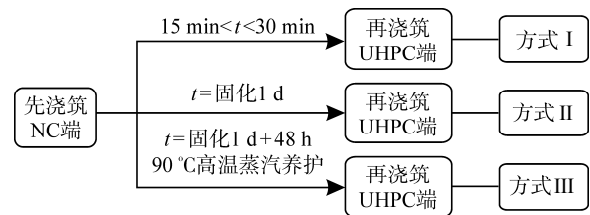


图 1 浇筑方式示意图

1.2 静态劈裂试验

静态界面结合强度测试在 2 000 kN 微机控制的电液伺服万能试验机上进行,取 3 个试件测值的算术平均值作为该组试件的测量值,当 3 个测值中的最大值或最小值中有一个与中间值的差值超过中间值的 15% 时,则应予以剔除,取中间值作为该组试件的抗压强度测量值;当最大值和最小值与中间值的差值均超过中间值的 15% 时,则该组试件的试验结果无效。试验采用巴西圆盘劈裂法,加载方式如图 2 所示,采用应变率控制,设置应变率为 10⁻⁴ s⁻¹,在试件两端施加轴向压缩荷载。在圆盘中轴线附近,施加的外力会产生一个纵向压缩应力和一个横向拉伸应力,这种荷载状态导致材料的拉应力集中在试件中心,形成了典型的劈裂模式。

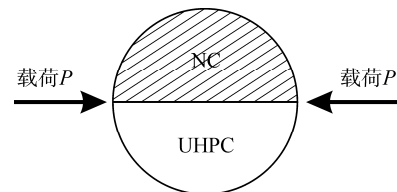


图 2 黏结强度试验加载示意图

根据弹性理论,静态拉应力算式^[22]如下:

$$\sigma_{ts} = \frac{2P}{\pi Dh} \quad (1)$$

式中: σ_{ts} 为静态拉应力; P 为施加荷载; D 为圆

盘直径; h 为圆盘厚度。

1.3 冲击劈裂试验

动载下界面结合强度的测试同样采用巴西圆盘劈裂法, 在 SHPB 装置上予以实现。SHPB 装置如图 3 所示。入射杆长 2 800 mm, 透射杆长 1 800 mm, 子弹长度 400 mm, 杆径均为 74 mm, 材料为弹簧钢, 弹性模量 210 GPa, 密度 $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。试验时, 利用应变片记录入射波、透射波和反射波信号, SHPB 试验中的应力、应变和应变率^[23]分别由式(2)~式(4)进行计算:

$$\sigma = \frac{A}{2A_s} E (\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)) \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C}{h} \int_0^t (\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)) dt \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C}{h} (\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)) \quad (4)$$

冲击劈裂试样的压缩应变、压缩应力可由 SHPB 试验测得, 则试样的动态拉应力 σ_{id} 与荷载 P 关系如下:

$$\sigma_{\text{id}} = \frac{2P}{\pi Dh} = \frac{2\sigma A_s}{\pi Dh} \quad (5)$$

结合式(2)可得拉应力算式如下:

$$\sigma_{\text{id}} = \frac{A}{\pi Dh} E (\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)) \quad (6)$$

式(2)~(6)中, σ 、 σ_{id} 、 $\varepsilon(t)$ 、 $\dot{\varepsilon}(t)$ 分别为压缩应力、拉应力、压缩应变及压缩应变率; A 、 E 、 C 分别为杆的截面积、弹性模量及杆中弹性波波速; A_s 、 h 、 D 分别为试件的截面积、厚度与直径; ε_i 、 ε_t 、 ε_r 分别为入射应变、透射应变及反射应变; t 为时间。

2 结果与分析

2.1 静态界面结合性能

图 4 给出了静态黏结试件劈裂应力—时间曲线。由图可知, 试验测得 UHPC-NC 组合体浇筑方式 I、II、III 的静态黏结强度分别为 4.7、2.6 及 2.3 MPa。浇筑方式 I 试件的静态黏结强度明显高于另

外 2 种方式制作的试件。因为在混凝土浇筑后, 内部水泥颗粒与水持续发生水化反应, 生成水化硅酸钙(C-S-H)和氢氧化钙(Ca(OH)₂)等水化产物, 而水化硅酸钙是提供混凝土强度的主要成分^[24]。在水化过程中, 水泥浆中的孔隙结构也发生变化, 原本大量连接的孔隙逐渐被水化产物填充, 减少了混凝土内部的空隙, 提高了强度^[25]。在浇筑初期, 水泥颗粒的表面积较大, 反应速度较快, 强度迅速提高。随着时间的推移, 水泥颗粒逐渐被消耗, 反应速度减缓。因此浇筑间隔 30 min 内的 UHPC-NC 界面处水泥颗粒几乎同时水化, 共同生成水化硅酸钙, 赋予界面更高的强度, 并且使得 UHPC-NC 界面孔隙能充分被水化产物填充, 从而拥有更好的界面性能。而对于方式 II 的试样, 1 d 固化后, NC 端界面处能与 UHPC 共同发生水化反应的水泥颗粒大大减少。方式 III 制作试样时, 1 d 固化+48 h 高温蒸汽养护后的 NC 水化已基本完成, NC 端界面处能与 UHPC 共同发生水化反应的水泥颗粒更是少之又少。故浇筑方式 I 的静态黏结强度明显强于方式 II 和方式 III 的试件。劈裂破坏后试件形貌如图 5 所示, 可以发现方式 II 和方式 III 的劈裂试验后破坏为 UHPC-NC 界面的剥离破坏, 浇筑方式 I 试件破坏则为 NC 侧的拉裂破坏, 且试验测得界面结合强度与 NC 抗拉强度 4.4 MPa 相近, 说明试验测得浇

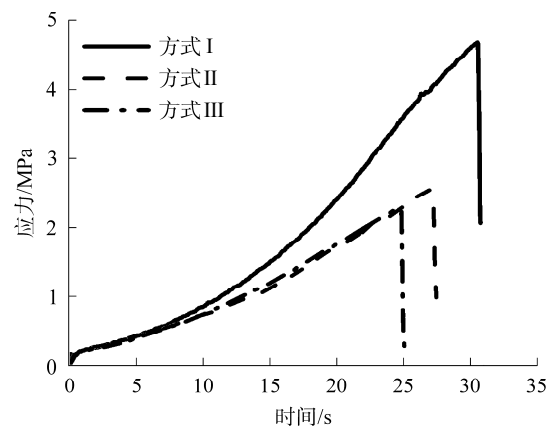


图 4 静态黏结试件劈裂应力—时间曲线

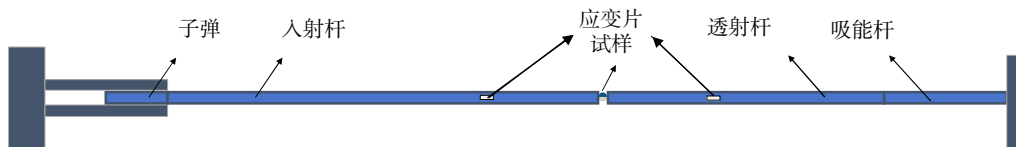


图 3 SHPB 装置示意图

筑方式I的界面结合强度实际为 NC 的抗拉强度,浇筑方式I试件黏结强度应大于测值 4.7 MPa。

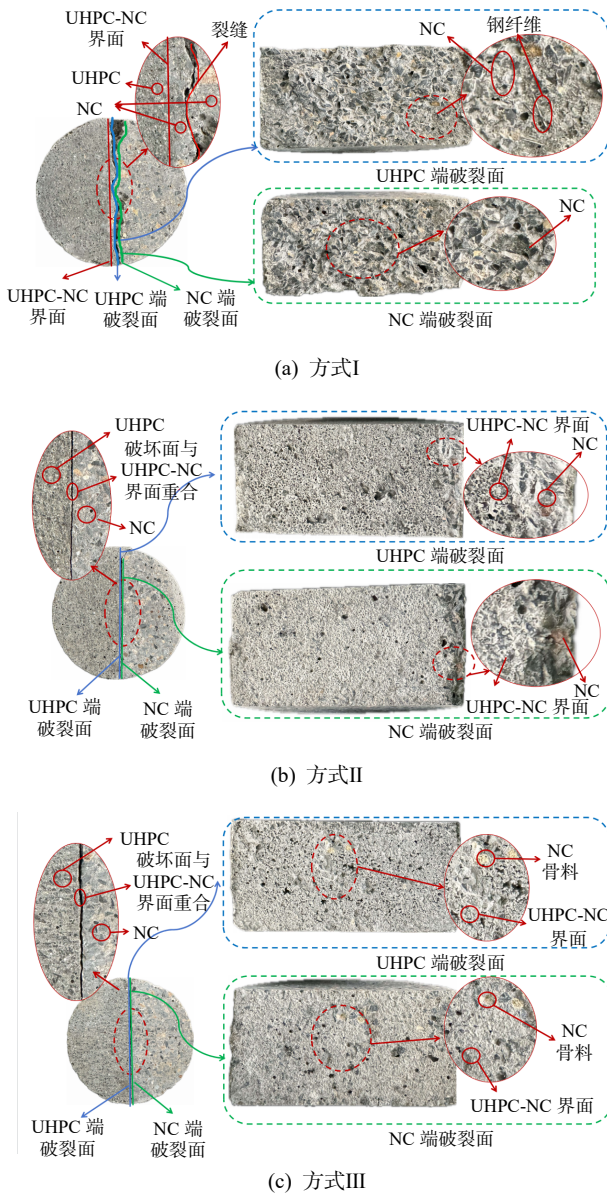


图5 不同浇筑间隔试件静态劈裂破坏形貌

2.2 动态界面结合强度

2.2.1 应力平衡验证

在混凝土 SHPB 试验中,进行应力平衡验证是确保试验结果可靠性的重要步骤。应力平衡验证的核心是确认在试验过程中,入射波、反射波和透射波之间的相互作用能保持平衡,从而使材料在特定应变率下的力学行为得以准确测量。通常情况下,应力平衡的误差应控制在 5% 以内,以确保试验结果的有效性。

图 6 和图 7 分别给出了 0.2 MPa 气压下空杆打击和 0.6 MPa 劈裂试验的应力波电压—时间曲线。由图可知,空杆反射波信号几乎为零,说明入射杆与透射杆端面平行性较好;试样加持前后入射波电压—时间曲线与反射波+透射波的应力—时间曲线重合性较好,说明试验满足应力平衡条件。

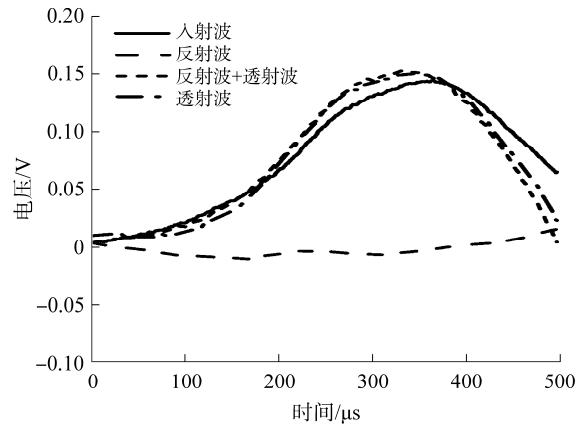


图6 0.2 MPa 空杆应力波电压—时间曲线

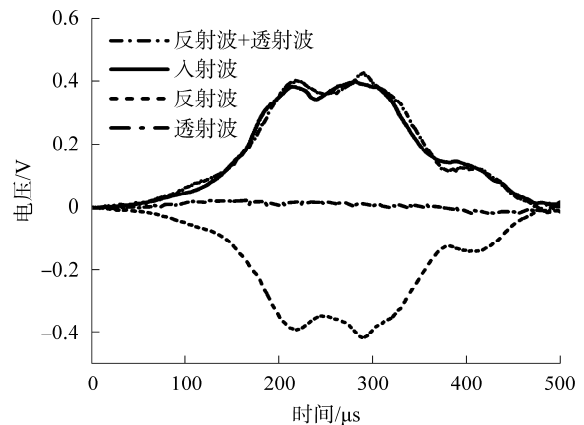


图7 0.6 MPa 劈裂试验应力波电压—时间曲线

2.2.2 试验结果

图 8 展示了不同浇筑间隔 UHPC-NC 组合体黏结试件的冲击劈裂应力—时间曲线。由图可知,方式I的试件在应变率为 25、50、80 s^{-1} 下的冲击黏结强度分别为 10.3、12.2、15.6 MPa; 方式II试件在应变率为 25、50、80 s^{-1} 下的冲击黏结强度分别为 7.9、10.8、13.5 MPa; 方式III试件在 25、50、80 s^{-1} 应变率下的冲击黏结强度分别为 7.4、10.0、11.1 MPa, 3 种浇筑方式试件的冲击黏结强度都随着应变率的增加而增大,表现出明显应变率效应。对比不同应变率下、不同浇筑间隔试件的冲击黏结强度可知(图 9),在相同应变率下,方式I的 UHPC-NC

试件冲击黏结强度最大, 随后依次是方式II和方式III的试件。并且方式I试件的破坏发生在接近UHPC-NC界面的NC端(图10(a)), 而方式II和方式III试件的破坏发生在界面处(图10(b)和(c))。这是因

为在遭受冲击荷载时, 试样中心处于高拉伸应力状态, 拉伸破裂会首先在中心薄弱处产生, 并迅速沿加载方向向试样两端扩展, 形成拉伸裂纹, 并将试样劈裂为两部分。由于方式I浇筑试件的界面结

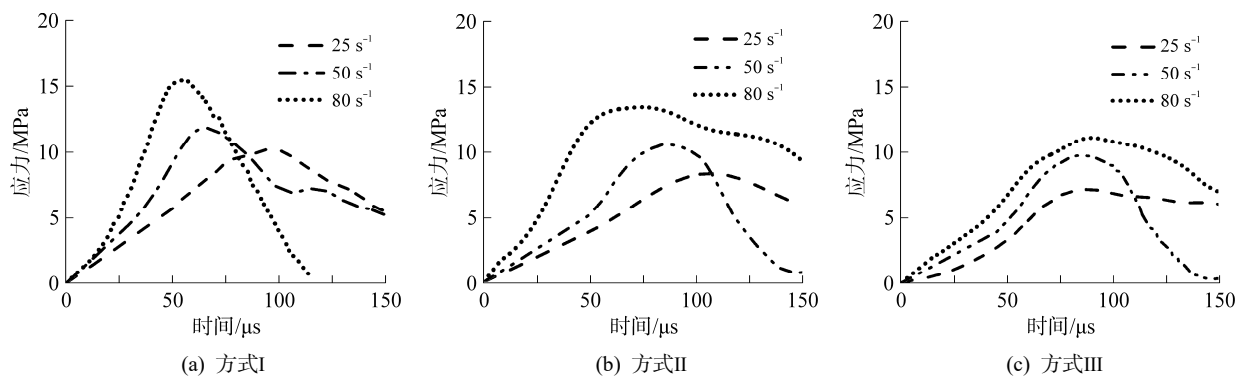


图8 不同浇筑间隔下 UHPC-NC 组合体黏结试件冲击劈裂应力—时间曲线

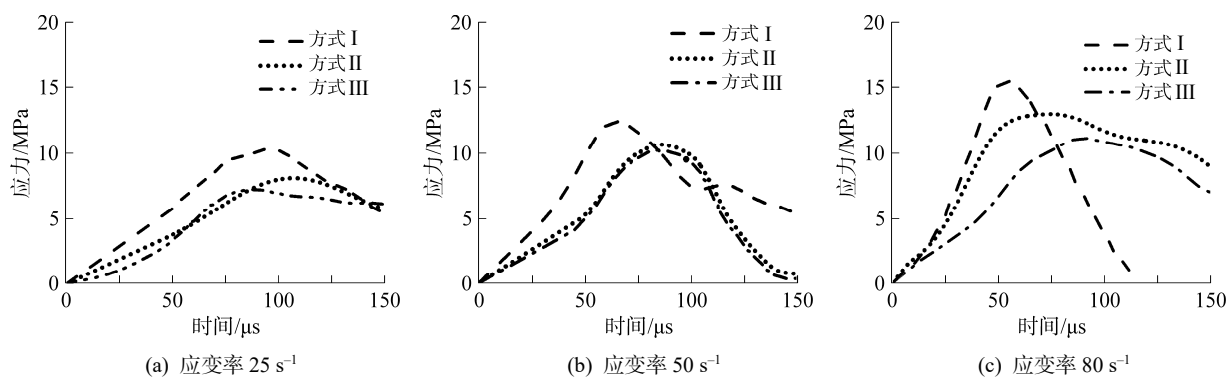


图9 不同应变率下 UHPC-NC 组合体黏结试件冲击劈裂应力—时间曲线

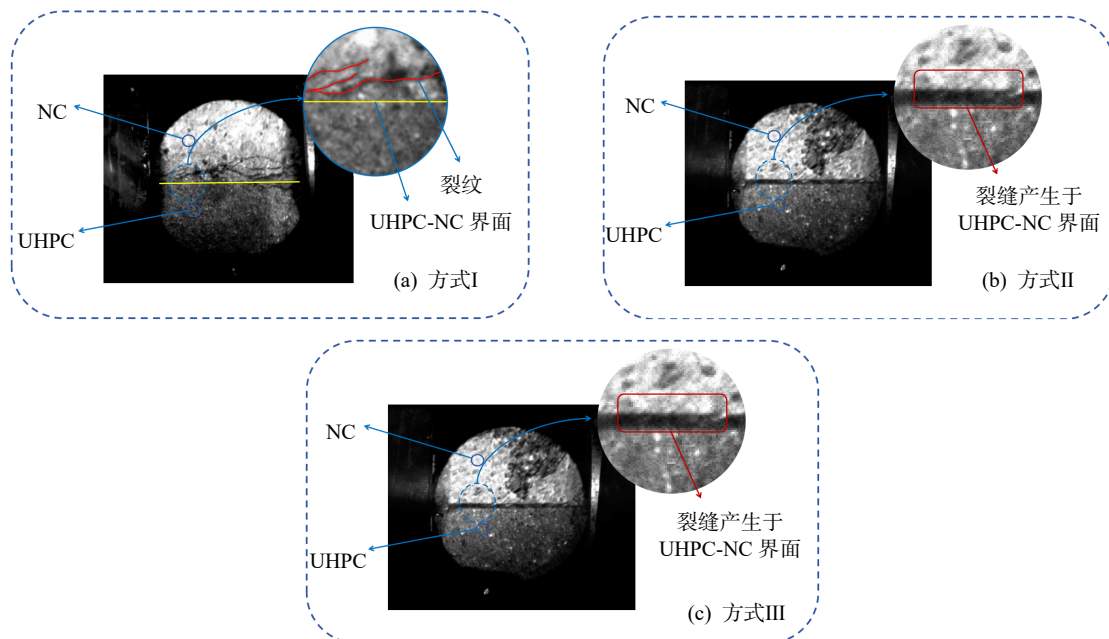


图10 不同浇筑间隔 UHPC-NC 试件在应变率 80 s^{-1} 下冲击黏结强度试验界面破坏图

合强度大于 NC 的抗拉强度,而方式II、方式III试件的界面结合强度小于 NC 的抗拉强度,所以方式I试样中心处的薄弱环节为 NC,然而方式II、III试样中心的薄弱环节为 UHPC-NC 界面,因此方式I试件接近 UHPC-NC 界面的 NC 端会率先达到抗拉强度极限而遭受破坏,而方式II和方式III试件沿着 UHPC-NC 界面裂开。

试验结果表明:当 UHPC 应用于 UHPC-NC 预制构件时,控制浇筑间隔可以使构件拥有良好的界面结合强度,使 UHPC-NC 界面不再是整体结构的薄弱环节,这对实际工程有指导价值。在实际结构维护与加固时,还可以采取其他强化界面措施,例如使用界面剂、增加界面粗糙度等方式提升界面结合强度,保证结构的安全性与耐久性。

3 结论

对 UHPC-NC 组合体进行动态、静态结合强度测试,得到了试件的界面结合强度,结合试样的破坏形态得出以下结论:

(1) UHPC-NC 组合体的界面黏结强度随应变率的增加而增大,表现出明显的应变率效应。

(2) UHPC-NC 组合体的界面黏结强度受浇筑间隔时间影响,浇筑间隔时间在 30 min 内(方式I)的试件在动态、静态荷载下的界面结合强度均明显强于浇筑间隔时间为 1 d 固化(方式II)及 1 d 固化+48 h 高温蒸养(方式III)的试件。

(3) 方式I的试件在动态、静态荷载下的破坏均发生在 NC 端,说明方式I试件的 UHPC-NC 界面结合强度大于 NC 的抗拉强度,该工况下试件的薄弱环节不再是 UHPC-NC 界面。

参考文献:

- [1] BACHE H H. Densified cement ultra-fine particle-based materials[C]//International Conference on Superplasticizers in Concrete. Ottawa, Canada, 1981.
- [2] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement and concrete research, 1995, 25(7):1501-1511.
- [3] AKEED M H, QAIDI S, AHMED H U, et al. Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part I: developments, principles, raw materials[J]. Case studies in construction materials, 2022, 17:e01290.
- [4] VAN NGUYEN T. Rice husk ash as a mineral admixture for ultra high performance concrete[D]. Delft, Netherlands: Technische Universiteit Delft, 2011.
- [5] BINDIGANAVILE V, BANTHIA N, AARUP B. Impact response of ultra-high-strength fiber-reinforced cement composite[J]. ACI materials journal, 2002, 99(6):543-548.
- [6] LAI J Z, ZHU Y Y, XU S Y, et al. Multiple impact penetration of ultra high performance cementitious composites[J]. Reinforced concrete, 2013:637-646.
- [7] PIÉRARD J, DOOMS B, CAUBERG N. Durability evaluation of different types of UHPC[J]. Reinforced concrete, 2013, 2013:275-284.
- [8] 林上顺, 黄卿维, 陈宝春, 等. 跨海大桥 U-RC 组合桥墩设计[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(4):55-65.
- [9] DENG E F, ZHANG Z, ZHANG C X, et al. Experimental study on flexural behavior of UHPC wet joint in prefabricated multi-girder bridge[J]. Engineering structures, 2023, 275:115314.
- [10] ALEXANDER M, BEUSHAUSEN H. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures: review and critique[J]. Cement and concrete research, 2019, 122:17-29.
- [11] GHOLIPOUR G, MUNTASIR BILLAH A H M. Numerical investigation on the dynamic behavior of UHPFRC strengthened rocking concrete bridge piers subjected to vehicle collision[J]. Engineering structures, 2023, 288:116241.
- [12] 韩李斌, 杨黎明. 泡沫混凝土动态力学性能及破坏形式[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(1):68-72.
- [13] ZHANG M, WU H J, LI Q M, et al. Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests. Part I: experiments[J]. International journal of impact engineering, 2009, 36(12):1327-1334.
- [14] CARNEIRO L F, BARCELLOS A. Résistance a la traction des Bétons[J]. RILEM bull, 1949, 13:98-125.
- [15] American Society for Testing and Materials. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens: ASTM C496/C496M-17:2017[S/OL]. https://store.astm.org/c0496_c0496m-17.html.
- [16] International Organization for Standardization. Testing of concrete – Part 4: strength of hardened concrete: ISO 1920-4:2020[S/OL]. <https://www.iso.org/standard/72260.html>.
- [17] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J].

- Proceedings of the physical society: section B, 1949, 62(11):676-700.
- [18] 马宏伟, 张立军, 闫晓鹏, 等. 混凝土动态劈裂拉伸试验的数值模拟[J]. 宁波大学学报(理工版), 2003, 16(4): 349-353.
- [19] TAYEH B A, ABU BAKAR B H, MEGAT JOHARI 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(18):1846-1864.
- [20] MANSOUR W, FAYED S. Effect of interfacial surface preparation technique on bond characteristics of both NSC-UHPFRC and NSC-NSC composites[J]. Structures, 2021, 29:147-166.
- [21] FAN J, WU L, ZHANG B. Influence of old concrete age, interface roughness and freeze-thawing attack on new-to-old concrete structure[J]. Materials, 2021, 14(5):1057.
- [22] TIMOSHENKO S P, GOODIER J N, ABRAMSON H N. Theory of elasticity [J]. Journal of applied mechanics, 1970, 37(3):140-143.
- [23] WANG T T, SHANG B. Three-wave mutual-checking method for data processing of SHPB experiments of concrete[J]. Journal of mechanics, 2014, 30(5):N5-N10.
- [24] ZHU S, FANG Y, GUO Y, et al. Preparation of nano-calcium silicate hydrate and its application in concrete[J]. Materials science and engineering, 2019, 631(2):22052.
- [25] ZHENG S, LIU T, JIANG G, et al. Effects of water-to-cement ratio on pore structure evolution and strength development of cement slurry based on HYMOSTRUC3D and micro-CT[J]. Applied sciences, 2021, 11(7):3063.

Research on the interface bonding state of UHPC-NC

LI Mengmeng^{1,2}, YANG Heng^{1,2}, HUANG Yichang^{1,2}, LI Zhe², CHEN Jiangying^{1,2}
(1.Zhejiang Provincial Engineering Research Center for the Safety of Pressure Vessel and Pipeline, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2.Key Laboratory of Impact and Safety Engineering of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To investigate the interfacial bonding strength of ultra-high performance concrete and normal concrete (UHPC-NC) combinations, specimens are designed and fabricated with three different curing conditions, including a pouring interval of 30 minutes, 1 day curing period, and 1 day curing followed by 48 hours of high-temperature steam curing at 90 °C, respectively. The bonding strength under dynamic and static loading conditions is tested by using the split Hopkinson pressure bar (SHPB) device and an electro-hydraulic servo universal testing machine, with the Brazilian disc splitting method being employed. The results indicate that the specimens with a pouring interval of 30 minutes exhibit the highest bonding strength under both dynamic and static loads, followed by those with a 1 day curing and finally the specimens subjected to 48 hours of high-temperature steam curing. Crack initiation in the 30 minutes interval specimens occurs at the NC end, while cracks in the other two types initiate at the UHPC-NC interface, indicating that the weak points are at the NC end in the former and at the UHPC-NC interface in the latter two. Moreover, the bonding strength of all three UHPC-NC combinations increases with the increase of strain rate, demonstrating a significant strain rate effect.

Keywords: Ultra-High Performance Concrete-Normal Concrete (UHPC-NC) combinations; interfacial bonding strength; strain rate; Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)

(责任编辑 章践立)