

冲击作用下CFRP光圆筋与UHPC粘结性能的试验研究

蒋正文 刘朋杰 方志 方亚威 王志伟

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

JIANG Zhengwen, LIU Pengjie, FANG Zhi, FANG Yawei, WANG Zhiwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230612.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

玻璃纤维增强聚合物复合材料筋与工程水泥基复合材料黏结性能

Bonding behavior between glass fiber reinforced polymer composite bars and engineered cementitious composite

复合材料学报. 2020, 37(3): 696–706 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190729.001>

变形钢筋/超高性能混凝土搭接黏结性能

Bond behavior of deformed steel bars lap-splice in ultra high performance concrete

复合材料学报. 2021, 38(11): 3912–3924 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201229.006>

纤维增强树脂复合材料约束超高性能混凝土轴压性能的细观数值模拟

Meso-scale numerical simulation of axial compression performance of fiber reinforced polymer composite-confined ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1629–1638 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190827.001>

钢纤维增强超高性能混凝土抗压性能的细观数值模拟

Microscopic numerical simulation of the uniaxial compression of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2018, 35(6): 1661–1673 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170831.001>

新拌超高性能纤维增强混凝土流动性能对其抗压强度的影响

Influence of the fresh ultra-high performance fiber reinforced concrete flowability on its compressive strength

复合材料学报. 2021, 38(11): 3827–3837 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210115.005>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

冲击作用下 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结性能的试验研究



分享本文

蒋正文^{1,2}, 刘朋杰¹, 方志^{*1,2}, 方亚威¹, 王志伟³

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 长沙 410082;

3. 中复碳芯电缆科技有限公司, 连云港 222069)

摘要: 为明确冲击荷载作用下, 碳纤维增强复合材料 (Carbon fiber-reinforced polymer, CFRP) 筋与超高性能混凝土 (Ultra-high performance concrete, UHPC) 粘结界面间化学粘结力和摩擦力的应变率效应, 以锚固长度和荷载类型为参数, 对 8 组共计 24 个采用 UHPC 作为粘结介质锚固的 CFRP 光圆筋试件 (锚固长度分别为 $20d$ - $35d$, d 为 CFRP 筋材直径), 分别进行了静力拉拔和筋材应变速率约为 4.0 s^{-1} 的纵向冲击试验。结果表明: 静力和纵向冲击试件均发生了光圆筋拔出的滑移破坏, 相较于冲击试件, 静力加载后 CFRP 光圆筋的表面损伤更明显。冲击荷载作用下, CFRP 光圆筋与 UHPC 间界面的化学粘结强度和峰值粘结强度均呈现正的应变率效应, 分别较相应的静力强度提高了约 53% 和 17%; 而峰值后界面的残余粘结强度即滑动摩擦阻力则表现为负的应变率效应, 较相应的静力值降低约 38%。基于试验结果, 建立了冲击作用下 CFRP 光圆筋与 UHPC 间界面动态粘结强度的预测公式。

关键词: 碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP); 超高性能混凝土 (UHPC); 冲击荷载; 粘结强度; 锚固长度

中图分类号: U446.1; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)02-0858-13

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

JIANG Zhengwen^{1,2}, LIU Pengjie¹, FANG Zhi^{*1,2}, FANG Yawei¹, WANG Zhiwei³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Zhongfu Carbon Fiber Core Cable Technology CO. LTD., Lianyungang 222069, China)

Abstract: To investigate effect of strain rate on chemical adhesion force and friction on the bonding interface between carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) bars and ultra-high performance concrete (UHPC) under impact load, both static pull-out tests and longitudinal impact tests with the 4.0 s^{-1} strain rate were conducted on UHPC-filled anchorage for CFRP smooth bars. Totally, 24 specimens for eight test groups with $20d$ - $35d$ (d is CFRP bars diameter) embedded lengths were prepared. The results show that both static and longitudinal impact specimens fail in a similar pattern, that is, all CFRP bars slide out UHPC regardless of the embedded lengths and load types. However, the damage on the surface of CFRP bar is slightly severer in static tests than in impact tests. Under the impact, the chemical bond strength at the bonding interface between CFRP smooth bar and UHPC increases, thereby leading to an improved peak bond strength; however, the residual bonding strength (i.e., friction) at the bond interface decreases. Compared with the corresponding static test specimens, the chemical bond strength and peak bond

收稿日期: 2023-04-13; 修回日期: 2023-05-14; 录用日期: 2023-05-25; 网络首发时间: 2023-06-13 11:13:47

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230612.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (52108210; 51938012); 湖南省科技创新计划 (省优秀博士后创新人才计划)(2021RC2062); 香江学者计划 (XJ2022037); 中国博士后基金面上项目 (2021M690968)

National Natural Science Foundation of China (52108210; 51938012); Science and Technology Innovation Program of Hunan Province (2021RC2062); Hong Kong Scholars Program (XJ2022037); China Postdoctoral Science Foundation (2021M690968)

通信作者: 方志, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为基于高性能材料工程结构的设计理论及工程应用技术 E-mail:fangzhi@hnu.edu.cn

引用格式: 蒋正文, 刘朋杰, 方志, 等. 冲击作用下 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结性能的试验研究 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 858-870.

JIANG Zhengwen, LIU Pengjie, FANG Zhi, et al. Experimental study on bonding behavior between CFRP smooth bar and UHPC under impact loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(2): 858-870(in Chinese).

strength approximately increase by 53% and 17%, respectively, while the average residual bonding strength decreases by about 38%. Besides, a prediction formula for predicting the dynamic bonding strength between CFRP smooth bar and UHPC under impact loads was established.

Keywords: carbon fiber-reinforced polymer (CFRP); ultra-high performance concrete (UHPC); impact loads; bond strength; embedment length

碳纤维增强树脂复合材料 (Carbon fiber reinforced polymers, CFRP) 筋材以其轻质、高强、耐腐蚀和抗疲劳性能好等优点, 作为土木工程中传统钢制拉索和普通钢筋的替代品具有广阔的应用前景^[1-3]。超高性能混凝土 (Ultra-high performance concrete, UHPC) 以其超高的抗压强度、较高的抗拉强度、良好的韧性和优异的耐久性被认为是新一代的水泥基复合材料^[4-5], 适于作为锚固 CFRP 拉索的粘结介质, 且基于 CFRP 和 UHPC 两种高级复合材料, 可形成具有优良承载性能和耐久性的高性能配筋混凝土结构而应用于恶劣环境中工作的桥梁工程^[6-10]。桥梁结构内的拉索、梁板和墩柱可能遭受落石、车辆撞击及相邻拉索断裂等引起的冲击作用^[11-14]。因此, 明确 CFRP 筋材在 UHPC 中的粘结锚固性能, 特别是冲击荷载作用下的相互作用性能, 是这类新型结构应用于实际工程需要解决的关键设计问题之一。

现有 CFRP 带肋筋材与普通混凝土或 UHPC 间动态粘结性能的试验研究发现^[15-16], 冲击荷载作用下试件的粘结强度均较相应的静力粘结强度低, 即均呈现负的应变率效应。而 CFRP 带肋筋材与普通混凝土或 UHPC 等粘结介质间的粘结强度均由界面上的机械咬合、化学粘结和滑动摩擦等作用所构成且主要由机械咬合作用提供^[17], 因此, 亦可断定冲击荷载下 CFRP 带肋筋材与普通混凝土或 UHPC 之间的机械咬合作用与应变率负相关。但受限于 CFRP 带肋筋材复杂的表面构造及粘结机制, 难以判断冲击作用下界面上化学粘结和滑动摩擦作用的应变率效应特征, 有待进一步明确。

国内外部分学者开展了纤维增强树脂复合材料 (Fiber reinforced polymers, FRP) 筋与普通混凝土间动态粘结性能的研究。李维博^[15]的试验研究发现: 纵向冲击荷载下 CFRP 带肋筋与普通混凝土之间的峰值粘结强度均低于相应的静力粘结强度。Xiong 等^[18]研究了应变速率对玄武岩纤维增强树脂复合材料 (Basalt fiber reinforced polymer, BFRP) 带肋筋在普通混凝土中锚固性能的影响, 结果表明: 动态试件的峰值粘结强度均小于相同锚固长度的静力试件。Li 等^[19]试验研究了筋材表

面形状和应变速率对 BFRP 筋粘结性能的影响, 结果表明: BFRP 带肋筋及黏沙筋与再生骨料混凝土之间的峰值粘结强度均随加载速率的提高而降低。

冲击作用下 FRP 筋与 UHPC 间粘结性能的研究还很少。向宇等^[20]采用落锤试验机研究了采用 UHPC 锚固带肋 CFRP 筋的粘结式锚固系统的横向抗冲击性能, 结果表明: 静力锚固可靠的粘结式锚具, 尽管冲击荷载作用下筋材内的拉力远小于相应的静力抗拔承载能力, 但仍发生了筋材的滑移破坏, 表明 CFRP-UHPC 粘结式锚固系统的动力抗冲击性能低于其静力性能。方志等^[16]试验研究了纵向冲击作用下 CFRP 带肋筋材在 UHPC 中的锚固性能, 结果表明: 应变率为 2.0 s^{-1} 的冲击荷载作用下, CFRP 筋材与 UHPC 之间的动态粘结强度仅约为相同锚固长度静力试件的 45%, 源于冲击作用下 CFRP 筋材抗剪模量的降低使筋材肋与 UHPC 间机械咬合作用减弱所致。

另有学者对光圆钢筋与普通混凝土之间的动态粘结性能开展了研究。Yan^[21]的试验结果表明, 直径 13 mm 光圆钢筋与 C40 混凝土界面间的峰值粘结强度由静力加载下的 13.0 MPa 增大至冲击应变率约 5.0 s^{-1} 下的 22.0 MPa, 其提升幅度约为 69%。Weathersby^[22]的试验结果表明: 直径 25 mm 光圆钢筋与 C40 混凝土之间的峰值粘结强度由静力加载下的 10.7 MPa 增大至冲击应变率约 6.5 s^{-1} 下的 18.4 MPa, 其提升幅度约为 72%。付应乾等^[23]研究了光圆钢筋与普通混凝土之间的动态粘结性能, 试验结果表明: 当筋材的应变速率由 0.001 s^{-1} 增大至 3.33 s^{-1} 、 33.33 s^{-1} 和 333.33 s^{-1} 时, 直径 6 mm 光圆钢筋与 C40 混凝土之间的峰值粘结强度由 9.4 MPa 分别增大至 11.1 MPa、13.1 MPa 和 25.4 MPa, 其提升幅度为 18.1%、39.4% 和 170.2%。

可见, 现有研究更多侧重于 FRP 带肋筋材与普通混凝土或 UHPC 之间的动态粘结性能, 明确了冲击作用下 FRP 带肋筋材与普通混凝土或 UHPC 间动态粘结强度或机械咬合作用表现为负的应变率效应^[15-19]。但受限于 FRP 带肋筋材复杂的表面构造及粘结机制, 难以判断冲击作用下界面上化学粘结和滑动摩擦作用的应变率效应特征。

虽然已有光圆钢筋与普通混凝土之间动态粘结性能的研究，但毕竟光圆钢筋和普通混凝土分别与光圆 CFRP 筋(抗剪强度低且表面更光滑)和 UHPC(强度等级更高且不含粗骨料)间的性态相差较大，且光圆钢筋和普通混凝土界面间化学粘结和滑动摩擦作用的应变率效应也未特别明确。

基于此，考虑到表面光滑的 CFRP 光圆筋材与粘结介质间的机械咬合作用几近可忽略，界面粘结强度主要由化学粘结和摩擦作用构成，本文分别对静力拉拔和纵向冲击作用下，CFRP 光圆筋在 UHPC 中的锚固性能进行试验研究，以期明确 CFRP 筋与 UHPC 界面间化学粘结作用及摩擦作用的应变率效应，并建立 CFRP 光圆筋与 UHPC 界面间动态峰值粘结强度的预测公式。

1 试验概况

1.1 原材料

试验采用图 1 所示由中复碳芯电缆科技有限公司生产的 CFRP 光圆筋材，其直径 $d=8\text{ mm}$ ，表

面非常光滑。参照《纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法》(GB/T 30022—2013)^[24]，测得筋材的抗拉强度和弹性模量分别为 3 025 MPa 和 160 GPa。

试验采用不含钢纤维的 UHPC 商品预混料作为锚固 CFRP 筋的粘结介质，UHPC 的配合比如表 1 所示。静力拉拔和纵向冲击试件同批次浇筑，参照《超高性能混凝土试验方法标准》(T/CECS 864—2021)^[25]与《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)^[26]，试件浇筑完成后经自然养护 24 h 后再采用 90℃ 蒸汽养护 48 h，并采用边长 100 mm 的立方体试块测得 UHPC 的立方体抗压强度为 120.5 MPa。



图 1 试验所用碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 光圆筋
Fig. 1 Smooth carbon fiber reinforced polymers (CFRP) bar used in the tested

表 1 超高性能混凝土 (UHPC) 的配合比

Table 1 Mix proportion of ultra-high performance concrete (UHPC)

Component	Cement	Silica fume	Quartz flour	Quartz sand	Water reducer	Water binder ratio
Mass ratio	1	0.25	0.25	1.1	0.02	0.22

1.2 试件设计

静力拉拔及纵向冲击试件均由自由段 CFRP 筋、试验端锚具和固定端锚具三部分组成，如图 2 所示。参照《纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法》(GB/T 30022—2013)^[24]，试件自由段长度设计为 300 mm。静力拉拔试件的固定端均采用锚固长度为 500 mm 的粘结式锚具；对于冲击试件，由于 CFRP 光圆筋的临界锚固长度较长且冲击试验空间受限，因此其固定端采用长度为 200 mm 的夹片式锚具进行锚固^[27]。粘结式锚具由外部钢套筒和内部浇筑的 UHPC 粘结介质组成，钢套筒的外径和壁厚分别为 42 mm 和 3 mm。

静力和纵向冲击试件的试验参数均为试验端的锚固长度，分别为 20 d 、25 d 、30 d 和 35 d (d 为筋材直径)。设计制作了 8 组，每组 3 个共计 24 个试件，试件编号及分组如表 2 所示。

试验端粘结式锚具的长度由试验所需筋材锚固长度确定。

1.3 试验装置

1.3.1 静力拉拔试验

静力拉拔所用试验装置由压力传感器、穿心

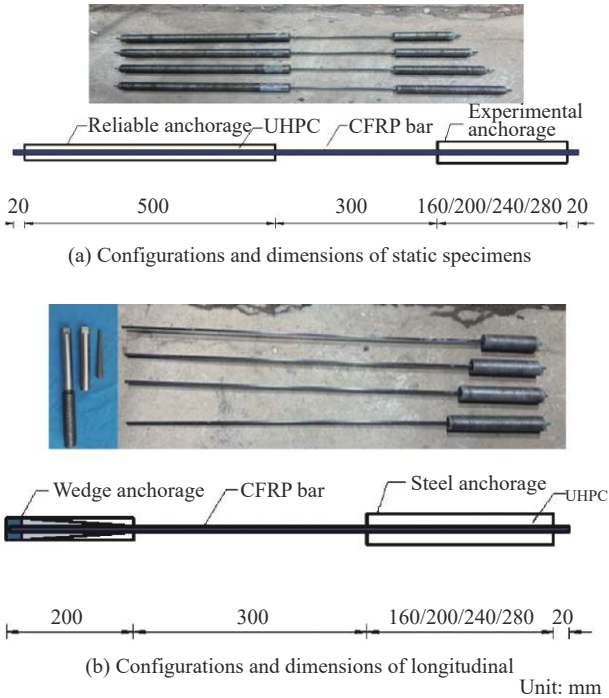


图 2 静力拉拔及纵向冲击试件构造及尺寸

Fig. 2 Configurations and dimensions of static tensile and longitudinal impact specimens

表 2 试件概况
Table 2 Overview of the test specimens

Specimen	Length of reliable anchorage/mm	Length of test anchorage/mm	Free length/mm	Length of specimens/mm
S-L160	500	160	300	1 000
S-L200	500	200	300	1 040
S-L240	500	240	300	1 080
S-L280	500	280	300	1 120
D-L160	Wedge type	160	300	680
D-L200		200	300	720
D-L240		240	300	760
D-L280		280	300	800

Notes: In specimen codes, the first letter indicates the test type (S—Static tensile test; D—Dynamic impact test), and the second letter is used to differentiate the anchorage length (160 to 280 mm denoted by L160 to L280). For example, D-L160 means the impact specimen with a bond length of 160 mm.

式千斤顶和加载垫板等组成，如图 3 所示。试验过程中，采用深圳米朗科技有限公司生产的电子位移计 (Linear variable displacement transducer, LVDT) 测量锚固端锚具及试验端锚具加载侧和自由侧筋材的滑移量，应变式压力传感器测量试件的纵向拉力。根据《预应力筋用锚具、夹具和连接器》(GB/T 14370—2015)^[28] 和《超高性能混凝土试验方法标准》(T/CECS 864—2021)^[25]，对静力试件采用荷载控制加载，每级持荷 1 min 后读取相应的拉力及滑移值^[16]。

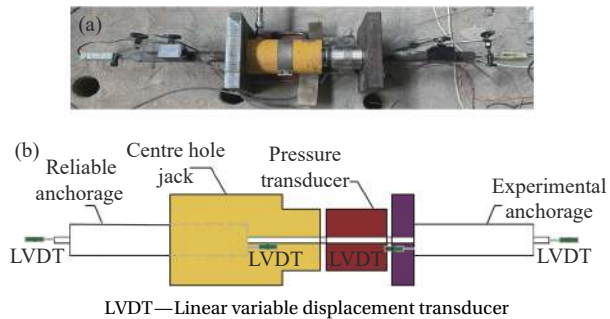


图 3 静力试验装置
Fig. 3 Setup of static tensile tests

1.3.2 纵向冲击试验

纵向冲击试验装置包括落锤冲击试验系统和自行研发的拉压转换装置两部分组成^[16-17]，见图 4。

桥梁工程中，由落石、车撞及相邻拉索断裂引起的结构应变率一般在 $0.1\sim10.0\text{ s}^{-1}$ ^[29-31]。因此，试验的目标应变率取为 4.0 s^{-1} 。通过预备性试验，测得落锤锤头质量为 570 kg、冲击高度为 200 mm 时，锚固长度 $20d$ 和 $35d$ 试件的应变率分别为 3.59 s^{-1} 和 4.20 s^{-1} ，故正式试验时均采用 570 kg 的锤头质量和 200 mm 的冲击高度。

试验过程中，将锤头上升至所需高度并释放，

锤头下落冲击拉压转换装置的支架顶板，进而对试件施加纵向受拉的冲击力，冲击拉压转换装置的总行程为 80 mm。采用电子位移计测量试验锚具加载侧筋材的滑移量，具体布置如图 5 所示。试件的索力则通过应变式压力传感器进行监测，采样频率为 15 kHz。

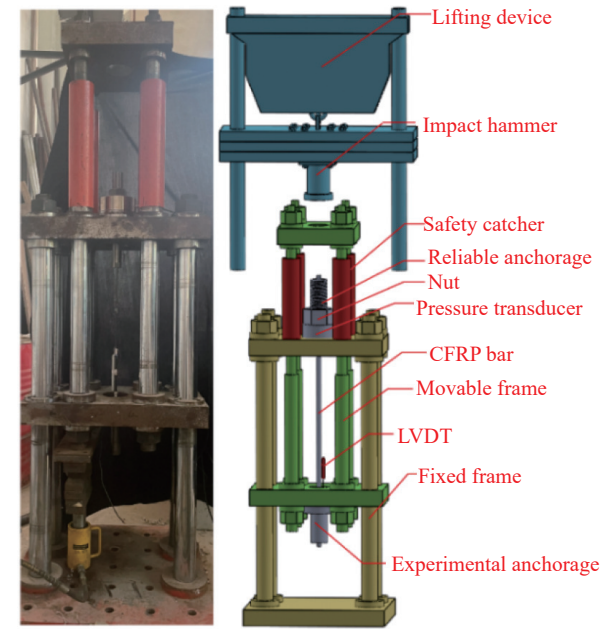


图 4 纵向冲击试验装置
Fig. 4 Setup of longitudinal impact tests

2 试验结果及分析

静力及冲击试验的主要结果如表 3 所示，包括试件自由段筋材的应变率 $\dot{\epsilon}$ 、最大索力 $T_{\max}$ 、与 $T_{\max}$ 相应的峰值粘结强度 τ_m 、化学粘结强度 τ_a 、残余粘结强度 τ_r (静力和纵向冲击试件的残余粘结强度均取滑移 15 mm 处对应的粘结应力，两者的粘结应力均在滑移值 15 mm 后逐渐趋于稳定)、

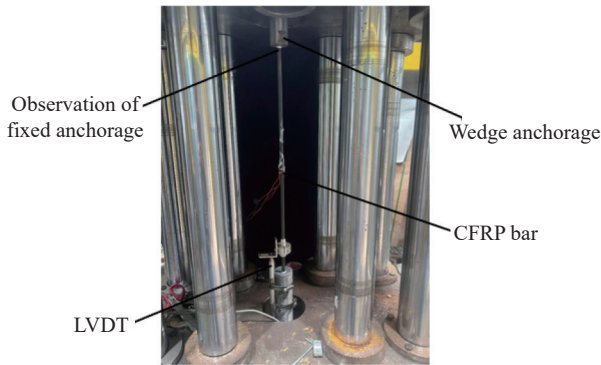


图5 滑移测点布置

Fig. 5 Arrangement of slip measuring point

与 $T_{\max}$ 相对应的试验端锚具加载侧筋材的滑移量 S_0 、筋材自由端开始滑动时加载侧对应的滑移量 S_z 。冲击作用下试验端筋材自由侧的滑移很遗憾未成功获取。

冲击试验中，CFRP 筋自由段的应变与索力成正比，因此，自由段筋材的应变率系根据索力时程曲线初始线性上升段的斜率确定，并取为索力时程曲线初始线性上升段 $0.2T_{\max}\sim 0.5T_{\max}$ 间割线

的斜率，这里 $T_{\max}$ 为冲击荷载作用下试件的最大索力。对于发生滑移破坏的试件，其峰值粘结强度 τ_m 采用下式进行计算：

$$\tau_m = \frac{T_{\max}}{\pi dl}$$

(1)

式中： $T_{\max}$ 为试件的最大索力 (kN)； d 为 CFRP 光圆筋的直径 (mm)； l 为试验端锚固长度 (mm)。

文献 [32] 定义化学粘结强度为初始加载段粘结应力-滑移曲线中斜率发生明显改变处所对应的应力。试件 S-L160、S-L200、S-L240 和 S-L280 这 4 组静力试件的粘结应力-滑移曲线分别在加载端滑移 0.09 mm、0.10 mm、0.11 mm 和 0.11 mm 处斜率发生明显变化，亦即斜率的改变点均在滑移值 0.10 mm 左右，因此本文将静力及纵向冲击试件的化学粘结强度取为加载端滑移 0.1 mm 处对应的粘结应力值，记为 τ_a 。

移量 S 采用下式计算，亦即应扣除电子位移计前端至试验锚具加载端范围内筋材的弹性伸长量：

表3 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件静力和冲击试验主要结果

Table 3 Typical results of static and impact tests on CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens

Specimen	$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	$\bar{\dot{\epsilon}}/s^{-1}$	$T_{\max}/kN$	$\bar{T}_{\max}/kN$	$\bar{\tau}_m/MPa$	$\bar{\tau}_a/MPa$	$\bar{\tau}_r/MPa$	S_0/mm	$\bar{S}_0/mm$	$\bar{S}_z/mm$
S-L160-1	—	—	12.35	11.96	2.98	1.24	2.52	0.56	0.46	0.48
S-L160-2			11.61					0.37		
S-L160-3			11.93					0.46		
S-L200-1	—	—	14.29	14.72	2.93	1.20	2.50	0.49	0.53	0.56
S-L200-2			15.13					0.50		
S-L200-3			14.75					0.60		
S-L240-1	—	—	17.74	17.30	2.87	1.21	2.50	0.65	0.61	0.65
S-L240-2			17.23					0.61		
S-L240-3			16.94					0.58		
S-L280-1	—	—	18.56	19.57	2.78	1.16	2.49	0.64	0.68	0.72
S-L280-2			19.73					0.66		
S-L280-3			20.42					0.75		
D-L160-1	3.44	3.65	14.30	13.96	3.47	1.93	1.60	0.97	0.83	—
D-L160-2	3.67		13.93					0.77		
D-L160-3	3.83		13.64					0.76		
D-L200-1	3.95	3.70	16.13	17.06	3.40	1.87	1.58	0.85	0.91	—
D-L200-2	3.29		17.15					0.89		
D-L200-3	3.85		17.90					0.99		
D-L240-1	3.93	3.84	21.21	20.31	3.37	1.79	1.55	1.10	1.01	—
D-L240-2	3.89		19.19					0.96		
D-L240-3	3.71		20.54					0.98		
D-L280-1	4.42	4.06	23.40	23.48	3.34	1.76	1.52	1.06	1.08	—
D-L280-2	3.86		22.46					1.03		
D-L280-3	3.91		24.58					1.14		

Notes: $\dot{\epsilon}$, $T_{\max}$, S_0 —Strain rate, maximum load, slip of specimen corresponding to the maximum load, respectively; $\bar{\dot{\epsilon}}$, $\bar{T}_{\max}$, $\bar{\tau}_m$, $\bar{\tau}_a$, $\bar{\tau}_r$, $\bar{S}_0$, $\bar{S}_z$ —Average value of the strain rate, maximum load, peak bond strength, chemical bond strength, residual bond strength, slip of specimen corresponding to the maximum load, slip of loading end corresponding the free end start slip, respectively.

$$S = S_T - \frac{T}{E_f A} \Delta L$$

(2)

式中： S_T 为位移计测量值 (mm)； T 为试件的实测索力 (N)； E_f 为筋材弹性模量 (MPa)； A 为筋材横截面积 (mm²)； ΔL 为电子位移计前端至试验锚具加载端的长度 (mm)。

为获得可靠的试验结果，每组试件均包含 3 个平行试件。实测结果表明：静力及冲击加载作用下，每组 3 个平行试件的实测曲线相近，3 组曲线上各特征点的实测值相差均基本在 10% 以内。因此文中采用 3 条实测曲线中各特征点与平均值最接近的一条曲线进行分析讨论。

2.1 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件的破坏形态

静力和纵向冲击试件均发生试验端锚具内筋材拔出的滑移失效，但试件固定端锚具内的筋材均未见明显滑移。不同锚固长度的静力及纵向冲击试件拔出后筋材表面的损伤程度相近，静力试件拔出筋材表面存在刮伤，而纵向冲击试件拔出筋材表面加载前后无明显变化，见图 6(a)~6(c)。

将试验后的 S-L200 和 D-L200 试件试验锚具沿纵轴线切开以观察结合面的状态，如图 6(d) 所示。可见：静力试件 S-L200 有部分筋材表面树脂残留在 UHPC 内表面上，而冲击试件 D-L200 的界面较光滑，基本无树脂基体的残留。导致上述现象产生原因是，CFRP 树脂基体及 UHPC 的抗剪强度均随加载速率的提高而有所增加 [33-35]，使二者的界面相对更趋弱化，导致筋材的滑出更容易，相应的损伤程度亦较低。

2.2 冲击作用下 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件的索力-时程曲线

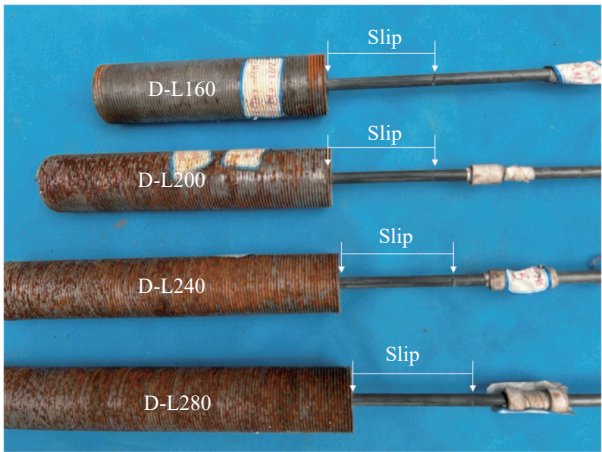
纵向冲击试件的索力-时程曲线如图 7 所示。所有试件均迅速达到最大索力，之后由于 CFRP 筋材的滑出，索力快速下降，此后试件的粘结力仅由滑动摩擦力提供并趋于稳定，索力-时程曲线呈现出平台段；最后因筋材拔出位移达到支架下落的最大行程 80 mm，索力传感器不再受力并快速下降为 0。峰值索力随锚固长度的增加而增大，试件滑移达到支架最大行程 80 mm 所经历的时间也更长。

2.3 冲击作用下 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件的滑移-时程曲线

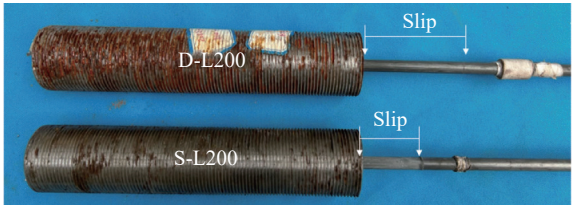
冲击试件试验锚具加载端滑移-时程曲线的时程如图 8 所示。冲击荷载作用下筋材滑移量持续增加直至最大行程 80 mm。滑移-时程曲线的滑移



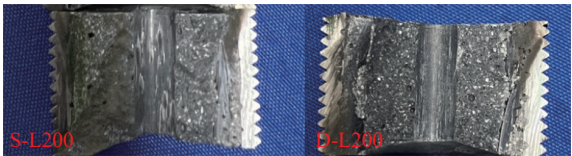
(a) Failure modes of experimental anchorage under static loads



(b) Failure modes of experimental anchorage under impact loads



(c) Surface state of CFRP smooth bar after static and impact loads



(d) Surface state of UHPC interface after static and impact loads

图 6 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件在静力和纵向冲击加载下的破坏形态

Fig. 6 Typical failure modes of CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens under static and impact loads

速率均在峰值荷载对应时刻发生改变，峰值后的

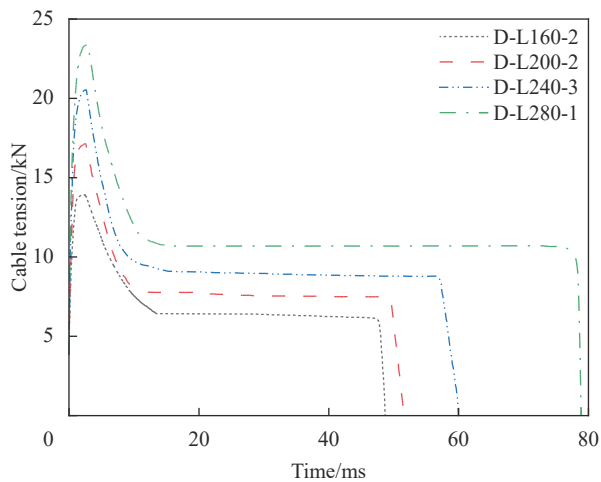


图7 冲击荷载作用下 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件的索力-时程曲线

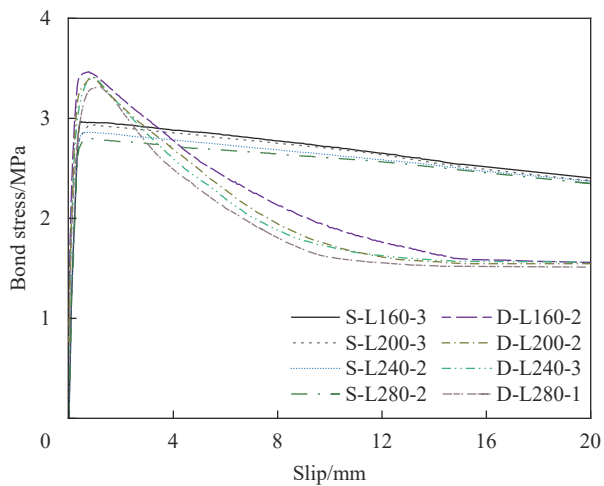


图9 静力和冲击荷载作用下 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件的 粘结应力-滑移曲线

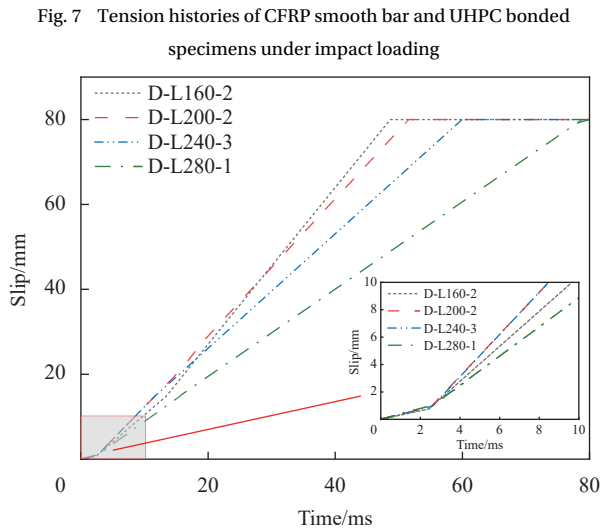


图8 冲击荷载作用下 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件的滑移-时程曲线

Fig. 8 Slip histories of CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens under impact loading

滑移速率约为峰值前滑移速率的 2~3 倍，表明峰值荷载后 CFRP 筋与 UHPC 界面间的粘结性能明显退化，主要是 CFRP 筋材与 UHPC 界面间的化学粘结作用在峰值荷载后完全丧失，仅存稳定的滑动摩擦作用。

2.4 静力及冲击作用下 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件的粘结应力-滑移曲线

静力及纵向冲击作用下试件试验锚具加载端典型的粘结应力-滑移曲线如图 9 所示。从图 9 并结合表 3 的试验结果可以看出：

(1) 不同锚固长度下的静力及纵向冲击试件的粘结应力-滑移曲线分别相近。静力试件的粘结应力-滑移曲线可明显分为峰值点前、后的上升段和下降段，滑移约 15 mm 后，不同锚固长度下的曲线趋同，可视为进入稳定段；动力试件的粘结应

Fig. 9 Bond stress-slip curves of CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens under static and impact loading

力-滑移曲线可明显分为峰值点前、后的上升段和下降段及滑移约 15 mm 后的稳定段，且稳定段较静力试件更趋平坦，源于动力试件拔出筋材表面更加光滑完整，摩擦系数更趋稳定所致；

(2) 无论是静力试件还是动力试件，加载初期，滑移不超过约 0.1 mm 时，粘结应力-滑移曲线均呈线性关系，此阶段的粘结强度由化学粘结力提供；随着荷载增加，滑移逐渐增大，CFRP 筋与 UHPC 界面从加载端向自由端逐渐脱粘，界面间的化学粘结力逐渐丧失，曲线呈非线性，界面应力主要由尚未脱粘部分的化学粘结力和脱粘界面的摩擦作用共同抵抗直至到达曲线的峰值点。峰值点后筋材自由端开始滑移，锚固长度范围内筋材表面的化学粘结力完全丧失，粘结强度几乎全部由摩擦力提供。这点从表 3 所示筋材自由端开始滑动时加载侧对应的滑移量 S_z 与峰值点处加载端的滑移值 S_0 极为接近可以推断出；

(3) 滑移 0.1 mm 时，动力试件的粘结应力较静力试件高约 53%；而稳定后的残余粘结强度却相应降低约 38%。表明 CFRP 光圆筋材与 UHPC 界面的化学粘结力具有正的应变率效应，而界面间的滑动摩擦力则呈现负的应变率效应^[36-38]。

2.5 锚固长度对 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件界面间静、动力粘结性能的影响

2.5.1 对界面化学粘结力的影响

不同锚固长度下静力及纵向冲击试件化学粘结强度的变化分别如图 10 和表 4 所示。可见，当锚固长度由 20d 逐渐增大至 35d 时，静力试件的

化学粘结强度分别为 1.16~1.24 MPa，均值为 1.20 MPa；纵向冲击试件的化学粘结强度则分别为 1.76~1.93 MPa，均值为 1.84 MPa。亦即虽然不同锚固长度试件的静、动态化学粘结强度各自有所变化，但变化幅度较小；而界面化学粘结强度呈现明显的正应变率效应。应变速率约为 4.0 s^{-1} 时，CFRP 光圆筋与 UHPC 界面的动态化学粘结强度较相应的静力值提高约 48%~56%，均值提高约 53%。

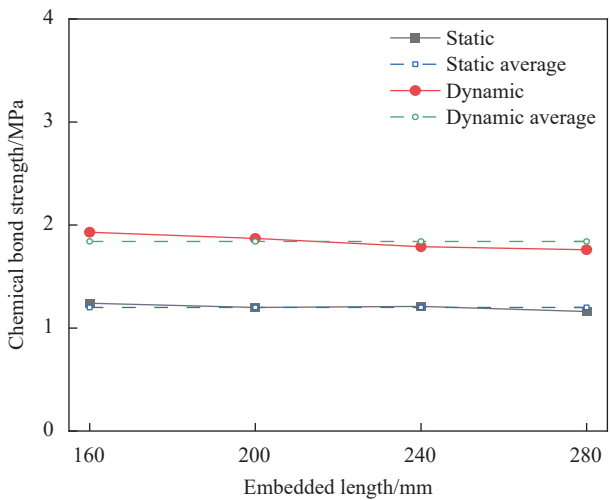


图 10 锚固长度对 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件化学粘结强度的影响
Fig. 10 Effect of embedded length on chemical bond strength of CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens

表 4 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件静、动态化学粘结强度对比
Table 4 Comparison of static and dynamic chemical bond strength between CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens

Embedded length/mm	$\tau_{s,a}$ /MPa	$\tau_{d,a}$ /MPa	$\tau_{d,a}/\tau_{s,a}$
160	1.24	1.93	1.56
200	1.20	1.87	1.56
240	1.21	1.79	1.48
280	1.16	1.76	1.52
Average	1.20	1.84	1.53

Note: $\tau_{s,a}$, $\tau_{d,a}$ —Static and dynamic chemical bond strength, respectively.

冲击荷载下 CFRP 筋材与 UHPC 界面间化学粘结作用得到提升，源于静力荷载作用下界面微观裂纹有足够的时间沿着阻力最小的路径发展，而在较高的加载速率下，界面微观裂纹未必沿阻力较小的路径发展^[35, 39-40]且 UHPC 及 CFRP 筋树脂基体的抗剪强度均随加载速率的增大而提升^[33-35]，致使 CFRP 筋的拔出阻力增大，界面间的化学粘结作用相应增强。

2.5.2 对峰值点处粘结强度的影响

不同锚固长度下静力及纵向冲击试件峰值点处粘结强度的变化分别如图 11 和表 5 所示。可见，当锚固长度由 $20d$ 逐渐增加至 $35d$ 时，静力试件的峰值粘结强度为 2.78~2.98 MPa，均值为 2.89 MPa；纵向冲击试件的峰值粘结强度为 3.34~3.47 MPa，均值为 3.39 MPa。亦即虽然不同锚固长度试件的静、动态峰值粘结强度各自有所变化，但变化幅度尚较小；与光圆钢筋和普通混凝土界面间的动态粘结强度类似^[21-23]，CFRP 光圆筋与 UHPC 界面的动态峰值粘结强度亦呈现较明显的正应变率效应，应变速率约为 4.0 s^{-1} 时的动态峰值粘结强度较相应的静力值提高约 16%~20%，均值约提高 17%。

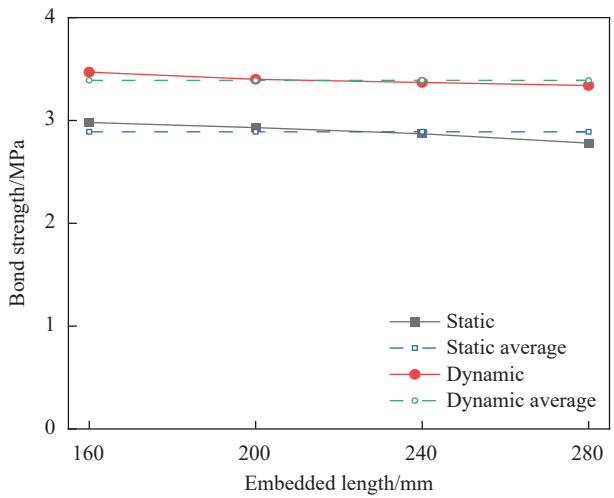


图 11 锚固长度对 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件峰值粘结强度的影响
Fig. 11 Effect of embedded length on peak bond strength of CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens

表 5 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件静、动态峰值粘结强度对比
Table 5 Comparison of static and dynamic peak bond strength between CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens

Embedded length/mm	$\tau_{s,m}$ /MPa	$\tau_{d,m}$ /MPa	$\tau_{d,m}/\tau_{s,m}$
160	2.98	3.47	1.16
200	2.93	3.40	1.16
240	2.87	3.37	1.17
280	2.78	3.34	1.20
Average	2.89	3.39	1.17

Note: $\tau_{s,m}$, $\tau_{d,m}$ —Static and dynamic peak bond strength, respectively.

冲击荷载作用下试件峰值点处的动态粘结强度仍得以提高，源于冲击荷载作用下峰值点处的界面化学粘结强度增幅(增加约 53%，见表 4)高

于界面滑动摩擦力的降幅 (降低约 38%，见表 6)，使峰值点处的动态粘结强度仍有所提高，但约 17% 的提高幅度明显低于界面化学粘结强度约 53% 的增幅。

表 6 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件静、动态残余粘结强度对比

Table 6 Comparison of static and dynamic residual bond strength between CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens

Embedded length/mm	$\tau_{s,r}$ /MPa	$\tau_{d,r}$ /MPa	$\tau_{d,r}/\tau_{s,r}$
160	2.52	1.60	0.63
200	2.50	1.58	0.63
240	2.50	1.55	0.62
280	2.49	1.52	0.61
Average	2.50	1.56	0.62

Note: $\tau_{s,r}$, $\tau_{d,r}$ —Static residual bond strength and dynamic residual bond strength, respectively.

2.5.3 对残余粘结强度的影响

不同锚固长度下静力及纵向冲击试件的残余粘结强度的变化分别如图 12 和表 6 所示。可见，当锚固长度由 20d 逐步增加至 35d 时，静力试件的残余粘结强度为 2.49~2.52 MPa，均值为 2.50 MPa；而纵向冲击试件的残余粘结强度为 1.52~1.60 MPa，均值为 1.56 MPa。亦即虽然不同锚固长度试件的静、动态残余粘结强度各自有所变化，但各自的变化幅度也较小；CFRP 光圆筋与 UHPC 界面的动态残余粘结强度呈现较明显的负应变率效应，应变速率约为 4.0 s⁻¹ 时的动态残余粘结强度较相应的静力值降低约 37%~39%，均值约降低 38%。冲击荷载下试件残余粘结强度即滑动摩擦力的下降源于 CFRP 筋材与 UHPC 之间的滑动摩擦系数随加载速率的增大而减小^[36-38]。

2.5.4 对峰值点处滑移量的影响

锚固长度对静力及纵向冲击试件峰值点处滑移量的影响如图 13 所示。可知，静力和纵向冲击荷载作用下，峰值点处滑移量均随锚固长度的增加而增大。当锚固长度由 20d 增大至 25d、30d 和 35d 时，静力试件的滑移量由 0.46 mm 增大至 0.53 mm、0.61 mm 和 0.68 mm，分别增大了 15.22%、32.61% 和 47.83%；纵向冲击试件的滑移量由 0.83 mm 增大至 0.91 mm、1.01 mm 和 1.08 mm，分别增大了 9.64%、21.69% 和 30.12%。源于锚固长度越长，锚固区内筋材的弹性伸长量越大^[7,16]。

图 14 对比了相同锚固长度试件在静力和纵向

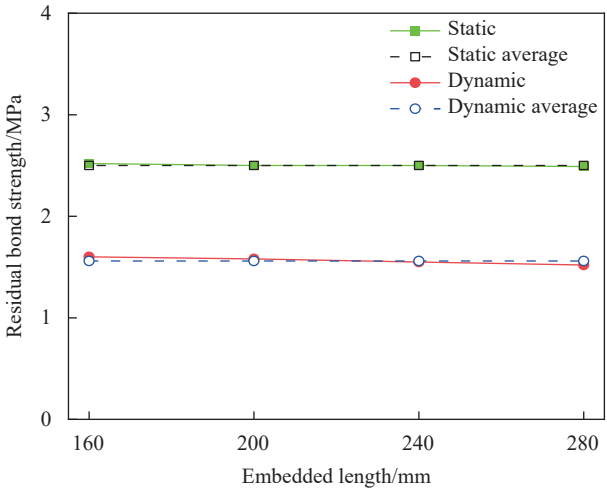


图 12 锚固长度对 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件残余粘结强度的影响

Fig. 12 Effect of embedded length on residual bond strength of CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens

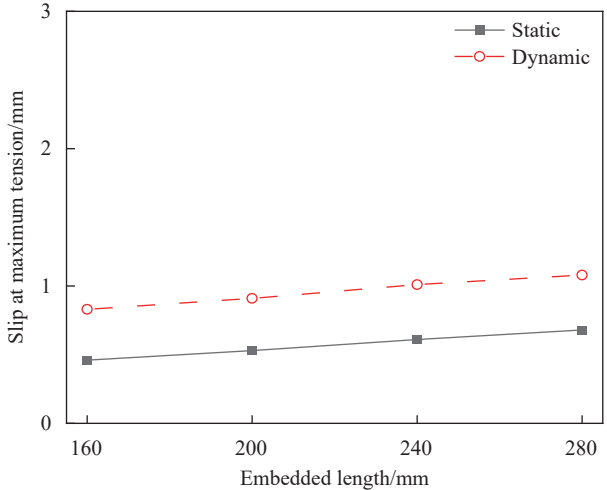


图 13 锚固长度对 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件峰值点处滑移量的影响

Fig. 13 Effect of embedded length on slip at maximum load of CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens

冲击荷载作用下峰值点处的滑移量。可见，相同锚固长度下冲击试件峰值点处的滑移量均较静力试件的大。锚固长度由 20d 提升至 25d、30d 和 35d 时，分别较静态滑移量增大了 80.43%、71.70%、65.57% 和 58.82%。这与普通混凝土中光圆钢筋峰值荷载对应滑移量随加载速率的提高而增大的结论相符^[21-23,41]。源于冲击荷载作用下试件的峰值索力更大，锚固区内筋材的弹性伸长也更大。

3 UHPC 中 CFRP 光圆筋的界面动态粘结强度及临界锚固长度

已有研究提出了静力作用下 CFRP 光圆筋与

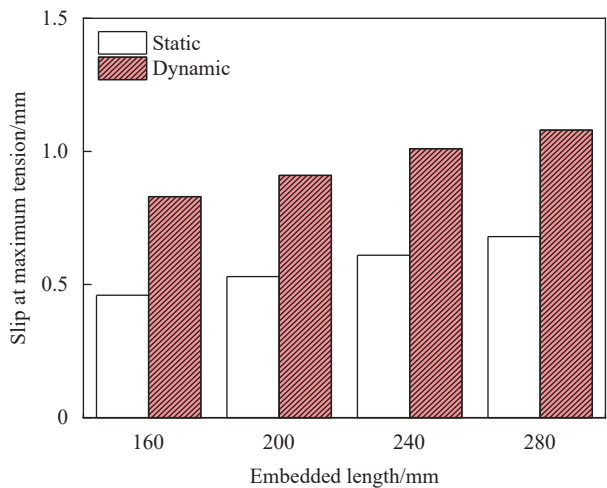


图 14 静力和纵向冲击荷载下 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结试件峰值索力对应滑移量的对比

Fig. 14 Comparison of static and dynamic slip at maximum load between CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens

UHPC 间的界面粘结强度 (前文述及的峰值粘结强度) 计算公式^[42]:

$$\tau_{s,m} = 0.08(1 + 0.07\alpha)f_{cu}^{3/4} \quad (3)$$

式中: $\tau_{s,m}$ 为静力试件的界面粘结强度 (MPa); α 为锚具套筒内壁倾角 (°); f_{cu} 为粘结介质 UHPC 的立方体抗压强度 (MPa)。

图 15 为本文静力试件实测值与式 (3) 计算值的比较, 平均值为 1.01, 变异系数为 0.04, 二者吻合良好, 表明上式具有良好的适用性, 故本文基于上式提出相应的动态粘结强度计算公式。

纵向冲击试验结果表明, 冲击作用下, CFRP 光圆筋与 UHPC 间的动态粘结强度会得到提升, 为量化冲击作用对峰值粘结强度的影响, 定义界面动态粘结强度增大系数 I_d :

$$I_d = \frac{\tau_{d,m}}{\tau_{s,m}} \quad (4)$$

式中, $\tau_{d,m}$ 为纵向冲击试件的峰值粘结强度 (MPa)。

由式 (3) 和式 (4), 可得界面动态粘结强度 $\tau_{d,m}$ 的预测公式:

$$\tau_{d,m} = 0.08I_d(1 + 0.07\alpha)f_{cu}^{3/4} \quad (5)$$

基于前述试验结果, 应变率 3.65~4.06 s⁻¹ 时, 可取动态粘结强度增大系数 $I_d=1.17$ 。

纵向冲击试件粘结强度试验值与预测值的比较如图 16 所示, 平均值为 1.00, 变异系数为 0.03, 二者吻合良好, 表明式 (5) 对纵向冲击试件的动态粘结强度能给出较好的预测。

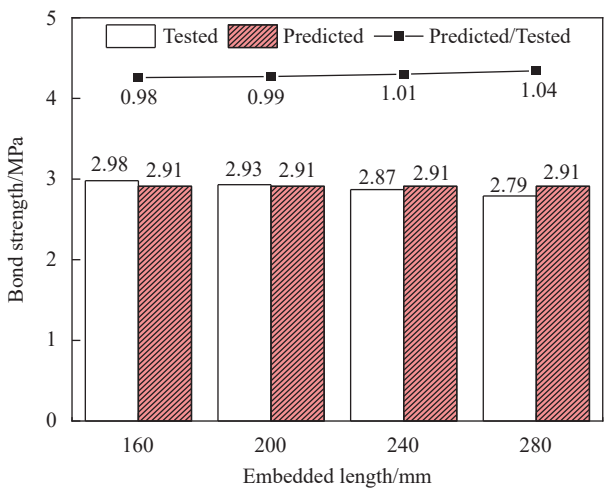


图 15 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结静力试件峰值粘结强度试验值与预测值的比较

Fig. 15 Comparison between the predicted and experimental of static peak bond strength of CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens

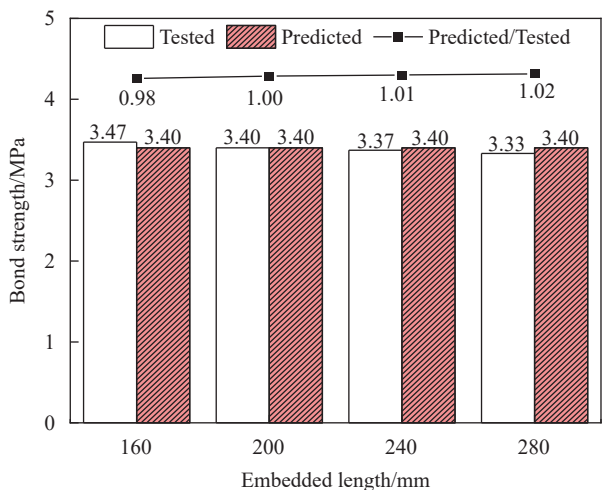


图 16 CFRP 光圆筋与 UHPC 粘结冲击试件动态粘结强度试验值与预测值的比较

Fig. 16 Comparison between the predicted and experimental of dynamic bond strength of CFRP smooth bar and UHPC bonded specimens

定义冲击作用下试件发生筋材拉断而非拔出破坏的最小锚固长度为临界锚固长度 l_{cr} , 则有

$$\pi dl_{cr}\tau_{d,m} = f_{d,t}A \quad (6)$$

式中, $f_{d,t}$ 为 CFRP 筋的动态抗拉强度 (MPa)。

Hou 等^[43]、Al-Zubaidy^[44] 对单向 CFRP 片材及层合板的应变率效应进行了研究, 结果表明: 在 0.002~31.32 s⁻¹ 的应变率范围内, CFRP 材料纵向抗拉强度无明显的应变率效应。故这里 CFRP 筋材的动态抗拉强度取其静态抗拉强度。

将式 (5) 代入式 (6), 可得 3.65~4.06 s⁻¹ 应变率

范围内, CFRP 光圆筋在 UHPC 中的临界锚固长度 l_{cr} 的计算公式如下:

$$l_{cr} = \frac{f_{d,t}d}{0.32I_d(1+0.07\alpha)f_{cu}^{0.75}} \quad (7)$$

将实测 $f_{d,t}$ 、 f_{cu} 、 d 和 I_d 等参数代入式 (7) 进行计算, 可得纵向冲击作用下, 采用抗压强度为 120.5 MPa 的 UHPC 作为粘结介质时, 8 mm 直径的 CFRP 光圆筋的纵向冲击临界锚固长度 l_{cr} 为 223d (1 778 mm), 结合式 (3) 与式 (6) 计算可得, 此时静力试件临界锚固长度计算值为 260d (2 080 mm), CFRP 光圆筋的动态临界锚固长度约为相应静态值的 0.86 倍。

4 结论

基于静力拉拔和纵向冲击作用下, 碳纤维增强复合材料 (CFRP) 光圆筋在超高性能混凝土 (UHPC) 中粘结锚固性能的试验结果, 可得到以下结论:

(1) 锚固长度为 20d~35d 的静力和纵向冲击试件均发生 CFRP 筋材拔出的滑移失效。静力试件拔出筋材表面存在刮伤, UHPC 内表面可见部分残留树脂, 而纵向冲击试件拔出筋材表面无明显变化。锚固长度对界面间的化学粘结强度、峰值粘结强度及残余粘结强度的影响较小;

(2) 冲击荷载作用下, CFRP 光圆筋与 UHPC 间界面的动态化学粘结强度呈现正的应变率效应。应变速率约为 4.0 s^{-1} 时, 锚固长度 20d~35d 的 CFRP 光圆筋, 其与 UHPC 界面的化学粘结强度较相应的静力强度提高约 53%;

(3) 冲击荷载作用下, CFRP 光圆筋与 UHPC 间界面的动态峰值粘结强度也呈现正的应变率效应。应变速率约为 4.0 s^{-1} 时, 锚固长度 20d~35d 的 CFRP 光圆筋, 其与 UHPC 界面的动态峰值粘结强度较相应的静力强度提高约 17%;

(4) 冲击荷载作用下, CFRP 光圆筋与 UHPC 间界面的残余粘结强度即滑动摩擦力呈现负的应变率效应。应变速率约为 4.0 s^{-1} 时, 锚固长度 20d~35d 的 CFRP 光圆筋, 其与 UHPC 界面的残余粘结强度即滑动摩擦力较相应的静力残余粘结强度降低约 38%;

(5) 基于试验结果建立了冲击作用下 CFRP 光圆筋与 UHPC 间的粘结强度及临界锚固长度计算公式。采用抗压强度不低于 120.5 MPa 的 UHPC 作为粘结介质时, 直径 8 mm 的 CFRP 光圆筋的动

态临界锚固长度为 223d, 约为静力临界锚固长度的 0.86 倍。

需要说明的是, 本文仅对静力和应变速率约为 4.0 s^{-1} 的冲击荷载下, 不同锚固长度 CFRP 光圆筋与 UHPC 间的粘结性能进行了试验研究, 不同筋材直径、UHPC 强度等级和应变速率对界面粘结性能的影响有待后续研究中的进一步明确。

参考文献:

- [1] FANG Y W, FANG Z, JIANG Z W, et al. Investigation on failure behavior of carbon fiber reinforced polymer wire subjected to combined tension and bending[J]. *Composite Structures*, 2021, 267: 113927.
- [2] 叶列平, 冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(3): 24-36.
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(3): 24-36(in Chinese).
- [3] FANG Y W, FANG Z, XIANG Y, et al. Charpy impact properties of uni-directional carbon fiber-reinforced polymer tendons with protective layers[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2023, 26(1): 36-51
- [4] 方亚威. 不同温度作用下碳纤维复合材料筋的静力和抗冲击性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
FANG Yawei. Investigation on static and impact behavior of carbon fiber reinforced polymer bar with considering temperature effect[D]. Changsha: Hunan University, 2020(in Chinese).
- [5] 宋进辉. 大吨位FRP拉索整体锚固体系优化设计及性能评价[D]. 南京: 东南大学, 2017.
SONG Jinhui. Optimal design and performance evaluation of integral anchoring system with large tonnage FRP cable[D]. Nanjing: Southeast University, 2017(in Chinese).
- [6] 梅葵花, 吕志涛, 张继文. CFRP筋粘结型锚具试验研究及实桥应用分析[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(1): 53-60.
MEI Kuihua, LYU Zhitao, ZHANG Jiwen. Experimental study and practical application of bond-type anchorages for CFRP tendons[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(1): 53-60(in Chinese).
- [7] 方志, 梁栋, 蒋田勇. 不同粘结介质中CFRP筋锚固性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(6): 47-51.
FANG Zhi, LIANG Dong, JIANG Tianyong. Experiment investigation on the anchorage performance of CFRP tendon in different bond mediums[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(6): 47-51(in Chinese).
- [8] 蒋田勇, 方志. CFRP筋粘结式锚具锚固性能试验[J]. *中国公路学报*, 2011, 24(1): 72-81.

- JIANG Tianyong, FANG Zhi. Experiment on anchorage performance of bond-type anchorage for CFRP tendon[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(1): 72-81(in Chinese).
- [9] ZHANG K, FANG Z, NANNI A, et al. Experimental study of a large-scale ground anchor system with FRP tendon and RPC grout medium[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(4): 04014073.
- [10] FANG Z, ZHANG K, TU B. Experimental investigation of a bond-type anchorage system for multiple FRP tendons[J]. *Engineering Structures*, 2013, 57: 364-373.
- [11] FANG Y W, FANG Z, HUANG D B, et al. Experimental investigation on mechanical performance of carbon fiber reinforced polymer wire after exposure to elevated temperature[J]. *Composite Structures*, 2021, 274: 114388.
- [12] 张羽, 方志, 卢江波, 等. 大跨混凝土斜拉桥施工过程中结构的断索动力响应[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(5): 237-246.
- ZHANG Yu, FANG Zhi, LU Jiangbo, et al. Broken cable-induced dynamic response of long-span concrete cable stayed bridge during construction[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(5): 237-246(in Chinese).
- [13] FANG Y W, FANG Z, JIANG R N, et al. Effect of temperature on the transverse impact performance of preloaded CFRP wire[J]. *Composite Structures*, 2020, 231: 111464.
- [14] FANG Y W, FANG Z, JIANG R N, et al. Transverse static and low-velocity impact behavior of CFRP wires under pretension[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(5): 04019041.
- [15] 李维博. 冲击荷载作用下CFRP筋-混凝土界面力学性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- LI Weibo. Experiment study on dynamic bond behavior of CFRP rebar to concrete interface under impact loads[D]. Changsha: Hunan University, 2017(in Chinese).
- [16] 方志, 奉礼鑫, 方亚威, 等. 冲击作用下CFRP筋粘结式锚固系统力学性能的试验研究[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(11): 5287-5299.
- FANG Zhi, FENG Lixin, FANG Yawei, et al. Experimental study on mechanical properties of CFRP bar bond-type anchorage system under impact[J]. *Acta Materialia Composita Sinica*, 2022, 39(11): 5287-5299(in Chinese).
- [17] FANG Y, FANG Z, FENG L, et al. Bond behavior of an ultra-high performance concrete-filled anchorage for carbon fiber-reinforced polymer tendons under static and impact loads[J]. *Engineering Structures*, 2023, 274: 115128.
- [18] XIONG Z, WEI W, HE S, et al. Dynamic bond behaviour of fibre-wrapped basalt fibre-reinforced polymer bars embedded in sea sand and recycled aggregate concrete under high-strain rate pull-out tests[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 276: 122195.
- [19] LI L, MAI G, HE S, et al. Experimental study on bond behaviour between recycled aggregate concrete and basalt fibre-reinforced polymer bars under different strain rates[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 290: 123218.
- [20] 向宇, 方志, 王常林. 碳纤维拉索及其锚固系统抗冲击性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(12): 82-90.
- XIANG Yu, FANG Zhi, WANG Changlin. Experimental study on impact behaviors of CFRP cable and its anchoring system[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(12): 82-90(in Chinese).
- [21] YAN C. Bond between reinforcing bars and concrete under impact loading[D]. Vancouver: University of British Columbia, 1992.
- [22] WEATHERSBY J H. Investigation of bond slip between concrete and steel reinforcement under dynamic loading conditions[D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2003.
- [23] 付应乾, 余效儒, 董新龙, 等. 应变率对光圆钢筋与混凝土“粘结-滑移”行为影响的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(6): 85-93.
- FU Yingqian, YU Xiaoru, DONG Xinlong, et al. An experimental study of dynamic bond-slip behaviors of plain steel bars in concrete at different strain rates[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(6): 85-93(in Chinese).
- [24] 中国建筑材料联合会. 纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法: GB/T 30022—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- China Building Materials Federation. Test method for basic mechanical properties of fiber reinforced polymer bar: GB/T 30022—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013(in Chinese).
- [25] 中国建筑材料联合会. 超高性能混凝土试验方法标准: T/CECS 864—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- China Building Materials Federation. Standard for test methods of ultra-high performance concrete: T/CECS 864—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021(in Chinese).
- [26] 中国建筑材料联合会. 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- China Building Materials Federation. Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015(in Chinese).
- [27] 诸葛萍, 强士中. 新型CFRP筋夹片式锚具理论与试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(10): 67-72.
- ZHU Geping, QIANG Shizhong. Theoretical and experimental investigation of a new CFRP tendon wedge-anchor[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(10): 67-72(in Chinese).
- [28] 中国建筑材料联合会. 预应力筋用锚具、夹具和连接器: GB/T 14370—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

- China Building Materials Federation. Anchorage, grip and coupler for prestressing tendons: GB/T 14370—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015(in Chinese).
- [29] 李正辉. 落石冲击下拱形明洞落石冲击荷载及荷载效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- LI Zhenghui. Research on rock-fall impact loads and loads effects of arch open tunnel under the impact of rock[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017(in Chinese).
- [30] 刘练. 不同应变率下混凝土纵向冲击力学性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- LIU Lian. Experimental study on dynamic mechanical properties of concrete under different strain rates[D]. Changsha: Hunan University, 2017(in Chinese).
- [31] 张羽. 大跨混凝土斜拉桥断索后结构受力性能及倒塌破坏研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- ZHANG Yu. Investigation on structural performance and progressive collapse of a long-span concrete cable-stayed bridge subjected to cable loss[D]. Changsha: Hunan University, 2020(in Chinese).
- [32] ACHILLIDES Z, PILAKOUTAS K. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(2): 173-181.
- [33] KUMAR C, SINGH K K, RAWAT P, et al. Effect of loading rate on inter laminar shear strength (ILSS) of highly doped MWCNTs carbon/epoxy laminates[J]. *IOP Publishing*, 2018, 455(1): 012006.
- [34] PAPADAKIS N, REYNOLDS N, PHARAOH M W, et al. Strain rate effects on the shear mechanical properties of a highly oriented thermoplastic composite material using a contacting displacement measurement methodology—Part A: Elasticity and shear strength[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(5): 729-738.
- [35] TAI Y S, EL-TAWIL S, CHUNG T H. Performance of deformed steel fibers embedded in ultra-high performance concrete subjected to various pullout rates[J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 89: 1-13.
- [36] BAKIS C E, UPPULURI V S, NANNI A, et al. Analysis of bonding mechanisms of smooth and lugged FRP rods embedded in concrete[J]. *Composites Science and Technology*, 1998, 58(8): 1307-1319.
- [37] CHEN W, MENG F, SUN H, et al. Bond behaviors of BFRP bar-to-concrete interface under dynamic loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 305: 124812.
- [38] ZHANG R, JIN L, LIU M, et al. Refined modeling of the interfacial behavior between FRP bars and concrete under different loading rates[J]. *Composite Structures*, 2022, 291: 115676.
- [39] 朱平, 池颜海, 易笃韬, 等. 混杂钢纤维对钢纤维-超高性能混凝土界面粘结性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(10): 1669-1681.
- ZHU Ping, CHI Yanhai, YI Dutao, et al. Influence of hybrid steel fibers on interfacial bond performance between steel fiber and ultra high-performance concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(10): 1669-1681(in Chinese).
- [40] ZIELINSKI A J. Fracture of concrete and mortar under uniaxial impact tensile loading[D]. Delft: Delft University of Technology, 1982.
- [41] MO Y L, CHAN J. Bond and slip of plain rebars in concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1996, 8(4): 208-211.
- [42] 方志, 蒋田勇, 梁栋. CFRP筋在活性粉末混凝土中的锚固性能[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2007(7): 1-5
- FANG Zhi, JIANG Tianyong, LIANG Dong. The anchorage behavior of CFRP tendons in RPC[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2007(7): 1-5(in Chinese).
- [43] HOU J P, RUIZ C. Measurement of the properties of woven CFRP T300/914 at different strain rates[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60(15): 2829-2834.
- [44] AL-ZUBAIDY H, ZHAO X L, AL-MAHAIDI R. Mechanical characterisation of the dynamic tensile properties of CFRP sheet and adhesive at medium strain rates[J]. *Composite Structures*, 2013, 96: 153-164.