

含粗骨料超高性能混凝土与钢筋黏结性能研究

黄远^{1,2†}, 吴仁迪¹

[1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;
2. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南 长沙 410082]

摘要:在超高性能混凝土(UHPC)中加入粗骨料可以有效地解决 UHPC 自身收缩大、成本高等问题。为了研究弯曲应力状态下含粗骨料超高性能混凝土(UHPC-CA)与钢筋的黏结性能,对 12 根 UHPC-CA 搭接梁式试件进行 4 点弯曲加载试验,并采用钢筋开槽粘贴应变片的方式测量了沿搭接钢筋长度方向黏结应力,研究其分布规律。主要研究参数包括粗骨料粒径、粗骨料含量、搭接长度以及保护层厚度。试验结果表明,试件破坏以劈裂破坏为主。粗骨料对钢筋的黏结性能具有双重影响,一方面,骨料与钢筋的互锁机制能增强机械咬合力,提升黏结强度;另一方面,骨料的加入会增加材料的不均匀程度,对黏结性能产生不利影响。5~10 mm 粒径的骨料对黏结性能的影响比 10~15 mm 粒径的骨料更显著,当骨料含量达到 800 kg/m³ 时,钢筋黏结应力沿搭接长度方向的分布变得更均匀。增大钢筋搭接长度和增加混凝土保护层厚度均能增强对黏结强度的保持作用,从而提高试件的峰后黏结强度。提出了考虑粗骨料特征参数的 UHPC-CA 劈裂黏结强度计算表达式,计算结果与试验结果吻合良好。

关键词:超高性能混凝土;粗骨料;黏结性能;梁式试验;搭接
中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A

Study on Bonding Performance of Ultra-high Performance Concrete with Coarse Aggregate and Reinforcement Bars

HUANG Yuan^{1,2†}, WU Rend¹

[1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures of Hunan Province (Hunan University), Changsha 410082, China]

Abstract: The inclusion of coarse aggregates in ultra-high performance concrete (UHPC) can effectively address the issues of high shrinkage and high cost associated with UHPC. This study investigated the bond properties of UHPC with coarse aggregate (UHPC-CA) and steel reinforcement under flexural stress using 12 lap-spliced beam specimens in 4-point bending tests. The distribution pattern of bond stress along the length of the lap splice reinforcement has been obtained by milling a slot on the surface of the steel reinforcement and pasting strain gauges evenly. Key variables studied included coarse aggregate (CA) size, CA content, splice length, and cover depth. The specimens primarily failed in splitting. The results showed that CA affected the bond performance in two ways: it

* 收稿日期:2024-03-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51890901), National Natural Science Foundation of China (51890901); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ2003, 2020RC5005), Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ2003, 2020RC5005)

作者简介:黄远(1982—),男,湖南衡阳人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人, E-mail: huangy@hnu.edu.cn

enhanced the mechanical interlock and bonding strength but also increased material inhomogeneity, which may reduce bond quality. Notably, smaller CA (5~10 mm) had a more significant impact than larger CA (10~15 mm). Increasing CA content to 800 kg/m³ made the bond stress distribution along the splice length more uniform. Extending splice length and increasing cover depth improved bonding strength retention and post-peak performance. A formula was developed to predict splitting bond strength, aligning well with experimental findings.

Key words: ultra-high performance concrete (UHPC); coarse aggregate (CA); bond behavior; beam test; lap splice

超高性能混凝土是一种新型水泥基复合材料,通常由水泥、硅粉、细石英砂、高掺量减水剂和纤维构成,有时也包含其他辅助胶凝材料和粗骨料^[1]. UHPC具有优越的力学性能,但其水灰比低,导致较高的体积收缩率,且表面容易产生早期干燥裂缝^[2].为了解决上述问题,学者们提出在UHPC中加入粗骨料^[3],形成含粗骨料超高性能混凝土(UHPC-CA),通过粗骨料的约束作用降低UHPC的自收缩以及早期开裂的风险.与此同时,由于粗骨料取代了一部分胶凝材料,可以在一定程度上降低UHPC材料的成本^[3].目前UHPC-CA已在实际工程中得到了应用,包括南京第五长江大桥和上海松浦大桥等^[4-5].为了推广UHPC-CA在结构工程中的应用,研究钢筋与UHPC-CA之间的黏结性能至关重要^[6-7].

Iqbal等^[8]通过研究不同粒径骨料对钢筋与普通混凝土黏结性能的影响,发现当最大骨料粒径小于10 mm时,钢筋的黏结强度明显降低.Walach^[9]研究了骨料粒径对普通混凝土和高强混凝土中钢筋黏结性能影响的差异,结果表明普通混凝土中钢筋黏结性能随骨料粒径的增大而降低,但在高强混凝土中骨料粒径变化对黏结强度没有明显影响.本课题组^[10]改进了拔出试验,并进一步探究了粗骨料的加入对拔出试件中钢筋黏结性能的影响,试验结果表明较小粒径的粗骨料对黏结强度的提升幅度能达到14.49%^[11].

相较于短锚试验,梁式搭接试验更能反映实际结构中钢筋的黏结状态^[12].Maya等^[13]开展了UHPC节点区域钢筋搭接黏结性能试验研究,得出15倍钢筋直径的搭接长度能够使试件达到理论抗弯强度.Valentim等^[14]同时开展了短锚拔出试验和梁式搭接试验,探究了不同参数对钢筋-UHPC黏结性能的影响.Bae等^[15]研究了两种类型的钢纤维混合对钢筋黏结性能的影响,结果表明两种钢纤维混合能够提高

钢筋的黏结强度.Ronanki等^[6]开展了拉拔试验和梁式搭接试验,发现钢筋黏结应力沿长度方向分布不均匀.Liang等^[7]开展了一系列梁式搭接试验,探究钢筋与UHPC的黏结性能,并提出劈裂黏结强度的计算表达式.Hung等^[16]对16个全尺寸UHPC梁进行4点加载试验,得出粗骨料能够增强钢筋与UHPC的黏结强度的结论.

已有的相关研究中并未考虑到不同骨料粒径以及不同骨料含量的变化对UHPC和钢筋黏结性能的影响.因此本文设计梁式搭接试验,以探究弯曲应力状态下钢筋与UHPC-CA的黏结性能.主要研究参数包括粗骨料含量、粗骨料粒径、钢筋搭接长度以及钢筋保护层厚度.研究不同参数对钢筋与UHPC-CA黏结性能的影响.探究了不同骨料含量下钢筋黏结应力沿钢筋搭接方向的分布规律.并提出了考虑粗骨料特征参数的UHPC-CA构件劈裂黏结强度计算表达式.

1 试验概况

1.1 试件设计

本研究一共设计了12根梁式试件,试件梁的截面尺寸均为200 mm×300 mm,梁长度为1 500 mm,计算跨度为1 300 mm.所有试件均采用4点加载的方式进行试验.钢筋搭接段均设在试件纯弯段内,以确保搭接钢筋与周围UHPC-CA基体在加载过程中均处于受拉的应力状态.同时,为了使UHPC-CA梁表面裂缝数量足够多,避免加载点位置处可能形成塑性铰区域而对钢筋-UHPC-CA黏结性能产生影响,纯弯段的长度不宜小于搭接段长度与梁截面高度之和^[17].

梁底纵筋选用2根直径16 mm的HRB600热轧带肋钢筋,梁顶架立筋选用2根直径10 mm的

HRB500 热轧带肋钢筋. 为探究 UHPC-CA 梁的劈裂破坏特征, 钢筋的搭接长度取为 $8d_b$ (d_b 为钢筋直径)^[13]. 位于搭接段外侧的钢筋从梁内一直延伸到梁外, 并用 PVC 管将钢筋与 UHPC-CA 隔开, 钢筋与 PVC 管之间的空隙用发泡胶进行填充, 防止浇筑时 UHPC 流入 PVC 管^[7,12]. 在梁的剪跨段范围内布置直径为 6 mm, 间距为 70 mm 的 HRB400 级双支箍筋.

根据参考文献[11,16]以及 UHPC-CA 在实际工程中的应用, 选择玄武岩碎石作为 UHPC-CA 中的粗骨料. 其中, 骨料粒径的选取包括 5~10 mm 粒径组和 10~15 mm 粒径组两种, 钢筋肋间间距为 10.2 mm, 两

种粒径的选择分别对应于小于钢筋肋间距离和大于钢筋肋间距离的情况. 骨料含量分别取 0、400、600、800 kg/m³, 共 4 种, 搭接长度为 $8d_b$ 、 $10d_b$ 、 $12d_b$ 、 $15d_b$, 共 4 组, 保护层厚度分别为 $1d_b$ 、 $1.5d_b$ 、 $2d_b$, 共 3 组.

所有试件的参数详见表 1, 试件编号分为 5 部分, 分别表示骨料粒径、骨料含量、钢纤维体积掺量、搭接长度和保护层厚度的取值, 其中钢纤维体积掺量编号均为 S2. 如试件 DA-G4-S2-L8-C1.5, 表示骨料粒径为 5~10 mm, 含量 400 kg/m³, 搭接长度 $8d_b$, 最小保护层厚度为 $1.5d_b$. 试件几何参数以及配筋情况如图 1 所示.

表 1 试件参数汇总

Tab.1 Summary of specimen parameters

试件编号	骨料含量/(kg·m ⁻³)	$c_b=c_{s0}$ /mm	c_{si} /mm	c_m/d_b	l_s/d_b	f_c /MPa	f_t /MPa	τ_u /MPa	τ_3 /MPa	破坏模式
DA-G0-S2-L8-C1.5	0	24	42	1.5	8	147.80	9.32	15.58	7.11	劈裂破坏
DA-G4-S2-L8-C1.5	400	24	42	1.5	8	155.96	8.32	12.33	6.84	劈裂破坏
DA-G6-S2-L8-C1.5	600	24	42	1.5	8	157.69	8.44	13.49	8.59	劈裂破坏
DA-G8-S2-L8-C1.5	800	24	42	1.5	8	159.36	8.15	16.53	11.46	劈裂破坏
DB-G4-S2-L8-C1.5	400	24	42	1.5	8	162.46	7.62	15.06	10.77	劈裂破坏
DB-G6-S2-L8-C1.5	600	24	42	1.5	8	162.60	7.58	14.21	9.21	劈裂破坏
DB-G8-S2-L8-C1.5	800	24	42	1.5	8	165.62	7.69	14.5	10.18	劈裂破坏
DA-G4-S2-L10-C1.5	400	24	42	1.5	10	155.96	8.32	13.51	10.46	劈裂破坏
DA-G4-S2-L12-C1.5	400	24	42	1.5	12	155.96	8.32	12.64	10.07	劈裂破坏
DA-G4-S2-L15-C1.5	400	24	42	1.5	15	155.96	8.32	11.83	11.76	屈服+劈裂破坏
DA-G4-S2-L8-C1	400	16	50	1.0	8	155.96	8.32	11.11	6.35	劈裂破坏
DA-G4-S2-L8-C2	400	32	34	2.0	8	155.96	8.32	13.15	10.07	弯曲拔出破坏

注: c_b 为搭接钢筋底面保护层厚度; c_{s0} 为搭接钢筋侧面保护层厚度; c_{si} 为搭接钢筋净间距的 1/2; $c_m=\min(c_b, c_{s0}, c_{si})$; l_s 为搭接长度; f_c 为 UHPC-CA 材料立方体抗压强度; f_t 为 UHPC-CA 材料抗拉强度; τ_u 为试件峰值黏结强度; τ_3 为钢筋滑移至 3 mm 时, 试验梁的峰后黏结强度.

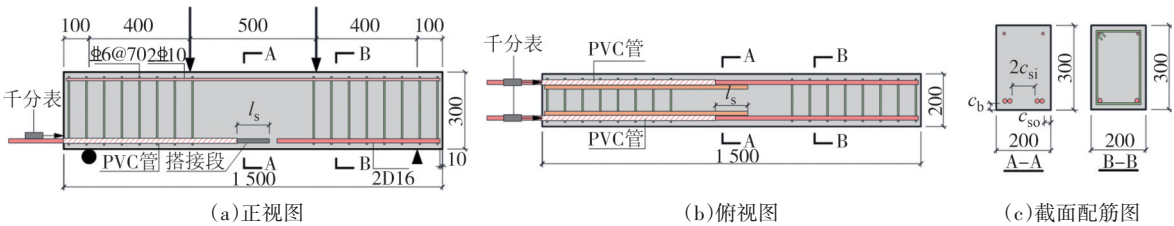


图 1 试件几何参数(单位:mm)

Fig.1 Geometric parameters of the specimen (unit: mm)

1.2 材料性能

UHPC-CA 由水泥、石英粉、石英砂、粉煤灰、硅灰、高效减水剂、钢纤维以及玄武岩碎石混合而成, 水胶比为 0.18^[11]. 具体成分如表 2 所示. 钢纤维选用直径为 0.2 mm, 长度为 13 mm 的直钢纤维. 为了确保粗骨料的工作性能, 在与 UHPC 混合之前须经过清洗和干燥的处理工序, 以防止灰尘等杂质对骨料与 UHPC 黏结界面造成影响^[11]. 不同粒径粗骨料样品如图 2(a)所示.

表 2 UHPC 材料配比

Tab.2 UHPC material mix ratio						
水泥	石英粉	硅粉	火山灰	石英砂	水胶比	钢纤维掺量/%
1.0	0.25	0.25	0.1	1.1	0.18	2

注: 减水剂按照胶凝材料质量的 0.2% 参加, 粗骨料掺量根据不同的参数进行配置.

钢筋表面特征如图 2(b)所示. 根据《金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1—

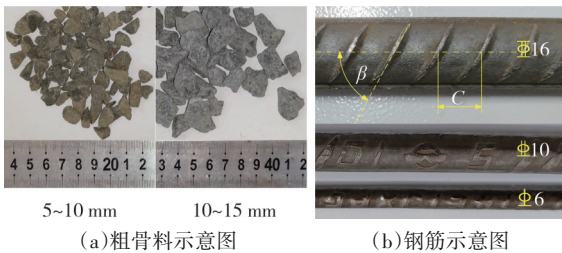


图 2 粗骨料及钢筋示意图

Fig.2 Schematic diagram of CA and steel bars

2021)^[18]的要求对热轧带肋钢筋进行单轴拉伸强度测试,测量结果详见表 3.

表 3 钢筋几何特征与力学性能					
Tab.3 Geometric and mechanical properties of steel bars					
钢筋直径 d_b/mm	$B/^\circ$	C/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/GPa
6	55	4.0	483	617	200
10	55	7.0	539	734	200
16	60.5	10.0	688	865	200

按照《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)^[19]的要求,UHPC-CA 材料的抗压强度采用边长为 100 mm 的立方体进行测试,抗拉强度则根据《超高性能混凝土试验方法标准》(T/CECS 864—2021)^[20]所采用的方法,对截面尺寸为 50 mm×100 mm 的狗骨型试块进行单轴拉伸试验.每组测试 3 个试块并对结果取平均值.UHPC-CA 的立方体抗压强度和单轴抗拉强度测量结果见表 1.

1.3 量测方案与试验装置

采用 4 点弯曲加载,利用 DYG200-300 型电动液压千斤顶施加集中力,通过分配梁传递到 UHPC-CA 简支梁上.纯弯段长度为 500 mm,剪跨段长度为 400 mm,如图 3 所示.峰值荷载前采用以力控制的加载方式,每一级荷载为 20 kN,峰后采用位移控制加载,直至试件破坏,承载力下降至峰值荷载的 50% 时停止加载.

在试验梁跨中和两边支座各布置一个位移计,用以测量加载过程中试件跨中挠度的变化.同时,在两根外伸的钢筋上各布置一个千分表用于测量加载过程中钢筋与 UHPC-CA 的相对滑移.在梁顶与梁底面跨中区域均贴两个混凝土应变片,观测 UHPC 的开裂荷载以及受压区混凝土的压应变发展规律.

对部分试件的搭接钢筋表面开一条宽 3 mm,深

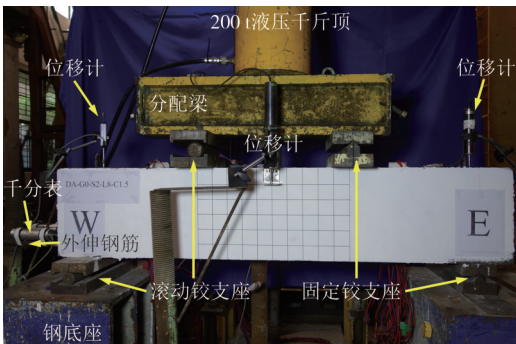


图 3 梁试验装置

Fig.3 Test setup of the beams

2 mm 的沿钢筋长度方向的长槽,在槽内均匀粘贴应变片,测量钢筋应变沿搭接长度方向的发展规律^[11].从而探究搭接段钢筋与 UHPC-CA 之间黏结应力的分布规律.搭接段区域内侧和外侧各选取一根钢筋进行应变测点的布置,与之对称的另一根钢筋仅在搭接段中部与末端粘贴两个应变片,本文仅针对 5~10 mm 粒径骨料含量参数变化的试件进行搭接段黏结应力的测量.具体应变测点布置方式如图 4 所示.

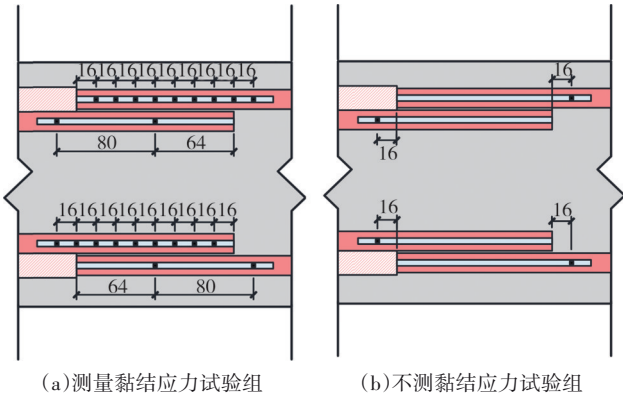


图 4 钢筋表面应变片布置位置(单位:mm)

Fig.4 Strain gauge arrangement on steel bars(unit:mm)

2 试验现象及结果

2.1 试件破坏模式

试件的主要破坏模式为劈裂破坏,在梁底面和侧面观察到明显的沿钢筋长度方向的纵向劈裂裂缝,同时在搭接区域的边缘,由于弯拉应力的作用还出现贯通梁底的横向弯曲裂缝,试件整体表现为拱形裂缝特征,如图 5 所示.表 1 列出了所有试件的破坏模式.

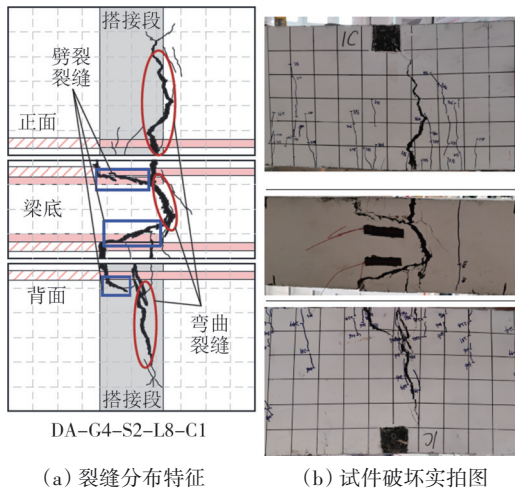


图5 试验梁纯弯段典型破坏模式

Fig.5 Typical failure mode of the pure bending section of the test beams

根据文献[7]提出的搭接钢筋劈裂开裂机理,搭接钢筋在相对滑移的过程中对其周围UHPC-CA产生环向拉应力,进而导致钢筋周围形成纵向微劈裂裂缝,随着钢筋滑移量的增加,微劈裂裂缝逐渐贯通并向外延伸,导致钢筋与UHPC-CA之间的黏结强度降低,最终试件由于搭接钢筋无法有效传递轴力而丧失承载力。

2.2 平均黏结应力-滑移曲线

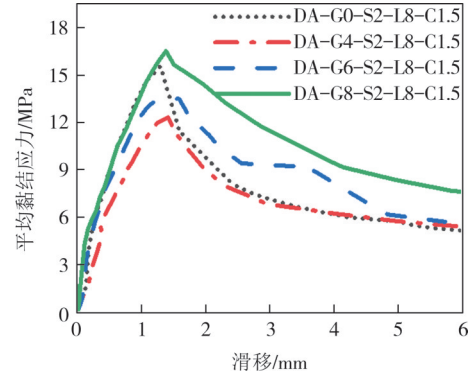
根据搭接段末端钢筋轴力可以计算搭接钢筋与UHPC-CA界面之间的平均黏结应力,如式(1)所示:

$$\tau = \frac{A_s f_s}{\pi d_b l_s} = \frac{f_s d_b}{4 l_s} \quad (1)$$

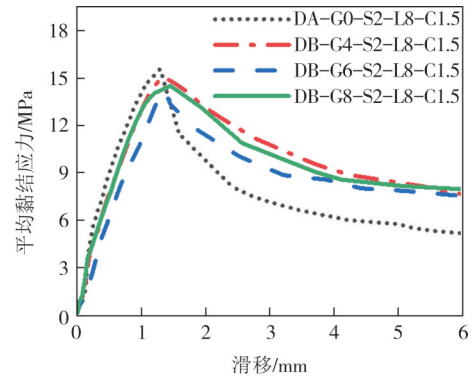
式中: τ 表示搭接段范围内钢筋的平均黏结应力; A_s 为钢筋截面面积; f_s 为搭接段末端钢筋的轴向应力,根据钢筋应变实测值以及钢筋本构关系确定; l_s 为钢筋搭接长度。

不同参数下梁式搭接试件的平均黏结应力-滑移曲线如图6所示,从图中可以看出,平均黏结应力-滑移曲线的发展趋势可以分为4个阶段。1)线性阶段,黏结应力呈线性增加,此时试件整体内力较小,UHPC-CA与搭接钢筋没有发生相对滑移;2)微裂缝发展阶段,随着荷载继续增加,梁底拉应力通过钢筋肋与UHPC-CA的机械咬合作用传递到钢筋上,同时UHPC-CA在钢筋的环向挤压下产生微裂缝,当达到峰值黏结强度时试件发生劈裂破坏或弯曲拔出破坏;3)劈裂裂缝发展阶段,峰值荷载后,搭接钢筋滑移量突然变大,黏结应力也逐渐下降,此时微裂缝相互贯通,劈裂裂缝持续发展;4)残余阶段,在黏结应力-滑移曲线的最后阶段,试件的黏结应力保持稳

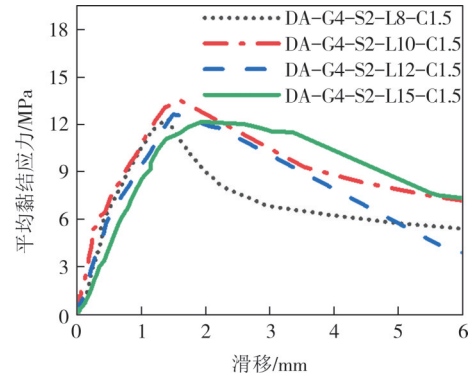
定,始终维持在峰值黏结应力的40%以上,UHPC-CA中骨料与钢筋肋的机械咬合以及钢纤维对裂缝的桥接作用共同维持了钢筋与UHPC-CA之间的残余黏结应力。



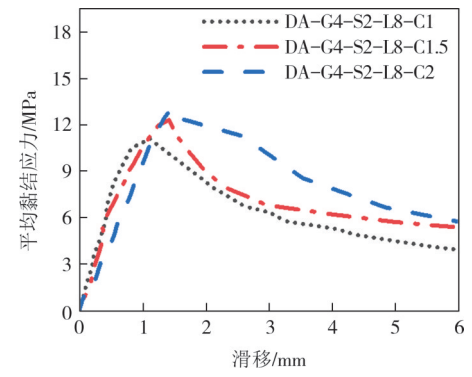
(a) 5~10mm 骨料粒径



(b) 10~15mm 骨料粒径



(c) 搭接长度



(d) 保护层厚度

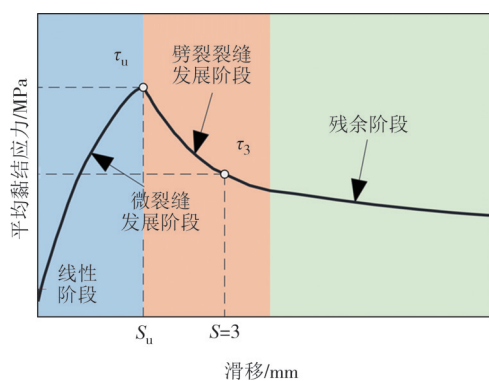
(e) 典型 τ - S 曲线

图6 平均黏结应力-滑移曲线

Fig.6 Average bond stress-slip curves

3 黏结强度分析

黏结应力-滑移试验结果如表1所示, τ_u 通过峰值荷载下钢筋的应力状态计算得出, τ_3 为实测钢筋滑移至3 mm时试件的残余黏结应力^[7]. 为更直观地比较不同参数设置下试验梁黏结性能的差异, 所有的黏结应力值都利用 $f_c^{1/2}$ 进行标准化处理, 得到黏结应力特征值 $\tau_u/f_c^{1/2}$ 和 $\tau_3/f_c^{1/2}$.

3.1 骨料粒径和骨料含量

骨料粒径与骨料含量对黏结强度的影响如图7所示, 对于5~10 mm粒径的粗骨料试件, 随着骨料含量的逐级增加, 黏结强度先减小后增大, 当粗骨料含量从0增加至400 kg/m³、600 kg/m³、800 kg/m³时, $\tau_u/f_c^{1/2}$ 分别增大-22.95%、-16.16%、2.26%, 劈裂破坏后的 $\tau_3/f_c^{1/2}$ 分别增大-6.98%、26.41%、54.68%.

对于10~15 mm粒径的粗骨料试件, 随着骨料含量的逐级增加, 黏结强度缓慢减小, 当粗骨料含量从0增加至400 kg/m³、600 kg/m³、800 kg/m³时, $\tau_u/f_c^{1/2}$ 分别减小7.8%、13.04%、12.02%, 劈裂破坏后的 $\tau_3/f_c^{1/2}$ 分别增大43.95%、23.17%、34.75%.

从图7可以看到, 在相同的骨料含量下, 含不同粒径粗骨料试件的黏结强度差异较大, 且随着骨料含量的增加, 这种差异也随之变化, 当骨料含量为400 kg/m³时, 含5~10 mm粒径粗骨料的试件的 $\tau_u/f_c^{1/2}$ 比含10~15 mm粒径粗骨料的试件低了16.43%, $\tau_3/f_c^{1/2}$ 低了35.38%. 随着骨料含量增加到600 kg/m³, 两种不同粒径粗骨料对钢筋黏结性能的影响几乎一致. 当骨料含量达到800 kg/m³时, 含5~10 mm粒径粗骨料的试件的 $\tau_u/f_c^{1/2}$ 比含10~15 mm粒径粗骨料的试件高16.24%, $\tau_3/f_c^{1/2}$ 高14.79%.

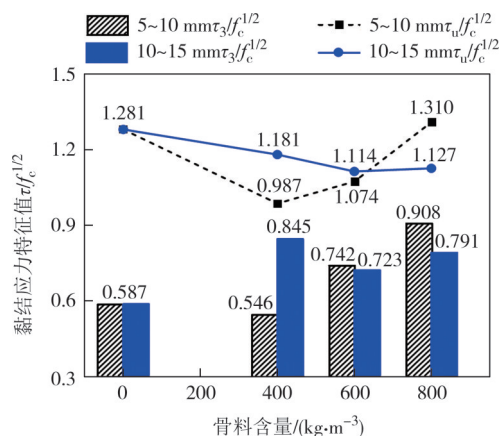


图7 骨料粒径与骨料含量对黏结应力特征值的影响

Fig.7 Influence of CA size and content on $\tau/f_c^{1/2}$

骨料对钢筋黏结性能的影响可分为有利的方面和不利的方面. 有利的方面是, 骨料的存在会与钢筋肋形成骨料互锁机制^[11], 增大钢筋与UHPC-CA的机械咬合力, 进而提高试件的峰值黏结强度 τ_u . 同时, 骨料也会使得试件的裂缝发展路径更加曲折, 增大劈裂破坏所需的断裂能^[16], 能够提高试件的峰后黏结强度 τ_3 . 不利的方面是, 粗骨料的掺加会导致UHPC-CA拌合物的流动性下降, 基体中钢纤维更容易出现结团现象, 进而增加材料内部缺陷出现的概率^[21], 降低其与钢筋的黏结强度.

对于含5~10 mm粒径粗骨料的试件, 随着骨料含量的增加, 试件的峰值黏结强度 τ_u 表现为先减小后增大的变化趋势. 当骨料含量低于800 kg/m³时, 骨料对黏结性能的不利影响占主导, 试件的峰值黏结强度 τ_u 较不含粗骨料试件有所下降. 同时, 相同的骨料含量下, 粒径较小的骨料数量更多, 因此对拌合物流动性的影响更大, 较小粒径的骨料对钢筋黏结性能的不利影响比较大粒径的骨料更显著. 当骨料含量达到800 kg/m³时, 骨料互锁机制产生的有利影响占主导, 此时试件的峰值黏结强度 τ_u 有所提高. 由于试验中钢筋的肋间距为10.1 mm, 10~15 mm粒径的骨料较难与钢筋肋形成互锁作用, 因此800 kg/m³的骨料含量下, 较大粒径的骨料对峰值黏结强度 τ_u 仍然表现为不利影响.

但是两种粒径的骨料都能够限制裂缝的发展, 进而增加劈裂破坏所需断裂能, 因此含不同粒径粗骨料的试件峰后黏结强度 τ_3 均有不同程度的提升.

3.2 搭接长度

搭接长度对黏结强度的影响如图8所示, 随着搭接长度的增加, 试件的黏结强度先增大后减小, 搭接长度由 $8d_b$ 增加至 $10d_b$ 、 $12d_b$ 和 $15d_b$, $\tau_u/f_c^{1/2}$ 分别增

加了 9.52%, 2.53%, -4.05%, 当搭接长度从 $8d_b$ 增加到 $10d_b$, 试件的平均黏结应力有所上升, 随着搭接长度的继续增加, 平均黏结强度缓慢下降; 而 $\tau_3/f_c^{1/2}$ 分别增加了 52.92%、47.26% 和 69.34%.

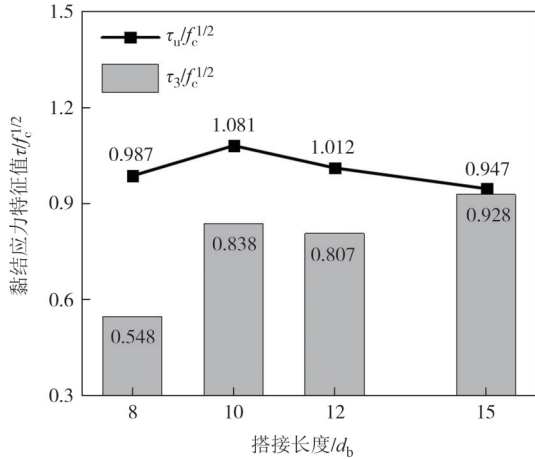


图8 搭接长度对黏结应力特征值的影响

Fig.8 Influence of splice length on $\tau/f_c^{1/2}$

随着搭接长度的增加, 试件的峰值黏结强度总体呈下降的趋势, 这是由于黏结应力沿钢筋搭接方向的分布并不均匀. 但是搭接长度的增加对试件的峰后黏结强度 τ_3 有显著的提升效果. 搭接长度达到 $15d_b$ 时, 试件的破坏模式由拱形劈裂破坏变为钢筋屈服-劈裂破坏, 从破坏模式图中可以看出虽然梁试件表面出现了劈裂裂缝, 但是劈裂裂缝并未变宽. 这是因为黏结强度达到峰值之前钢筋已经进入屈服阶段, 因此劈裂裂缝并未随着加载而进一步发展, 随着加载的进行, 弯曲裂缝逐渐变宽, 最终试件由于钢筋滑移量过大而不适宜继续承载. 试件的峰值黏结强度和峰后黏结强度几乎一致, 说明当搭接长度增加至 $15d_b$ 时, 试件对于黏结强度的保持作用能得到明显提升.

3.3 保护层厚度

保护层厚度对黏结强度的影响如图 9 所示. UHPC-CA 保护层厚度的变化可有效影响钢筋与 UHPC-CA 间黏结强度, 随着保护层厚度的逐级增加, 试件的黏结强度也呈递增的趋势. 较大厚度的保护层对钢筋的约束效果更强, 从而限制加载过程中裂缝的开展. 保护层厚度由 $1d_b$ 增加至 $1.5d_b$ 、 $2d_b$, $\tau_u/f_c^{1/2}$ 分别提高 11.02% 和 18.45%, $\tau_3/f_c^{1/2}$ 分别增加了 7.66% 和 58.35%.

当保护层厚度增加到 $2d_b$ 时, 试件的破坏模式由拱形劈裂破坏转变为弯曲拔出破坏. 对于保护层厚

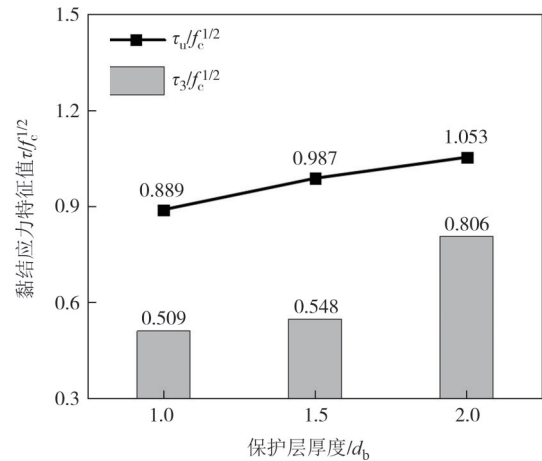


图9 保护层厚度对黏结应力特征值的影响

Fig.9 Influence of cover thickness on $\tau/f_c^{1/2}$

度较小的试件, 当黏结应力达到峰值之后, 微劈裂裂缝相互连通并快速向外发展, 导致试件的黏结强度随着钢筋的滑移迅速下降. 对于保护层厚度为 $2d_b$ 的试件, 钢筋搭接处的劈裂裂缝发展至试件表面的路径更长, 黏结强度随钢筋滑移而下降的幅度相对也更小, 试件因此而获得更高的峰后黏结强度.

4 黏结应力分布规律

根据试验测试得到的沿搭接长度方向各测点的应变数据, 采用文献[22-23]推荐的有限差分法计算各测点处的黏结应力, 如图 10 所示.

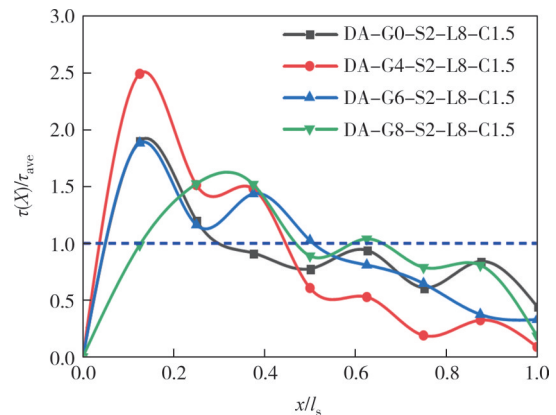


图10 不同骨料含量黏结应力沿搭接长度分布

Fig.10 Bond stress distribution along the splice length with different CA content

图 10 展示了含 5~10 mm 粒径骨料的试件当黏结强度达到峰值 τ_u 时搭接钢筋的黏结应力分布, 为了便于对比, 所有试件的黏结应力均对各自的峰值黏结强度 τ_u 进行归一化处理. 对于 5~10 mm 粒径粗骨

料的试件,当骨料含量为0时,高黏结应力区位于距钢筋端部0~0.2 l_s 长度范围内,而搭接段其余部分的黏结应力较小,不超过搭接段黏结应力的平均值.当骨料含量达到400 kg/m³,高黏结应力区间分布的范围基本不变,但是相对黏结应力的最大值达到2.49,与此同时搭接段末端0.4 l_s 长度范围内的钢筋黏结应力分布很小,不超过黏结应力平均值的1/2.这也说明了粗骨料的加入使材料的不均匀程度有所增加,导致其黏结性能下降.随着骨料含量的继续增加,高黏结应力区范围逐渐增大,同时黏结应力的最大值开始下降,搭接段末端的黏结应力也随即上升.当骨料含量达到800 kg/m³时,高黏结应力区间由距钢筋端部0~0.2 l_s 长度的范围增加至0~0.4 l_s 长度范围,搭接段末端的黏结应力值也更接近钢筋的平均黏结应力,黏结应力沿搭接长度方向分布更均匀.

5 UHPC-CA 劈裂黏结强度简化公式

5.1 劈裂黏结强度计算公式

根据本文的试验结果,结合作者课题组已有的研究,考虑骨料粒径、骨料含量、钢纤维体积掺量、钢筋搭接长度以及保护层厚度对黏结性能的影响,采用多项式非线性拟合的方式,建立适用于UHPC-CA的劈裂黏结强度计算公式:

$$\tau_u = \sqrt{f_c} \left[0.555 - 1.400 \frac{\varphi}{R^3} + 1.719 \left(\frac{\varphi}{R^3} \right)^2 + 0.274 \frac{c_m}{d_b} + 1.715 \frac{d_b}{l_s} + 0.104 \lambda_f \right] \quad (2)$$

式中: φ 为骨料含量,kg/m³;R为最大骨料粒径,mm; c_m 为最小保护层厚度,mm; d_b 为钢筋直径,mm; l_s 为钢筋搭接长度,mm; $\lambda_f = V_f L_f / d_b$ 为纤维影响因子.

如图11所示,式(2)的计算结果与作者课题组的试验结果拟合更好,同时,对文献[16,24-27]中的试验数据也表现出较为合理的计算精度,试验值与计算值之比的平均值为0.930,变异系数为0.166.可以较好地反映钢筋与UHPC-CA的劈裂黏结强度.

5.2 与短锚试验结果对比

根据作者课题组已有研究成果^[11],将短锚拔出试件的参数代入本文所提出UHPC-CA劈裂黏结强度计算式[式(2)],试验值与计算值之比的平均值为1.680,变异系数为0.116.如图12所示.

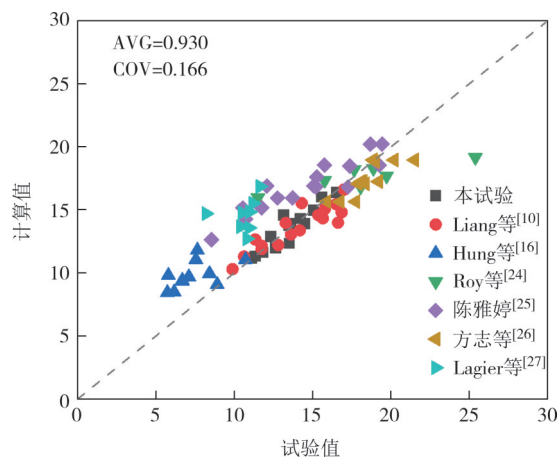


图11 式(2)黏结强度计算值与试验值比较

Fig.11 Comparison of bond strength in test and Eq(2)

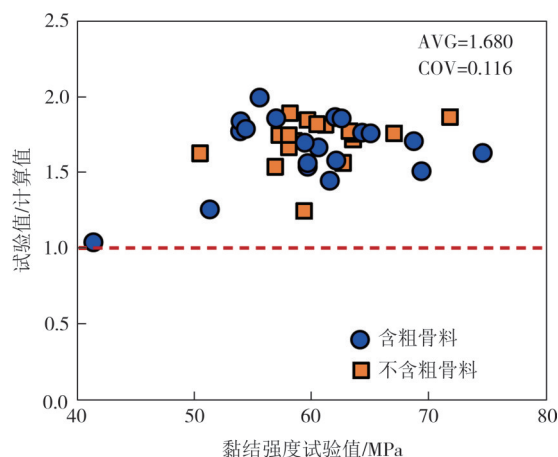


图12 式(2)与短锚拔出试验结果对比

Fig.12 Comparison of bond strength in pull out test and Eq(2)

本文所提出的计算模型会低估短锚试件中钢筋与UHPC-CA之间的黏结强度,这主要是由于短锚拔出试验中钢筋的锚固长度较短,由于钢筋表面黏结应力沿长度方向分布不均匀,当钢筋锚固长度较短时,所测得的平均黏结应力会偏大.同时,在短锚拔出试验中,由于混凝土保护层厚度较大,且加载过程中钢筋周围混凝土处于受压的应力状态,故试件以发生钢筋拔出破坏为主,相较于发生劈裂破坏的试件,发生钢筋拔出破坏的试件中UHPC对钢筋的约束作用更强,进而增加钢筋黏结强度.

因此本文所提出的黏结强度计算公式仅适用于以发生劈裂破坏为主的梁式搭接试件,而梁式搭接试验能够反映受弯构件中真实的应力状态,被认为是研究钢筋与混凝土黏结性能的最直接可靠的试验方法^[7].

6 结论

本文对 12 个搭接梁试件进行了 4 点加载试验, 主要结论如下.

1) 试件破坏模式主要表现为拱形劈裂破坏, 由梁底或梁侧面纵向劈裂开裂引起强度降低. $2d_b$ 的保护层厚度能够限制劈裂裂缝的发展, 试件表现为弯曲拔出破坏. $15d_b$ 的搭接长度下钢筋达到屈服强度, 劈裂裂缝出现以后并未进一步扩展, 试件表现为钢筋屈服-劈裂破坏.

2) 粗骨料对黏结性能的影响具有两面性, 一方面, 骨料与钢筋的互锁机制能够增强机械咬合力, 提高黏结强度, 同时骨料的存在还能限制裂缝发展, 增加断裂能, 从而提高试件的峰后黏结强度; 另一方面, 粗骨料的加入会增加 UHPC-CA 材料的不均匀程度, 对黏结性能产生不利影响.

3) 增加 5~10 mm 粒径的粗骨料含量, 钢筋与 UHPC-CA 之间的峰值黏结强度先减小, 后逐渐增大. 当骨料含量较低时, 骨料对黏结强度的不利影响占主导; 当骨料含量达到 800 kg/m^3 时, 骨料与钢筋肋的咬合作用得以充分发挥, 此时骨料对黏结强度的有利影响占主导, 试件的峰值黏结强度和峰后黏结强度相较于骨料含量为 400 kg/m^3 的试件分别提高 32.73% 和 65.69%.

4) 10~15 mm 粒径的骨料难以与钢筋肋形成充分咬合, 对峰值黏结强度的不利影响占主导, 但骨料仍然能限制劈裂裂缝的发展, 进而提高试件的峰后黏结强度. 随着其含量由 0 增加到 800 kg/m^3 , 试件的峰值黏结强度降低 11.72%, 峰后黏结强度提高 35.21%.

参考文献

- [1] ACI Committee 239. ACI PRC-239-18: Ultra-high performance concrete: an emerging technology report [M]. Farmington Hills: The American Concrete Institute, 2018.
- [2] YOO D Y, PARK J J, KIM S W, et al. Early age setting, shrinkage and tensile characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 41: 427-438.
- [3] WANG J Q, LIU J P, WANG Z, et al. Cost-effective UHPC for accelerated bridge construction: material properties, structural elements, and structural applications [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(2): 04020117.
- [4] 刘加平, 刘建忠, 韩方玉, 等. 基于钢-混凝土组合结构轻量化的粗骨料超高性能混凝土研究进展与应用 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 36-44.
- [5] LIU J P, LIU J Z, HAN F Y, et al. Research progress and application of coarse aggregate ultra high performance concrete used for lightweight steel-concrete composite structure [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(9): 36-44. (in Chinese)
- [5] LAI Y P, LI Y, HUANG M K, et al. Conceptual design of long span steel-UHPC composite network arch bridge [J]. Engineering Structures, 2023, 277: 115434.
- [6] RONANKI V S, AALETI S, VALENTIM D B. Experimental investigation of bond behavior of mild steel reinforcement in UHPC [J]. Engineering Structures, 2018, 176: 707-718.
- [7] LIANG R, HUANG Y. Development length and bond behavior of lap-spliced reinforcement in ultra-high performance concrete beams [J]. Engineering Structures, 2023, 291: 116354.
- [8] IQBAL S, ULLAH N, ALI A. Effect of maximum aggregate size on the bond strength of reinforcements in concrete [J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2018, 8(3): 2892-2896.
- [9] WALACH D. The effect of aggregate composition on a bond between the steel reinforcement and the normal and high-performance concrete [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 603(4): 042055.
- [10] LIANG R, HUANG Y, XU Z M. Experimental and analytical investigation of bond behavior of deformed steel bar and ultra-high performance concrete [J]. Buildings, 2022, 12(4): 460.
- [11] HUANG Y, YU Z F. Experimental study of the bonding behavior between coarse aggregate ultra-high performance concrete and steel rebar [J]. Engineering Structures, 2023, 288: 116253.
- [12] SHAO Y, TICH K L, BOARO S B, et al. Impact of fiber distribution and cyclic loading on the bond behavior of steel-reinforced UHPC [J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 126: 104338.
- [13] MAYA L F, ZANUY C, ALBAJAR L, et al. Experimental assessment of connections for precast concrete frames using ultra high performance fibre reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 173-186.
- [14] VALENTIM D B, AALETI S, RONANKI V S. Development length of reinforcing bars in UHPC: an experimental and analytical investigation [C]//First International Interactive Symposium on UHPC. Iowa State University Digital Press, 2016: .
- [15] BAE B I, CHOI H K. Experimental study on the flexural behavior of lap-spliced ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams [J]. Polymers, 2022, 14(11): 2138.

- [16] HUNG C C, YUEN T Y, HUANG C W, et al. Tension lap splices in UHPC beams: influence of rebar size, steel fibers, splice length, and coarse aggregate[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 55: 104716.
- [17] KIM S, LEE J, JOH C, et al. Flexural bond behavior of rebar in ultra-high performance concrete beams considering lap-splice length and cover depth[J]. *Engineering*, 2016, 8(3): 116–129.
- [18] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Metallic materials—tensile testing—part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [19] 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [20] 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.
- Standard for test method of ultra-high performance concrete: T/CECS 864—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021. (in Chinese)
- [21] 黄政宇, 李仕根. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(3): 47–54.
- HUANG Z Y, LI S G. Study on mechanical properties of ultra high performance concrete with coarse aggregate[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(3): 47–54. (in Chinese)
- [22] 洪小健, 张誉. 粘结滑移试验中的粘结应力的拟合方法[J]. *结构工程师*, 2000, 16(3): 44–48.
- HONG X J, ZHANG Y. The fitting method of the smooth bondstress in the bond-slip test[J]. *Structural Engineers*, 2000, 16(3): 44–48. (in Chinese)
- [23] 贾方方. 钢筋与活性粉末混凝土粘结性能的试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- JIA F F. Experimental study on bond performance between steel bar and reactive powder concrete[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [24] ROY M, HOLLMANN C, WILLE K. Influence of volume fraction and orientation of fibers on the pullout behavior of reinforcement bar embedded in ultra high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 146: 582–593.
- [25] 陈雅婷. 高强钢筋与UHPC界面粘结性能试验与理论研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- CHEN Y T. Experimental and theoretical study on interfacial bonding performance between high strength steel bar and UHPC[D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [26] 方志, 陈潇, 张门哲, 等. 活性粉末混凝土中带肋钢筋搭接性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(3): 20–28.
- FANG Z, CHEN X, ZHANG M Z, et al. Experimental study on performance of lap-spliced ribbed steel bars in reactive powder concrete[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(3): 20–28. (in Chinese)
- [27] LAGIER F, MASSICOTTE B, CHARRON J P. Bond strength of tension lap splice specimens in UHPFRC[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93: 84–94.