DOI:10.11918/202104070

## 带肋钢筋与超高延性水泥基复合材料的黏结性能

余 琼,魏晋文,张 亮,许雪静,余江滔

(同济大学土木工程学院,上海200092)

摘 要: 超高延性水泥基复合材料(UHDCC)是新型纤维增强混凝土,受拉时表现出超高的延性和应变硬化能力。为提供 UHDCC应用于受力构件的界面黏结理论依据,进行了45个钢筋在UHDCC中锚固的拉拔试验,考察了锚固长度、浇筑方式、 保护层厚度、90°弯钩等对黏结性能的影响。试验结果表明:由于纤维约束作用,试件未发生劈裂破坏;UHDCC的浇筑方式显 著影响黏结强度,垂直浇筑的黏结强度大于平行浇筑;由于UHDCC的应变硬化现象,试件锚固长度从4d增大到6d时黏结强 度有上升趋势,大于6d时中心锚固试件(保护层较厚)锚固长度对黏结强度影响不大,偏心锚固试件(保护层较薄UHDCC材料的约束作用减小)随锚固长度增加黏结强度降低;直锚段钢筋长度为4d时,增设90°弯钩(4d)后,承载力提升幅度可达 67%,但随着直锚段长度增加,弯钩对承载力提升幅度减小;绝对锚固长度相等时直锚组试件承载力大于带弯钩的试件,弯钩 段锚固并不等价于直锚钢筋,弯钩锚固必须保证直锚段长度。论文分析了带肋钢筋与UHDCC之间的黏结滑移机理,给出了 UHDCC直接锚固的黏结强度公式。

### Bond behavior between ribbed steel bar and ultra-high ductile cementitious composite

YU Qiong, WEI Jinwen, ZHANG Liang, XU Xuejing, YU Jiangtao

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Ultra-high ductile cementitious composite (UHDCC), a new type of fiber reinforced concrete, exhibits ultra-high ductility and strain hardening ability during stretching. In this study, pull tests were conducted on 45 specimens whose ribbed steel bars were all anchored in UHDCC. The influences of anchorage length, pouring method, protective layer thickness, 90-degree hook, and other parameters on the bonding performance were investigated, and a theoretical basis for the bonding strength of the force-bearing members using UHDCC was provided. Results show that all the specimens did not split due to the restraint of the fiber in the UHDCC. The pouring method of UHDCC had significant impact on the bonding strength, and the bonding strength of the specimen poured vertically was greater than that of the specimen poured horizontally. As the anchorage length of the specimen increased from 4d to 6d, the bonding strength tended to increase due to the strain hardening of UHDCC. When the anchorage length was longer than 6d, the anchorage length of the central anchoring specimen (with a thicker protective layer) had little effect on the bonding strength. However, the bonding strength of the eccentric anchoring specimen (whose restraint of UHDCC to the ribbed steel bar decreased due to the thinner protective layer) decreased with the anchorage length increased. A 90-degree hook with the length of 4d was added at the end of the steel bar when the length of the straight anchor section was 4d, and the ultimate bearing capacity was increased by 67%. However, when the length of the straight anchor section increased, the effect of the 90-degree hook on the ultimate bearing capacity began to decrease. When the absolute anchorage lengths were the same, the bearing capacity of the specimens without hooks was greater than that of the specimens with hooks. For the specimen whose steel bar had a 90-degree hook, the anchorage length must be guaranteed. Based on the test results, the bond-slip mechanism between ribbed steel bar and UHDCC was analyzed, and the equation of bonding strength between UHDCC and ribbed steel bar without 90-degree hook was given.

Keywords: ultra-high ductile cementitious composite (UHDCC); anchorage length; bond slip; anchorage with hook; protective layer thickness

普通混凝土具有很好的抗压性能,但受拉极易 开裂,正常使用阶段混凝土的开裂会导致钢筋锈蚀、 结构耐久性不足,在地震、爆炸等荷载作用下也可能 出现脆性断裂,因此研究人员开展了高性能混凝土 的制备试验。例如:1992年,Li等<sup>[1]</sup>将短纤维掺入 胶凝材料、砂和水泥中,得到了具有明显应变硬化特 征的复合材料 ECC(engineered cementitious composites)。

收稿日期: 2021-04-16

作者简介:余 琼(1968—),女,副教授,硕士生导师

通信作者:余 琼, yiongyu2005@163.com

2001年,Li等<sup>[2]</sup>又研制成功了聚乙烯醇纤维增强水 泥基复合材料(PVA-ECC),这些复合材料极限应 变超过3%。Ranade等<sup>[3]</sup>研制的高强高延性混凝土 (HSHDC)抗压强度大于150 MPa、拉伸应变在 3%~4%,使得水泥基复合材料第一次同时实现高 强度、高延性。

近年来国内学者关于高延性混凝土也已做了许 多研究。高淑玲等<sup>[4]</sup>成功配制了 PVA - ECC,徐世 烺等<sup>[5]</sup>测得 PVA - ECC 极限拉应变达 3.8% ~4.2%, 裂缝宽度控制在 100 μm 以内,且对缺口不敏感。 陆洲导等<sup>[6]</sup>配制出了具有超高强度和超高延性的 纤维混凝土(UHDCC),平均拉伸应变超过 8%,抗 压强度在 45.9~121.5 MPa。

高延性混凝土主要应用于结构维修、桥面板、隧 道衬砌等领域,在抗震节点<sup>[7]</sup>、抗震阻尼器、拼装式 剪力墙<sup>[8]</sup>等方面也有广泛应用前景。但目前高延 性混凝土与带肋钢筋之间的黏结滑移性能的研究还 比较少,仅徐世烺等<sup>[9]</sup>分析了钢筋与水泥基复合材 料之间的黏结应力沿锚固长度的分布规律,得出黏 结滑移本构关系;于明鑫等<sup>[10]</sup>进行了带肋钢筋与 ECC 黏结性能试验,仅研究了钢筋直径、锚固长度 及纤维体积掺量对黏结应力 - 滑移曲线的影响。

本文进行了 20 组共 45 个试件的钢筋与 UHDCC 拉拔试验,考察了锚固长度、浇筑方式、保护 层厚度、90°弯钩以及偏心锚固等对黏结强度的影 响,同时也分析了 UHDCC 应力沿黏结长度的分布 规律、带肋钢筋与 UHDCC 之间的黏结滑移机理,以 期为高强水泥基复合材料在受力构件中的应用提供 理论依据。

1 试验概况

#### 1.1 试件设计与制作

UHDCC 制备材料主要包括硅酸盐水泥、硅灰、 矿粉、石英砂、水、聚乙烯(PE)纤维、减水剂等,表1 为各材料粒径范围及配合比,表2为所用 PE 纤维 的性能。

表1	UHDCC 材料及配合比	
----	--------------	--

Tab. 1	Material	and	mix	proportion	of	UHDCC
--------	----------	-----	-----	------------	----	-------

组成	粒径范围/µm	配合比	质量/(g・L <sup>-1</sup> )
硅酸盐水泥	30 ~ 80	1.00	500.00
硅灰	0.1~1	0.27	135.93
矿粉	5~100	1.83	913.50
石英砂	106~212	0.92	457.95
水		0.62	309.88
PE 纤维		0.04	20.00
减水剂		0.01	7.00

	]	Tab. 2 Proj	perties of 1	PE fiber	
直径	纤维长	弹性模量	断后伸	密度	
d∕µm	径比	<i>E/</i> GPa	长率/%	$\rho/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$	)府京/ し
25	720	116	2.42	0.97	150
试	验基准	试件的外	形和尺寸	<b>十</b> 见图 1。	
		105 105 105 105 105 105 105 105	× 1		钢筋 · SSS
	(a) 正	视图		(b) 俯视图	
	图 1	其准试件	的外形和	尼寸(mm)	

表 2 PE 纤维性能

Fig. 1 Shape and dimensions of reference specimens (mm)

第一批试验探索钢筋锚固长度和浇筑方式对黏 结性能的影响。表3为第一批试件基本情况,试件 为中心锚固,考虑了浇筑面平行钢筋轴向方向(梁 构件)和浇筑面垂直钢筋方向(柱构件)两种浇筑方 式,见图2。

#### 表 3 第一批试验试件基本情况

Tab. 3 Basic parameters of the first batch of experimental specimens

影响 因素	试件 组	试件 个数	试件编号	钢筋 直径 d/mm	锚固 长度 l <sub>a</sub> /mm	保护层 厚度 c/mm	浇筑 方式
	A1	3	12 - 12d - 5.8d - T		144		
411 121	A2	3	12 - 10d - 5.8d - T		120		
锚固 长	A3	3	12 - 8d - 5.8d - T	12	96	69	垂直
以反	A4	3	12 - 6d - 5.8d - T		72		
	A5	3	12 - 4d - 5.8d - T		48		
浇筑	B1	3	12 – 10 <i>d</i> – 5. 8 <i>d</i> – P	12	120	69	平行
方式	B2	3	12 - 4d - 5.8d - P	12	48	07	1 1 1

注:UHDCC 中纤维的质量分数均为 2%。试件编号释义为"直径 -相对锚固长度 - 相对保护层厚度 - 浇筑方向",12d 表示 12 倍钢 筋直径,T 表示垂直浇筑,P 表示水平浇筑。



根据第一批试件试验结果,当试件锚固长度为 6d、浇筑方式为垂直浇筑时黏结强度较高(详见2、3 节),故定义后续浇筑方式为垂直浇筑,研究保护层 厚度时,锚固长度取6d。

表 4 为第二批试件基本情况,研究参数为钢筋 直径、保护层厚度、锚固钢筋形状(直锚和弯锚)。

表4 第二批试验试件基本情况

Tab. 4 Basic parameters of the second batch of

experimental specimens							
赵昫	计件	计件		钢筋	锚固	保护层	
<b>影</b> 啊 国主	风什	风什	试件编号	直径	长度	厚度	
囚糸	狙	千剱		$d/\mathrm{mm}$	$l_{\rm a}/{ m mm}$	c∕mm	
	D1	2	12 – 6 <i>d</i> – 2. 5 <i>d</i>			30	
保护	D2	2	12 - 6d - 3.5d	10	70	42	
<b>医</b> 厚 度	D3	2	12 - 6d - 4.5d	12	12	54	
ix.	A4	3	12 – 6 <i>d</i> – 5. 8 <i>d</i>			69	
(90°	F1	2	W - 12 - 10d - 2.5d		120		
弯钩)	F2	2	W - 12 - 8d - 2.5d	10	96	20	
锚固	F3	2	W - 12 - 6d - 2.5d	12	72	30	
长度	F4	2	W - 12 - 4d - 2.5d		48		
	E1	2	12 – 12 <i>d</i> – 2. 5 <i>d</i>		144		
(直	E2	2	12 - 10d - 2.5d		120		
锚) 锚固 长度	E3	2	12 – 8 <i>d</i> – 2. 5 <i>d</i>	12	96	30	
	D1	2	12 - 6d - 2.5d		72		
	E4	2	12 - 4d - 2.5d		48		

注:试件编号释义为"(弯钩-)直径-相对锚固长度-相对保护层 厚度",试件纤维质量分数均为2%。

本次试验采用 HRB400 月牙肋钢筋,钢筋力学 性能见表5。

#### 表 5 钢筋材性试验性能

#### Tab. 5 Properties of steel bar

_		•	
	钢筋直径 d/mm	承载力 P <sub>u</sub> /kN	屈服强度fy/MPa
	12	63.00	391.63
	14	87.08	403.72
	16	105.46	407.39

本文采用狗骨型平板试件<sup>[11]</sup>测试 UHDCC 抗 拉性能。UHDCC 混凝土需分多次制备,每次都保留 3~5 根狗骨试件,最后在 20 余根狗骨试件中选取 标距段内裂缝得到充分开展的作为 UHDCC 材料的 强度依据。

UHDCC的抗拉应力 - 应变关系与混凝土的应 力应变明显不同<sup>[12]</sup>,UHDCC存在应变硬化现象,即 在达到峰值荷载前一段相当长范围内,应变增加时, 应力也会增大,其平均抗拉强度为9.05 MPa,是同 等水泥标号(P.Ⅱ 52.5)对应的C50普通混凝土 (*f*<sub>tk</sub> = 2.64 MPa)的3.43倍,平均峰值应变为7%, 是 C50 混凝土( $\varepsilon_{u} = 0.01\%$ )的 700 倍。

测得 40 mm × 40 mm × 160 mm 试件的三点弯 曲平均抗折强度为 18.0 MPa,50 mm × 100 mm 的圆 柱体平均抗压强度为 50.51 MPa。

#### 1.2 加载装置

图 3 为试验装置示意,加载主要利用钢反力架, 包含上层顶板(厚 40 mm)、下层底板(厚 30 mm,开 槽,以观察试件开裂)及连接上、下层板的 4 根直径 为20 mm的高强螺栓。



图 3 试验装置及钢反力架示意

Fig. 3 Schematic of test equipment and steel reaction frame

图 4 为引伸计、拉线式位移计的布置位置示意。 试验共设置 2 个标距为 20 mm 的引伸计 *A*、*B*,分别 测量钢筋自由端和钢筋加载端的位移;设置 2 个拉 线式位移计 *C*、*D*,用于测量试件的横向膨胀率,分 别放置在试件中部和下部。



Fig. 4 Arrangement of measuring points for extensioneter and pull wire displacement meter

试验通过测量钢筋两端的位移来得到黏结长度 上的平均滑移量。从图 4 可看出,钢筋在 UHDCC 内的锚固段为 CD 段。由于自由端钢筋在加载过程 中不受力,因此可认为自由端没有变形,所以可用A 点引伸计测得的位移 S<sub>F</sub> 来代替 C 点位移。B 点离加 载端混凝土非常近,此段区间内钢筋变形可忽略。因 此,可认为B点引伸计测得的位移 $S_{L}$ 为D点的位 移。CD 段滑移平均值 S 为

$$S = \frac{S_{\rm F} + S_{\rm L}}{2} \tag{1}$$

钢筋与 UHDCC 黏结段平均黏结应力 $\tau$ 为



(a) 中心锚固时钢筋拔出破坏



(d) 中心锚固时钢筋及 UHDCC 锥形 拔出破坏



(b)保护层厚度为 2.5d 时直锚试件 钢筋拔出破坏



(e)保护层厚度为 2.5d 时直锚试件 钢筋及 UHDCC 锥形拔出破坏



式中 d 为钢筋直径, l。为钢筋锚固长度。

为了消除加载速度对试验结果的影响,试验以 1 mm/min 的速度进行单调加载。

#### 试验结果 2

#### 2.1 试件破坏形式

图 5 为 UHDCC 试件出现的 3 种破坏形态:钢 筋拔出破坏、钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏、钢筋屈 服强化后拉断破坏,试件的具体破坏形态见表6。



(c)保护层厚度为 2.5d 时弯钩试件 钢筋拔出破坏



(f)保护层厚度为2.5d时弯钩试件 钢筋及 UHDCC 锥形拔出破坏



(g) 钢筋屈服强化后拉断破坏试件正面 (h) 钢筋屈服强化后拉断破坏试件侧面



图 5 UHDCC 试件破坏类型

Fig. 5 Failure types of UHDCC specimens

当锚固长度较小(4d~6d)时,一般出现钢筋拔 出破坏,见图 5(a)(中心锚固,钢筋周边几乎无裂 缝)、5(b)(保护层厚度为30mm时,直锚构件,钢 筋周边出现裂缝)、5(c)(弯钩试件,钢筋周边裂 缝多)。

锚固长度达 6d~10d 时试件发生钢筋及 UHDCC 锥形拔出破坏,见图 5(d)(中心锚固)、5(e)(保护 层厚度为30mm时,直锚构件)、5(f)(弯钩试件)。

锚固长度较长(10d~12d)时,发生钢筋拉断破 坏,见图5(g)、(h),试件表面无裂缝。

图 6 为 A 组数据不同锚固长度试件的  $\tau - s$  曲 线,可以看出发生钢筋拔出破坏+钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏的试件(A3-2、A4-2、A5-1), 荷载达到最大值后即进入下降段,位移持续增加,荷 载保持在一定水平并在较小的范围内波动(残余荷 载),此时是摩擦力起作用,观察完全拔出的钢筋, 其肋间充满 UHDCC 混凝土碎屑。发生钢筋拉断破 坏的试件钢筋变形小,最后钢筋拉伸断裂,试件积蓄 的巨大能量在钢筋颈缩拉断瞬间被突然释放,发出 巨大的响声。

表6 试件破坏类型

	Tab. 6 Failure types of specimens									
试验	亦具	)-+)/+-/E	1 计供会粉签定	计供户目	钢筋			$P_{\rm u}/{\rm kN}$		- /MPa
批次	文里	瓜什组	1 风什多奴间与	<b>瓜</b> 什 编 亏	屈服	<b>奴</b> 坏形式	试件1	试件2	试件3	∙ 7 <sub>u</sub> ∕ mira
		A5	12 – 4 <i>d</i> – 5. 8 <i>d</i> – T	A5 – 1 <sub>2</sub>		钢筋拔出	19.98	23.09		11.91
第一		A4	12 - 6d - 5.8d - T	A4 - 1 2 3		钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏	36.18	47.34	32.13	14.21
	锚固长度 (中、饼田、	A3	12 – 8 <i>d</i> – 5. 8 <i>d</i> – T	A3 - 1 2 3	NT	钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏	44.16	52.84	48.93	13.45
	(中心轴回 + 直锚)	A2	12 – 10 <i>d</i> – 5. 8 <i>d</i> – T	A2 - 1 A2 - 2 <sub>3</sub> 3	N	钢筋屈服、强化* 钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏	67.61	62.20	61.80	14.13
验		A1	12 – 12 <i>d</i> – 5. 8 <i>d</i> – T	A1 – 1 2		钢筋拉断	66.65	67.12		12.33
	14 64 L	B2	12 – 4 <i>d</i> – 5. 8 <i>d</i> – P	B2 – 1 B2 – 2	Ν	钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏 钢筋拔出	19.19	19.56		12.62
	优巩刀八	B1	12 - 10d - 5.8d - P	B1 - 1 2 3	Y	钢筋拔出	53.40	48.78	51.73	11.35
		A4	12 – 6 <i>d</i> – 5. 8 <i>d</i> – T	A4 - 1,2,3		钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏	36.18	47.34	32.13	14.21
	钢筋直径	C1	14 - 6d - 5.8d - T	C1 – 1 <u>2</u> 3	Ν	钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏	47.64	57.64		16.63
		C2	16 - 6d - 5.8d - T	C2 – 1 、2		钢筋拔出及 30 mm 范围锥形破坏	46.07	52.92		13.68
		D1	12 – 6 <i>d</i> – 2. 5 <i>d</i> – T	D1 – 1 2		钢筋拔出	39.92	43.55		15.38
	但持日同志	D2	12 - 6d - 3.5d - T	D2 – 1 <sub>2</sub>	NT	钢筋拔出及 25 mm 范围锥形破坏	44.46	37.40		15.09
	保护层厚度	D3	12 – 6 <i>d</i> – 4. 5 <i>d</i> – T	D3 – 1 <sub>2</sub>	IN	钢筋拔出及 30 mm 范围锥形破坏	44.91	43.14		16.23
		A4	12 – 6 <i>d</i> – 5. 8 <i>d</i> – T	A4 - 1 2 3		钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏	36.18	47.34	32.13	14.21
第二	锚固长度	F4	W – 12 – 4 <i>d</i> – 2. 5 <i>d</i> – T	F4 – 1 2	Ν	钢筋拔出及 70 mm 范围锥形破坏	35.01	33.39		18.91
验	(30 mm	F3	W - 12 - 6d - 2.5d - T	F3 – 1 2		钢筋拔出及15 mm 范围锥形破坏	50.46	54.85		19.41
	保护层 +	F2	W - 12 - 8d - 2.5d - T	F2 – 1 2	Y	钢筋拔出	56.09	60.47		16.11
	90°弯钩)	F1	W - 12 - 10d - 2.5d - T	F1 – 1 、2		钢筋拉断	64.29	66.25		14.44
		E4	12 – 4 <i>d</i> – 2. 5 <i>d</i> – T	E4 – 1 、2	Ν	钢筋拔出	22.37	18.40		11.27
	锚固长度	D1	12 – 6 <i>d</i> – 2. 5 <i>d</i> – T	D1 – 1 ,2	Ν	钢筋拔出	39.92	43.55		15.38
	(30 mm 伊拉屋,	E3	12 – 8 <i>d</i> – 2. 5 <i>d</i> – T	E3 – 1 2		钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏	48.95	56.02		14.51
	本近云 + 百锚)	E2	12 – 10 <i>d</i> – 2. 5 <i>d</i> – T	E2 – 1 <sub>2</sub>	Y	钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏	56.33	59.59		12.82
		E1	12 – 12 <i>d</i> – 2. 5 <i>d</i> – T	E1 – 1 ,2		钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏	67.53	64.53		12.17

注:1. 试件参数简写释义为"(弯钩-)直径-相对锚固长度-相对保护层厚度-浇筑方向",W表示带90°弯钩;

2. P<sub>u</sub>表示各试件承载力(峰值荷载),确定 P<sub>u</sub>时不考虑滑移平均值,列中空白表示未设试件3;<sub>7</sub><sub>u</sub>表示试件组黏结强度平均值;

3. \* 表示钢筋屈服强化后,没有明显的拔出迹象,但变形较大,为了保护引伸计,故提前停止加载。





Fig. 6  $\tau$  – s curves of specimens in group A with different anchorage lengths

本试验中并未出现带肋钢筋与灌浆料拉拔试验 中试件的脆性劈裂破坏<sup>[13]</sup>。这是因为纤维混凝土 具有良好的横向约束作用,带肋钢筋与 UHDCC 混 凝土间的黏结性能得以充分发挥,试件破坏模式为 延性破坏。

## 3 试验结果分析

#### 3.1 中心锚固时锚固长度对黏结性能的影响

定义钢筋锚固长度与钢筋直径之比 l<sub>a</sub>/d 为相 对锚固长度,图 7 为 A 组试件承载力、黏结强度随 相对锚固长度变化趋势(A1 组试件全部为拉断破 坏,不参与拟合)。



第4期

Fig. 7 Variation of bearing capacity and bonding strength with anchorage length

图 7(a)表明随着钢筋锚固长度增加,试件承载 力逐渐增加。这是由于锚固长度增大钢筋与 UHDCC 的接触面增大,接触面上的机械咬合作用随之增强。

图 7(b)表明当锚固长度从 4d 增大到 6d, 黏结 强度有上升趋势;大于 6d, 黏结强度变化不大,这与 余琼等<sup>[14]</sup>得出的"混凝土、灌浆料等脆性材料, 锚固 长度增大, 黏结强度下降"不同。图 8 为灌浆料黏 结强度随相对锚固长度的变化规律。





对于混凝土、灌浆料等脆性材料,黏结应力沿钢 筋纵向分布是不均匀的。当钢筋锚固长度较小时, 高应力区段比较饱满,黏结强度 $\tau_u$ 与实际最大黏结 应力 $\tau_{max}$ 的比值较大;而当锚固长度较大时,距加载 端较远处的钢筋黏结应力小,黏结应力分布不均匀 性更加突出,黏结强度 $\tau_u$ 与实际最大黏结应力 $\tau_{max}$ 的比值较小。而不同钢筋锚固长度的试件 $\tau_{max}$ 的变 化不大,因此随着钢筋锚固长度的增加,试件的平均 黏结应力越来越小。

但 UHDCC 材料受拉时具有应变硬化的特性, 即材料应变增加时,应力也会增大,故 UHDCC 的极 限抗拉承载力相比于普通混凝土是持续增大的。在 持续加载后,即使钢筋周围混凝土产生放射状裂缝, 由于纤维约束,裂缝宽度非常小(短锚试件的裂缝 甚至未能穿透保护层),UHDCC 材料仍能持续地承 载,并对钢筋提供足够的约束作用。因此,锚固长度 增加到 10*d* 时,黏结力增加或保持不变。

#### 3.2 中心锚固时浇筑方式对黏结性能的影响

图9为(B组试件)不同浇筑方式与黏结强度的 关系。可以看出,垂直浇筑成型的试件,平均黏结应 力普遍高于平行浇筑的试件;而对普通混凝土,两种 浇筑方式基本没有差异。这是由于两种浇筑方式影 响了纤维分布,纤维的成型方向会对钢筋与 UHDCC 的黏结性能产生影响。Hambach 等<sup>[17]</sup>的研究指出 碳纤维沿着混凝土的受力方向进行排列可以有效提 高纤维混凝土的强度,邱明红等<sup>[18]</sup>研究表明采用平 行纤维取向可以显著提高纤维混凝土的首次开裂荷 载和峰值荷载,并能显著抑制裂缝宽度的扩展。而 纤维混凝土中纤维的排列在浇筑时倾向平行于流动 方向,当垂直浇筑时纤维排列倾向于与钢筋垂直,能 有效约束钢筋径向的膨胀力,因此黏结强度增加。



pouring methods

#### 3.3 保护层厚度对黏结性能的影响

图 10 为 UHDCC 及灌浆料的保护层厚度与试件的黏结强度关系图(均为中心锚固),本文试验中 UHDCC 保护层厚度超过 4.5d 后,对黏结强度的影 响不明显,而灌浆料的保护层厚度大于 5.5d 后对黏 结强度才无明显影响。可见由于纤维拉结作用, UHDCC 材料不受影响的最小保护层厚度降低。



图 10 不同的科怀尔法序度对如约强度的影响对比 Fig. 10 Influence of protective layer thickness of different materials on bonding strength

# 3.4 保护层厚度为 30 mm 时锚固长度对黏结性能 的影响

保护层厚度 30 mm 的试件发生钢筋拔出或钢 筋拔出及 UHDCC 锥形破坏。这主要是因为该组试 件的保护层厚度偏小(2.5d),黏结力的径向分量能 使保护层开裂,黏结强度大幅降低。图 11 为保护层 厚度30 mm工况下承载力、黏结强度随锚固长度的 变化规律。



#### 图 11 保护层厚度 30 mm 时锚固长度与承载力及黏结 强度关系

Fig. 11 Relationship between anchorage length, bearing capacity, and bonding strength when protective layer thickness is 30 mm

图 11(b)偏心锚固(保护层厚度较薄) 黏结强 度变化规律与图 8(b)中心锚固不同,锚固长度从 4d 到 6d,试件从钢筋拔出破坏转变为钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏,黏结强度增大,此时 UHDCC 材 料 PE 纤维的约束作用得以发挥;当锚固长度从 6d 增大到 12d,试件从钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏转 换到拉断破坏,黏结强度下降,这是因为保护层偏 薄,UHDCC 材料的应变硬化及约束作用减小,试件 的黏结性能类似灌浆料。

## 3.5 保护层厚度为 30 mm 时 90°弯钩对黏结性能 的影响

工程中常常会在锚固钢筋的末端增设弯钩,以 增大锚固的安全系数,抵御钢筋被拔出的风险。本文 研究增设90°弯钩(4d),考察其对承载力的提高作用。

3.5.1 直锚段相等时

图 12 为保护层厚度 30 mm、弯钩工况下,直锚 段锚固长度与承载力关系。短锚区段(4*d*~6*d*)的 承载力增长速度大于中锚区段(6*d*~10*d*)。

表7为直锚段相同时增设弯钩后承载力提升情况。当弯段钢筋(4d)与直段锚固钢筋(4d)等长时, 承载力提升幅度可达67.78%。弯钩段长度一定时,随着直锚段长度增加,弯钩对承载力提升幅度减小。这主要是由于弯钩段钢筋有效起到抵抗滑移。 对于短锚试件,钢筋与UHDCC较早黏结失效,产生 滑移,弯钩能抵抗较多的滑移,极大地提升试件承 载力;对于长锚试件,承载力增大,钢筋滑移量较 小,因此弯钩抵抗的滑移量也相对减少,承载力增 幅有限。



#### 图 12 带 90°弯钩的试件锚固长度 – 承载力关系

Fig. 12 Relationship between anchorage length and bearing capacity of specimen with 90-degree hook

#### 表7 直锚段等长时增设90°弯钩后承载力提升

Tab. 7 Bearing capacity improvement after adding 90-degree hook under the condition of equal straight anchor length

组别	锚固长度	承载力 P <sub>u</sub> /kN	承载力提升值 ΔP/kN	弯钩对承载力 的提升幅度/%
直锚组	4d	20.38	13 82	67.78
弯钩组	4d + 4d	34.20	10102	0/1/0
直锚组	6d	41.74	10.92	26.17
弯钩组	6d + 4d	52.66		
直锚组	8d	52.48	5.80	11.04
弯钩组	8d + 4d	58.28		10 (0)
直锚组	10d	57.96	7.31	12.60
弯钩组	10d + 4d	65.27		

图 13 为直锚段相等情况下弯钩组与直锚组荷载-滑移曲线对比,可以看出在不同的受力阶段,带 弯钩试件直段钢筋的锚固力和弯钩段的锚固力的比 例是变化的。



图 13 直锚段相等情况下弯钩组与直锚组荷载 – 滑移曲线对比

Fig. 13 Comparison of load-slip curves between hook group and straight anchor group under the condition of equal straight anchor length

在加载前期,由于弯钩控制滑移,弯钩组的滑移 小于直锚组;达到峰值荷载后,由于弯钩的机械锚固 作用,弯钩组荷载-位移曲线没有下降的趋势,承载 力较稳定,而直锚组承载力迅速下降。

3.5.2 绝对锚固长度相等

图 14 为绝对锚固长度相等时直锚组与弯钩组 荷载 - 滑移曲线对比。对于绝对锚固长度(实际埋 入试件内的钢筋长度总和)相等的试件,直接锚固 的试件承载力大于带 90°弯钩的试件,故弯钩锚固 不能等价直锚钢筋。在弯钩段长度均为 4d 时,弯钩 组的直锚段越长,直锚组与弯钩组承载力相差越小, 因此弯钩锚固必须保证其直锚段长度。





Fig. 14 Comparison of load-slip curves with equal absolute anchorage length

在工程应用中,需要首先确保直接锚固段的长 度满足要求,有条件的可以加上弯钩增大安全系数。

4 黏结强度计算公式

参照王冰等<sup>[19]</sup>、山显彬<sup>[20]</sup>的函数形式,对本文

试验结果进行统计回归,得出浇筑方式为垂直方向、 锚固方式均为直接锚固的黏结强度 $\tau_u$ 的计算公式:

$$\tau_{u} = \left[0.502 + 0.109\left(\frac{a}{l_{a}}\right)\right] \left[2.918 + 0.014\left(\frac{c}{d}\right)\right] f_{ts}$$
(3)

试验计算结果见表 8, 黏结强度计算值  $\tau_u^0$  与试 验值  $\tau_u^c$  的比值  $\tau_u^0/\tau_u^c$  在区间 0.85~1.25 内, 平均值 1.02, 标准差为 0.124, 变异系数为 0.122, 数据拟合 程度良好。此公式适用于 HRB400 钢筋, UHDCC 的 抗拉、抗折、抗压强度分别在 9、18、50 MPa 左右。由 于 A5 和 E4 实验组相对锚固长度过小(均为 4*d*), 试验数据存在较大误差,此公式有待更多的试验验证。

#### 表 8 直接锚固黏结强度试验值和计算值对比

Tab. 8 Comparison of test value and calculation value of ultimate bonding strength of direct anchorage

试件组	黏结强度试验值 $ au_{ m u}^{ m c}/{ m MPa}$	黏结强度计算值 $ au_{ m u}^0/{ m MPa}$	$ au_{ m u}^0/ au_{ m u}^c$
A2	14.13	13.92	0.99
A3	13.45	13.99	1.04
A4	14.21	14.12	0.99
A5	11.91	14.36	1.21
C1	16.63	14.14	0.85
C2	13.68	14.18	1.04
D1	15.38	13.90	0.90
D2	15.09	13.97	0.93
D3	16.23	14.03	0.86
E1	12.17	13.66	1.12
E2	12.82	13.71	1.07
E3	14.51	13.78	0.95
E4	11.27	14.14	1.25

## 5 结 论

通过45个钢筋在 UHDCC 中锚固试件的拉拔 试验,得出的主要结论可为 UHDCC 应用于受力构 件提供理论依据。

1) UHDCC 试件 3 种破坏形态:钢筋拔出破坏、 钢筋拔出及 UHDCC 锥形破坏、钢筋拉断破坏。纤 维混凝土具有良好的横向约束作用,使得带肋钢筋 与 UHDCC 间的黏结性能得以充分发挥,试件未发 生劈裂破坏。

2)由于 UHDCC 应变硬化现象,试件锚固长度 从 4d 增大到 6d,黏结强度有上升趋势;大于 6d 时, 中心锚固试件(保护层较厚)锚固长度对黏结强度 影响不大,偏心锚固试件(保护层较薄 UHDCC 材料 的约束作用减小)随锚固长度增加黏结强度降低。

3)纤维混凝土中纤维的排列在浇筑时倾向平 行于流动方向,当垂直浇筑时纤维排列与钢筋垂直, 能有效约束钢筋径向的膨胀力,垂直浇筑的试件承 载力大于水平浇筑。

4)由于纤维拉结作用,本文试验条件下 UHDCC 材料不受影响的保护层厚度为 4.5d 后,比灌浆料的 不受影响的保护层厚度5.5d 小。

5) 增设90°弯钩4d后,直锚段钢筋为4d时,承载力提升幅度大,随着直锚段长度增加,90°弯钩对承载力提升幅度减小,弯钩试件在荷载超过峰值荷载后荷载-位移曲线没有下降的趋势。

6)绝对锚固长度相等时直锚组试件承载力大 于带弯钩的试件,弯钩锚固不能等价直锚钢筋。弯 钩段长均为4d,实际锚固长度越长时,弯钩组直锚 段越长,直锚组与弯钩组承载力相差越小,因此带弯 钩段的锚固,必须保证直锚段长度。

7) 提出 UHDCC 黏结强度计算公式。

## 参考文献

- [1] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118 (11): 2262. DOI: 10.1061/(ASCE)0733 - 9399 (1992)118:11(2246)
- [2] LI V C, WANG Shuxin, WU C. Tensile strain-hardening behavior or polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6): 490
- [3] RANADE R, LI V C, STULTS M D, et al. Composite properties of high-strength, high-ductility concrete [J]. ACI Materials Journal, 2013, 110(4):420
- [4] 高淑玲,徐世烺. PVA 纤维增强水泥基复合材料拉伸特性试验研究[J].大连理工大学学报,2007,47(2):233
   GAO Shuling, XU Shilang. Experimental research on tension property of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composites [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2007, 47(2): 233
- [5] 徐世烺,李贺东. 超高韧性水泥基复合材料直接拉伸试验研究[J]. 土木工程学报,2009,42(9):39
  XU Shilang, LI Hedong. Uniaxial tensile experiments of ultra-high toughness cementitious composite [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9):39. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2009.09.011
- [6] 陆洲导,林晨旭,余江滔,等.可用于无钢筋建造的超强超韧水 泥基复合材料[J].同济大学学报,2017,45(6):881
  LU Zhoudao, LIN Chenxu, YU Jiangtao, et al. High strength ultrahigh ductile cementitious composite developed for steel-free construction[J]. Journal of Tongji University, 2017, 45(6):881.
  DOI: 10.11908 /j. issn.0253 - 374x.2017.06.014
- [7] 钱辉,裴金召,李宗翱,等. 基于 SMA/ECC 的新型自复位框架节 点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2020,53(11):65 QIAN Hui, PEI Jinzhao, LI Zongao, et al. Experimental study on seismic performance of self-centering beam-column joints reinforced with superelastic SMA and ECC [J]. China Civil Engineering Journal,2020,53(11):65. DOI:10.15951/j. tmgexb. 2020.11.007
- [8] 徐世烺,李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. 土木工程学报,2008(6):56
  XU Shilang, LI Hedong. A review on the development of research and application of ultra-high toughness cementitious composites[J]. China Civil Engineering Journal, 2008(6):56. DOI:10.15951/j. tmgcxb.2008.06.013

- [9] 徐世烺,王洪昌. 超高韧性水泥基复合材料与钢筋黏结本构关系的试验研究[J]. 工程力学,2008(11):60 XU Shilang, WANG Hongchang. Experimental study on bond-slip between ultra-high toughness cementitious composites and steel bar[J]. Engineering Mechanics,2008(11):60
- [10]于明鑫,俞家欢.超强韧性混凝土与钢筋黏结性能研究[J].混凝土,2018(10):58
   YU Mingxin, YU Jiahuan. Research on bond properties of rebar and PP ECC [J]. Concrete, 2018 (10):58. DOI: 10. 3969/j. issn.

1002 - 3550. 2018. 10. 014

- [11] Japan Society of Civil Engineers Concrete Committee. Recommendations for design and construction of high-performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks [S]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2008
- [12] YU Kequan, WANG Yichao, YU Jiangtao, et al. A strainhardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8% [J]. Construction and Building Materials, 2017, 220;727. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2019.06.067
- [13]余琼,袁炜航,尤高帅.带肋钢筋与灌浆料黏结性能试验研究及 有限元分析[J].结构工程师,2016,32(6):109
  YU Qiong, YUAN Weihang, YOU Gaoshuai. Experiment and finite element analysis on bonding properties between deformed bars and grouting material[J]. Structural Engineers, 2016, 32 (6):109.
  DOI:10.15935/j. cnki.jggcs. 2016.06.017
- [14]余琼,许雪静,尤高帅.带肋钢筋与灌浆料黏结性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):95
  YU Qiong, XU Xuejing, YOU Gaoshuai. Experimental study on bond behavior for ribbed steel bars and grout[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12):95. DOI:10.11918/j. issn. 0367 6234. 201701088
- [15] 袁炜航. 带肋钢筋与灌浆料、约束灌浆料黏结性能试验研究[D]. 上海:同济大学,2017
   YUAN Weihang. Experimental study on bond performance of ribbed steel bar with grouting material or restrained grouting material[D].
- Shanghai: Tongji University, 2017
  [16] 尤高帅. 带肋钢筋与灌浆料黏结性能试验研究及有限元分析[D]. 上海:同济大学,2016
  YOU Gaoshuai. Experimental study and finite element analysis on

bonding properties between deformed bars and grouting material[D]. Shanghai: Tongji University,2016

- [17] HAMBACH M, MOLLER H, NEUMANN T, et al. Portland cement paste with aligned carbon fibers exhibiting exceptionally high flexural strength (> 100 MPa) [J]. Cement and Concrete Research, 2016, 89:84. DOI:10.1016/j. cemconres. 2016.08.011
- [18] QIU Minghong, ZHANG Yang, QU Shaoqin, et al. Effect of reinforcement ratio, fiber orientation, and fiber chemical treatment on the direct tension behavior of rebar-reinforced UHPC [J]. Construction and Building Materials, 2020, 256: 119. DOI: 10. 1016/j. conbuildmat. 2020. 119311
- [19] 王冰,李学章,计学闰. 浮石混凝土与变形钢筋粘结锚固性能的研究[J].哈尔滨建筑大学学报,1998,31(6):35
  WANG Bing, LI Xuezhang, JI Xuerun. Experimental study on bond properties of deformed bars in punice concrete[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture,1998,31(6):35
  [20] 山县松,亦形如练兵,在察察,想将人之间都结线用机器;100,35
- [20]山显彬.变形钢筋与自密实混凝土之间黏结锚固性能试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008
   SHAN Xianbin. Experimental research on bonding properties between deformed bras and self-compacting concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008

(编辑 赵丽莹)