

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.05.004

预应力钢绞线与超高性能混凝土黏结性能试验研究

郑 辉, 梁雪娇, 轩帅飞, 杨 杓, 李嘉伟

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 超高性能混凝土(UHPC)是具有超高强度、高韧性、高耐久性的新型水泥基复合材料, UHPC与钢绞线的黏结性能也与普通混凝土存在差异, 且缺乏关于超高性能混凝土与钢绞线黏结性能的设计标准。因此, 通过对36个常温自然养护的UHPC与钢绞线中心拉拔试验进行研究, 研究参数为黏结长度和保护层厚度, 根据试验获取了其荷载滑移曲线、破坏形态、黏结强度。分析试验数据表明: UHPC与钢绞线的极限黏结应力为7.01~11.65 MPa, 均值为8.78 MPa, 明显优于普通混凝土的。当直径为15.2 mm钢绞线的保护层厚度大于30 mm后, 保护层厚度对黏结强度的影响较小。相对于普通混凝土, UHPC中1×7钢绞线的传递长度和锚固长度均可减少50%, 建议对于抗压强度大于150 MPa的UHPC, 钢绞线传递长度取25d, 锚固长度取35d。

关键词: 超高性能混凝土(UHPC); 预应力钢绞线; 黏结强度; 传递长度; 锚固长度

中图分类号: U444

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)05-0019-08

An Experimental Study on Bonding Properties of Prestressed Strands with Ultra High Performance Concrete

ZHENG Hui, LIANG Xuejiao, XUAN Shuaifei, YANG Biao, LI Jiawei

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Ultra-high-performance concrete (UHPC) is a relatively new class of composite material characterized with its ultra-high strength, high toughness and high durability. There is no design standard about the bonding performance of UHPC with prestressed strands, which is rather different from that of ordinary concrete. Therefore, based on the study on the central drawing tests of 36 UHPC with stranded strands under normal temperature natural curing, with bonding length and thickness of protective layer the research parameters, the load slip curves, failure modes and bond strength have thus been obtained. The analysis and test data show that the ultimate bond stress between UHPC and strand is 7.01~11.65 MPa with an average value of 8.78 MPa, which is obviously superior to ordinary concrete. When the thickness of protective layer of steel strands with a diameter of 15.2 mm is greater than 30 mm, the thickness of protective layer has little effect on the bonding strength. Compared with that of ordinary concrete, the transfer length and anchorage length of 1×7 strand in UHPC can be reduced by 50%. It is recommended that for UHPC with a compressive strength greater than 150 MPa, the transfer length of steel strands should be 25d and the anchorage length 35d.

Keywords: ultra-high-performance concrete (UHPC); prestressed strand; bond strength; development length; anchorage length

收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608189), 大学生研究性学习和创新性实验计划基金资助项目(湘教通[2016]283号), 交通基础设施安全风险行业重点实验室基金资助项目(长沙理工大学)(16KE01)

作者简介: 郑 辉(1986-), 男, 湖南耒阳人, 湖南工业大学讲师, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为高性能混凝土在桥梁与结构工程中的应用, E-mail: zhenghui@hut.edu.cn

0 引言

因超高性能混凝土 (ultra-high-performance concrete, UHPC) 具有超高强度、高抗裂、高韧性和高耐久性优势, 是未来水泥基复合材料的发展方向^[1-4]。工程结构中, 为发挥 UHPC 的高强特性, 一般采用预应力结构, 预应力筋与 UHPC 之间的黏结性能是结构设计中的基本问题之一。

预应力混凝土构件按施加应力方式的不同, 可以分为先张法和后张法, 先张法预应力构件混凝土中的预压应力是通过钢绞线和混凝土之间的黏结力建立起来的。钢筋与混凝土间的黏结机理复杂, 影响因素较多, 目前对普通混凝土和普通钢纤维混凝土与钢筋之间的黏结性能研究已较为成熟, 根据黏结试验结果建立了黏结滑移模型, 其黏结锚固设计也有了相应标准。但 UHPC 在原材料选取、制备过程及力学性能等方面均与普通混凝土或普通钢纤维混凝土存在明显不同, 因此超高性能混凝土设计时不宜简单套用已有的黏结性能研究成果。现行的钢筋混凝土设计规范只规定了 C80 以下钢筋与混凝土的锚固设计原则, 而对于强度在 120 MPa 以上的超高性能混凝土没有设计标准。

文献 [5-11] 研究了高强钢筋与普通混凝土、高强混凝土界面的黏结性能, 文献 [12-16] 研究了预应力钢绞线与 UHPC 的黏结性能, 研究结果认为, 钢绞线与 UHPC 的黏结性能明显优于普通混凝土的, 且文献得出的黏结强度在 7~20 MPa 之间, 离散型较大。而且当前大部分研究者研究的均是钢绞线与热养护 UHPC 的黏结性能, 比较缺乏对自然环境养护时 UHPC 与钢绞线黏结性能的研究。因此, 本文拟通过对 36 个常温自然养护的 UHPC 与钢绞线中心拉拔试验进行研究, 研究参数为黏结长度和保护层厚度, 以期预应力钢绞线在 UHPC 中的传递长度和锚固长度设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料与性能

试验梁采用 UHPC 配合比, 具体见表 1。其中, 水泥为 P.O.52.5 普通硅酸盐水泥; 硅灰中 SiO₂ 的质量分数不小于 90%, 粒径在 1 μm 以下, 平均粒径为 0.1 μm; 石英砂采用级配砂, 粒径为 0.3~0.6 mm; 采用 325 目石英粉, 平均粒径为 50.1 μm; 采用可溶性树脂型高效减水剂, 掺量为 2%, 减水率为 25%; 采用镀铜光面平直钢纤维, 其直径为 (0.16 ± 0.05) mm, 长度为 (12 ± 1) mm, 抗拉强度为 2 000 MPa, 体积

掺量为 2%。

表 1 UHPC 配合比
Table 1 Mixture ratio of UHPC

水泥	硅灰	石英砂	石英粉	减水剂	W/B	钢纤维体积掺量
1.00	0.25	1.1	0.37	2%	0.16	2%

试件分 4 批进行浇筑, 浇筑完成后采用塑料薄膜覆盖其表面, 在实验室条件下对其进行自然养护。浇筑完毕至试验的时间约为 60 d, 试验梁浇筑时预留边长为 100 mm 的立方体试块和 100 mm × 100 mm × 400 mm 的棱柱体试块, 用于测试 UHPC 的抗压强度、劈裂强度和弹性模量。依据 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》中的要求, 对 UHPC 进行材性试验, 所得测试结果见表 2。

表 2 UHPC 实测强度及弹性模量
Table 2 Measured strengths and elastic modulus of UHPC

浇筑批次	立方体抗压强度 /MPa	劈裂强度 /MPa	弹性模量 /GPa
第 1 批	157.6	16.8	45.3
第 2 批	159.2	15.7	45.8
第 3 批	158.3	16.3	45.9
第 4 批	152.7	15.8	45.4
均值	157.0	16.2	45.6

本试验采用公称直径 15.2 mm 的 1 × 7 标准型低松弛钢绞线, 公称截面面积 $A_p=140 \text{ mm}^2$ 。弹性模量为 195 GPa, 极限强度为 1 860 MPa, 设计屈服强度为 1 260 MPa。

1.2 试件设计

所有 36 个构件均设计为中心拉拔长方体试件, 试件尺寸如图 1 所示。

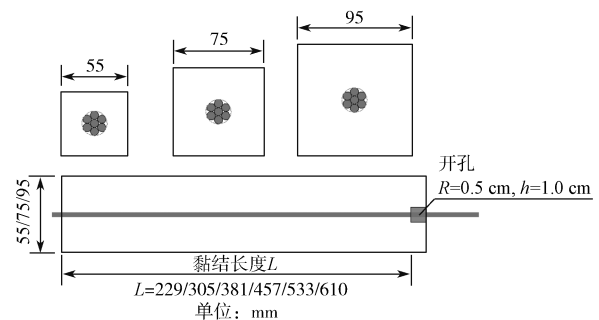


图 1 试件尺寸

Fig. 1 Specimen sizes

将预应力钢绞线埋置在试件中心, 钢绞线外径 $d=15.2 \text{ mm}$ 。试验研究参数为黏结长度和混凝土保护层厚度, 36 个试件分成 12 个系列, 试件设计参数见表 3。试件长度为黏结长度 L 加上防止局部受力的开孔 (直径为 1 cm、深度为 1 cm), 黏结长度分为 6 类, 分别为 229 mm (约 $15d$)、305 mm (约 $20d$)、381 mm (约 $25d$)、457 mm (约 $30d$)、533 mm (约

35d)、610 mm (约 40d)。试件断面尺寸为正方形, 边长分别为 55, 75, 95 mm, 对应混凝土的保护层厚度分别为 15, 30, 45 mm, 近似为 1d, 2d, 3d。为表述方便, 试件采用 $Und-C-N$ 的形式进行编号, 其中 U 表示 UHPC; nd 表示黏结长度, 依次为 15d, 20d, 25d, 30d, 35d, 40d; C 表示保护层厚度, 依次为 15, 30, 45 mm; N 表示同一组试件序号, 每组 3 个试件, 依次标注为 1, 2, 3。例如, U15d-30-1 表示黏结长度为 15d (238 mm), 保护层厚度为 30 mm (立方体的边长为 75 mm) 系列中的第 1 个试件。

表 3 试件设计参数

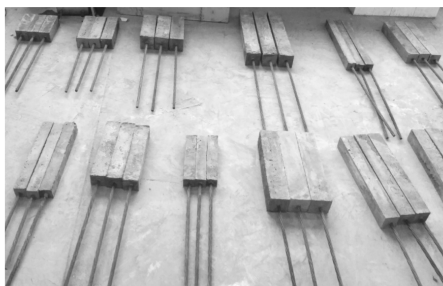
Table 3 Design parameters of specimens

序号	试件编号	黏结长度 / mm	保护层厚度 / mm	试件数量	浇筑批次
1	U20d-15-n	305	15	3	1
2	U20d-30-n	305	30	3	1
3	U20d-45-n	305	45	3	1
4	U30d-15-n	457	15	3	2
5	U30d-30-n	457	30	3	2
6	U30d-45-n	457	45	3	2
7	U40d-15-n	610	15	3	3
8	U40d-30-n	610	30	3	3
9	U40d-45-n	610	45	3	3
10	U15d-30-n	229	30	3	4
11	U25d-30-n	381	30	3	4
12	U35d-30-n	533	30	3	4

试件分为 4 批, 每批 3 组, 采用木模板进行浇筑, 试件模板如图 2a 所示。试件浇筑完毕后均在实验室条件下进行自然养护, 浇筑后的试件如图 2b 所示。



a) 试件模板

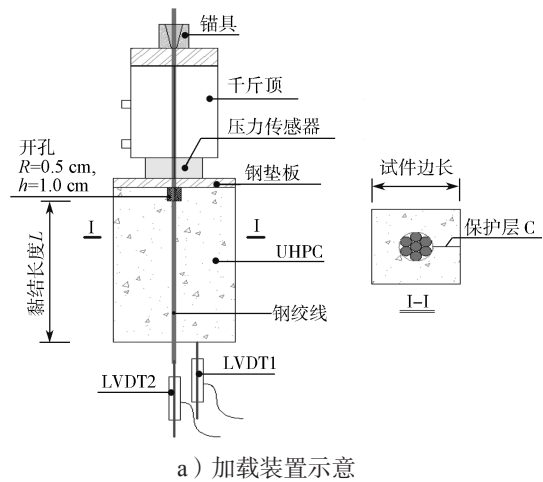


b) 浇筑后试件
图 2 试件照片

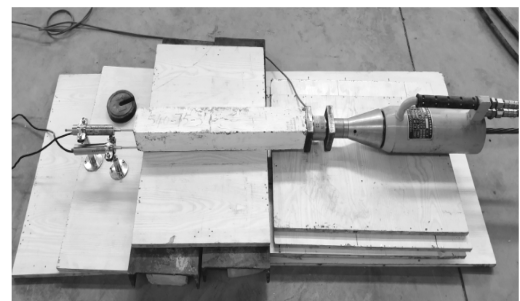
Fig. 2 Physical pictures of test specimens

1.3 试验装置及测量方法

选用的试验装置如图 3 所示。采用穿心式千斤顶逐步进行钢绞线拉拔, 在试件张拉端设置一个量程为 30 t 的穿心式压力传感器, 实时监测预应力钢绞线的拉拔力, 加载速率约为 25 kN/min。在试件的自由端放置两个线性位移传感器 (linear variable differential transformer, LVDT), 用于测量预应力钢绞线相对于混凝土长方体的位移。并将力传感器和两个位移传感器接于同一静态应变测试仪, 拉拔过程中按间隔 5 s 自动记录荷载及相对位移。加载过程中对试件裂缝进行记录。



a) 加载装置示意



b) 试验装置照片

图 3 试验加载装置

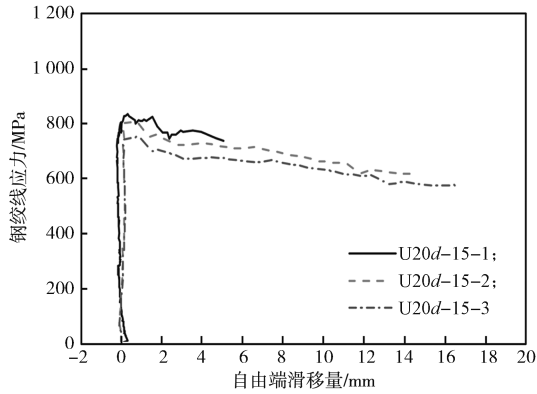
Fig. 3 Test loading devices

2 试验结果与分析

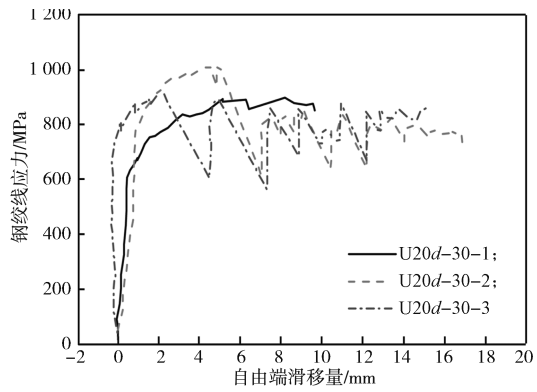
2.1 荷载 - 滑移曲线

图 4 描述了各系列试件的钢绞线应力 - 自由端滑移曲线, 其中钢绞线应力通过压力传感器测得, 自由端滑移量为 LVDT2 与 LVDT1 的差值。观察图 4 所示试验结果可以发现, 每一系列 3 个试件荷载 - 滑移曲线基本一致。荷载 - 滑移曲线均呈现出 2 个阶段: 第一阶段为弹性阶段, 此时 UHPC 与钢绞线几乎不发生相对滑移, 曲线呈现直线上升的变化趋势; 第二阶段为滑移阶段, 荷载 - 滑移曲线会出现

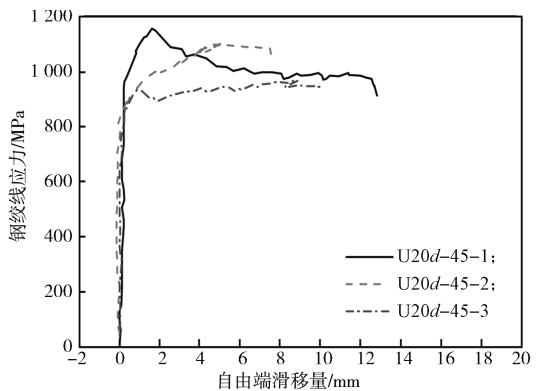
明显的滑移点, 荷载达到滑移点之后, 自由端位移迅速增加, 钢绞线应力增幅明显减缓或者缓慢下降。



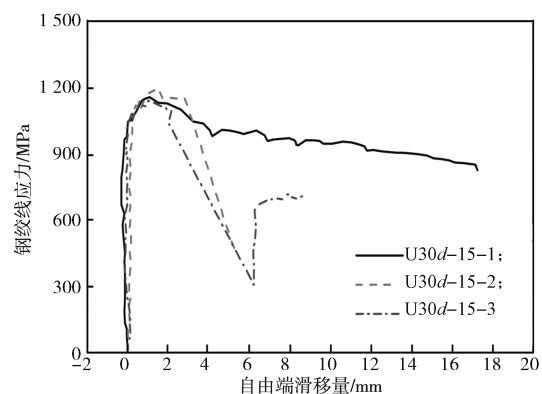
a) U20d-15 系列



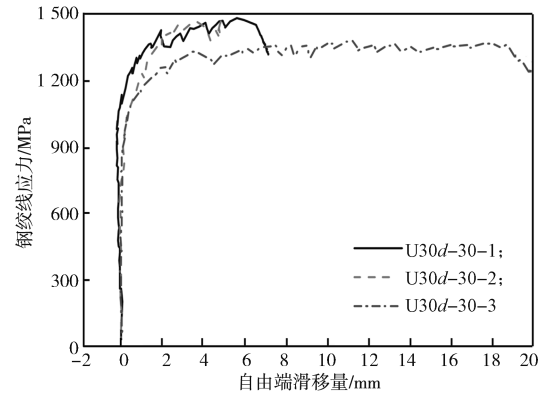
b) U20d-30 系列



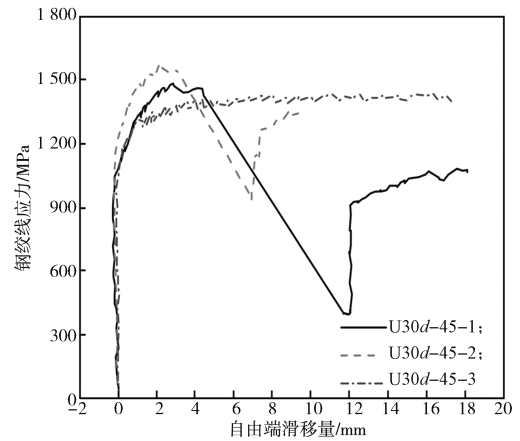
c) U20d-45 系列



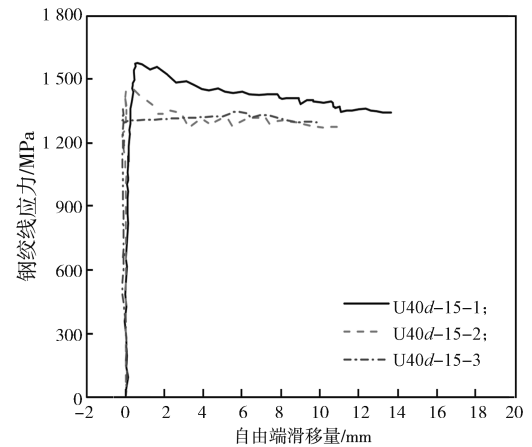
d) U30d-15 系列



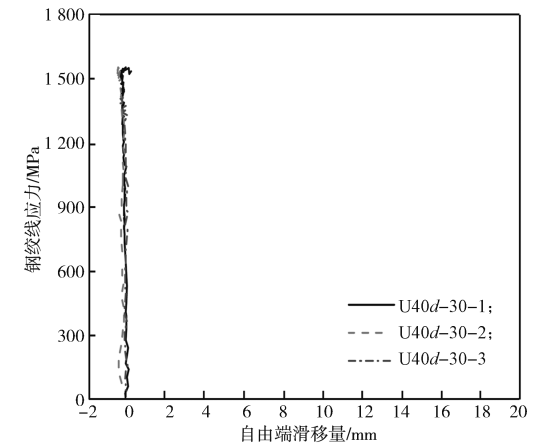
e) U30d-30 系列



f) U30d-45 系列



g) U40d-15 系列



h) U40d-30 系列

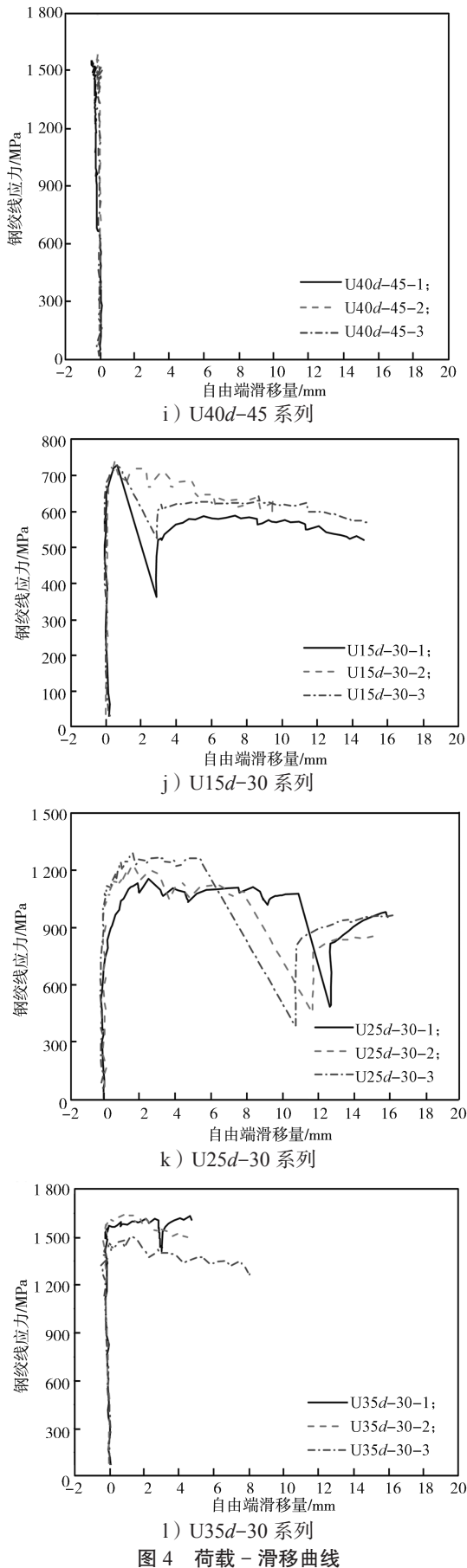


图4 荷载-滑移曲线

Fig. 4 Load-slip curves measured from the tests

2.2 破坏形态

试件破坏的形式主要可分为3种: a) 钢绞线被拔出; b) 钢绞线被拉断; c) 钢绞线被拔出同时试件开裂, 各典型破坏形态如图5所示。

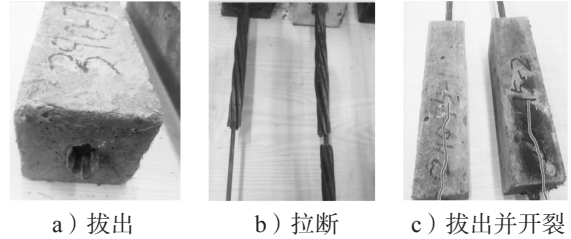


图5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of tests

不同参数情况下, 各系列试件的破坏模式矩阵如表4所示。

表4 试件破坏模式矩阵

Table 4 Failure mode matrix of different specimens

参数	15d	20d	25d	30d	35d	40d
15 mm	-	SC	-	SC	-	SC
30 mm	SC	SC	SC	S	SC	F
45 mm	-	SC	-	S	-	F

注: 表中破坏形态 S 表示滑移破坏, SC 表示滑移的同时试件开裂, F 表示钢绞线被拉断; 15d-40d 表示黏结长度, d 为钢绞线外径; 15, 30, 45 mm 表示钢绞线保护层厚度。

基于表4可以发现, 随着试件黏结长度的提高, 试件的破坏形态依次呈现为开裂后滑移破坏、滑移破坏、钢绞线拉断。J. R. Janney^[17]的研究表明, 钢绞线与混凝土黏结力主要来源于4种机理: 胶结力、摩擦力、机械咬合力和Hoyer效应。与普通混凝土相同, 钢绞线与UHPC之间的黏结应力都主要来源于钢绞线凸出的肋与周围基体间的摩擦力和机械咬合力。钢绞线被拔出过程中, 凸出的肋会对周围UHPC基体产生锥楔作用, 其径向分力使周围UHPC径向受拉。当钢绞线拔出产生的径向力大于其劈裂强度时, 普通混凝土内部就会出现裂缝, 且随着荷载的增大, 裂缝逐渐发展到试件表面, 使试件产生劈裂破坏。但与普通混凝土不同的是: 由于UHPC中掺有一定量的钢纤维, 其劈裂强度较大, 当钢绞线拔出产生的径向力大于其劈裂强度时, UHPC内部只会出现裂纹, 随着拉拔荷载的增大, 裂纹逐渐发展到试件表面, 试件表面裂缝呈放射状, 并没有发生普通混凝土试件可能呈现的劈裂破坏。

2.3 黏结强度

为评估钢绞线与UHPC的黏结强度, 本文采用式(1)进行黏结应力计算, 表5为得到的主要试验结果。

$$\tau_u = F_u / (\pi \cdot d \cdot l_a), \quad (1)$$

式中： τ_u 为平均黏结强度（MPa）； F_u 为中心拉拔试验极限荷载； d 为钢绞线的公称直径，本文试验中 $d=15.2\text{ mm}$ ； l_a 为试件黏结长度。

表5 拉拔试验结果

Tab 5 Pull-out test results

试件编号	峰值状态		黏结强度 / 黏结强度	
	极限荷载 /kN	对应位移 /mm	MPa	均值 /MPa
U20d-15-1	116.97	0.325	8.03	7.92
U20d-15-2	113.19	0.800	7.77	
U20d-15-3	115.90	0.898	7.96	
U20d-30-1	125.57	8.147	8.62	9.03
U20d-30-2	141.95	4.489	9.75	
U20d-30-3	127.14	1.963	8.73	
U20d-45-1	169.67	1.627	11.65	10.81
U20d-45-2	154.13	5.192	10.58	
U20d-45-3	148.57	8.852	10.20	
U30d-15-1	162.11	1.08	7.43	7.73
U30d-15-2	167.99	1.54	7.70	
U30d-15-3	175.97	1.03	8.06	
U30d-30-1	207.05	5.59	9.49	9.55
U30d-30-2	206.00	4.86	9.44	
U30d-30-3	212.09	11.20	9.72	
U30d-45-1	207.89	2.84	9.53	9.92
U30d-45-2	221.75	2.18	10.16	
U30d-45-3	219.86	7.37	10.07	
U40d-15-1	220.28	0.61	7.56	7.25
U40d-15-2	204.32	0.26	7.01	
U40d-15-3	209.36	-0.14	7.19	
U40d-30-1	218.39	0.01	>7.50	>7.54
U40d-30-2	220.49	-0.32	>7.57	
U40d-30-3	220.28	-0.19	>7.56	
U40d-45-1	217.55	-0.459	>7.47	>7.77
U40d-45-2	225.11	-0.122	>7.73	
U40d-45-3	236.45	0.002	>8.12	
U15d-30-1	101.85	0.684	9.31	9.38
U15d-30-2	103.32	0.506	9.45	
U15d-30-3	102.58	0.691	9.38	
U25d-30-1	161.48	2.526	8.88	9.42
U25d-30-2	171.98	1.709	9.45	
U25d-30-3	180.40	1.650	9.92	
U35d-30-1	228.68	4.643	8.98	9.05
U35d-30-2	231.45	1.110	9.09	
U35d-30-3	230.78	1.964	9.07	

表5中破坏模式为钢绞线拉断破坏的试件，其实际黏结强度应大于按公式（1）计算的结果，因此在表中用“>”表示。分析表5中的数据可以得知，本文试验结果中自然养护条件下的UHPC与钢绞线的黏结强度最大值为11.65 MPa，最小值为7.01 MPa，即为7.01~11.65 MPa，均值为8.78 MPa，方差为1.11 MPa。文献[9-10]研究了钢绞线与普通混凝土、轻骨料混凝土的黏结性能，可以了解到预应力钢绞线与普通混凝土黏结应力滑移曲线的极限黏结应力为5~7 MPa。UHPC与钢绞线的极限黏结应力达到了7.01~11.65 MPa，相对于普通混凝土，预应力钢绞线

与UHPC的黏结性能明显得到了提高。

3 保护层厚度对黏结强度的影响

分析表5中的黏结强度数值可以发现，保护层厚度对黏结强度产生了明显的影响。图6描述了滑移破坏试件的不同保护层厚度与平均黏结强度的关系。

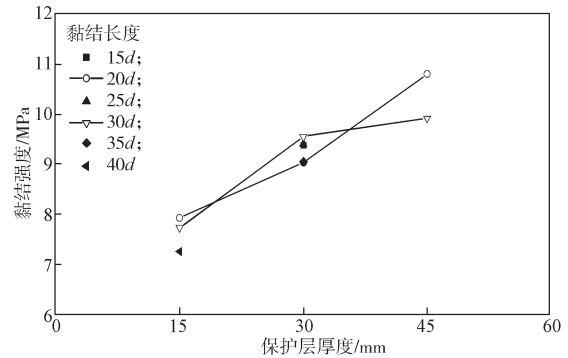


图6 保护层厚度与黏结强度关系

Fig. 6 Thickness of protective layers and bond strengths

由图6可以发现，保护层厚度分别为15、30、45 mm时，各试件的黏结强度均值分别为7.63、9.28、10.37 MPa。每增加15 mm保护层厚度，试件的黏结强度依次提高21.6%、11.6%。

特别地，黏结长度对保护层厚度的提高效果也会产生明显的影响。黏结长度较短（20d）时，每增加15 mm的保护层厚度，钢绞线与UHPC的黏结强度分别提高了约14.0%、19.7%。黏结长度较长（30d）时，每增加15 mm的保护层厚度，钢绞线与UHPC的黏结强度分别提高了约23.5%、3.9%。其主要的原因可能是黏结长度越短，UHPC试件受端部局部压力的影响范围相对试件的长度越大，压力对黏结强度起有利作用。

随着试件保护层厚度增加，试件的黏结强度随之增加。钢绞线与UHPC的黏结性能也随着保护层厚度的增加而得到提高，当保护层厚度大于30 mm后，试件的黏结强度在9 MPa以上，比普通钢筋混凝土提高了约50%。

4 传递长度和锚固长度建议取值

钢筋从应力为零的端面到应力为 σ_{pe} 的这个长度 l_t 称为预应力钢筋的传递长度。钢筋从应力为零的端面至钢筋应力为 f_{pd} 的截面的这一长度 l_d 称为锚固长度，这一长度可保证钢筋在应力达到 f_{pd} 时不致被拔出。图7描述了黏结长度与试件破坏时的应力关系。图7中空心的标志表示各试件破坏时对应的钢绞线应力值，实心标志为一组试件的试验结果均值。

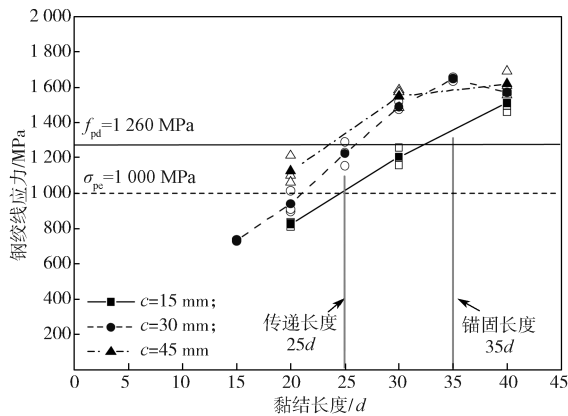


图7 黏结长度与钢绞线应力关系

Fig. 7 Strand stress of different bond lengths

由图7可以发现,试件被破坏时,钢绞线的应力随黏结长度的增加呈现增大趋势,且该趋势与钢绞线的保护层厚度有关。当保护层厚度为15 mm时,钢绞线应力与黏结长度基本呈线性关系,黏结长度越长,试件破坏时钢绞线应力越大。当保护层厚度不小于30 mm、黏结长度小于 $30d$ 时,钢绞线应力与黏结长度基本呈线性关系,黏结长度不小于 $30d$ 后,破坏时钢绞线应力与黏结长度关系不大,可以认为当黏结长度不小于 $30d$ 之后,破坏时钢绞线基本可达到极限应力。需要特别说明的是,图7显示的钢绞线应力为拉断时压力传感器读数,且即使为钢绞线被拉断破坏,其值也小于钢绞线的极限应力(1 860 MPa),其主要原因是钢绞线断裂时(如图5b所示)中心钢丝并没有被拉断,拉断荷载仅为1 860 MPa的 $6/7$,即1 594 MPa。

预应力传递长度 l_t 与混凝土强度等级以及有效预应力值 σ_{pe} 有关,本试验暂未考虑UHPC强度等级对传递长度的影响,仅取了一种强度等级U150进行研究,抗压强度150 MPa是目前国内外有关结构用UHPC抗压强度的最低要求。基于本文的试验结果(如图7所示),无论保护层厚度取15, 30 mm还是取45 mm,只要黏结长度大于 $25d$,即可保证试件破坏时钢绞线应力达到1 000 MPa。因此,可以认为 $25d$ 为混凝土强度等级为U150时 1×7 钢绞线的传递长度。而JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定,当混凝土强度等级不低于C55时, 1×7 钢绞线的传递长度为 $58d$ 。试验发现,UHPC中钢绞线的传递长度可缩短至普通混凝土的43%左右。

钢绞线锚固强度为依靠其表面与混凝土的黏结作用而达到设计承受应力时所需要的长度,一般取钢绞线应力达到屈服强度 f_{pd} (1 260 MPa)时所需要的黏结长度。如图7所示,对于保护层厚度为30 mm

及以上的试件,只要黏结长度不低于 $30d$,即可保证试件破坏时钢绞线应力达到1 260 MPa。即使对于保护层厚度为15 mm的试件,当黏结长度达到 $35d$ 时,也可以保证试件破坏时钢绞线的应力达到1 260 MPa。基于本文的试验结果,偏保守地建议 1×7 钢绞线的锚固长度为 $35d$ 。JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定混凝土强度等级不低于C65时, 1×7 钢绞线的锚固长度为 $105d$ 。试验发现,UHPC中钢绞线的锚固长度可缩短至普通混凝土的48%左右。

5 结论

本文通过对36个常温养护的UHPC与钢绞线中心进行拉拔试验,研究了不同黏结长度、不同保护层厚度情况下UHPC与钢绞线的黏结性能,得出如下主要结论:

- 1) UHPC与钢绞线的极限黏结应力为7.01~11.65 MPa,均值为8.78 MPa,明显优于普通混凝土的。
- 2) 保护层厚度的增加也可以提高钢绞线与UHPC的黏结性能。当保护层厚度大于30 mm后,其黏结强度在9 MPa以上,比普通钢筋混凝土提高约50%。
- 3) 相对于普通混凝土,UHPC中 1×7 钢绞线的传递长度和锚固长度均可减少约50%,故建议对于抗压强度大于150 MPa的UHPC,钢绞线传递长度取 $25d$,锚固长度取 $35d$ 。

参考文献:

- [1] RICHARD P. Reactive Powder Concrete with High Ductility and 200~800 MPa Compressive Strength[J]. ACI Spring Conversion, 1994, 114: 507-518.
 - [2] GRAYBEAL B A. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete, FHWA-HRT-06-103[R]. McLean: U. S. Department Transportation Federal Highway Administration, 2006: 75-85.
 - [3] SHI C, WU Z, XIAO J, et al. A Review on Ultra High Performance Concrete: Part I. Raw Materials and Mixture Design[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 741-751.
 - [4] FRANÇOIS T, RESPLENDINO J. Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development[M]. Wiley: [s. n.], 2011: 1-15.
 - [5] 胡玲,杨勇新,王全凤,等. HRBF500钢筋粘结锚固性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(11): 13-16, 44.
- HU Ling, YANG Yongxin, WANG Quanfeng, et

- al. Experimental Study on Bond Anchorage Properties of HRBF500 Steel Bars in Concrete[J]. *Industrial Construction*, 2009, 39(11): 13-16, 44.
- [6] 刘平, 李艳艳, 刘坤. HRB500 钢筋粘结性能的试验与分析[J]. *河北工业大学学报*, 2012, 41(1): 76-80.
LIU Ping, LI Yanyan, LIU Kun. Bond Performance of HRB500 Steel[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2012, 41(1): 76-80.
- [7] 欧阳煜, 赖校君. 高强钢筋高强混凝土粘结性能的试验与分析[J]. *工业建筑*, 2007, 37(5): 77-81.
OUYANG Yu, LAI Xiaojun. Experiment and Analysis of Bond Performance Between High-Strength Reinforcing Bar and High-Strength Concrete[J]. *Industrial Construction*, 2007, 37(5): 77-81.
- [8] 李方元, 赵人达. C80 高强混凝土与变形钢筋的粘结滑移试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(6): 714-718.
LI Fangyuan, ZHAO Renda. Test Study on Bond-Slip Relationship Between C80 High Strength Concrete with Deformed Reinforcing Bar[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2003, 31(6): 714-718.
- [9] 李晓芬, 刘立新, 张慧鹏. 先张法预应力钢绞线锚固长度试验研究[J]. *建筑结构*, 2015, 45(15): 102-105, 92.
LI Xiaofen, LIU Lixin, ZHANG Huipeng. Experimental Study on Anchorage Length of Pretensioned Prestressed Steel Strands[J]. *Building Structure*, 2015, 45(15): 102-105, 92.
- [10] 杜毛毛, 苏小卒, 赵勇. 预应力钢绞线粘结性能试验研究综述[J]. *结构工程师*, 2008, 24(3): 140-144.
DU Maomao, SU Xiaozu, ZHAO Yong. Overview of Experimental Studies on Bond Behavior of Prestressing Strands[J]. *Structural Engineers*, 2008, 24(3): 140-144.
- [11] 安明喆, 张盟. 变形钢筋与活性粉末混凝土的粘结性能试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2007, 28(2): 50-54.
AN Mingzhe, ZHANG Meng. Experimental Research of Bond Capability Between Deformed Bars and Reactive Powder Concrete[J]. *China Railway Science*, 2007, 28(2): 50-54.
- [12] LUBBERS A R. Bond Performance Between Ultra-High Performance Concrete and Prestressing Strands[D]. Ohio: Ohio University, 2003.
- [13] GRAYBEAL B A. Splice Length of Prestressing Strands in Field-Cast UHPC Connections[J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(6): 1831-1839.
- [14] HEGGER J, TUCHLINSKI D, KOMMER B. Bond Anchorage Behavior and Shear Capacity of Ultra High Performance Concrete Beams[C]//*Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. Kassel: University of Kassel, 2004: 351-360.
- [15] ĀĀTEK D, VĀTEK J L, KOLĀSKO J, et al. Assessment of Bond Behavior of UHPC and Prestressing Strands[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1000: 247-250.
- [16] BERTRAM G, HEGGER J. Bond Behavior of Strands in UHPC: Tests and Design[C]//*Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC*. Kassel: [s. n.], 2012: 525-532.
- [17] JANNEY J R. Nature of Bond in Pretensioned Prestressed Concrete[J]. *Journal of the American Concrete Institute*, 1954, 50(5): 717-736.

(责任编辑: 廖友媛)