

超高性能混凝土与钢筋的黏结性能试验研究

郑七振, 让梦, 李鹏

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 针对超高性能混凝土与钢筋的黏结性能, 以钢筋锚固长度、钢筋直径、混凝土保护层厚度为主要参数, 进行了超高性能混凝土试件中心拉拔试验研究。研究表明: 试件破坏形态可归纳为钢筋拔出破坏、劈裂破坏和钢筋拉断破坏; 钢筋直径对自由端滑移量影响较大, 对黏结强度影响较小; 给出了临界保护层厚度的建议值。

关键词: 超高性能混凝土; 中心拉拔试验; 黏结性能

中图分类号: TU 502⁺.6 **文献标志码:** A

Experimental Study on the Bond Behavior Between Ultra-high Performance Concrete and Steel Bars

ZHENG Qizhen, RANG Meng, LI Peng

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the stickiness energy of ultra-high performance concrete and reinforcing steel bars, taking the anchorage length of steel bars, diameter of steel bars and thickness of concrete cover as main parameters, the central pull-out tests of ultra-high performance concrete specimens were carried out. The analysis results show that the failure pattern of specimens can be summarized as the pull-out failure, splitting failure and breaking of steel bars. The steel bar diameter has a great influence on the slip at the free end, and has less influence on the bonding strength. In addition, a proposed value for the critical layer thickness was given.

Keywords: ultra-high performance concrete; central pull-out test; bond behavior

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)作为一种具有超高强度、优良韧性(类金属变形性能)及优异耐久性等性能的超高强水泥基材料, 已应用于核工业、超高层建筑、海洋工程及加固防护工程等领域^[1-5]。目前, 国内外关于UHPC的研究主要集中在配合比设计、材料性能、养护方法及工程应用等方面, 对钢筋与UHPC的

黏结性能研究较少^[6-9]。深入研究钢筋与UHPC材料的黏结性能, 对推动UHPC材料的发展, 拓展其应用领域具有重要意义^[10]。本文以钢筋锚固长度、钢筋直径及混凝土保护层厚度为主要参数, 设计了9组共27个试件, 进行了中心拉拔试验, 研究不同参数取值对钢筋与UHPC之间的黏结性能的影响, 为UHPC材料在建筑结构工程中的应

用提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试验材料及性能

试验采用的钢筋均为 HRB400 热轧带肋钢筋。在制作试件时，选取同批次钢筋，取标距为 5 倍钢筋直径，根据《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228-2002)进行拉伸试验。钢筋的物理力学性能参数如表 1 所示。

表 1 钢筋的物理力学性能参数

Tab.1 Physical and mechanical properties of steel bars

钢筋型号	直径/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	伸长率/ %	弹性模量/ GPa
HRB400	12	489.3	678.7	21.1	198.1
	16	506.2	700.6	32.0	224.9
	20	448.4	644.8	31.0	197.7

注: 表中所列数据均为实测结果的平均值。

试验采用的 UHPC 由某材料公司提供，根据《活性粉末混凝土》(GB/T 31387-2015)进行材性试验，UHPC 的立方体尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm，测得抗压强度平均值为 135.0 MPa。

1.2 试件设计与制作

设计并制作 9 组中心拉拔试件，共 27 个，其中，U1，U2，U3 组试件的主要变化参数分别为钢筋锚固长度 l_a ，钢筋直径 d 和混凝土保护层厚度 c ，各试件参数如表 2 所示。试件采用无横向钢筋的中心拉拔试件，为了避免试件加载端的 UHPC 受到局部挤压，在加载端用 PVC 套管将非黏结段的钢筋与混凝土隔离开，试件设计示意图如图 1 所示。

表 2 试件分组及设计参数

Tab.2 Grouping of specimens and design parameters

试件编号	直径 /mm	钢筋锚固长度/直径	标距 /mm	混凝土保护层厚度/mm	混凝土相对保护层厚度	截面尺寸/mm ²	个数
U1-1	16	3	80	67	4.19	150×150	3
U1-2	16	4	80	67	4.19	150×150	3
U1-3	16	5	80	67	4.19	150×150	3
U1-4	16	7.5	80	67	4.19	150×150	3
U1-5	16	10	80	67	4.19	150×150	3
U2-1	12	5	60	69	5.75	150×150	3
U2-2	20	5	100	65	3.25	150×150	3
U3-1	16	5	80	42	2.63	100×100	3
U3-2	16	5	80	32	2.00	80×80	3

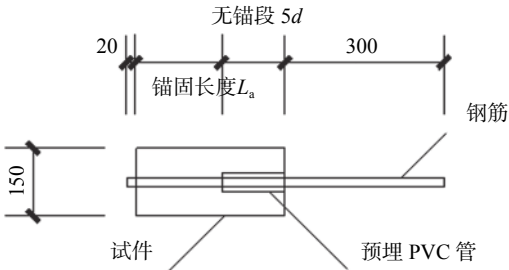


图 1 试件设计示意图
Fig.1 Schematic diagram of the specimen design

1.3 加载及测量方案

试验在 SANT100T 液压伺服万能试验机上进行，采用力控加载方式，钢筋直径为 12，16，20 mm 的加载速度分别为 72，128，200 N/s，连续加载直至试件破坏，试验加载装置如图 2 所示。在拉拔试件的加载端(下端)和自由端(上端)分别对称布置 2 个位移计，以测量加载端和自由端钢筋与试件基体的相对滑移，位移计通过特定装置固定于试件相应位置后，将其与 DH5921 数据采集系统相连，连续采集试验数据。



图 2 试验加载装置
Fig.2 Loading appliance

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态

在加载初期，钢筋加载端和自由端的滑移量均为零，随着荷载的增大，钢筋加载端逐渐开始

产生滑移，且荷载向自由端传递，并最终产生了3种破坏形态：钢筋拔出破坏、劈裂破坏和钢筋拉断破坏，典型破坏形态如图3所示。

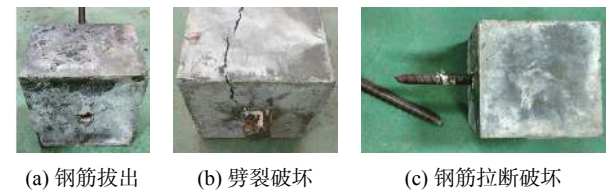


图3 典型破坏形态
Fig.3 Typical failure forms

在9组试件中，有7组试件发生了钢筋拉断破坏，只有钢筋锚固长度为3*d*的试件(U1-1)发生了钢筋拔出破坏，对于混凝土保护层厚度最小的U3-2试件则发生了劈裂破坏。各试件具体破坏形态如表3所示，定义 F_{cr} 为自由端初始滑移荷载， F_u 为极限拉拔荷载， τ_u 为极限黏结强度，按公式 $\tau_u=F_u/(\pi d l_a)$ 计算， s_u 为峰值荷载对应的自由端滑移量。

表3 超高性能混凝土试件的中心拉拔试验结果
Tab.3 Pull-out test results of ultra-high performance concrete

试件编号	<i>d</i> /mm	<i>l_a</i> / <i>d</i>	<i>c</i> / <i>d</i>	F_{cr} /kN	F_u /kN	τ_u /MPa	s_u /mm	破坏形态
U1-1	16	3	4.2	47.4	122.2	50.7	1.40	钢筋拔出破坏
U1-2	16	4	4.2	88.0	125.0	38.9	0.16	钢筋拉断破坏
U1-3	16	5	4.2	94.3	123.8	30.8	0.06	钢筋拉断破坏
U1-4	16	7.5	4.2		123.5	20.5	0	钢筋拉断破坏
U1-5	16	10	4.2		124.4	15.5	0	钢筋拉断破坏
U2-1	12	5	5.6	34.1	64.8	29.0	0.05	钢筋拉断破坏
U2-2	20	5	3.2	156.8	190.1	30.3	0.30	钢筋拉断破坏
U3-1	16	5	2.63	91.3	123.6	30.8	0.14	钢筋拉断破坏
U3-2	16	5	2	68.6	105.5	26.2	0.47	劈裂破坏

注：表中所列数据均为实测结果的平均值。

2.2 荷载-滑移曲线及其特性

为了忽略试验加载过程中钢筋伸长的影响，仅对自由端滑移量进行分析。同一破坏模式的试件，均表现出相似的荷载-滑移曲线，图4为各破坏形态的典型荷载-滑移曲线，由图4可见，典型荷载-滑移曲线可呈现3阶段特点：

a. 无滑移阶段。加载初期，自由端几乎不产生滑移，当荷载达到50%~70%极限拉拔荷载时，自由端才开始出现滑移，首次出现滑移对应的荷载称为自由端初始滑移荷载 F_{cr} 。

b. 滑移阶段。随着荷载增加，自由端滑移量不断增大，荷载-滑移曲线斜率减小，荷载逐渐达到极限拉拔荷载 F_u ，形成非线性增长的曲线。

c. 破坏阶段。不同破坏形态的试件，其荷载-滑移曲线的破坏阶段也不同。对于钢筋拔出破坏，荷载达到极限拉拔荷载 F_u 后，荷载增长不大的情况下，自由端钢筋产生大量滑移，荷载逐渐减小，钢筋被拔出，荷载-滑移曲线形成一段平缓的下降曲线；对于劈裂破坏，荷载达到极限拉拔荷载 F_u 后，试件表面裂缝迅速发展，瞬间劈裂，此阶段破坏较为突然，荷载变化较小，滑移量迅速增大，荷载-滑移曲线形成一段陡峭的下降曲线；对于钢筋拉断破坏，荷载达到钢筋的极限抗拉强度时，在钢筋与UHPC的黏结性能完好情况下，最终发生钢筋拉断破坏，自由端钢筋滑移量不再变化，荷载-滑移曲线形成一段垂直的下降段。

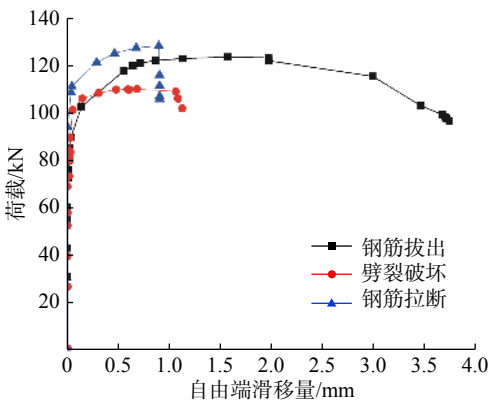


图4 各典型破坏形态的荷载-滑移曲线
Fig.4 Load-slip curve of typical failure forms

钢筋拉断破坏试件的自由端初始滑移荷载明显高于劈裂破坏试件和钢筋拔出破坏试件，且破坏时的试件自由端滑移量很小。发生钢筋拔出破坏的试件自由端滑移量较大，约为钢筋拉断破坏和劈裂破坏的4倍。

3 影响黏结性能的因素

3.1 钢筋锚固长度的影响

图5为具有不同钢筋锚固长度的U1系列试件荷载-滑移曲线。由图5可见，随着钢筋锚固长度的增大，自由端初始滑移荷载 F_{cr} 显著提高，U1-2与U1-3相较U1-1分别提高了85%，99%，而U1-4和U1-5试件钢筋直接拉断，未产生自由端滑移。对比U1系列试件可知，钢筋锚固长度在

4d 时, 自由端初始滑移荷载与钢筋的屈服荷载基本保持一致, 建议将钢筋与 UHPC 黏结性能的合理锚固长度取为 4d。

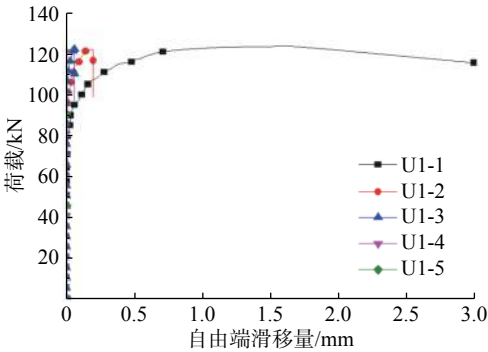


图 5 钢筋锚固长度对黏结性能的影响
Fig.5 Effect of the anchorage length on bond behaviors

3.2 钢筋直径的影响

图 6(a)为具有不同钢筋直径的 U1-3, U2-1 和 U2-2 试件的荷载-滑移曲线($F-S$ 曲线)。由图 6(a)可知, 钢筋直径越大, 其实际锚固长度就越大, 与 UHPC 接触面积越大, 从而两者间的极限化学胶着力也越大, 表现为随着钢筋直径的增大, 自由端初始滑移荷载急剧增大。试件 U2-2 和 U1-3 的自由端初始滑移荷载分别为 U2-1 的 3 倍和 2 倍, 且钢筋直径越大, 荷载-滑移曲线越平缓, 最终自由端滑移量也越大, 直径为 12 mm 的 U2-1 试件的最终自由端滑移量约为 0.03 mm, 而直径为 20 mm 的 U2-2 试件的最终自由端滑移量约为 0.25 mm 以上。

由于 3 组试件均为钢筋拉断破坏, 钢筋与 UHPC 间的黏结性能并未破坏, 因此, 3 组试件的极限黏结应力相差不大, 如图 6(b)所示。

3.3 混凝土保护层厚度的影响

试验通过调整试件横截面尺寸来设置混凝土保护层厚度 c 。图 7(a)为具有不同混凝土保护层厚度的 U1-3, U3-1 和 U3-2 试件的 $F-S$ 曲线。由图 7(a)可见, 试件自由端初始滑移荷载随着混凝土保护层厚度的增加而有所增大, 但增大幅度较小。 $c=32$ mm 的 U3-2 试件发生了劈裂破坏, 钢筋滑移较大; 而 c 较大的 U1-3 和 U3-1 则为钢筋拉断破坏。由此可见, 随着混凝土保护层厚度的增大, 试件的环向约束能力增强, 但当保护层达到一定程度后, 再增大保护层厚度对提高黏结强度没有作用。3 组试件保护层厚度与极限黏结应力的对比曲线如图 7(b)所示。由于试验并未设到与极限黏结强度对应的保护层厚度, 因此, 参考相关

资料, 并对图 7(b)进行推断, 建议混凝土临界保护层厚度为 $2.6 d$ 。

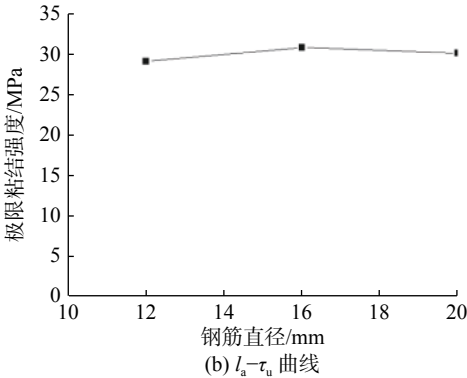
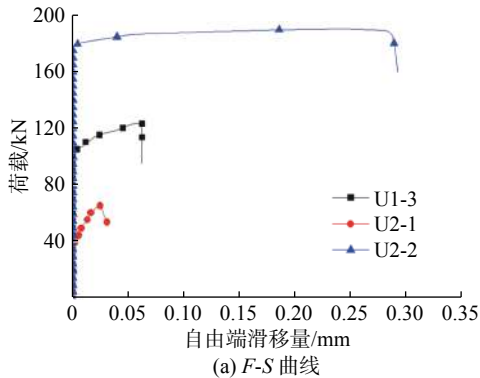


图 6 钢筋直径对黏结性能的影响
Fig. 6 Effect of the steel diameter on bond behaviors

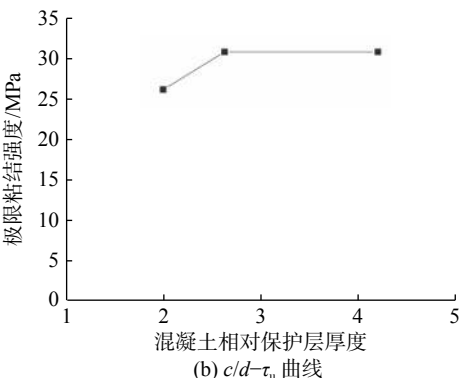
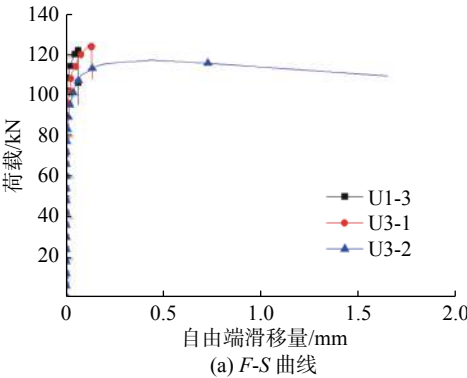


图 7 混凝土保护层厚度对黏结性能的影响
Fig. 7 Effect of the concrete cover thickness on bond behaviors

4 结 论

- a. 超高性能混凝土中心拉拔试件主要发生了3种破坏形态：钢筋拔出破坏、劈裂破坏和钢筋拉断破坏。
- b. 钢筋锚固长度在 $4d$ 时，自由端初始滑移荷载与变形钢筋的屈服荷载基本保持一致，建议超高性能混凝土与钢筋的黏结强度的中心拉拔试验试件的合理锚固长度取为 $4d$ 。
- c. 自由端初始滑移荷载随钢筋锚固长度和钢筋直径的增大可提高1~2倍。
- d. 钢筋直径对自由端初始滑移荷载影响较大，对极限平均黏结强度影响较小。
- e. 随着混凝土保护层厚度的增大，试件的环向约束能力增强，但当保护层达到一定程度后，再增大保护层厚度对提高黏结强度没有作用，建议混凝土临界保护层厚度取为 $2.6d$ 。

参考文献：

[1] 阎培渝. 超高性能混凝土(UHPC)的发展与现状[J]. 混凝土

土世界, 2010(9): 36-41.
[2] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
[3] 梁天霄, 郑元勋. 超高性能混凝土的研究综述[J]. 科技展望, 2016, 26(36): 19-20.
[4] 王德辉, 史才军, 吴林妹, 等. 超高性能混凝土在中国的研究和应用[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(1): 141-149.
[5] 邓宗才, 肖锐, 申臣良. 超细水泥活性粉末混凝土的配合比设计[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4): 659-665.
[6] 高向玲. 高性能混凝土与钢筋黏结性能的试验研究及数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2003.
[7] ORANGUN C O, JIRSA J O, BREEN J E. A Reevaluation of test data on development length and splices[J]. ACI Journal, 1977, 74(3): 114-122.
[8] 安明喆, 张盟. 变形钢筋与活性粉末混凝土的黏结性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(2): 50-54.
[9] 邓宗才, 袁常兴. 高强钢筋与活性粉末混凝土黏结性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 69-78.
[10] 李鹏, 郑七振, 龙莉波, 等. 钢筋埋长对超高性能混凝土与钢筋黏结性能的影响[J]. 建筑施工, 2016, 38(12): 1722-1723.

(编辑：石 瑛)



(上接第 397 页)

[20] JIANG T, TENG J G. Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete[J]. Engineering Structures, 2007, 29(11): 2968-2986.
[21] HANY N F, HANTOUCHE E G, HARAJLI M H. Finite element modeling of FRP-confined concrete using modified concrete damaged plasticity[J]. Engineering Structures, 2016, 125: 1-14.
[22] ACI COMMITTEE. Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318-08) [M].

Indianapolis: American Concrete Institute, 2008.
[23] CANDAPPA D C, SANJAYAN J G, SETUNGE S. Complete triaxial stress-strain curves of high-strength concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001, 13(3): 209-215.
[24] POPOVICS S. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1973, 3(5): 583-599.

(编辑：丁红艺)