

含 FRP 约束环钢筋锚固性能试验

金 峤,李京龙,孙 丽,赵明泽

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究含 FRP 约束环的钢筋锚固连接性能,为后续此种套筒连接的钢筋搭接试验研究做准备.方法 对 66 个试件进行静力拉伸试验,试验中主要考虑钢筋直径、约束环直径、约束环壁厚、混凝土强度以及锚固长度等参数的影响,对试验构件的破坏形态以及应力应变曲线进行分析.结果 钢筋最小锚固长度为 0.8 倍钢筋基本锚固长度时,仍然可以保证钢筋的锚固性能;FRP 约束环与内部灌浆料及外围混凝土之间未发生相互滑移及局部破坏的现象.结论 含 FRP 约束环的灌浆钢筋连接技术是一种连接性能可靠、工艺简单、经济效益突出,适合于建筑工业化的预制装配式混凝土结构钢筋连接技术.

关键词 装配式混凝土结构;纤维增强塑料聚合物;钢筋锚固;粘结滑移性能;静力拉伸试验

中图分类号 TU398.7

文献标志码 A

Experimental Study on Anchorage Performance of Steel Bars with FRP Confined Rings

JIN Qiao, LI Jinglong, SUN Li, ZHAO Mingze

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to study the performance of reinforcement anchorage connection with FRP restrained ring and prepare for the subsequent research, static tensile tests were carried out on 66 specimens. The main parameters considered in the test such as the diameter of steel bar, the diameter of the restraint ring, the thickness of the restraint ring, the strength of concrete and the length of anchorage. After that, the failure modes and stress-strain curves of the test members were analyzed. The result shows that the anchorage performance of the steel bar can still be guaranteed when the minimum anchorage length is 0.8; in addition, there is no slip and local destruction phenomenon between FRP restraint ring and internal grouting material as well as peripheral concrete. Furthermore, the proposed technique is a reinforcement connection method for fabricated concrete structures with various good performances including the reliable performance, simple construction process and good economic benefit, which is suitable for construction industrialization of prefabricated reinforced concrete structures.

收稿日期:2018-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51578347);住房和城乡建设部科技攻关项目(2017-K9-057)

作者简介:金峤(1975—),男,副教授,博士,主要从事装配式结构关键技术方面研究.

Key words: prefabricated concrete structure; fiber reinforced polymer; reinforcement anchorage; bond-slip behavior; static tensile test

在当今国际建筑领域,特别是在当今崇尚绿色环保的和谐社会发展理念下,我国大力发展住宅工业化.住宅工业化是在工厂生产预制构件,在施工现场拼装、连接、安装成型的一种住宅建筑方式.住宅工业化实施的关键技术在于预制构件的拼装、连接是否可靠^[1].国内外学者对此进行了相关的研究:姜洪斌、张海顺等^[2-3]进行了预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固性能试验研究,考虑钢筋直径、混凝土强度、锚固长度等主要影响参数;张兴虎等^[4]进行了采用套筒浆锚连接的预制柱抗震性能试验研究,并验证了其连接方式的可靠性;陈俊等^[5]进行了预埋波纹管的钢筋-高强浇筑料黏结锚固性能试验研究,考虑波纹套管直径、钢筋直径、波纹套管直径与钢筋直径的比值、钢筋锚固长度等对钢筋锚固性能的影响;A. ALIAS^[6]等进行了横向钢筋对预制混凝土结构的套筒注浆连接方式影响的研究;V. A. YERLIOI^[7]等进行了高强混凝土中钢筋黏结锚固性能影响因素的研究.基于此,笔者提出了一种新的钢筋连接方式——含 FRP 约束环的钢筋搭接连接.为了能够深入了解这种方式钢筋的搭接连接性能,应首先确定此种方式的钢筋锚固性能,然后进行了含 FRP 约束环的钢筋搭接连接技术的钢筋锚固试验研究,试验中的主要参数为钢筋直径、约束环直径、约束环壁厚、混凝土强度以及锚固长度,通过试验研究该新型连接方法的钢筋基本锚固性能,以确定适合该种钢筋连接方法的锚固长度.

1 试 验

1.1 含 FRP 约束环的钢筋搭接连接方法

笔者研究工作的背景技术为含 FRP 约束环的钢筋搭接,针对该技术已获国家授权实用新型专利(含 FRP 约束环的钢筋搭接连

接结构,公开号:CN205116564U),其主要技术组成及原理说明如下:

钢筋连接节点示意图如图 1 所示.上层预制混凝土构件下端内部设置 FRP 约束环,在 FRP 约束环下端部位开有注浆孔,上端部位开有排气孔,FRP 约束环顶端设有带孔的封口弹性橡胶密封圈,上层预制构件的预埋钢筋穿过密封圈圆孔伸入 FRP 约束环中,下层预制构件内的外伸连接钢筋伸入 FRP 约束环内至设计搭接长度,与上层预制构件中的预埋钢筋形成搭接连接,采用微膨胀高强灌浆料通过 FRP 约束环的注浆孔进行注浆,注满 FRP 约束环,待灌浆料达到设计强度后便完成该节点区域的构件连接.在连接节点的设计上,FRP 约束环对内部混凝土的约束作用可缩减钢筋搭接长度,而其内外壁的凹凸设计则可增强约束环与其内外围混凝土之间的粘结效应,避免约束环产生整体剪切滑移^[8-9].

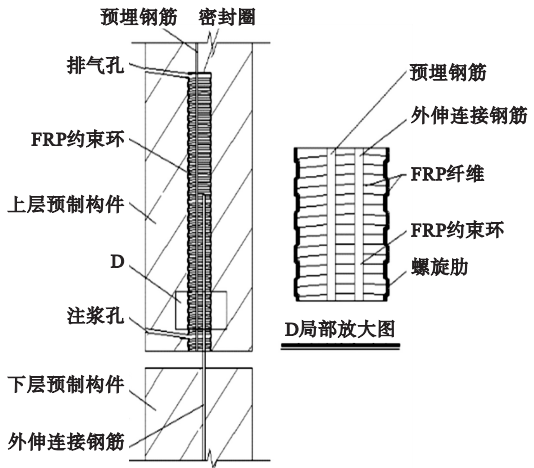


图 1 钢筋连接节点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rebar connection node

该方法将纤维增强聚合物(Fiber Reinforced Polymer,FRP)材料应用于装配式混凝土构件的连接节点之中,利用 FRP 材料为连接节点内部的钢筋提供环向约束力以缩短钢

筋连接长度,同时,FRP材料又能为连接节点的钢筋搭接区域提供了宽松的钢筋对空间,降低了施工精度要求^[10-12]。该新型连接较“套筒灌浆连接”有较大的价格优势,且规避了浆锚搭接连接所固有的成孔难题。

1.2 材料性能

在浇筑试件时,根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)每组试件预留的150 mm×150 mm×150 mm的混凝土立方体试块,与试件进行同条件养护。混凝土立方体试块力学性能指标是在试件试验同时测定,测得C30混凝土抗压强度为31.5 MPa,C40混凝土抗压强度为41.9 MPa。根据《钢筋连接用套筒灌浆料》制作3个40 mm×40 mm×160 mm的棱柱体,以(2400±200) N/s的加载速率实验测得灌浆料的抗压强度为81.4 MPa。FRP约束环的拉伸强度为100 MPa、环向刚度为350 MPa、断裂伸长率为3.5%。试件中连接钢筋的强度等级为HRB400,根据《金属材料拉伸实验第1部分:室温试验方法》得到钢筋的材料性能如表1所示。

表1 钢筋材料性能

Table 1 Steel bar material property		
钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
12	449	610
14	410	615
16	435	605
20	447	605
22	455	625

1.3 试件设计

图2为含FRP约束环灌浆钢筋锚固试验试件各个尺寸说明,试件统一采用长×宽为200 mm×200 mm的混凝土截面。图中, L_1 为钢筋长度; D 为钢筋直径; l_a 为钢筋锚固长度; L_n 为FRP约束环内径; L_w 为FRP约束环外径。试验试件采用三种钢筋锚固长度,即1倍钢筋基本锚固长度 l_a (根据混凝土结构设计规范确定)、0.9倍钢筋基本锚固长度和0.8倍钢筋基本锚固长度;钢筋类型为

HRB400,其直径分别采用12 mm、14 mm、16 mm、20 mm和22 mm等5种,试件加载端钢筋长度为630 mm,自由端长度为30 mm;混凝土强度考虑C30和C40两种;采用定制的FRP约束环如图3所示,详细尺寸如图4所示。

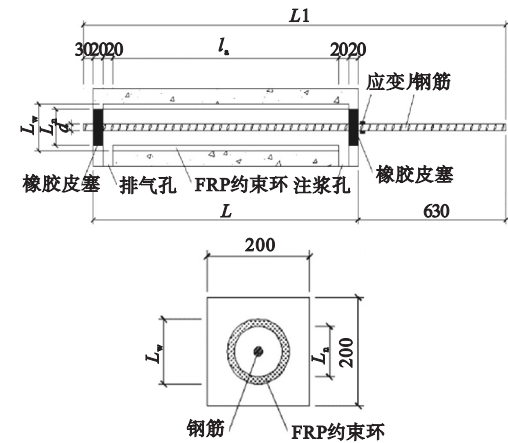


图2 钢筋锚固示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rebar anchorage

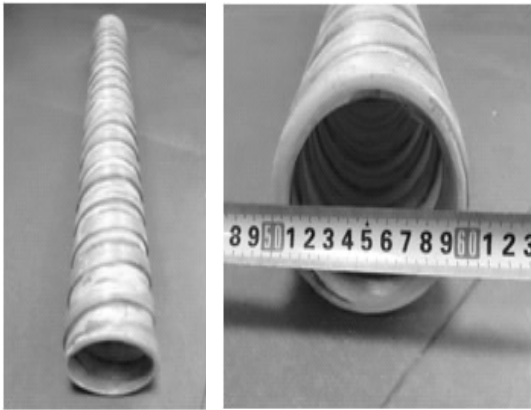


图3 FRP约束环

Fig. 3 FRP constraint ring

FRP约束环的内肋与外肋的凸起高度为3 mm,倾斜角度为15°,宽度为20 mm,内径分别为75 mm、80 mm两种,壁厚分别为3、4 mm两种。综合考量这些技术参数,共组合出66组试件设计方案(见表2~4)。另外为扩大对含FRP约束环的钢筋连接技术的应用范围,本试验又额外附加采用强度为HRB400,直径为20 mm、22 mm的带肋钢筋进行锚固性能试验,共6组试件,每组试件为

2 个,混凝土强度为 C40,具体数据见表 5。

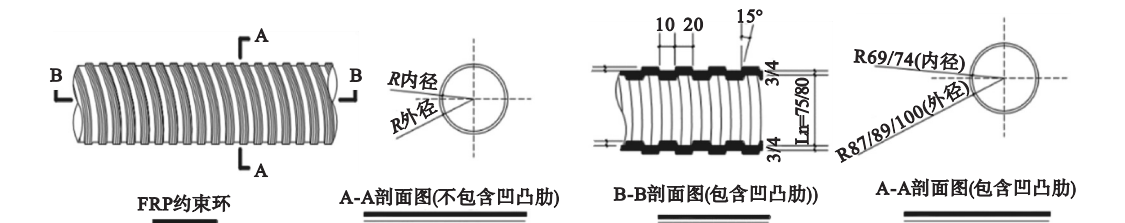


图 4 FRP 约束环尺寸

Fig. 4 The dimension of FRP constrained ring

表 2 锚固试验试件设计方案 1

Table 2 No. 1 design scheme of anchorage test specimen

混凝土强度	编号	钢筋直径/mm	锚固长度 l_a /mm	试件长度 L /mm	钢筋长度 L_1 /mm	FRP 约束环壁厚/mm	FRP 约束环内径 L_n /mm	试件数量/个
C30	A1	12	420	500	1 160	4	80	1
	A2	12	420	500	1 160	4	75	1
	A3	12	420	500	1 160	3	75	1
	B1	14	490	570	1 230	4	80	1
	B2	14	490	570	1 230	4	75	1
	B3	14	490	570	1 230	3	75	1
	C1	16	560	640	1 300	4	80	1
	C2	16	560	640	1 300	4	75	1
	C3	16	560	640	1 300	3	75	1
C40	D1	12	348	428	1 088	4	80	1
	D2	12	348	428	1 088	4	75	1
	D3	12	348	428	1 088	3	75	1
	E1	14	406	486	1 146	4	80	1
	E2	14	406	486	1 146	4	75	1
	E3	14	406	486	1 146	3	75	1
	F1	16	464	544	1 204	4	80	1
	F2	16	464	544	1 204	4	75	1
	F3	16	464	544	1 204	3	75	1

表 3 锚固试验试件设计方案 2

Table 3 No. 2 design scheme of anchorage test specimen

混凝土强度	编号	钢筋直径/mm	锚固长度 l_a /mm	试件长度 L /mm	钢筋长度 L_1 /mm	FRP 约束环壁厚/mm	FRP 约束环内径 L_n /mm	试件数量/个
C30	G1	12	378	458	1 118	4	80	1
	G2	12	378	458	1 118	4	75	1
	G3	12	378	458	1 118	3	75	1
	H1	14	441	521	1 181	4	80	1
	H2	14	441	521	1 181	4	75	1
	H3	14	441	521	1 181	3	75	1
	I1	16	504	584	1 244	4	80	1
	I2	16	504	584	1 244	4	75	1
	I3	16	504	584	1 244	3	75	1
C40	J1	12	313	393	1 053	4	80	1
	J2	12	313	393	1 053	4	75	1
	J3	12	313	393	1 053	3	75	1
	K1	14	365	445	1 105	4	80	1
	K2	14	365	445	1 105	4	75	1
	K3	14	365	445	1 105	3	75	1
	L1	16	418	498	1 158	4	80	1
	L2	16	418	498	1 158	4	75	1
	L3	16	418	498	1 158	3	75	1

表 4 锚固试验试件设计方案 3

Table 4 No. 3 design scheme of anchorage test specimen

混凝土强度	编号	钢筋直径/mm	锚固长度 l_a /mm	试件长度 L /mm	钢筋长度 L_1 /mm	FRP 约束环 壁厚/mm	FRP 约束环 内径 L_n /mm	试件数 量/个
C30	M1	12	336	416	1 076	4	80	1
	M2	12	336	416	1 076	4	75	1
	M3	12	336	416	1 076	3	75	1
	N1	14	392	472	1 132	4	80	1
	N2	14	392	472	1 132	4	75	1
	N3	14	392	472	1 132	3	75	1
	P1	16	448	528	1 188	4	80	1
	P2	16	448	528	1 188	4	75	1
	P3	16	448	528	1 188	3	75	1
C40	R1	12	278	358	1 018	4	80	1
	R2	12	278	358	1 018	4	75	1
	R3	12	278	358	1 018	3	75	1
	S1	14	325	405	1 065	4	80	1
	S2	14	325	405	1 065	4	75	1
	S3	14	325	405	1 065	3	75	1
	T1	16	371	451	1 111	4	80	1
	T2	16	371	451	1 111	4	75	1
	T3	16	371	451	1 111	3	75	1

表 5 锚固试验试件设计方案

Table 5 Design scheme of anchorage test specimens

混凝土强度	编号	钢筋直径/mm	锚固长度 l_a /mm	试件长度 L /mm	钢筋长度 L_1 /mm	FRP 约束环 壁厚/mm	FRP 约束环 内径 L_n /mm	试件数 量/个
C40	U1	20	$l_a = 700$	780	1 440	4	80	2
	U2	20	$0.9l_a = 630$	710	1 370	4	75	2
	U3	20	$0.8l_a = 560$	640	1 300	3	75	2
C40	V1	22	$l_a = 770$	850	1 510	4	80	2
	V2	22	$0.9l_a = 693$	793	1 453	4	75	2
	V3	22	$0.8l_a = 616$	696	1 356	3	75	2

1.4 试验装置及加载方案

试验加载装置图如图 5 所示.

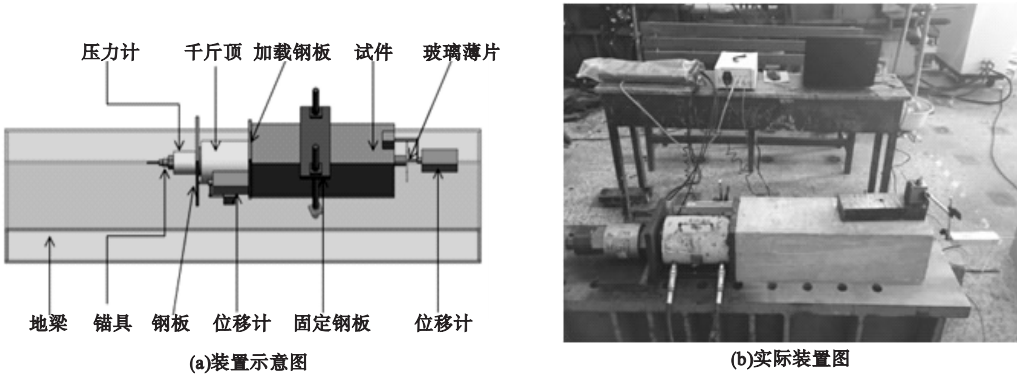


图 5 试验装置

Fig. 5 Test equipment

试验采用手动液压式千斤顶进行单向连续加载,加载速度按照规范《混凝土结构试验方法标准》进行控制,加载至试件中的钢筋屈服以致断裂为止,并通过液压传感器、位移计、应变片测得所加荷载值、加载端钢筋的伸长量、自由端滑移量与钢筋应变^[13-15]。

1.5 测量内容和方法

试验的流程可概括为:首先,在钢筋加载端靠近混凝土构件的位置粘贴应变片;然后,进行钢筋的锚固性能试验,在静力拉伸过程中,通过数据采集板读出在逐渐增大的荷载作用下钢筋的应变,荷载的大小通过拉压力传感器获得,钢筋的两端加有电子位移计可以测出钢筋的滑移量。试验量测的项目应包括下列内容:试件自由端钢筋滑移值与加载端钢筋伸长量、钢筋屈服荷载值与极限荷载值、数据采集板采集的钢筋应变。

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

在试验中,66 组试验构件的试验现象均是在加载自由端处的钢筋被拉断,整个加载过程中 FRP 约束环与内部灌浆料及外围混凝土之间未发生相互滑移及局部破坏的现象。图 6、图 7 汇总了部分试验试件的断面情况。

图 8 展示了 U3 试件经过钢筋锚固试验后,沿纵向剖开所展示的试件内部情形,U3 试件为混凝土型号为 C40,钢筋直径为 20 mm,锚固长度为 $0.8l_a=560\text{ mm}$ 。

由图 8(a)可以看出,在整个试验过程中,FRP 约束环自身未发生破坏,同时,FRP 约束环与内部灌浆料及外围混凝土之间的



图 6 加载端钢筋
Fig. 6 Loading end reinforcement



图 7 自由端钢筋
Fig. 7 Free end reinforcement

界面亦未发生开裂、滑移等情况。上述试验现象表明:①FRP 约束环能够与外围的混凝土协同工作,未发生沿界面方向的剪切滑移破坏;②FRP 约束环能够与其内部灌浆料很好的粘结,其对内部灌浆料的约束作用明显。由图 8(b)、(c)可以看出,钢筋最终的破坏形式是在加载端处的钢筋被拉断,而自由端钢筋及灌浆料完好,钢筋在自由端滑移量均为零。因此可认为钢筋与灌浆料之间的锚固性能可以得到保证。FRP 约束环对内部灌浆料的环向套箍作用,缩短了钢筋的最短锚固距离要求,试验中所设计的钢筋锚固长度,均大于实际构件所需要的最短钢筋锚固距离。试件的最终破坏形式见表 6~9 所示。

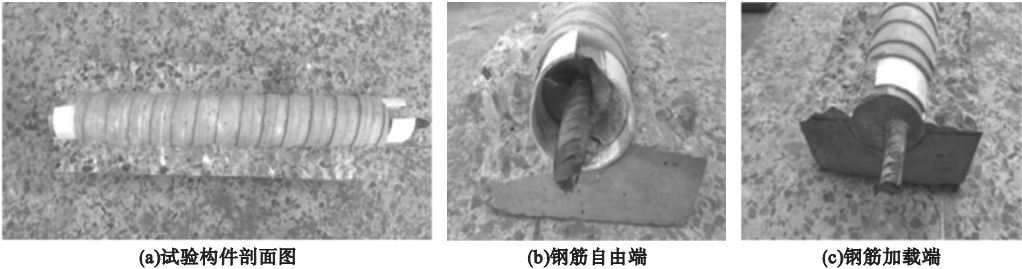


图 8 U3 试件
Fig. 8 U3 component

表6 1.0 l_a 锚固试验数据表

Table 6 Anchor test data sheet with 1.0 l_a

编号	混凝土强度	HRB400 直径/mm	锚固长度/mm	屈服拉力/kN	平均屈服强度/MPa	加载端伸长量/mm		自由端滑移量/mm	极限拉力/kN	约束环内径与壁厚/mm	破坏形式
						内	外				
A1	C30	12	420	52.8	462.7	9	81	0	72.8	80/4	外部钢筋被拉断
A2	C30	12	420	51.0	462.7	7	78	0	71.2	75/4	外部钢筋被拉断
A3	C30	12	420	53.2	462.7	10	85	0	72.1	75/3	外部钢筋被拉断
B1	C30	14	490	63.2	421.7	8	86	0	95.9	80/4	外部钢筋被拉断
B2	C30	14	490	68.3	421.7	11	87	0	98.3	75/4	外部钢筋被拉断
B3	C30	14	490	63.2	421.7	9	78	0	92.9	75/3	外部钢筋被拉断
C1	C30	16	560	89.0	443.1	10	81	0	122.3	80/4	外部钢筋被拉断
C2	C30	16	560	89.2	443.1	12	86	0	123.4	75/4	外部钢筋被拉断
C3	C30	16	560	89.1	443.1	8	73	0	120.8	75/3	外部钢筋被拉断
D1	C40	12	348	52.1	466.5	10	87	0	72.5	80/4	外部钢筋被拉断
D2	C40	12	348	53.2	466.5	9	79	0	72.6	75/4	外部钢筋被拉断
D3	C40	12	348	53.0	466.5	13	89	0	73.1	75/3	外部钢筋被拉断
E1	C40	14	406	63.1	413.5	7	74	0	90.1	80/4	外部钢筋被拉断
E2	C40	14	406	65.7	413.5	10	79	0	95.7	75/4	外部钢筋被拉断
E3	C40	14	406	62.1	413.5	9	82	0	94.2	75/3	外部钢筋被拉断
F1	C40	16	464	88.1	440.1	11	86	0	123.8	80/4	外部钢筋被拉断
F2	C40	16	464	88.1	440.1	7	74	0	121.6	75/4	外部钢筋被拉断
F3	C40	16	464	89.3	440.1	8	78	0	122.9	75/3	外部钢筋被拉断

表7 0.9 l_a 锚固试验数据表

Table 7 Anchor test data sheet with 0.9 l_a

编号	混凝土强度	HRB400 直径/mm	锚固长度/mm	屈服拉力/kN	平均屈服强度/MPa	加载端伸长量/mm		自由端滑移量/mm	极限拉力/kN	约束环内径与壁厚/mm	破坏形式
						内	外				
G1	C30	12	378	50.2	453.6	10	81	0	69.3	80/4	外部钢筋被拉断
G2	C30	12	378	51.1	453.6	11	86	0	72.1	75/4	外部钢筋被拉断
G3	C30	12	378	52.6	453.6	8	78	0	72.8	75/3	外部钢筋被拉断
H1	C30	14	441	62.2	406.8	9	82	0	93.5	80/4	外部钢筋被拉断
H2	C30	14	441	63.1	406.8	8	81	0	98.2	75/4	外部钢筋被拉断
H3	C30	14	441	62.5	406.8	12	81	0	89.1	75/3	外部钢筋被拉断
I1	C30	16	504	88.3	439.9	8	78	0	123.3	80/4	外部钢筋被拉断
I2	C30	16	504	88.5	439.9	10	85	0	116.1	75/4	外部钢筋被拉断
I3	C30	16	504	88.6	439.9	9	80	0	120.6	75/3	外部钢筋被拉断
J1	C40	12	313	49.5	443.9	11	91	0	69.2	80/4	外部钢筋被拉断
J2	C40	12	313	50.1	443.9	9	83	0	72.4	75/4	外部钢筋被拉断
J3	C40	12	313	51.0	443.9	10	76	0	72.0	75/3	外部钢筋被拉断
K1	C40	14	365	63.1	416.7	9	81	0	91.5	80/4	外部钢筋被拉断
K2	C40	14	365	65.2	416.7	8	83	0	97.2	75/4	外部钢筋被拉断
K3	C40	14	365	64.1	416.7	10	79	0	90.4	75/3	外部钢筋被拉断
L1	C40	16	418	88.2	445.4	7	75	0	123.3	80/4	外部钢筋被拉断
L2	C40	16	418	87.1	445.4	9	86	0	122.7	75/4	外部钢筋被拉断
L3	C40	16	418	93.4	445.4	10	85	0	122.6	75/3	外部钢筋被拉断

表 8 0.8l_a 锚固试验数据表

Table 8 Anchor test data sheet with 0.8l_a

编号	混凝土强度	HRB400 直径/mm	锚固长度/mm	屈服拉力/kN	平均屈服强度/MPa	加载端伸长量/mm		自由端滑移量/mm	极限拉力/kN	约束环内径与壁厚/mm	破坏形式
						内	外				
M1	C30	12	336	55.3	470.7	11	85	0	75.6	80/4	外部钢筋被拉断
M2	C30	12	336	51.2	470.7	10	84	0	72.9	75/4	外部钢筋被拉断
M3	C30	12	336	53.2	470.7	8	87	0	72.7	75/3	外部钢筋被拉断
N1	C30	14	392	62.5	410.0	9	78	0	93.2	80/4	外部钢筋被拉断
N2	C30	14	392	63.3	410.0	7	75	0	92.0	75/4	外部钢筋被拉断
N3	C30	14	392	63.5	410.0	7	79	0	91.9	75/3	外部钢筋被拉断
P1	C30	16	448	88.3	440.8	10	81	0	121.8	80/4	外部钢筋被拉断
P2	C30	16	448	88.5	440.8	8	78	0	122.3	75/4	外部钢筋被拉断
P3	C30	16	448	89.2	440.8	10	86	0	122.5	75/3	外部钢筋被拉断
R1	C40	12	278	54.2	467.1	9	78	0	73.8	80/4	外部钢筋被拉断
R2	C40	12	278	52.0	467.1	9	85	0	72.2	75/4	外部钢筋被拉断
R3	C40	12	278	52.3	467.1	11	83	0	72.5	75/3	外部钢筋被拉断
S1	C40	14	325	62.2	407.8	7	74	0	90.0	80/4	外部钢筋被拉断
S2	C40	14	325	62.3	407.8	8	78	0	90.8	75/4	外部钢筋被拉断
S3	C40	14	325	63.8	407.8	12	81	0	97.8	75/3	外部钢筋被拉断
T1	C40	16	371	90.2	445.9	9	82	0	123.2	80/4	外部钢筋被拉断
T2	C40	16	371	89.5	445.9	13	91	0	122.5	75/4	外部钢筋被拉断
T3	C40	16	371	89.3	445.9	10	78	0	122.8	75/3	外部钢筋被拉断

表 9 锚固试验数据表

Table 9 Anchor test data sheet

编号	混凝土强度	HRB400 直径/mm	锚固长度/mm	屈服拉力/kN	平均屈服强度/MPa	加载端伸长量/mm		自由端滑移量/mm	极限拉力/kN	约束环内径与壁厚/mm	破坏形式
						内	外				
U1	C40	20	580(1.0l _a)	145.2	461.0	23	186	0	202.1	75/3	外部钢筋被拉断
				144.3	461.0	23	186	0	202.1	75/3	钢筋屈服
U2	C40	20	522(0.9l _a)	144.5	461.0	19	183	0	198.7	75/3	外部钢筋被拉断
				145.0	461.0	19	183	0	198.7	75/3	钢筋屈服
U3	C40	20	464(0.8l _a)	143.6	458.6	21	190	0	201.1	75/3	外部钢筋被拉断
				144.7	458.6	21	190	0	201.1	75/3	钢筋屈服
V1	C40	22	638(1.0l _a)	172.5	454.9	28	198	0	238.2	75/3	外部钢筋被拉断
				173.1	454.9	28	198	0	238.2	75/3	钢筋屈服
V2	C40	22	574(0.9l _a)	172.2	455.6	32	195	0	238.1	75/3	外部钢筋被拉断
				174.0	455.6	32	195	0	238.1	75/3	钢筋屈服
V3	C40	22	510(0.8l _a)	171.8	452.8	29	201	0	237.5	75/3	外部钢筋被拉断
				172.8	452.8	29	201	0	237.5	75/3	钢筋屈服

2.2 试验结果分析

图 9 为钢筋在 0.8l_a 的锚固长度试件试验中,获得的各钢筋在单调受拉状态下的应力-应变曲线图.以图 9(d)为例,从图中可以看出,直径为 20 mm 的钢筋在应变值为 0.024 8 前处于弹性状态,应力与应变呈线性关系;在应变达到 0.024 8 后,钢筋应力达到 458 MPa,随着应变的增加,应力增长趋势变

缓,说明钢筋处于屈服状态;在钢筋应变达到 0.149 7,钢筋应力达到 640 MPa,对比 HRB400 级钢筋,钢筋达到极限强度,此区间为钢筋强化阶段,应力不再增长.最后,应力急剧降低,标志着钢筋被拉断.通过以上对钢筋应力应变过程的分析,说明试验过程中,钢筋是有过屈服阶段、强化阶段与颈缩阶段,乃至最终被拉断的过程.

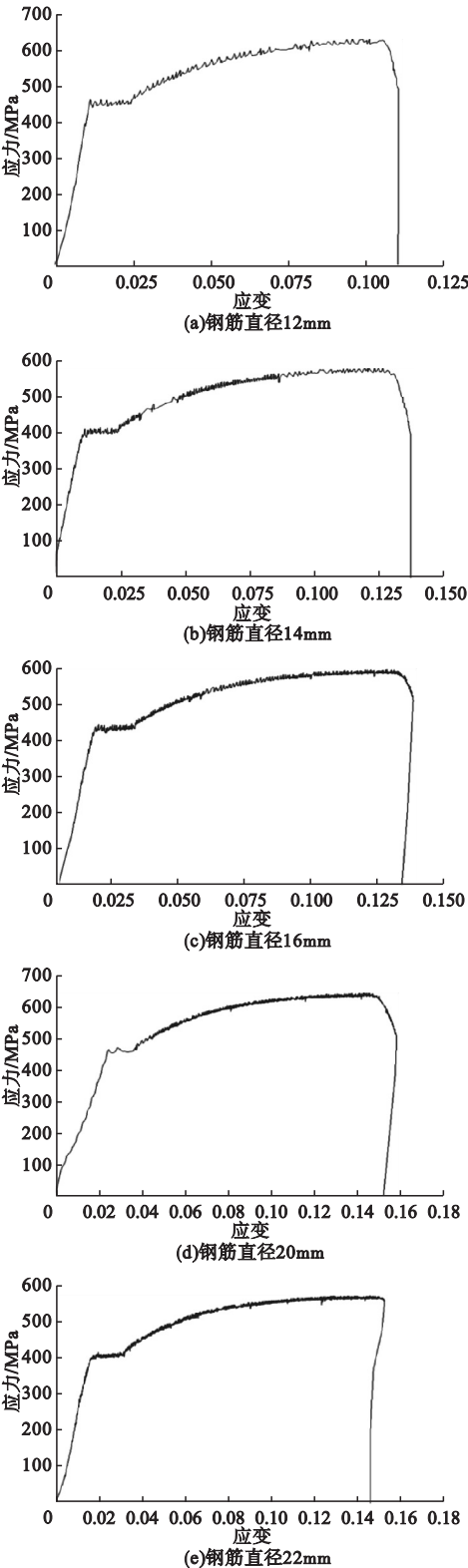


图 9 钢筋单调受拉应力 - 应变曲线

Fig. 9 Stress strain curves of steel bars under monotonic tension

根据试验时对钢筋应力应变状态的监测数据,钢筋均因达到屈服强度直至极限强度而断裂. 该种钢筋连接区域外部设有 FRP 约束环,在与微膨胀的灌浆料相互作用过程中,前者对后者起到一定的套箍作用,从而可以相当程度地缩短钢筋的锚固长度^[16-19]. 试验进程很好地说明了这一机理,即当试验构件中钢筋的锚固长度缩减了 20%,用于构件连接的钢筋与灌浆料之间的锚固性能仍然可以得到保证.

3 结 论

(1)对于不同规格的 FRP 约束环,均能够与外围的混凝土协同工作,同时也能够与内部灌浆料很好的粘结,对内部灌浆料的约束作用明显.

(2)FRP 约束环对微膨胀灌浆料产生了一定的套箍作用,使得钢筋的粘结性能得到较大的提高,从而可以相当程度地缩短钢筋的锚固长度. 对于小直径钢筋(12 mm、14 mm、16 mm),在 0.8la 的锚固长度试件锚固试验中表明,钢筋最终的破坏形式均是在加载自由端处的钢筋被拉断,整个加载过程中试件内部混凝土与灌浆料部分未出现劈裂破坏、钢筋被拔出或者是粘结破坏,钢筋在自由端滑移量均为零,因此可认为钢筋与灌浆料之间的锚固性能可以得到保证.

(3)对于大直径钢筋(20 mm、22 mm)在 0.8la 的锚固长度试件锚固试验中表明,钢筋在自由端滑移量均为零,因此可认为钢筋与灌浆料之间的锚固性能仍然可以得到保证. 根据锚固性能试验结果,在未来的搭接试验中,可考虑进一步缩短钢筋的搭接长度.

参考文献

[1] 蔡天然. 住宅建筑工业化发展历程及其当代建筑设计的启示研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.
(CAI Tianran. The development process of residential building industrialization and the inspiration of contemporary architectural design

- [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.)
- [2] 姜洪斌, 张海顺, 刘文清, 等. 预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(4): 28-31.
(JIANG Hongbin, ZHANG Haishun, LIU Wenqing, et al. Experimental study on plug-in filling hole for steel bar anchorage of the PC structure[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2011, 43(4): 28-31.)
- [3] 张海顺. 预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固搭接试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
(ZHANG Haishun. Experimental study on plug-in filling hole for lap-joint of PC concrete structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 13-25.)
- [4] 张兴虎, 王建, 潘树宾, 等. 套筒浆锚连接柱的抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(2): 164-170.
(ZHANG Xinghu, WANG Jian, PAN Shubin, et al. Experimental research on seismic performance of new fabricated column spliced by grout sleeves[J]. Journal of Xi'an university of architecture & technology (natural science edition), 2013, 45(2): 164-170.)
- [5] 陈俊, 肖岩, 尹齐, 等. 预埋波纹套管的钢筋-高强浇筑料黏结锚固性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015.)
(CHEN Jun, XIAO Yan, YIN Qi, et al. Bonding strength of rebar anchorage in embedded corrugated sleeve with high strength grout[J]. Journal of building structures, 2015.)
- [6] ALIAS A, ZUBIR M A, SHAHID K A, et al. Structural performance of grouted sleeve connectors with and without transverse reinforcement for precast concrete structure [J]. Procedia engineering, 2013, 53(3): 116-231.
- [7] YERLIOI V A, TURAN O. Factors affecting anchorage bond strength in high-performance concrete [J]. ACI structural journal, 2000, 97(3): 499-507.
- [8] 赵晓丽, 陈颖, 陈其安. 横肋对称与横肋非对称钢筋黏结锚固性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(6): 67-70.
(ZHAO Xiaoli, CHEN Ying, CHEN Qi'an, et al. Experimental study on the bond anchorage properties for the rebar with symmetrically distributed transverse ribs and the unsymmetrically ones in concrete[J]. Industrial construction, 2008, 38(6): 67-70.)
- [9] 肖成志, 田稳苓, 孙文君, 等. 影响混凝土植筋锚固性能因素的试验分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增刊2): 275-278.
(XIAO Chengzhi, TIAN Wenling, SUN Wenjun, et al. Experimental research on parameters affecting anchorage performance of post-installed bars in concrete[J]. Journal of building structures, 2010, 31(S2): 275-278.)
- [10] 栗新. 工业化预制装配式(PC)住宅建筑的设计研究与应用[J]. 建筑施工, 2008, 30(3): 201-202.
(LI Xin. Study on design and application of industrialized PC dwellings [J]. Building construction, 2008, 30(3): 201-202.)
- [11] FILHO F M D A, DEBS M K E, DEBS A L H C E. Bond-slip behavior of self-compacting concrete and vibrated concrete using pull-out and beam tests [J]. Materials & structures, 2008, 41(6): 1073-1089.
- [12] WU Y T, XIAO Y, ANDERSON J C. Seismic behavior of PC column and steel beam composite [J]. Journal of structural engineering, 2009, 135(11): 1398-1407.
- [13] 钱稼茹, 杨新科, 秦珩, 等. 竖向钢筋采用不同连接方法的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构学报, 2011(6): 51-59.
(QIAN Jiaru, YANG Xinke, QIN Heng, et al. Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with various methods of vertical reinforcement splicing [J]. Journal of building structures, 2011(6): 51-59.)
- [14] 尹齐, 陈俊, 彭黎, 等. 钢筋插入式预埋波纹管浆锚连接的锚固性能试验研究[J]. 工业建筑, 2014(11): 104-107.
(YIN Qi, CHEN Jun, PENG Li, et al. Experimental study of anchorage performance of grouting connection with steel bars inserted pre-buried bellows[J]. Industrial construction, 2014(11): 104-107.)
- [15] 郑威. 高温后装配式结构注浆波纹管连接钢筋锚固性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
(ZHENG Wei. Study on anchorage performance of assembled structure with corrugated pipe connecting steel bar after high temperature [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.)
- [16] 蒋德稳, 邱洪兴. 重复荷载作用下钢筋混凝土锚固端黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, (9): 127-135.
(JIANG Dewen, QIU Hongxing. Test study on bonding performance of reinforced concrete anchorage zone under repeated loads[J]. Journal of building structures, 2012, 33(9): 127-135.)
- [17] 张伟. 装配整体式混凝土结构钢筋连接技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
(ZHANG Wei. Research on steel bar connection technology of assembled monolithic concrete structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.)
- [18] ALIAS A, ZUBIR M A, SHAHID K A, et al. Structural performance of grouted sleeve connectors with and without transverse reinforcement for precast concrete structure [J]. Procedia engineering, 2013, 53(7): 116-123.
- [19] 丁红岩, 刘源, 李海瑞, 等. 高强钢筋与混凝土锚固性能研究[J]. 天津大学学报, 2016(4): 376-384.
(DING Hongyan, LIU Yuan, LI Hairui, et al. Anchoring behavior between high-strength steel bar and concrete [J]. Journal of Tianjin university, 2016(4): 122-125.)