

DOI:10.11918/201907017

钢筋套筒灌浆对接与搭接接头力学性能对比

余 琼¹, 张远明¹, 宫 鑫¹, 白少华², 范宝秀²

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 山西建筑工程集团有限公司, 太原 030032)

摘 要: 为研究套筒灌浆对接和搭接接头力学性能差异, 进行了 24 个对接和 12 个搭接接头单向拉伸试验, 对比研究了接头的破坏形态、承载力、延性、力-位移曲线、套筒应变等。对接接头在加载过程中套筒中部灌浆料出现全截面开裂现象, 加载结束发生了灌浆料从套筒中拔出破坏, 搭接接头无以上现象。试验结果表明在套筒长度相同时, 搭接接头承载力、总伸长率、刚度分别是对接接头的 5~7 倍、3~5 倍、2~3 倍, 位移延性系数大于对接接头; 在锚固长度相同时, 搭接接头承载力、位移延性略大于对接接头, 两者初始刚度差别不大, 而搭接接头中后期刚度高于对接接头。对接接头套筒中部截面纵向受拉, 而搭接接头加载前期受拉, 后期受压, 反映搭接接头对套筒抗拉强度要求较低; 对接接头套筒中部截面环向受压, 而搭接接头加载前期受压, 后期受拉, 说明搭接接头套筒中部对灌浆料约束作用大于对接接头。搭接接头力学性能优于对接接头, 可运用于预制装配式结构钢筋连接。

关键词: 套筒灌浆; 对接接头; 搭接接头; 传力路径; 套筒应变

中图分类号: TU758.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)08-0140-11

Comparison of mechanical properties of reinforcement sleeve grouting butt joint and lap joint

YU Qiong¹, ZHANG Yuanming¹, GONG Xin¹, BAI Shaohua², FAN Baoxiu²

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shanxi Construction Investment Group Co. Ltd., Taiyuan 030032, China)

Abstract: To investigate the difference of mechanical properties between sleeve grouting butt joints and lap joints, 24 butt joints and 12 lap joints were tested under unidirectional tension. The failure modes, bearing loading capacity, ductility, force-displacement curves, and sleeve strain of the joints were compared and studied. During the loading process, the grouting material of the butt joints cracked in full section at the middle of the sleeve, and was pulled out of the sleeve at the end of the loading process, while the lap joint had no such situation. Test results show that the bearing loading capacity, total elongation, and stiffness of lap joint were 5-7 times, 3-5 times, and 2-3 times larger than those of butt joint respectively when the sleeve length was the same, and the displacement ductility coefficient was larger than that of butt joint. When the anchorage length was the same, the bearing capacity and displacement ductility of lap joint were slightly larger than those of butt joint. The initial stiffness difference between the joints was not obvious, but the mid-late stiffness of lap joint was higher than that of butt joint. When the middle section of the butt joint sleeve was longitudinally tensioned, the lap joint was tensioned in the early stage of loading and compressed in the late stage of loading, which reflects the lower requirement of the tensile strength of the lap joint sleeve. When the middle section of the butt joint sleeve was circumferentially compressed, the lap joint was compressed in the early stage of loading and tensioned in the late stage of loading, indicating that the restraint effect of the middle part of lap joint sleeve on the grouting material was greater than that of butt joint. The mechanical property of lap joint is better than that of butt joint, so it can be used to connect reinforcement bars in prefabricated assembly structures.

Keywords: sleeve grouting; butt joint; lap joint; transmission path; sleeve strain

灌浆套筒是目前装配式混凝土结构中钢筋主要连接方式, 采用钢筋对接连接, 见图 1(a), 即在套筒

的中心插入两根对接的钢筋后注浆。目前, 该连接的研究较为成熟。

2013 年吴小宝等^[1]进行了灌浆套筒对接接头拉伸试验, 证明了接头变形与钢筋种类无明显关系; 2015 年郑永峰等^[2]通过拉伸试验, 研究了对接接头套筒约束机理; 2016 年郑永峰等^[3]进行了变形套筒

收稿日期: 2019-07-02
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

拉伸试验及有限元分析,证明了该对接接头抗拉强度满足要求;2018 年刘洋等^[4]进行了对接接头单向拉伸、高应力及大变形反复拉压试验,分析了钢筋直径、套筒形式和钢筋偏位对接头力学性能的影响;2018 年许成顺等^[5]通过接头高应力反复拉压试验,发现高应力循环作用对接头性能影响不明显;2019 年王瑞等^[6]采用 ABAQUS 进行对接接头模拟,发现当接头为钢筋拉断破坏时,钢筋偏位对承载力影响不显著。

套筒灌浆搭接接头是在两搭接钢筋外部安放套筒后注浆,以此实现钢筋的连接,见图 1(b),这是余琼^[7]提出的新的钢筋连接方式。该接头具有套筒直径较大,施工便利、灌浆易密实、造价低等优势。

2016 年余琼等^[8]进行了以钢筋直径与套筒长度为变量的搭接接头拉伸试验,分析了接头受力机理,提出了搭接黏结应力和临界搭接长度的计算公式;2017 年余琼等^[9]通过拉伸试验,研究搭接长度变化对钢筋及套筒力学性能的影响,同时发现搭接接头对套筒材料抗拉性能要求低。

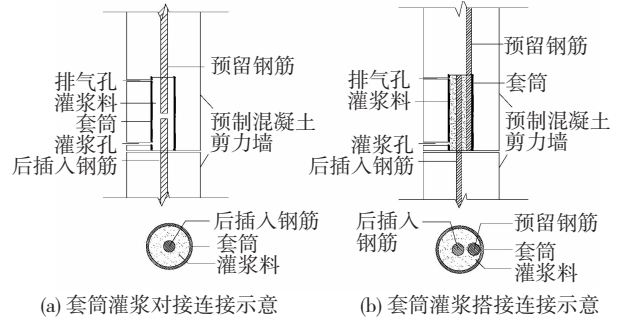


图 1 接头构造示意

Fig. 1 Schematic of joints construction

对接与搭接接头都是利用套筒约束束浆锚连接,但钢筋连接方式不同,因此其传力机理不同。本文通过 24 个对接和 12 个搭接接头单向拉伸试验,研究了对接及搭接接头破坏形态、力学性能、力-位移曲线差异,分析了两者套筒纵向、环向应变的不同,为搭接接头运用于预制装配式结构钢筋连接提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

试验制作了 24 个对接与 12 个搭接接头。接头钢筋直径及套筒截面尺寸、厚度相同,对接接头套筒长度 $6d \sim 20d$ (d 为钢筋的公称直径),搭接接头套筒长度 $6d \sim 12.5d$ 。

对接试件两钢筋对接布置于套筒轴线位置,浇筑灌浆料,在筒壁粘贴 SG1、SG2 应变片分别测量套筒中部截面纵向、环向应变。试件详细尺寸(见表 1)及应变片布置示意图 2。

表 1 试件详细尺寸

Tab. 1 Detailed dimensions of specimens

套筒	连接方式	钢筋直径 d/mm	套筒长度 L/mm	试件数量
套筒内径 $D=79\text{ mm}$	对接	20	120(6 d)	3
			160(8 d)	3
			200(10 d)	3
			250(12.5 d)	3
			300(15 d)	3
套筒壁厚 $S=3.5\text{ mm}$	搭接	20	350(17.5 d)	3
			400(20 d)	3
			450(22.5 d)	3
			120(6 d)	3
			160(8 d)	3
(对接与搭接为同一种套筒)			200(10 d)	3
			250(12.5 d)	3

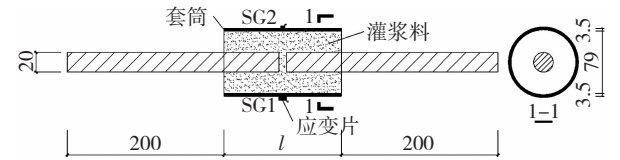


图 2 对接试件详细尺寸及应变片布置示意

Fig. 2 Detailed dimensions of butt joint and layout of strain gauge

搭接试件先把预留钢筋在筒壁两端点焊(固定钢筋位置),再将后插入钢筋与预留钢筋紧密贴放,最后注入灌浆料。在筒壁粘贴 SG3、SG4 (SG5、SG6) 应变片分别测量近、远钢筋侧套筒中部截面纵(环)向应变。试件详细尺寸(见表 1)及应变片布置见图 3。

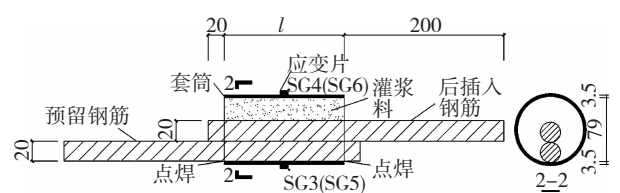


图 3 搭接试件详细尺寸及应变片布置示意

Fig. 3 Detailed dimensions of lap joint and layout of strain gauge

1.2 材料力学性能

对接及搭接试件材料相同,套筒使用的是 Q235B 无缝钢管,屈服强度 $\geq 235\text{ MPa}$,抗拉强度为 $375 \sim 500\text{ MPa}$;试件使用的是 HRB400 钢筋,屈服强度实际测得为 448.82 MPa ,极限抗拉强度为 625.14 MPa 。灌浆料试件 28 天抗折、抗压强度按文献^[10]测得分别为 7.23 、 61.55 MPa ;灌浆料立方体劈裂抗拉强度按文献^[11]测得为 3.67 MPa 。

1.3 加载方案

试验装置为万能试验机,在试件屈服前采用力控制匀速加载,加载速率为 1 kN/s ,加载至 130 kN 时,控制试验机夹头分离速率为 100 mm/s ,直至试

件发生破坏,无法加载. 试验装置见图 4.

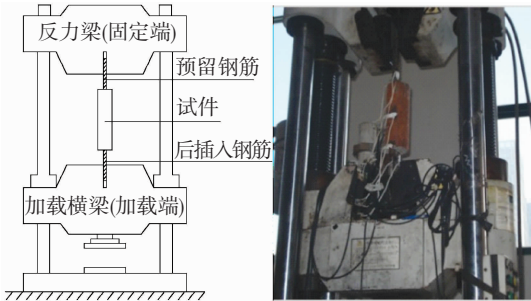


图 4 试验装置示意
Fig.4 Schematic of loading device

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏形态

试件极限荷载 P_u 、极限抗拉强度 f_u 、屈服位移 δ_y (屈服荷载对应的两夹头间钢筋的位移)、极限位移 δ_u (P_u 对应的两夹头间的位移) 以及试验破坏形态见表 2.

2.1.1 对接试件破坏形态分析

对接试件有两种破坏形态:钢筋屈服前或屈服后灌浆料从套筒中拔出破坏(图 5)和钢筋屈服后从灌浆料中拔出破坏(图 6). 未出现钢筋拉断破坏.

表 2 试验结果统计
Tab.2 Results of the experiment

试件编号	P_u/kN	破坏模式	f_u/MPa	评价文献[12]	δ_y/mm	δ_u/mm	Δ
对接-120-1	21.5	灌浆料拔出	68	N	—	2.07	—
对接-120-2	17.6	灌浆料拔出	56	N	—	1.87	—
对接-120-3	21.0	灌浆料拔出	67	N	—	3.73	—
对接-160-1	33.9	灌浆料拔出	108	N	—	13.64	—
对接-160-2	38.2	灌浆料拔出	122	N	—	23.04	—
对接-160-3	30.2	灌浆料拔出	96	N	—	3.84	—
对接-200-1	22.5	灌浆料拔出	72	N	—	3.69	—
对接-200-2	20.2	灌浆料拔出	64	N	—	3.03	—
对接-200-3	26.6	灌浆料拔出	85	N	—	3.55	—
对接-250-1	52.4	灌浆料拔出	167	N	—	8.33	—
对接-250-2	31.7	灌浆料拔出	101	N	—	5.35	—
对接-250-3	47.9	灌浆料拔出	153	N	—	4.53	—
对接-300-1	180.6	钢筋拔出	575	N	22.00	42.24	1.92
对接-300-2	168.8	钢筋拔出	538	N	26.86	40.50	1.51
对接-300-3	142.2	灌浆料拔出	453	N	28.16	31.96	1.13
对接-350-1	185.3	钢筋拔出	590	N	24.66	52.28	2.12
对接-350-2	126.5	灌浆料拔出	403	N	—	36.33	—
对接-350-3	99.4	灌浆料拔出	317	N	—	9.86	—
对接-400-1	184.6	钢筋拔出	588	N	27.96	47.38	1.69
对接-400-2	183.4	钢筋拔出	584	N	25.61	58.50	2.28
对接-400-3	168.3	灌浆料拔出	536	N	14.27	23.94	1.68
对接-450-1	155.5	灌浆料拔出	495	N	14.28	17.82	1.25
对接-450-2	139.6	灌浆料拔出	445	N	—	16.13	—
对接-450-3	193.3	钢筋拔出	616	N	19.05	54.81	2.88
搭接-120-1	137.4	钢筋拔出	438	N	—	20.56	—
搭接-120-2	142.4	钢筋拔出	454	N	—	20.37	—
搭接-120-3	128.4	钢筋拔出	409	N	—	20.25	—
搭接-160-1	180.5	钢筋拔出	575	N	18.29	34.71	1.90
搭接-160-2	187.6	钢筋拔出	597	N	18.64	40.77	2.19
搭接-160-3	183.1	钢筋拔出	583	N	18.70	38.73	2.07
搭接-200-1	198.1	钢筋拉断	631	Y	17.76	65.28	3.68
搭接-200-2	196.8	钢筋拔出	627	Y	15.59	54.54	3.50
搭接-200-3	188.6	钢筋拔出	601	Y	18.38	43.03	2.34
搭接-250-1	198.8	钢筋拉断	633	Y	15.52	66.69	4.30
搭接-250-2	200.1	钢筋拉断	637	Y	18.20	70.41	3.87
搭接-250-3	197.8	钢筋拉断	630	Y	15.21	61.92	4.07

注:1. 以对接(搭接)-120-1 为例,120 表示套筒长度,1 表示 1 号试件;
2. 套筒长度相同对比试件为对接(搭接)-120 组至对接(搭接)-250 组,锚固长度相同对比试件只有对接-400 组与搭接-200 组.
3. “—”试件破坏时钢筋未屈服,无法得到相应的指标.
4. Y 满足规范要求,N 不满足规范要求.

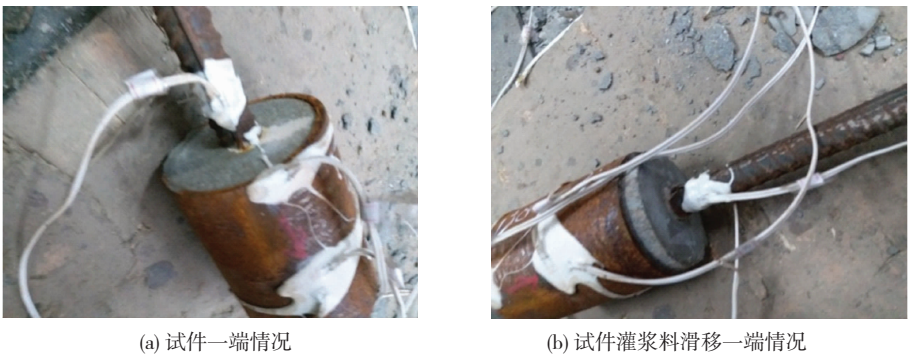


图 5 对接试件灌浆料从套筒中拔出破坏

Fig. 5 Failure of grouting material of butt joint specimen pulled out from sleeve

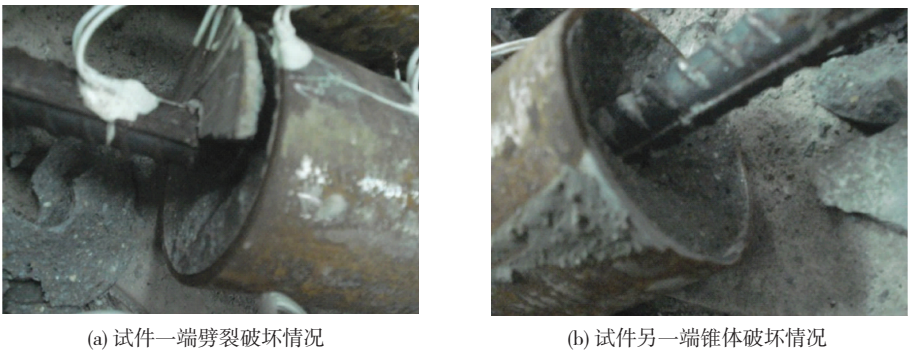


图 6 对接试件钢筋从灌浆料中拔出破坏

Fig. 6 Failure of reinforcement bar of butt joint specimen pulled out from grouting material

灌浆料从套筒中拔出破坏试件,加载过程中套筒内部裂纹不断开展(试验中可听灌浆料开裂声响),直至灌浆料中间截面(两钢筋相对处)裂缝贯穿整个横截面,当外力大于套筒与灌浆料之间的黏结力时,钢筋与灌浆体被拉出套筒见图 5(b),试件破坏,承载力降低,套筒长度 $\leq 250\text{ mm}$ 的试件均发生这种破坏,文献[13]也出现该种破坏形式,主要是锚固长度较短引起.

钢筋从灌浆料中拔出破坏试件一端灌浆料出现劈裂裂缝见图 6(a),另一端出现灌浆料拔出破坏椎体见图 6(b). 由于试件端部灌浆料相对于试件中部受到的纵向约束力小,始于钢筋肋端的斜裂缝发展至筒壁,形成劈裂裂缝,随后,在钢筋拔出端灌浆锥

体随钢筋拔出,套筒长度大于 250 mm 的试件多发生这种破坏.

2.1.2 搭接试件破坏形态分析

搭接试件有套筒外部钢筋拉断(见图 7),钢筋从灌浆料中拔出(见图 8)两种破坏形态. 在套筒端部,灌浆料无轴向约束,端部灌浆料受灌浆料与钢筋横肋间的机械咬合作用和套筒偏转影响,局部压碎并且脱落的现象,如 7(b)和图 8(a)、(b). 套筒中两根钢筋为搭接,对灌浆料、套筒的作用力方向相反,作用相互抵消,未发生灌浆料从套筒中拔出破坏.

搭接长度 $l = 6d$ 、 $8d$ 和大部分 $l = 10d$ 的试件发生钢筋从灌浆料中拔出破坏. 搭接长度 $l = 12.5d$ 与部分 $l = 10d$ 的试件发生钢筋拉断破坏.

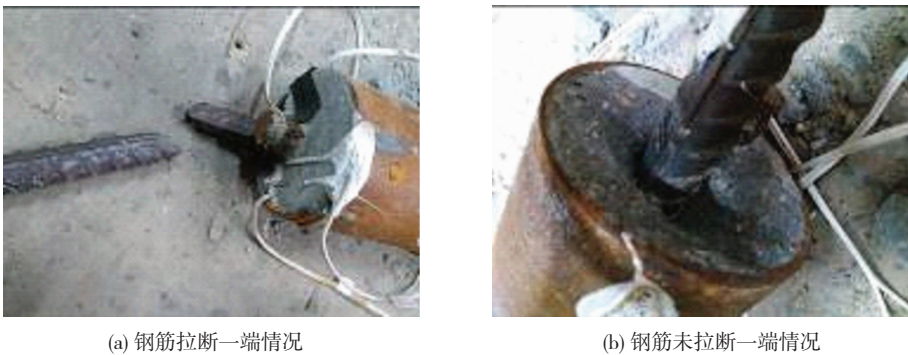


图 7 搭接试件钢筋拉断破坏

Fig. 7 Tensile failure of reinforcement bar of lap joint specimen

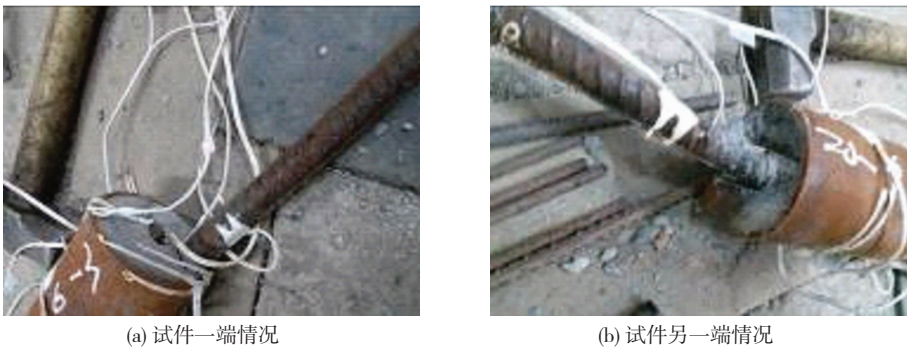


图 8 搭接试件钢筋从灌浆料中拔出破坏

Fig. 8 Failure of reinforcement bar of lap joint specimen pulled out from grouting material

2.2 试件极限承载能力及延性对比

2.2.1 套筒长度相同时

1) 承载力

《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》^[12] 规定: 钢筋套筒灌浆连接的抗拉强度不应小于连接钢筋抗拉强度的标准值, 本文即 540 MPa, 且破坏时应断于接头外钢筋. 对接接头均不满足规范要求; 搭接长度 $l = 10 d$ 的部分搭接试件和 $l = 12.5 d$ 全部搭接试件满足规范要求, 具体评价见表 2.

图 9 为套筒长度相同时对接与搭接试件承载力比较, 搭接试件承载力约是对接的 5 ~ 7 倍. 原因如下: 套筒长度相同时, 搭接试件钢筋在套筒中的锚固长度是对接试件的 2 倍; 而且搭接试件套筒约束了两根钢筋分离趋势, 提供约束更强, 灌浆料与钢筋的黏结力更大.

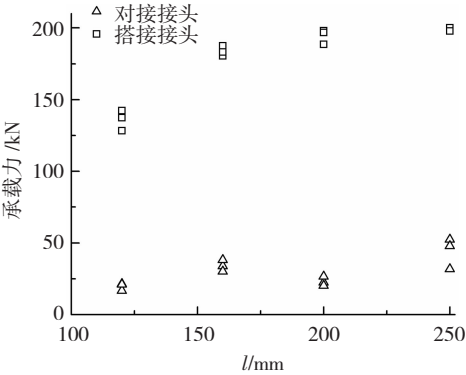


图 9 套筒长度相同时对接与搭接接头承载力比较

Fig. 9 Comparison of bearing capacity of butt joint and lap joint with the same sleeve length

2) 延性对比

接头总伸长率是最大力下的两加载点之间的位移与两加载点距离的比值, 即接头的平均应变. 图 10 为套筒长度相同时对接与搭接试件总伸长率比较, 可见搭接试件总伸长率是对接试件的 3 ~ 5 倍.

接头位移延性系数 $\Delta = \delta_u / \delta_y$, 接头延性系数见表 2. 对接试件灌浆料从套筒中拔出破坏延性系数为 1.13 ~ 1.68, 钢筋从灌浆料中拔出破坏接头延性系数为 1.51 ~ 2.88, 后者大于前者.

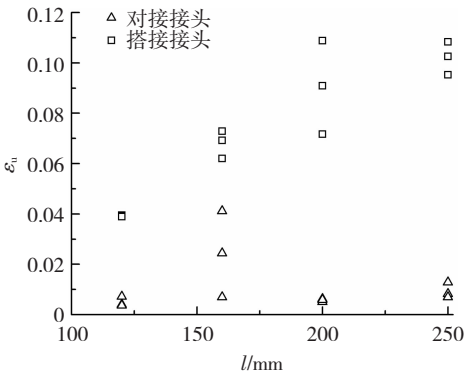


图 10 对接试件与搭接试件最大力下的总伸长率比较

Fig. 10 Comparison of total elongation (ductility) of butt joint and lap joint at maximum strength

搭接试件钢筋从灌浆料中拔出破坏接头延性系数为 1.90 ~ 3.68, 钢筋拉断破坏延性系数为 3.87 ~ 4.3. 文献^[14] 推荐钢筋的延性系数为 4, 钢筋拉断搭接试件基本满足要求.

总的来说, 搭接试件位移延性系数大于对接试件.

3) 力 - 位移曲线对比

图 11 为套筒长度相同时对接与搭接试件荷载 - 平均应变曲线, 搭接试件初始刚度约为对接试件 2 ~ 3 倍. 试件应变有 3 个部分, 钢筋应变、钢筋与灌浆料间滑移、套筒与灌浆料间滑移. 因为对接试件钢筋在灌浆料中的锚固长度为搭接试件的一半, 其钢筋 - 灌浆料平均黏结力较大, 由此引起钢筋肋前灌浆料的压缩和钢筋 - 灌浆料局部黏结破坏的程度较大, 试件滑移大, 同时部分对接接头存在较大的套筒 - 灌浆料滑移, 因此对接试件初始刚度小于搭接试件.

2.2.2 锚固长度相同时

1) 承载力对比

表 3 为锚固长度相同时对接与搭接试件的承载力比较, 可见两者的屈服强度无明显差异, 但搭接试件的承载力比对接试件略高. 1965 年 Untrauer 等^[15] 提出的黏结力 τ 与约束力 f_n 之间有关系式 (1), 搭接接头套筒约束两根钢筋分离趋势, 套筒对灌浆料有更大的径向约束力, 所以钢筋与灌浆料两者黏结力更大, 承载力越大.

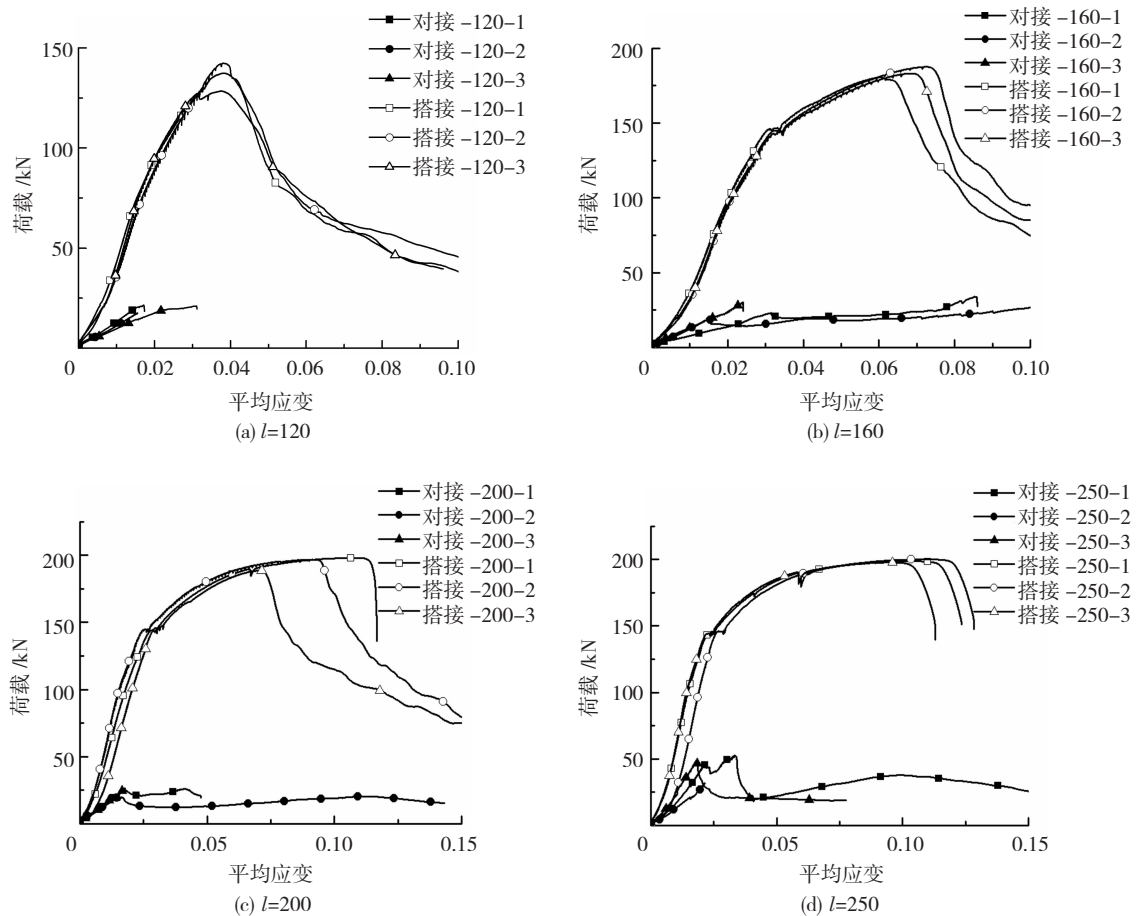


图 11 套筒长度相同时对接与搭接试件荷载 - 平均应变曲线比较

Fig. 11 Comparison of load-average strain curves of butt joint and lap joint with the same sleeve length

$$\tau = (1.49 + 0.45 \sqrt{f_n}) \sqrt{f_c}. \tag{1}$$

表 3 锚固长度相同时对接与搭接试件承载力比较

Tab. 3 Comparison of bearing capacity of butt joint and lap joint with the same anchorage length					MPa
试件编号	屈服强度 f_y	屈服强度 均值 $\bar{f}_y$	极限抗拉 强度 f_u	极限抗拉度 均值 $\bar{f}_u$	
对接 - 400 - 1	432.4		453.0		
对接 - 400 - 2	455.4	536.0	524.3	449.6	
对接 - 400 - 3	461.0		584.0		
搭接 - 200 - 1	451.3		631.0		
搭接 - 200 - 2	452.3	454.8	627.0	619.7	
搭接 - 200 - 3	457.7		601.0		

2) 延性对比

表 4 为锚固长度相同同时发生钢筋从灌浆料中拔出破坏对接与搭接试件的延性比较. 对接试件的平均屈服应变 $\bar{\varepsilon}_y$ 较大, 是因为试件中部截面灌浆料开裂后, 套筒 - 灌浆料滑移造成的影响; 搭接试件平均极限应变 $\bar{\varepsilon}_u$ 较大, 位移延性也较好, 是因为搭接接头套筒对钢筋约束能力更好, 钢筋的延性发展越充分.

3) 力 - 位移曲线对比

图 12 为锚固长度相同的对接与搭接试件荷载 - 平均应变曲线, 两者的初始刚度差别不明显, 中后期搭接试件刚度明显高于对接试件.

表 4 锚固长度相同时对接与搭接试件延性比较

Tab. 4 Comparison of ductility of butt joint and lap joint with the same anchorage length

试件编号	平均屈服应变 ε_y	平均屈服应变均值 $\bar{\varepsilon}_y$	平均极限应变 ε_{cu}	平均极限应变均值 $\bar{\varepsilon}_{cu}$	位移延性系数 R_d	位移延性系数均值 $\bar{R}_d$
对接 - 400 - 1	0.035 0		0.059 2		1.69	
对接 - 400 - 2	0.032 0	0.033 5	0.073 1	0.066 2	2.28	1.99
搭接 - 200 - 2	0.026 0		0.090 9		3.50	
搭接 - 200 - 3	0.030 6	0.028 3	0.071 7	0.081 3	2.34	2.92

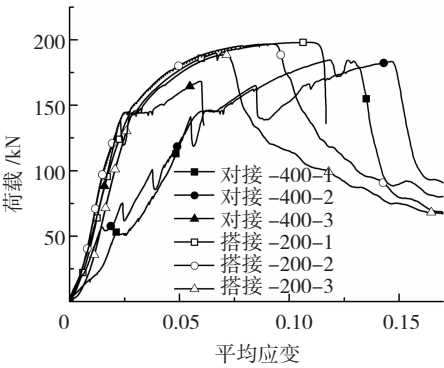


图 12 锚固长度相同时对接试件与搭接试件
荷载 - 平均应变曲线比较

Fig. 12 Comparison of load-average strain curves of butt joint and lap joint with the same anchorage length

2.3 对接与搭接接头工作性能对比

2.3.1 对接接头

对接接头钢筋、灌浆料、套筒的受力情况分别见图 13(a)、(b)、(c). 钢筋传力方式钢筋 - 灌浆料 - 套筒 - 灌浆料 - 钢筋, 中间截面钢筋不连续处, 力在两根钢筋间靠套筒和灌浆料的抗拉传递, 是通过钢筋 - 灌浆料、套筒 - 灌浆料间的黏结力实现. 对接接头传力路径长、传力间接, 套筒主要作用是抗拉, 尤其是套筒中部两根钢筋相对处, 套筒的抗拉承载力至少应大于所连接钢筋的抗拉承载力.

2.3.2 搭接接头

搭接接头钢筋、灌浆料、套筒的受力情况分别见图 13(e)、(f)、(g). 由于钢筋径向挤压灌浆料所引起的灌浆料内的径向压力由钢筋表面向外衰减, 远钢筋侧套筒受到灌浆料的黏结力小于近钢筋侧, 因此图 13(f)中上部灌浆料的黏结应力方向由上部钢筋控制, 其作用方向与上部钢筋作用方向相反, 同理

下部灌浆料的黏结应力作用方向与下部钢筋作用方向相反. 搭接接头主要传力方式是钢筋 - 灌浆料 - 钢筋, 两钢筋间可通过灌浆料间剪切作用直接传力, 路径短.

2.3.3 综合分析

假定沿钢筋表面黏结应力分布均匀. 图 13(d)、(h)分别为对接及搭接接头取半个套筒受力分析, 套筒所受剪应力之和 Q 与套筒中部拉力 P_s 相等, 由图 13(d)可知对接接头套筒中部受拉力. 由图 13(h)可知搭接接头套筒中部受力由 τ_2 和 τ_3 叠加而成, 而 τ_2 、 τ_3 方向相反, 故叠加的力小. 因此在外力 F 相同时对对接接头套筒中部拉力也比搭接接头大.

对接接头套筒中部拉力大, 采用球墨铸铁、45# 钢材等造价较高的套筒, 且筒壁与灌浆料间的黏结力也应足够大, 以抵两者间的滑移, 因此对接接头套筒中须进行刻痕处理. 同时灌浆料强度也应足够大, 抵抗中部截面的拉力, 增加套筒壁与灌浆料的黏结力, 一般灌浆料强度要大于 C80, 套筒与钢筋间间距小, 最大骨料粒径为 2.36 mm.

搭接接头套筒主要起约束作用, 套筒所受拉力小, 可采用 Q235 钢材, 由于两个钢筋对套筒壁作用力是相反的, 相互抵消, 不会出现套筒与灌浆料间滑移, 套筒内部不需处理; 灌浆料主要是握裹钢筋, 抵抗较小的剪力, 抗拉强度要求较低, 可采用 C60 灌浆料, 套筒壁与钢筋间间距可大, 最大骨料粒径可为 4.75 mm.

综上可知, 对接接头对套筒、灌浆料材料抗拉强度要求高, 对套筒壁与灌浆料的抗滑移性能要求也高, 这些使等直径钢筋对接接头造价约为搭接接头 2 倍.

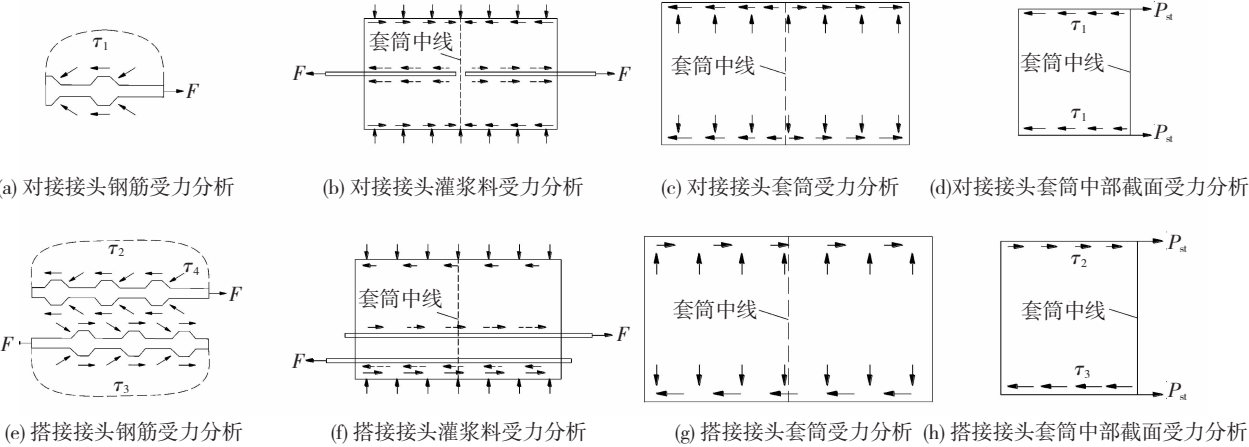


图 13 接头受力分析

Fig. 13 Joint force analysis diagram

3 力学性能分析

3.1 对接接头承载力分析

图 14 为钢筋屈服前灌浆料从套筒中拔出破坏

对接试件的承载力与套筒长度关系, 可见随着套筒长度增加接头承载力增大. 当套筒长度较短时, 对接试件一般发生灌浆料从套筒中拔出破坏且钢筋未屈服, 而 400 mm 长度套筒也发生灌浆料从套筒中拔

出破坏(钢筋屈服后),为套筒长度较长、灌浆不易浇筑密实造成. 而 200 mm 组试件承载力却比 160 mm 组小,推断也是灌浆不密实造成. 实际工程中应避免使用套筒较长的接头,杜绝灌浆料不密实的情况发生.

取钢筋与灌浆料间极限黏结强度与钢筋的极限抗拉强度相等时套筒长度为接头的临界连接长度,对接接头未发生钢筋拉断,可见接头的临界连接长度大于 400 mm(20 d).

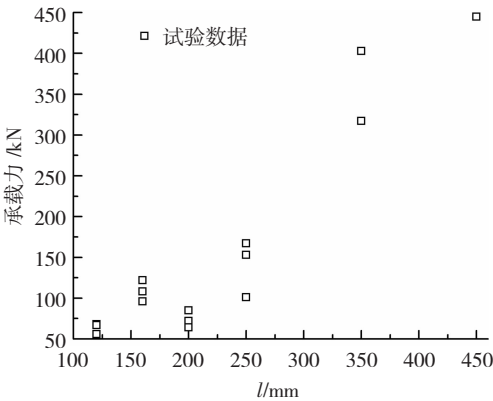


图 14 对接接头钢筋屈服前灌浆料从套筒中拔出破坏试件承载力与套筒长度关系

Fig. 4 Relation between bearing capacity of butt joint and sleeve length when grouting material is pulled out from sleeve before reinforcement yielding

图 15 为钢筋屈服后灌浆料从套筒中拔出破坏与钢筋从灌浆料中拔出破坏试件承载力比较,可见当套筒长度相同时,灌浆料从套筒中拔出破坏试件承载力小于钢筋从灌浆料中拔出破坏的试件.

套筒长度相同时,当灌浆料浇筑不密实时就发生灌浆料从套筒中拔出破坏,承载力低,反之,发生钢筋从灌浆料中拔出破坏,承载力高.

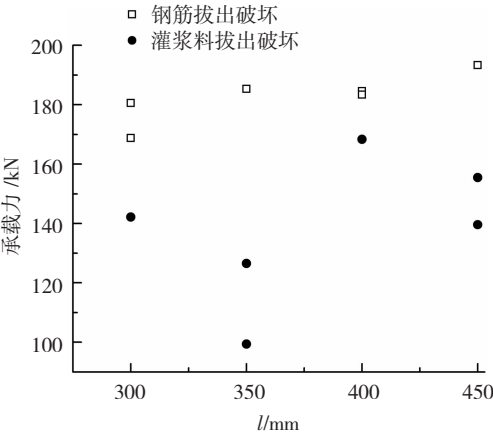


图 15 对接接头钢筋屈服后两种破坏模式试件承载力比较

Fig. 15 Comparison of bearing capacity of two failure modes of butt joint after reinforcement yielding

3.2 对接接头开裂分析

对接接头中间钢筋断开,随着荷载增加,套筒中部灌浆出现全截面开裂现象,图 16 为开裂荷载与套

筒长度的关系,可见对接试件的开裂荷载随套筒长度的增大而增大,说明套筒越长,灌浆料与筒壁的黏结力越大,套筒中部灌浆承担的拉力越小,开裂越晚.

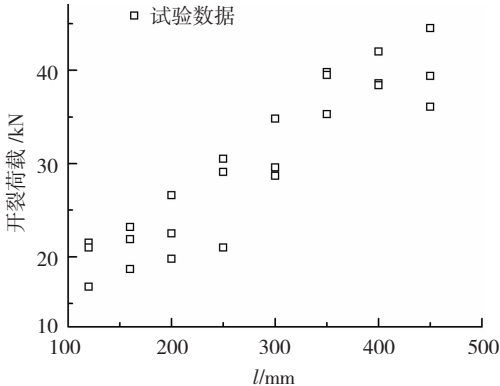


图 16 对接接头开裂荷载与套筒长度关系

Fig. 16 Relation between cracking load of butt joint and sleeve length

3.3 搭接接头承载力分析

图 17 为搭接接头承载力与套筒长度关系,可见随着套筒长度增加接头承载力增大. 当套筒长度较短时,试件一般发生钢筋拔出破坏,而较长套筒发生钢筋拉断破坏,搭接长度 $l = 10 d$ 的试件两种破坏均有发生,可见 $l = 10 d$ 为试件临界搭接长度,该长度比对接接头小得多.

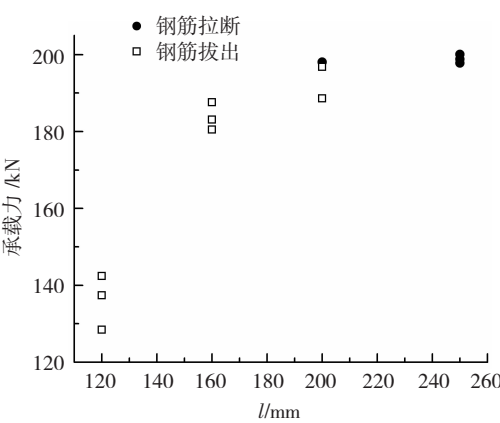


图 17 搭接接头试件承载力与套筒长度关系

Fig. 17 Relation between bearing capacity of lap joint and sleeve length

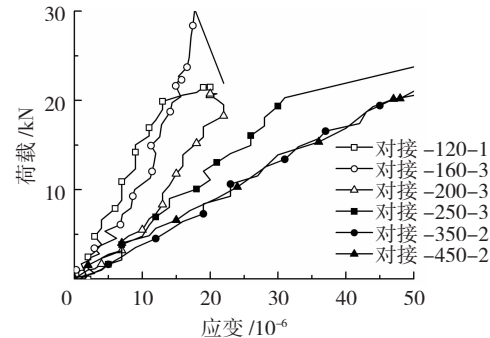
4 对接与搭接接头套筒中部截面纵向应变分析

套筒纵向应变由两部分产生:套筒本身受轴向拉力产生纵向拉应变,灌浆料膨胀变形使套筒环向受拉,由于泊松比效应,产生套筒纵向压应变.

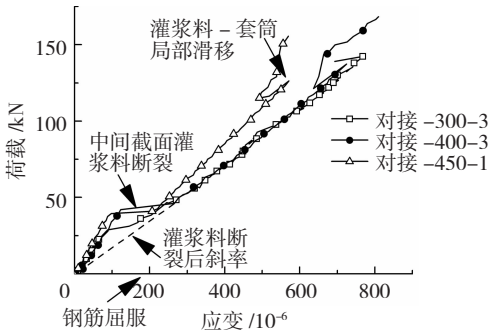
4.1 对接接头套筒中部截面纵向应变

图 18 为对接接头典型荷载-套筒中部截面纵向应变曲线,在加载过程中套筒纵向始终受拉. 钢筋屈服前灌浆料从套筒中拔出破坏的试件荷载-纵应变曲线相近,见图 18(a),试件的极限荷载即为开裂荷

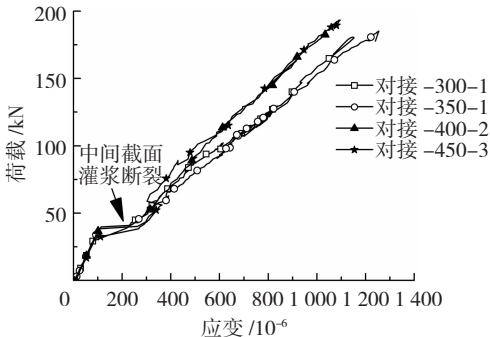
载,曲线的斜率随套筒长度的增大而减小,这说明套筒越长,同样力作用下套筒中部截面所受纵向拉应变越大. 钢筋屈服后灌浆料从套筒中拔出、钢筋从灌浆料中拔出破坏的试件荷载 - 中部截面纵向应变曲线见图 18(b)、(c),曲线形状基本相同. 灌浆料中间截面开裂时,套筒纵向应变突然增大,在荷载 - 应变曲线上形成平台;之后,试件中间截面(无钢筋处)的拉力全部由套筒承担,因此曲线斜率比开裂前明显减小.



(a) 钢筋屈服前灌浆料从套筒中拔出破坏



(b) 钢筋屈服后灌浆料从套筒中拔出破坏



(c) 钢筋屈服后钢筋从灌浆料中拔出破坏

图 18 对接接头荷载 - 套筒中部截面纵向应变曲线 (SG1)

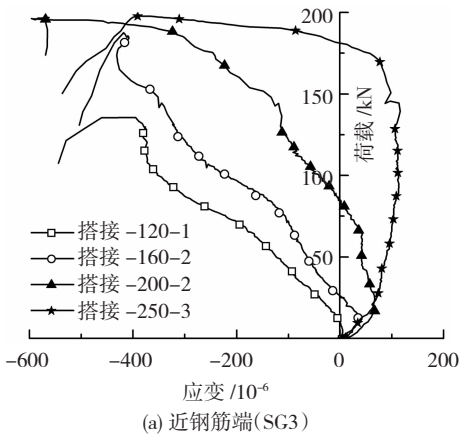
Fig. 18 Longitudinal load-strain curves of middle section of butt joint sleeve (SG1)

4.2 搭接接头套筒中部截面纵向应变

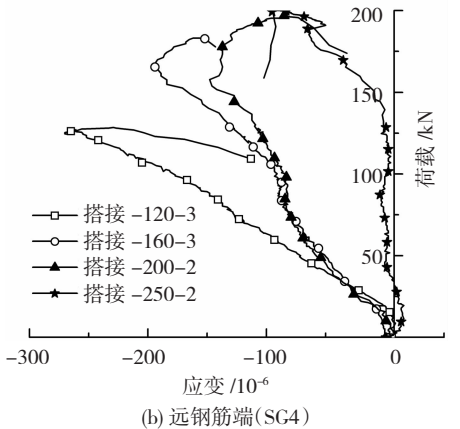
图 19 为搭接试件荷载 - 套筒中部纵向应变曲线,中部截面近钢筋侧套筒的纵向应变在加载前期为拉应变,随着荷载的增大,逐渐转变为压应变;远钢筋侧加载前期拉应变不明显.

加载前期,近钢筋侧套筒纵向应变主要由筒壁受到剪应力(由钢筋引起的)形成的纵向拉力决定,灌浆料的膨胀作用很小;随着荷载的不断增加,两钢

筋分离趋势加大,套筒环向膨胀变形加大,由于泊松效应产生的套筒纵向压应变占主导地位,所以套筒表现为纵向受压. 加载前期,远钢筋侧套筒受到钢筋的影响小,轴拉力小,故筒壁拉应变不明显.



(a) 近钢筋端(SG3)



(b) 远钢筋端(SG4)

图 19 搭接接头荷载 - 套筒中部截面纵向应变曲线

Fig. 19 Longitudinal load-strain curves of middle section of lap joint sleeve

4.3 对接与搭接接头套筒中部截面纵向应变对比

对接试件套筒均为纵向拉应变,钢筋屈服前灌浆料从套筒中拔出破坏最大拉应变达 50×10^{-6} ,钢筋屈服后灌浆料从套筒中拔出破坏最大应变达 800×10^{-6} ,钢筋屈服后从灌浆料中拔出破坏最大应变达 $1\,500 \times 10^{-6}$,与套筒屈服应变 $1\,500 \times 10^{-6}$ 相近. 搭接接头加载前期套筒中部为拉应变,最大达 200×10^{-6} ,加载后期均为压应变,最大达 600×10^{-6} . 因此总体上搭接接头对套筒的抗拉强度要求较低.

5 对接与搭接接头套筒中部截面环向应变分析

套筒环向应变也由两部分力引起,一是灌浆料膨胀变形,使套筒环向受拉;二是套筒本身受轴向拉力,由于泊松比效应,套筒环向出现压应变.

5.1 对接接头套筒中部截面环向应变

图 20 为对接试件典型的荷载 - 套筒中部环向应变曲线,环向均为压应变. 这是由于套筒中部纵向

拉应力较大,泊松效应导致套筒环向收缩;同时,由于套筒中部位于钢筋末端,由灌浆料膨胀引起环向拉应变很小,套筒环向受压.图 20(a) 120~200 系

列试件破坏荷载很小,环向压应变也很小;图 20(b) 对接 250~450 系列试件,试件发生破坏荷载大,环向压应变也大.

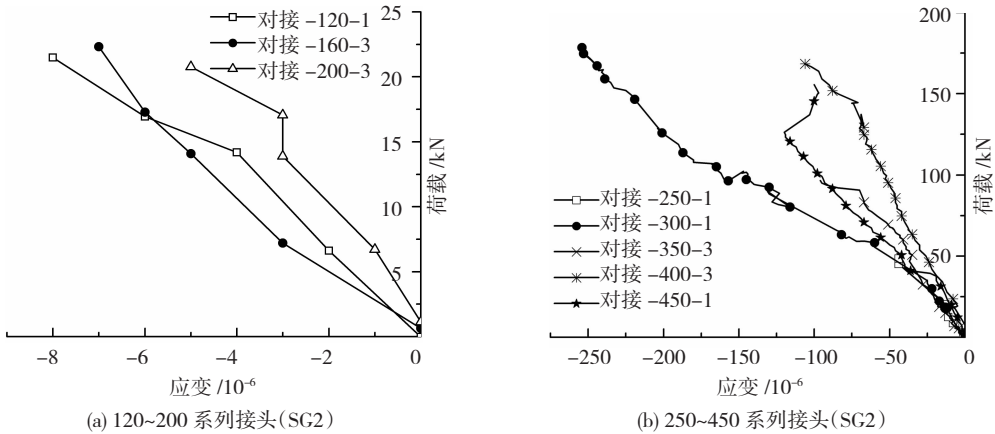


图 20 对接接头套筒荷载-筒中部截面环向应变曲线
Fig. 20 Load-annular strain curves of middle section of butt joint sleeve

5.2 搭接接头套筒中部截面环向应变

图 21 为搭接接头荷载-套筒中部截面近、远钢筋侧环向应变曲线.套筒中部截面近钢筋侧套筒的环向应变在加载初期为压应变,加载中后期,套筒环向受拉.套筒中部截面远钢筋侧的荷载-应变曲线主要表现为受拉,加载初期环向应力在 0 左右徘徊,受压不明显.

胀变形加大,使套筒环向受拉起控制作用.加载初期,远钢筋侧套筒受到钢筋的影响小,轴拉力小,环向受压不明显.

5.3 对接与搭接接头套筒中部截面环向应变对比

对接接头中部截面环向应变均为压应变,120~200 系列对接接头压应变较小,最大约为 10×10^{-6} ,250~450 系列接头压应变较大,最大约为 250×10^{-6} ;搭接接头中部截面在加载后期均为拉应变,搭接接头极限承载力时拉应变约为 $(200 \sim 800) \times 10^{-6}$.因此,搭接接头套筒中部约束作用大于对接接头.

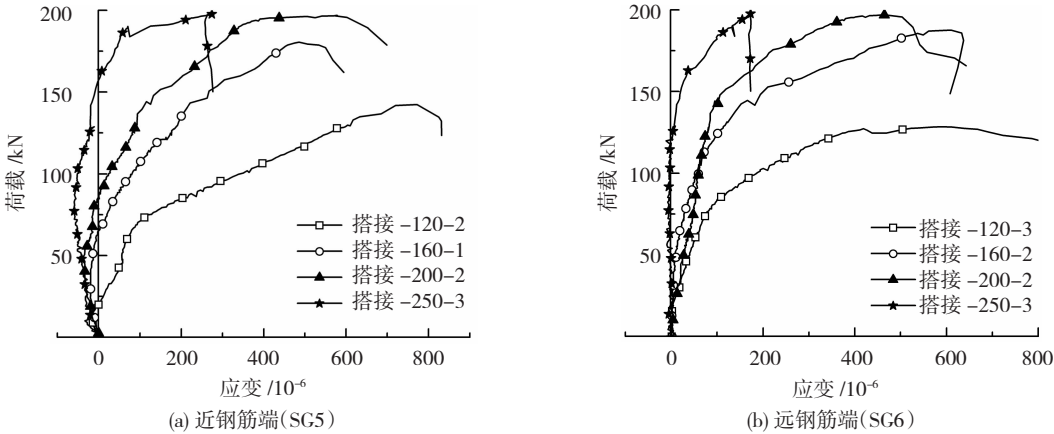


图 21 搭接接头套筒中部截面环向荷载-应变曲线
Fig. 21 Annular load-strain curves of middle section of lap joint sleeve

6 结 论

通过套筒灌浆 24 个对接和 12 个搭接接头单向拉伸试验,可更深入了解对接与搭接接头力学性能差异.得到主要结论:

接试件未出现.

3)在套筒长度相同时,搭接接头的承载力、总伸长率、刚度约是对接接头的 5~7 倍、3~5 倍、2~3 倍,位移延性系数大于对接试件.

4)在锚固长度相同时,搭接接头的承载力、位移延性略大于对接接头,两者初始刚度差别不明显,中后期搭接接头刚度明显高于对接接头.

5)对接试件的开裂荷载随套筒长度的增大而

- 1)对接接头套筒中部灌浆出现全截面开裂现象,而搭接接头不存该现象.
- 2)对接试件出现灌浆料从套筒中拔出破坏,搭

增大.

6)对接接头套筒中部纵向均为拉应变,搭接接头加载前期套筒中部为拉应变,加载后期均为压应变,搭接接头对套筒的纵向抗拉强度要求低于对接接头.

7)对接接头套筒中部截面为环向压应变,搭接接头加载前期为压应变,加载后期均为拉应变.搭接接头套筒中部截面对灌浆料的约束作用大于对接接头.

参考文献

[1] 吴小宝,林峰,王涛,等. 龄期和钢筋种类对钢筋套筒灌浆连接受力性能影响的试验研究[J]. 建筑结构,2013,43(14):77
WU Xiaobao, LIN Feng, WANG Tao, et al. Experimental study on the influence of age and type of reinforcement on the mechanical properties of reinforced sleeve grouting joints [J]. Architectural Structure,2013,43(14):77

[2] 郑永峰,郭正兴,曹江,等. 新型灌浆套筒的约束机理及约束应力分布[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(12):106
ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing, CAO Jiang, et al. Constraint mechanism and stress distribution of new grouting sleeve [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2015,47(12):106

[3] 郑永峰,郭正兴. 循环荷载作用下新型钢筋套筒灌浆连接结构性能[J]. 湖南大学学报,2016,43(11):131
ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing. Performance of new reinforced concrete sleeve grouting connection under cyclic loading [J]. Journal of Hunan University,2016,43(11):131

[4] 刘洋,张丽华,朱清华,等. 钢筋套筒灌浆接头力学性能试验研究[J]. 华北科技学院学报,2018,15(6):80
LIU Yang, ZHANG Lihua, ZHU Qinghua, et al. Experimental study on mechanical properties of reinforcement sleeve grouting joint [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology,2018,15(6):80

[5] 许成顺,刘洪涛,杜修力,等. 高应力反复拉压作用下钢筋套筒灌浆连接性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(12):178
XU Chengshun, LIU Hongtao, DU Xiuli, et al. Experimental study on connection performance of reinforced sleeve grouting under repeated tension and compression under high stress[J]. Journal of Building Structure,2018,39(12):178

[6] 王瑞,陈建伟,王宁,等. 钢筋套筒灌浆连接性能有限元分析[J]. 华北理工大学学报,2019,41(1):47
WANG Rui, CHEN Jianwei, WANG Ning, et al. Finite element

analysis of reinforced concrete sleeve grouting connection performance[J]. Journal of North China University of Science and Technology,2019,41(1):47

[7] 余琼. 一种新型的约束搭接套筒: ZL 2014 2 0656653. 0 [P]. 2015-04-01
YU Qiong. A new confined lapping sleeve: ZL 2014 2 0656653. 0 [P]. 2015-04-01

[8] 余琼,许志远,袁炜航,等. 两种因素影响下套筒灌浆搭接接头拉伸试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(12):34
YU Qiong, XU Zhiyuan, YUAN Weihang, et al. Tensile test of sleeve grouting lap joint under the influence of two factors [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2016,48(12):34

[9] 余琼,许雪静,袁炜航,等. 不同搭接长度下套筒约束浆锚搭接接头力学试验研究[J]. 湖南大学学报,2017,44(9):82
YU Qiong, XU Xuejing, YUAN Weihang, et al. Mechanical experimental study on sleeve binding slurry anchor lap joints with different lap lengths [J]. Journal of Hunan University,2017,44(9):82

[10] 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—1999 [S]. 北京: 中国标准出版社,1999:5
Method of testing cements-Determination of strength (ISO method): GB/T 17671—1999 [S]. Beijing: China Standard Press,1999:5

[11] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB 50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2003:15
Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB 50081—2002 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2003:15

[12] 钢筋套筒灌浆连接应用技术规程: JGJ 355—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2015:5
Steel sleeve grouting connection application technical specification: JGJ 355—2015 [S]. Beijing: China Building Industry Press,2015:5

[13] LING J H, RAHMAN A B, IBRAHIM I S, et al. Feasibility study of grouted splice connector under tensile load [J]. Construction and Building Materials,2014,50:532. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.010

[14] SOUDKI K A, RIZKALLA S H, LEBLANC B, et al. Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations part 1: mild steel connections [J]. PCI Journal,1995,41(1):85. DOI:10.15554/pci.07011995.78.96

[15] UNTRAUER R E, HENRY R L. Influence of normal pressure on bond strength [J]. ACIJ, 1965,62(5):580

(编辑 赵丽莹)