

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.004

两种因素影响下套筒约束浆锚搭接接头拉伸试验

余琼,许志远,袁炜航,吕西林

(同济大学 结构工程与防灾研究所,上海 200092)

摘要:为改善已有套筒灌浆接头的施工便利性,提出了一种有自主知识产权的套筒约束浆锚搭接接头,研究了该搭接接头的连接性能,为其在装配式构件中应用提供力学数据.进行了以钢筋直径和搭接长度为变化参数的63个该类接头拉伸试验,研究了试件的破坏形态、极限承载力、力-位移曲线和钢筋及套筒的应变.试件出现了套筒外钢筋拉断和钢筋与灌浆料滑移两种破坏形态,未出现已有约束对接接头文献中的灌浆料与筒壁拉脱及套筒被拉断的破坏情况.与单根钢筋相比,该类接头力-位移曲线、极限承载力接近,刚度稍差.相同钢筋,套筒外钢筋拉断试件,随着搭接长度增加,套筒的横向约束减弱;钢筋滑移的试件,随着钢筋直径的增加,套筒的横向约束增强.分析了套筒约束浆锚搭接与对接接头受力机理,表明对接接头对套筒材料抗拉及筒壁与灌浆料的抗滑移性能要求更高.给出搭接接头的力学模型,提出了接头的平均搭接粘结应力和临界搭接长度的计算公式.由于套筒约束接头的搭接长度大大减小,建议该接头的搭接长度为12.5倍的钢筋直径.

关键词:钢筋滑移;搭接长度;套筒环向应变;套筒约束;平均搭接应力

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)12-0034-09

Experimental study of grouted sleeve lapping connectors varied in two factors under tensile load

YU Qiong, XU Zhiyuan, YUAN Weihang, LÜ Xilin

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To improve the construction convenience of grouted splice connector, grouted sleeve lapping connector with independent intellectual property rights was put forward. A total of 63 specimens varied in bar diameter and lap length were tested under tensile load to study the mechanical properties of grouted sleeve lapping connector, which provides important scientific data for the application of the connector in precast concrete components. Failure modes, ultimate tensile capabilities, load-displacement curves and reinforcement and sleeve strains of the specimens were discussed. Bar fracture and bar-grout bond slip are the typical failure modes of the specimens, grout-sleeve bond failure and sleeve tensile fracture do not appear. Compared with the steel bar, the ultimate tensile capacity and the load-displacement curve of the connector are similar, while the stiffness is a bit lower. For specimens with the same bar diameter that failed by bar fracture, transverse confinement provided by the sleeve wall decreases as lap length increases. For specimens with bar-grout bond failure, bar diameter increase leads to an increase in confinement stress generated by the sleeve wall. The working mechanisms of grouted sleeve lapping connector and butting connector were analyzed. Compared with grouted sleeve lapping connector, sleeves with stronger tensile capacity and grout-sleeve with higher bond performance are needed to guarantee the working performance of grouted sleeve butting connector. The mechanical properties and mechanical model of grouted sleeve lapping connector were analyzed. Two equations were proposed to calculate the average lapping bond stress and critical lap length. Under confinement, the required lap length can be shortened greatly. The recommended lap length is 12.5 times bar diameter.

Keywords: reinforcement bond-slip; lap length; sleeve hoop strain; sleeve confinement; average lapping bond stress

套筒灌浆连接接头构造方式为两根钢筋对接放置在套筒中,并注入灌浆料,实现钢筋之间的对接连

接.套筒灌浆连接接头的示意图1(a).

LingJenhua 等^[1]2012年的试验结果表明套筒对接头提供约束,且套筒的几何形状对接头的承载能力有很大的影响,减小套筒内径和增大锚固长度会提高接头的承载力;Aizat Alias 等^[2]在2013年试验研究表明接头的刚度随搭接长度的增加而增加,放置箍筋的

收稿日期:2015-12-08

作者简介:余琼(1968—),女,副教授;

吕西林(1955—),男,教授,博士生导师

通信作者:余琼,yiongyu2005@163.com

别为 11.4 MPa、62.9 MPa;150 mm×150 mm×150 mm 灌浆料试块 28 d 劈裂抗拉强度^[9] 为 4.63 MPa.

表 2 钢筋材料性能

Tab.2 Material properties of reinforcement bar

钢筋直径/mm	屈服强度	极限抗拉强度	极限承载力
	均值 f_y /MPa	均值 f_u /MPa	均值 $P_u^{'}$ /kN
12	423	570	64.5
14	418	577	88.7
16	407	572	114.7
18	452	625	159.5
20	421	615	192.5
22	444	562	213.3
25	448	585	251.9

1.3 加载制度及测量内容

在筒壁中部粘贴应变片 SG1、2 测量套筒环向应变,在预留和后插入钢筋上分别贴放应变片 SG3、4测量钢筋应变,具体贴放位置见图 2.

试验在万能试验机上进行,初始加载速度为

2 kN/s,加载至 450 MPa 后,以 100 mm/min 的速率进行位移控制,直至试件破坏.加载装置见图 3.

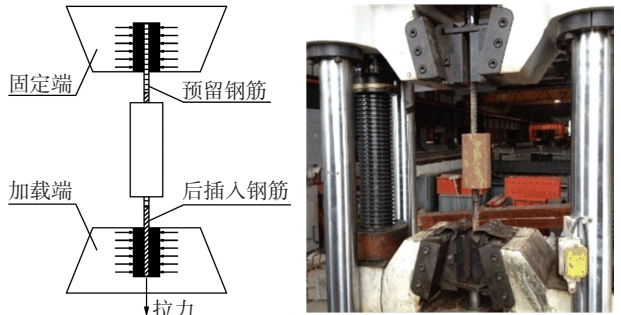


图 3 加载装置示意

Fig.3 Setup of tensile test

2 试验结果及分析

各试件极限承载力 P_u 、极限抗拉强度 f_u 和破坏形态见表 3.

表 3 试验结果统计

Tab.3 Results of the experiment

L/d	试件	P_u /kN	破坏形态	$P_u^{'}$ /kN	f_u /MPa	强度评价		
						文献[10]	文献[11]	文献[12]
8	12-96-1	56.16	后插入钢筋滑移	—	495	N	N	N
	12-96-2	57.11	预留钢筋拉断		505	N	N	Y
	12-96-3	61.69	后插入钢筋拉断		546	Y	Y	Y
	14-112-1	71.23	后插入钢筋滑移		465	N	N	N
	14-112-2	80.86	预留钢筋滑移	—	525	N	N	Y
	14-112-3	83.27	预留钢筋滑移		540	N	N	Y
	16-128-1	116.54	预留钢筋拉断		577	Y	Y	Y
	16-128-2	111.48	后插入钢筋拉断		555	Y	Y	Y
	16-128-3	113.57	后插入钢筋拉断	113.86	565	Y	Y	Y
	18-144-1	144.08	后插入钢筋滑移		566	N	N	Y
	18-144-2	142.78	后插入钢筋滑移		560	N	N	Y
	18-144-3	153.74	后插入钢筋滑移		605	N	Y	Y
	20-160-1	186.07	预留钢筋拉断	—	590	Y	Y	Y
	20-160-2	189.79	预留钢筋拉断		605	Y	Y	Y
	20-160-3	179.03	后插入钢筋滑移		570	N	N	Y
	22-176-1	224.43	后插入钢筋滑移		590	N	N	Y
	22-176-2	221.19	预留钢筋拉断	—	580	Y	Y	Y
	22-176-3	219.24	后插入钢筋滑移		575	N	N	Y
	25-200-1	297.90	预留钢筋拉断		605	Y	Y	Y
	25-200-2	293.04	后插入钢筋滑移		595	N	Y	Y
	25-200-3	294.56	预留钢筋拉断	—	600	Y	Y	Y
	12-120-1	62.30	预留钢筋拉断		551	Y	Y	Y
	12-120-2	63.41	后插入钢筋拉断		561	Y	Y	Y
	12-120-3	61.69	后插入钢筋拉断		546	Y	Y	Y
10	14-140-1	85.40	预留钢筋拉断	—	555	Y	Y	Y
	14-140-2	85.40	预留钢筋拉断		555	Y	Y	Y
	14-140-3	85.11	预留钢筋拉断		553	Y	Y	Y
	16-160-1	113.87	后插入钢筋拉断		565	Y	Y	Y
	16-160-2	115.77	预留钢筋拉断	115.04	575	Y	Y	Y
	16-160-3	115.47	后插入钢筋拉断		575	Y	Y	Y
	18-180-1	158.89	预留钢筋拉断		625	Y	Y	Y
	18-180-2	159.62	预留钢筋拉断		625	Y	Y	Y
	18-180-3	163.74	后插入钢筋拉断	160.75	645	Y	Y	Y
	20-200-1	186.00	预留钢筋拉断		590	Y	Y	Y
	20-200-2	186.42	后插入钢筋拉断		595	Y	Y	Y
	20-200-3	183.64	后插入钢筋拉断		585	Y	Y	Y
	22-220-1	224.99	预留钢筋拉断	225.10	590	Y	Y	Y
	22-220-2	226.35	后插入钢筋拉断		595	Y	Y	Y
	22-220-3	223.97	后插入钢筋拉断		590	Y	Y	Y
	25-250-1	300.87	预留钢筋拉断		615	Y	Y	Y
	25-250-2	298.14	后插入钢筋拉断	299.46	605	Y	Y	Y
	25-250-3	299.37	预留钢筋拉断		610	Y	Y	Y

续表 3
Tab.3 (continued)

L/d	试件	P_u/kN	破坏形态	P_u''/kN	f_u/MPa	强度评价		
						文献[10]	文献[11]	文献[12]
12.5	12-150-1	62.08	预留钢筋拉断	62.39	549	Y	Y	Y
	12-150-2	64.11	后插入钢筋拉断		568	Y	Y	Y
	12-150-3	60.97	预留钢筋拉断		540	Y	Y	Y
	14-175-1	87.10	后插入钢筋拉断	87.04	565	Y	Y	Y
	14-175-2	87.13	后插入钢筋拉断		565	Y	Y	Y
	14-175-3	86.89	后插入钢筋拉断		565	Y	Y	Y
	16-200-1	115.18	预留钢筋拉断	116.28	575	Y	Y	Y
	16-200-2	117.01	预留钢筋拉断		582	Y	Y	Y
	16-200-3	116.66	预留钢筋拉断		580	Y	Y	Y
	18-225-1	159.60	预留钢筋拉断	157.33	625	Y	Y	Y
	18-225-2	156.04	预留钢筋拉断		615	Y	Y	Y
	18-225-3	156.36	预留钢筋拉断		615	Y	Y	Y
	20-250-1	187.61	后插入钢筋拉断	189.80	600	Y	Y	Y
	20-250-2	187.07	预留钢筋拉断		595	Y	Y	Y
	20-250-3	194.73	后插入钢筋拉断		620	Y	Y	Y
	22-275-1	222.87	后插入钢筋拉断	220.79	585	Y	Y	Y
	22-275-2	220.52	预留钢筋拉断		581	Y	Y	Y
	22-275-3	218.99	预留钢筋拉断		575	Y	Y	Y
	25-313-1	282.53	后插入钢筋拉断	284.13	575	Y	Y	Y
	25-313-2	286.12	后插入钢筋拉断		585	Y	Y	Y
	25-313-3	283.75	预留钢筋拉断		580	Y	Y	Y

注:1.以 12-96-1 为例,12 表示钢筋直径,96 表示搭接长度,1 表示 1 号试件;2.“—”表示同组试件破坏状态不一致,无法得到相应的平均值;
3.N 表示试件的强度指标不满足规范要求,Y 表示强度指标满足要求。

由于搭接钢筋不在一条直线上,加载后,试件会发生偏转,见图 4,引起钢筋的弯曲变形及其周围灌浆料的局部破坏。

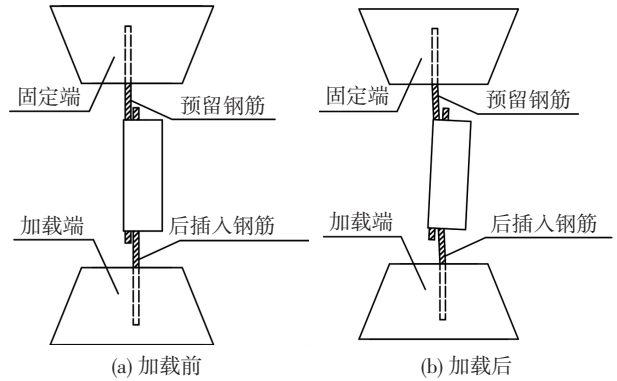


图 4 加载后试件偏转示意

Fig.4 Deflection of specimen after test

2.1 试件破坏形态

试件有两种破坏形态:套筒外部钢筋拉断和钢筋与灌浆料滑移,分别见图 5(a) 和 6(a),未出现文献[3]中灌浆料与筒壁拉脱及套筒被拉断的情况.在套筒端部,灌浆料无轴向约束,当钢筋受拉变形时,由于灌浆料与钢筋间机械咬合作用,灌浆料与钢筋一起变形,出现端部灌浆料局部破碎并脱落的现象,见图 5(b)、5(c)、6(b) 和 6(c);由于偏心的影响,预留钢筋向外侧倾斜,挤压筒壁,见图 5(b)、6(b),而后插入钢筋(靠近加载端)向套筒中部方向倾斜,挤压其周围灌浆料,见图 5(c)、6(c),加载端的灌浆料脱落深度大于固定端灌浆料的脱落深度。



(a) 钢筋拉断 (b) 固定端端部破坏 (c) 加载端端部破坏

图 5 钢筋拉断试件破坏情况

Fig.5 Failure modes of bar fracture



(a) 钢筋滑移 (b) 固定端端部破坏 (c) 加载端端部破坏

图 6 钢筋与灌浆料滑移试件破坏情况

Fig.6 Failure modes of bar-grout slip

2.2 试件的力-位移曲线

图 7(a)~(c) 为具有代表性的试件力-位移曲线与材性试验曲线的比较,7(d) 为钢筋滑移、拉断的典型力-位移曲线.从曲线可以看出,由于试件发生了如图 4(b) 所示的偏转,试件的力-位移曲线无明显的屈服台阶,绝大部分试件的刚度小于对应钢筋的刚度。

对于 L/d 为 10、12.5 的试件,破坏形态均为套筒外钢筋拉断,力-位移曲线与单根钢筋拉伸试验的力-位移曲线基本相同,曲线下降段为直线下降(图 7(d) $B'C'$ 段),试件的破坏均为延性。

对于 L/d 为 8 的试件,部分试件破坏形态为钢筋与灌浆料滑移,位移曲线达到峰值后,由于钢筋滑移,曲线进入迅速下降段(图 7(d) BC 段),后进入平缓的下降段(图 7(d) CD 段),由于接头所受的力

已超过屈服力,试件破坏为延性;部分试件的破坏形态为套筒外钢筋拉断.故 L/d 为 8 的试件的破坏也是延性的,由于离散性,同组试件出现了不同的破坏形态,这也说明, L/d 为 8 的试件接近受拉钢筋达到极限强度且钢筋与灌浆料间出现滑移的临界状态.

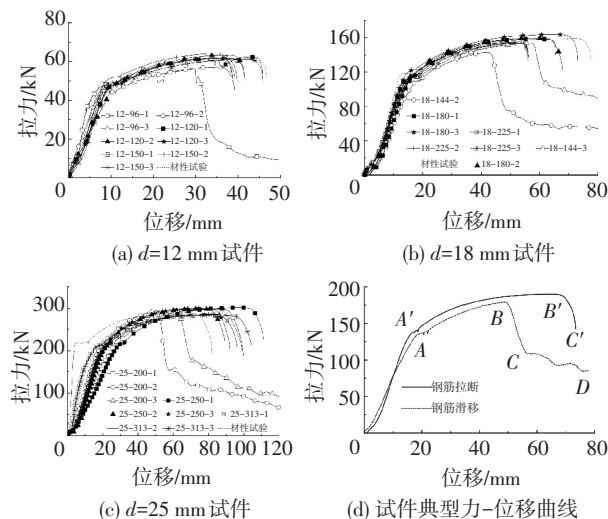


图 7 试件的力-位移曲线

Fig.7 Load-displacement curves

2.3 试件的强度分析

套筒外钢筋拉断试件的极限承载力均值 P_u' 示于表 3, 对应钢筋的极限承载力均值 P_u' 示于表 2, P_u' 和 P_u 基本相同.

《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》^[10] 规定: 钢筋套筒灌浆连接接头的抗拉强度不应小于连接钢筋抗拉强度的标准值 (本试验中为 540 MPa), 且破坏时应断于接头外钢筋.

《钢筋机械连接技术规程》^[11] 规定: 1) 当接头断于钢筋时, 接头抗拉强度应不小于钢筋的抗拉强度标准值 (本试验中为 540 MPa); 2) 当接头断于接头处时, 接头抗拉强度应不小于钢筋的 1.1 倍的抗拉强度标准值.

美国规范 ACI-318^[12] 建议: 机械连接接头的抗拉强度不低于连接钢筋的 1.25 倍的屈服强度 (本试验取 400 N/mm²).

根据以上规范所得的试件强度性能评定结果示于表 3. 可见, 对于 $8d$ 搭接长度试件, 不同规范评判结果有差异, 21 个试件中, 9 个试件同时满足 3 个规范, 2 个试件同时不满足 3 个规范, 其余 10 个试件有 8 个仅满足美国 ACI-318 规范 (不满足其它两个规范), 2 个不满足《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》 (但满足其它两个规范), 这说明美国 ACI-318 规范限制较小, 《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》限制较严格.

所有长度为 $10d$ 和 $12.5d$ 的试件均满足以上个

规范要求. 说明在套筒的约束下, 接头所需的搭接长度大大减小.

2.4 钢筋应力-应变曲线分析

12 mm、22 mm 直径试件加载端钢筋应力-应变关系与钢筋材性试验对比如图 8 所示. 可见部分钢筋的应力应变关系与材性试验相似, 由于试件偏转影响, 部分钢筋出现随着力的增大, 钢筋的拉应变降低现象.

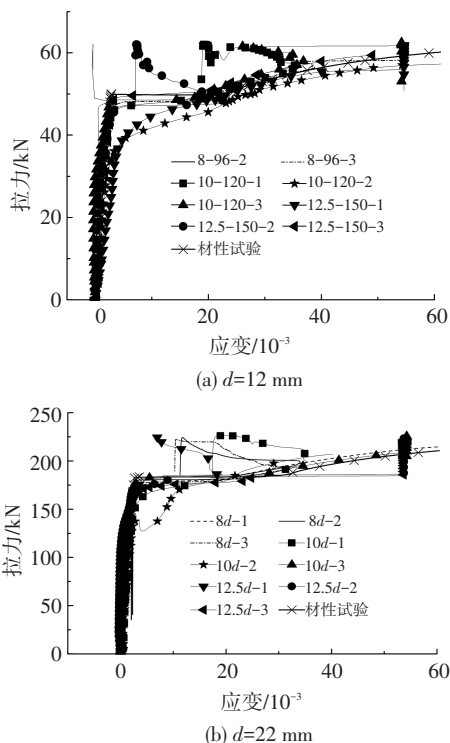


图 8 试件加载端钢筋应力-应变关系与钢筋材性试验对比

Fig.8 Comparison of the stress-strain curve between the bar at the loading end and the control bar

3 接头工作机理及分析

3.1 接头工作机理

图 9 为钢筋粘结机理图, 图 10 为套约束束浆锚搭接接头受力机理示意图.

加载初期, 由钢筋与灌浆料间的胶结力 τ_g 承载, 筒壁未产生横向约束, 见图 10(a); 胶结力失效后, 灌浆料与钢筋的机械咬合发挥作用, 钢筋对灌浆料作用斜向压应力, 斜向压应力沿径向产生分量 σ 和轴向分量 τ , 见图 9(a), 在灌浆料齿根应力集中处, 形成肋顶斜裂缝. 由于两根钢筋搭接在一起, 平行的肋顶斜裂缝间灌浆料形成一个咬合齿; 斜向挤压力沿径向分量 σ 造成两钢筋间的分离趋势, 此时筒壁产生约束, 抑制裂缝的发展, 见图 10(b); 内裂形成后, 相对滑移增大, 肋前灌浆料局部破碎, 并因斜向压肢的推力造成两钢筋间的分离趋势, 由于套筒的约束, 并未出现因钢筋分离而导致的灌浆料的劈

裂^[13].随着荷载的增加,肋前灌浆料压碎,承载力下降,见图 10(c);随后灌浆料与钢筋间的咬合齿完全挤碎剪断(对应图 7(d)BC 段),钢筋与灌浆料间形成新的滑移面,钢筋以摩擦阻力 τ_f 持力直至拔出(对应图 7(d)CD 段),此时套筒仍然对灌浆料产生约束作用,见图 10(d).整个加载过程中,由于套筒约束很好的抑制灌浆料裂缝发展,减缓了的粘结性能的下降,约束两根钢筋的分离趋势,使得接头承载能力得到了很大的提高.

本试验为搭接接头,试件呈现钢筋拉断、钢筋与灌浆料滑移的破坏形态,未出现文献[3]中对接接头的灌浆料与筒壁拉脱及套筒被拉断的情况.搭接接头钢筋部分拉力直接通过灌浆料传给另一根钢筋,部分拉力从灌浆料传递到套筒上再传给另一根钢筋,而对接接头钢筋拉力通过灌浆料传递到套筒上,再传递给另一根钢筋,所以对接接头对套筒抗拉强度、套筒与灌浆料间的粘结强度要求高.

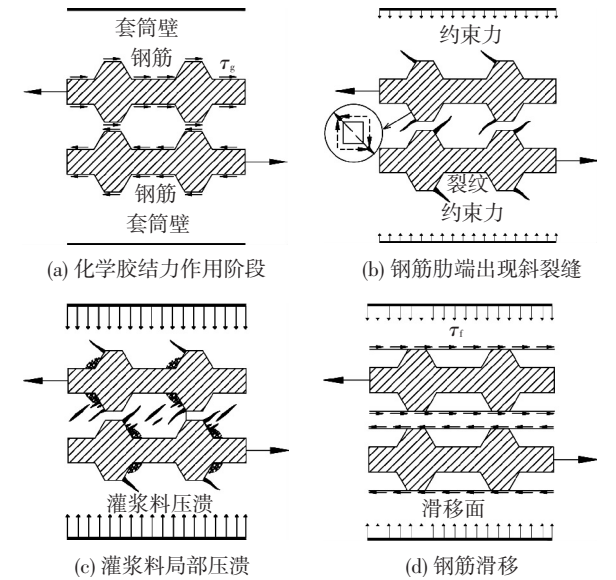
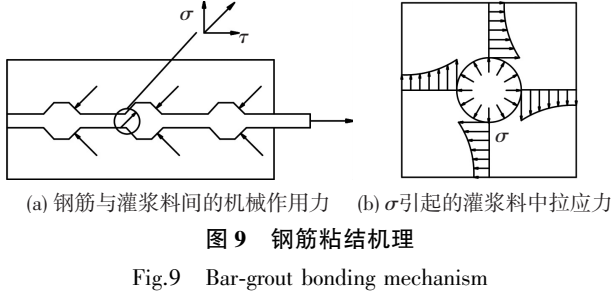


Fig.10 Working mechanism of grouted sleeve lapping connector

3.2 套筒环向应变

套筒环向应变由两部分力引起,一是套筒本身受拉,在加载过程中,钢筋拉力通过灌浆料的粘结力传递到套筒壁,套筒壁受到剪应力,后产生轴向拉力,环向收缩,环向产生压应变;二是灌浆料膨胀变

形,如图 9 所示,产生环向拉应变.

3.2.1 搭接长度为 $10d$ 时 SG1、2 应变分析

图 11 为 $10d$ 搭接长度下 SG1、2 拉力-应变曲线,可见,SG2 应变大于 SG1,说明套筒中部靠近钢筋处拉应变大于远离钢筋处拉应变,这正如图 9(b)显示,近钢筋处灌浆料膨胀力大,远钢筋处灌浆料膨胀力小.SG2 加载初期有明显压(负)应变,SG1 在加载后期出现压(负)应变.

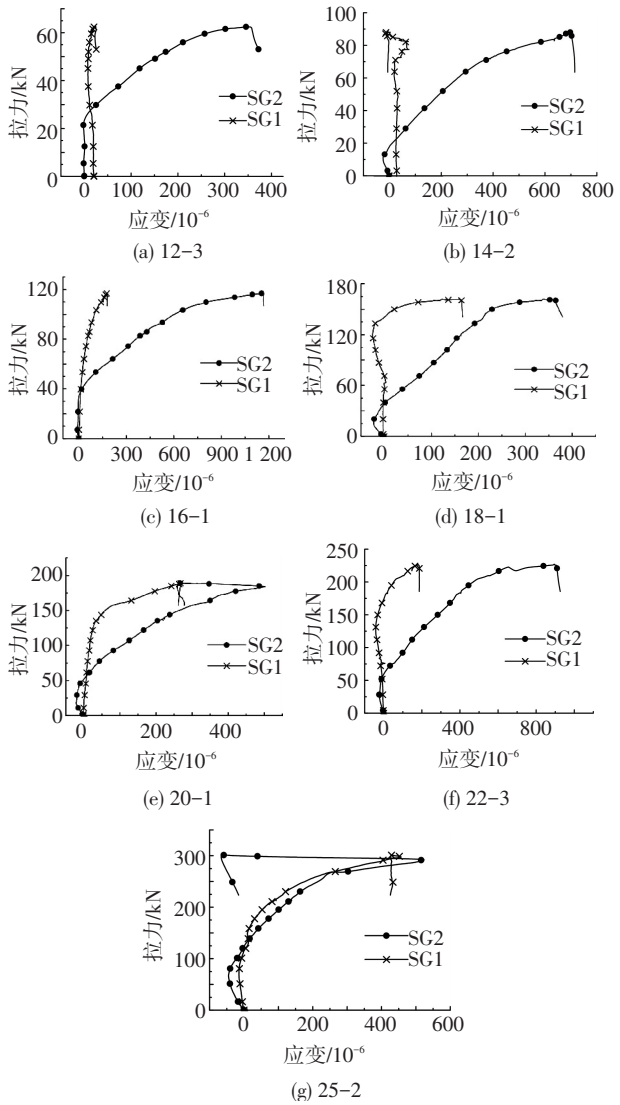


图 11 $10d$ 搭接长度下 SG1、2 荷载-应变曲线

Fig.11 Load-strain curves of SG1 and SG2 of the specimens with $10d$ lap length

由图 11 还可以看出随着钢筋直径的增加,SG1、2 的差值降低,这是由于钢筋直径增大,远钢筋侧与近钢筋的距离差值变小.

3.2.2 相同直径不同搭接长度 SG1、2 测点应变分析

图 12、13 分别为具有代表性的 SG1、2 的荷载-应变曲线.从 SG1、2 的应变来看,相同钢筋直径的接头搭接长度越短,套筒的环向拉应变越大.对于钢筋直径大 (22 mm 、 25 mm) 且搭接长度为 $12.5d$ 的接头,SG1、2 的压应变较大,说明搭接长度长的接头套

筒的环向压应变大。

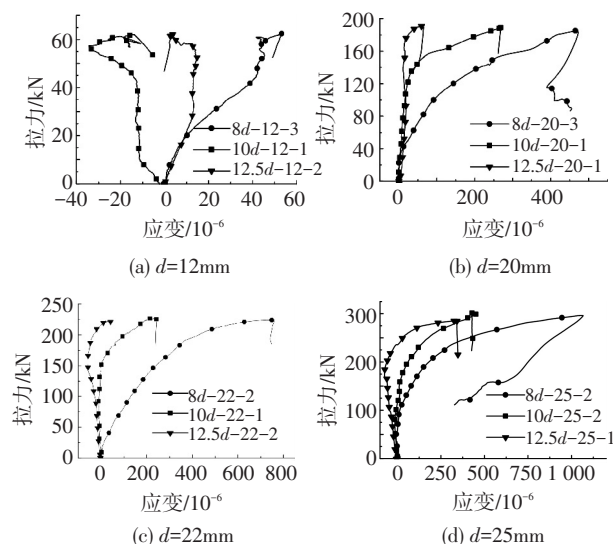


图 12 不同直径下 SG1 荷载-应变曲线

Fig.12 Load-strain curves of SG1

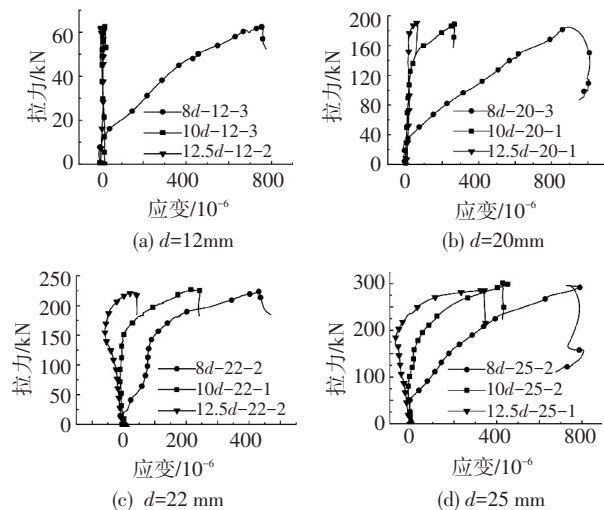


图 13 不同直径下 SG2 荷载-应变曲线

Fig.13 Load-strain curves of SG2

3.3 接头受力特点

在一定长度范围内,随着搭接长度增加,试件的极限承载力 P_u 增加.出现这种现象的原因是随着试件长度的增加,更多钢筋横肋与周围灌浆料作用,产生更大机械咬合力,钢筋与灌浆料的粘结力更大。

图 14 为钢筋拉断试件极限荷载时 SG1 的平均应变 $\bar{\varepsilon}_{1,t}$ 与搭接长度 L 关系图.钢筋直径相同,钢筋拉断试件,随着搭接长度增加, $\bar{\varepsilon}_{1,t}$ 呈现出减小的趋势.因为试件的极限承载力接近,随着搭接长度的增加,更多的钢筋横肋与灌浆料作用,钢筋周边的粘结应力降低,裂缝发展减少,筒壁横向约束降低,表现为 $\bar{\varepsilon}_{1,t}$ 减小.所有 SG1 的平均应变均小于钢材屈服时的应变,套筒具有一定的安全储备。

由于 SG2 靠近钢筋,受试件偏心所引起的钢筋弯折的影响较大,钢筋拉断试件的 SG2 应变与 L 间无明显规律。

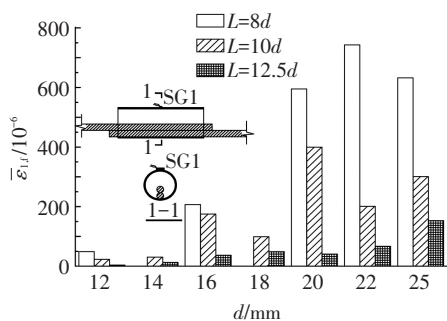


图 14 钢筋拉断试件 $\bar{\varepsilon}_{1,t}$ 随 L 的变化规律

Fig.14 The variation of $\bar{\varepsilon}_{1,t}$ with L of specimens failed by bar fracture

图 15 为钢筋滑移试件极限荷载时 SG1 平均应变 $\bar{\varepsilon}_{1,s}$ 随着 d 变化规律.由于套筒内径 D 一定,随着 d 的增加, D/d 减小,套筒的约束增强^[14], $\bar{\varepsilon}_{1,s}$ 增大。

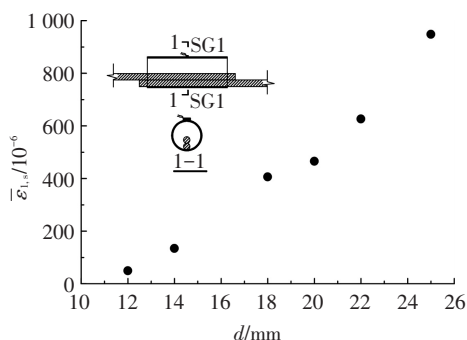


图 15 钢筋滑移试件 $\bar{\varepsilon}_{1,s}$ 随 d 的变化规律

Fig.15 The variation of $\bar{\varepsilon}_{1,s}$ with d of specimens failed by bar-grout bond slip

同样,由于试件偏心引起的钢筋弯折效应,钢筋滑移试件的 SG2 应变与 d 之间并无明显规律。

3.4 搭接应力的影响因素及计算公式

平均搭接粘结应力(以下简称平均搭接应力) $\tau = P/(\pi dL)$,对于破坏形态为钢筋滑移的试件($L = 8d$),极限平均搭接应力 τ_u 可表示为

$$\tau_u = \frac{1}{8\pi} \frac{P_u}{d^2}, \quad (1)$$

式中 P_u 为试件的极限承载力, d 为钢筋直径。

把试验所得数据带入式(1)后,得到 τ_u 与 d 的关系如图 16 所示.随着 d 的增加, τ_u 呈现出了增长的趋势.这是因为随着 d 的增加,筒壁约束增强, τ_u 增加。

把前期试验和本次试验的钢筋滑移试件相关数据汇总于表 4,线性回归分析,得极限平均搭接应力 τ_u 的计算公式为

$$\tau_u = \left(3.86 \frac{d}{D} - 17.51 \frac{d}{L} + 4.90 \right) R_t. \quad (2)$$

式中: d 为钢筋直径, D 为套筒内径, L 为套筒长度, R_t 为灌浆料抗拉强度。

将相关试验数据带入式(2)后得到相应的计算值 $\bar{\tau}_u$,除以试验值 τ_u 得到可靠度系数 R_r , R_r 均与 1.0 很接近,具体数据见表 4。

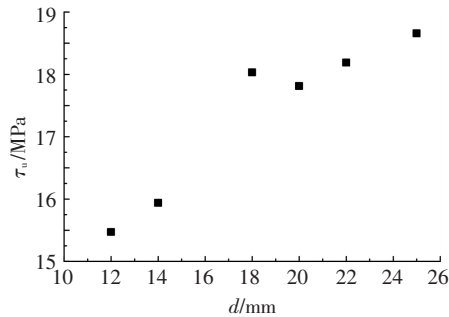


图 16 钢筋滑移试件 τ_u 随 d 的变化规律

Fig.16 The variation of τ_u with d of specimens failed by bar-grout bond slip

表 4 极限平均搭接应力的计算值与试验值比较
Tab.4 Comparison of calculated and experimental value of average ultimate lapping stress

试件组号	R_t /MPa	d/D	d/L	τ_u	$\bar{\tau}_u$	R_r
12-96	4.63	0.17	0.125	15.46	15.65	0.99
14-112		0.20	0.125	15.93	16.16	0.99
18-100		0.26	0.180	12.69	12.73	1.00
18-144		0.26	0.125	18.01	17.18	1.05
18-150		0.26	0.120	17.32	17.59	0.98
20-160		0.29	0.125	17.83	17.69	1.01
22-176		0.31	0.125	18.20	18.20	1.00
25-200		0.36	0.125	18.66	18.94	0.98

注:式(1)中的数值均为试验结果的平均值;18-100 和 18-150 的数据由前期试验获得。

3.5 接头力学模型分析

参考文献[5]提出套筒约束浆锚搭接接头的力学模型,如图 17 所示。

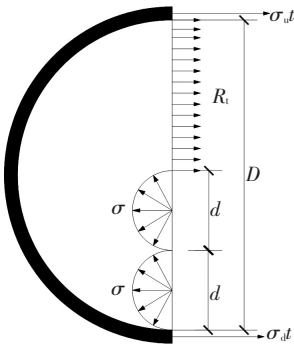


图 17 套筒约束浆锚搭接接头的力学模型

Fig.17 Mechanical model of grouted sleeve lapping connector

取套筒中部横截面的半截面进行分析,假设截面上的灌浆料全部达到极限抗拉强度 R_t ,建立平衡方程:

$$2\sigma d = \sigma_u t + \sigma_d t + R_t (D - 2d). \tag{3}$$

式中: σ 为纵筋的表面法向应力; t 为套筒壁厚; σ_u 、 σ_d 分别为筒壁上、下横截面上的正应力; $\sigma_u = E \varepsilon_1$ 、 $\sigma_d = E \varepsilon_2$, ε_1 、 ε_2 分别由 SG1、SG2 测得。

钢筋滑移时,假设纵筋表面的切向粘结应力等于法向粘结应力(图 9),得方程

$$\sigma = \tau = \frac{P}{\pi d L}. \tag{4}$$

联立方程(3)和方程(4),得式(5)

$$l_m = \frac{2P}{\pi [\sigma_u t + \sigma_d t + R_t (D - 2d)]}. \tag{5}$$

把破坏形态为钢筋滑移的试件的相关数据代入式(5)计算,并与实际的搭接长度进行对比,结果见表 5,公式计算值与实际值较为接近,说明该力学模型可用于接头的力学分析。

表 5 l_m 与 L 数据比较

Tab.5 Comparison of l_m and L

d /mm	l_m /mm	L /mm	l_m/L
14	84	112	0.75
18	87	144	0.60
20	115	160	0.72
22	219	176	1.24
25	175	200	0.88

4 搭接长度建议值

取钢筋与灌浆料滑移时,钢筋刚好被拉断的状态下的长度为临界搭接长度.设试件的临界搭接长度为 l ,临界搭接长度下极限平均搭接应力为 $\tau_{u,l}$,由力的平衡条件,得方程(6);把 l 代入式(2)可得 $\tau_{u,l}$ 的表达式:

$$\tau_{u,l} \pi d l = f_{u,b} \frac{1}{4} \pi d^2, \tag{6}$$

$$\tau_{u,l} = (3.86 \frac{d}{D} - 17.51 \frac{d}{l} + 4.90) R_t. \tag{7}$$

式中 $f_{u,b}$ 为钢筋极限抗拉强度。

联立方程(6)和式(7)得

$$l = \frac{\frac{f_{u,b}}{R_t} + 70.04}{\frac{15.44}{D} + \frac{19.6}{d}}. \tag{8}$$

$f_{u,b}$ 取材性试验得到的钢筋极限抗拉强度,并把试验的相关数据带入式(8),计算结果示于表 6。

表 6 临界搭接长度的试验值和计算值比较

Tab.6 Comparison of experimental values and calculated values of critical lapping length

d	试验值	式(8)值
12	96~120	104
14	112~140	120
16	<128	133
18	144~180	157
20	160~200	169
22	176~220	172
25	200~250	195

$d=16\text{ mm}$ 接头的计算值比试验值大(偏安全),
 $d=22, 25\text{ mm}$ 接头的计算值比试验值略小, 其余钢筋直径接头计算值在试验值范围以内, 表明式(8)可用于接头临界搭接长度的计算。

对于 $L/d=12.5$ 的试件, 强度均满足规范要求。虽然由于偏心的影响, 接头的刚度略低, 考虑到试验按套筒约束浆锚搭接接头较不利的工况进行, 结果是偏于安全的, 在该接头的套筒内径和厚度条件下, 建议接头的搭接长度值为 $12.5d$ 。

5 结 论

1) 由于试件发生了偏转, 试件的力-位移曲线无明显的屈服台阶, 绝大部分试件的刚度小于对应钢筋的刚度。

2) 套筒外钢筋拉断的接头, 其极限抗拉强度与单根钢筋的接近。

3) 套筒约束搭接接头与对接接头钢筋传力机理不同, 对接接头对套筒抗拉强度、套筒与灌浆料间的粘结强度要求高。

4) 钢筋与灌浆料滑移的试件($L=8d$), 随着钢筋直径增加, 套筒横向约束增强。钢筋直径相同, 破坏形态均为钢筋拉断的试件, 随着搭接长度增加, 套筒的横向约束减弱。

5) 在套筒中部, 套筒环向拉应变靠近钢筋处大于远离钢筋处; 筒壁出现环向压应变, 搭接长度越长的接头, 套筒的环向压应变越大。

6) 分析了套筒约束浆锚搭接接头的力学模型, 可为进一步的理论研究打下基础。

7) 式(2)、(8)可分别用于套筒约束浆锚搭接接头的平均搭接应力、临界搭接长度的计算。

8) 由于套筒的约束, 该接头的搭接长度建议为取为 12.5 倍钢筋直径。

下一步试验研究接头的变形性能, 并进行竖向钢筋采用套筒约束浆锚搭接接头连接的剪力墙、柱抗震性能试验, 以衡量该接头在结构中的工作性能。

参考文献

- [1] LING J H, RAHMAN A B, IBRAHIM I S, et al. Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load[J]. Construction and Building Materials, 2012, 33: 90-98.
- [2] 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: 116-123.
- [3] LING J H, RAHMAN A B, IBRAHIM I S. Feasibility study of grouted splice connector under tensile load[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 530-539.

- [4] 吴小宝, 林峰, 王涛. 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): 78-82.
WU Xiaobao, LIN Feng, WANG Tao. Experimental research on effects of grout age and types of steel bars on mechanical behavior of grout sleeve splicing for reinforcing bars [J]. Building Structure, 2013, 43(14): 78-82.
- [5] 姜洪斌, 张海顺, 刘文清, 等. 预制混凝土插入式预留孔灌浆钢筋搭接试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(10): 18-23.
JIANG Hongbin, ZHANG Haishun, LIU Wenqing, et al. Experimental study on plug-in filling hole for steel bar lapping of precast concrete structures [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(10): 18-23.
- [6] 马军卫, 尹万云, 刘守城, 等. 钢筋约束浆锚搭接连接的试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(02): 32-35.
MA Junwei, YIN Wanyun, LIU Shoucheng, et al. Experimental study on constrain grouted-filled connection of steel bar [J]. Building Structure, 2015, 45(02): 32-35.
- [7] 余琼. 一种新型的约束搭接套筒; ZL 20142 0656653.0[P]. 2015-04-01.
YU Qiong. A new confined lapping sleeve; ZL 2014 2 0656653.0 [P]. 2015-04-01.
- [8] 国家质量技术监督局. 水泥胶砂强度检验方法: GB/T 17671—1999[S]. 北京: 中国标准化出版社, 1999.
Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Method of testing cements-determination of strength: GB/T 17671—1999 [S]. Beijing: China Standard Press, 1999.
- [9] 中华人民共和国建设部. 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.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB 50081—2002 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2003.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical specification for grout sleeve splicing of rebars: JGJ 355—2015 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋机械连接技术规程: JGJ 107—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical specification for mechanical splicing of steel reinforcing bars: JGJ 107—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [12] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318 - 11 [S]. Michigan: American Concrete Institute, 2011.
- [13] 徐有邻, 汪洪, 沈文都. 钢筋搭接传力性能的试验研究[J]. 建筑结构, 1993(4): 20-24.
XU Youlin, WANG Hong, SHEN Wendu. Experimental on force transferring properties of overlapped bars [J]. Building Structure, 1993(4): 20-24.
- [14] LING J H. Behaviour of grouted splice connections in precast concrete wall subjected to tensile, shear and flexural loads[D]. Kuala Lumpur: Universiti Teknologi Malaysia, 2011.

(编辑 赵丽莹)