

DOI:10.11918/202309013

# 预制混凝土构件钢筋浆锚对接连接受拉性能

朱张峰<sup>1</sup>, 郭正兴<sup>2</sup>, 黄丁丁<sup>1</sup>, 陈耀钢<sup>3</sup>

(1. 南京工业大学 土木工程学院, 南京 211816; 2. 东南大学 土木工程学院, 南京 211189;  
3. 江苏中南建筑产业集团有限责任公司, 江苏 南通 226124)

**摘要:** 为改善预制混凝土构件钢筋连接工艺及性能, 提出一种预制混凝土构件钢筋浆锚对接连接技术。针对该新型钢筋连接的传力可靠性问题, 开展了考虑钢筋直径、混凝土强度和浆锚长度变化的接头单向拉伸试验。试验结果表明, 钢筋浆锚对接连接接头受拉性能由钢筋浆锚长度与帮条钢筋承载力共同控制, 与混凝土强度无明显关系, 表现为帮条钢筋配置相同的条件下, 12 mm、14 mm 直径连接钢筋试件分别在  $0.5l_a$  (受拉钢筋基本锚固长度)、 $0.6l_a$  钢筋浆锚长度条件下实现钢筋拉断, 16 mm 直径连接钢筋试件在  $0.6l_a$  钢筋浆锚长度条件下发生帮条钢筋拉断。结合数据分析, 建议 12~16 mm 直径连接钢筋浆锚长度按  $0.6l_a$  控制, 帮条钢筋与连接钢筋牌号相同的前提下, 12~14 mm 直径连接钢筋的帮条钢筋按 4Φ8 设计, 16 mm 直径连接钢筋的帮条钢筋应按 6Φ8 设计。同时, 试验中钢筋锚头构造可保证钢筋充分锚固, 其具体尺寸可用于指导钢筋加工; 螺旋筋对接头受拉性能影响不明显, 可参照本次试验参数进行设计。

**关键词:** 预制混凝土; 钢筋连接; 浆锚对接; 帮条钢筋; 受拉性能

中图分类号: TU398.2 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2025)01-0120-08

## Tensile properties of grout-anchored rebar butt connection for precast concrete component

ZHU Zhangfeng<sup>1</sup>, GUO Zhengxing<sup>2</sup>, HUANG Dingding<sup>1</sup>, CHEN Yaogang<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;

3. Jiangsu Zhongnan Construction Industry Group Co. Ltd., Nantong 226124, Jiangsu, China)

**Abstract:** To enhance the process and performance of precast concrete component rebar connections, a grout-anchored rebar butt connection was proposed. Uniaxial tensile tests were conducted on the new type of rebar connection specimens, to assess the reliability of force transmission, considering variations in rebar diameter, concrete strength, and grouted length. The experimental results indicated that the tensile performance of the grout-anchored rebar butt connection was governed by both the grouted length of the rebar and the load-bearing capacity of the splice bars, with no significant correlation to the concrete strength. Under identical splice rebar configurations, specimens with 12 mm and 14 mm diameter rebars fractured with grouted lengths of  $0.5l_a$  (basic anchorage length of the tensile steel bar) and  $0.6l_a$ , respectively, while those with 16 mm diameter rebars fractured at grouted lengths of  $0.6l_a$ . By data analysis suggested that the grouted length for connecting rebars with diameters ranging from 12 to 16 mm should be controlled to the value of  $0.6l_a$ . Under the condition that the splice rebars and the connecting rebars are of the same grade, the splice rebars for 12~14 mm connecting rebars should be designed as 4Φ8, and those for 16 mm diameter connecting rebars as 6Φ8. Additionally, the rebar heading structure could ensure full anchorage of the rebars, and its specific dimensions could guide the rebar processing. The spiral reinforcement has no significant effect on the tensile performance of the rebar connection and can be designed with reference to the parameters of this test.

**Keywords:** precast concrete; rebar connection; grout-anchored rebar butt connections; splice rebars; tensile properties

对于“等同现浇”装配式混凝土结构, 预制混凝土构件之间的受力钢筋连接性能起到关键性作用,

钢筋套筒灌浆连接及钢筋浆锚搭接连接成为中国相关标准推荐的两种钢筋连接方式。

收稿日期: 2023-09-05; 录用日期: 2023-10-08; 网络首发日期: 2024-04-11

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240409.1023.002>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0701703)

作者简介: 朱张峰(1985—), 男, 副教授, 硕士生导师; 郭正兴(1956—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 朱张峰, zzfking2210@163.com

钢筋套筒灌浆连接可实现机械连接性能,成为中国装配式混凝土结构的主推技术<sup>[1]</sup>。基于成熟的套筒产品,部分学者对套筒材料、结构及工艺进行了创新研发,如 Sayadi 等<sup>[2]</sup>研制了 GFRP 套筒;郑永峰等<sup>[3]</sup>研制了通过钢管冷滚轧成型的新型变形灌浆套筒;亢晋军等<sup>[4]</sup>提出了钢套筒-螺栓-结构胶形成的新型灌浆套筒。针对钢筋套筒灌浆连接施工质量问题,部分学者<sup>[5-9]</sup>研究了灌浆不饱满、钢筋偏置及灌浆料强度不足等缺陷对接头力学性能的影响。

钢筋浆锚搭接连接通过抽芯成孔或金属波纹管留孔,连接钢筋在孔内灌浆锚固,与孔外钢筋通过灌浆料、混凝土传递应力,形成搭接传力机制<sup>[10]</sup>。由于钢筋偏心传力,接头处需设置螺旋筋约束混凝土以防止劈裂。近年来的研究工作多集中在钢筋在波纹管内的锚固性能<sup>[11-12]</sup>及螺旋筋对接头的约束性能<sup>[13-14]</sup>,杨新磊等<sup>[15]</sup>进一步提出了采用套筒连接件实现钢筋搭接传力的方案,以克服通过灌浆料及混凝土搭接传力的不利影响。

钢筋套筒灌浆连接轴向传力机制合理、传力性能可靠,但其成本较高,对施工要求严格,而钢筋浆锚搭接连接则施工简便,但偏心传力机制不够理想,影响了接头的延性及变形能力。本文提出一种钢筋浆锚对接连接技术(图1),其由金属波纹管成孔,管外设置由帮条钢筋和螺旋筋点焊而成的帮条钢筋笼,带镦头的连接钢筋在波纹管内部浆锚,实现钢筋浆锚对接连接。

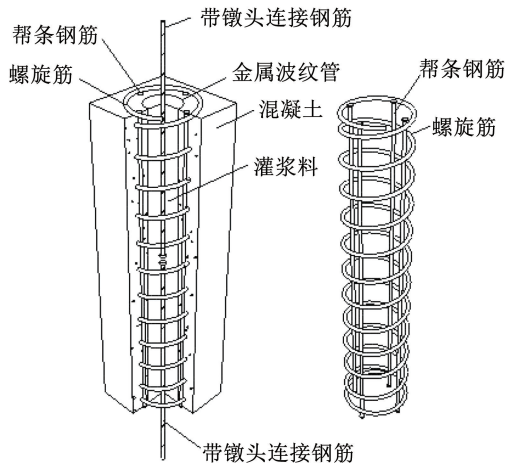


图1 钢筋浆锚对接连接示意

Fig. 1 Grout-anchored rebar butt connections

钢筋浆锚对接连接技术避免了钢筋套筒灌浆连接的高精度要求,也无需专业加工的钢筋套筒。通过帮条钢筋笼的约束和传力作用,实现了钢筋浆锚连接无法实现的钢筋对接连接。连接钢筋镦头也可发挥类似钢筋机械锚固作用而减少浆锚长度。因此,钢筋浆锚对接连接技术可作为预制混凝土构件

钢筋连接的可选方案。同时,钢筋浆锚对接连接构造使得其尺寸相对较大,为便于构件其他钢筋布置并保证混凝土浇筑质量,其更适用于预制剪力墙竖向分布钢筋“梅花形”部分连接或单排连接情形。

为探讨该新型钢筋连接技术的可靠性,开展了接头单向拉伸试验,以期掌握其真实受力性能,并给出设计建议。

## 1 试件设计

试件设计详图见图2,试件截面尺寸考虑常规200 mm厚剪力墙,取为100 mm×100 mm,且本次试验关注连接钢筋在固定混凝土截面条件下的锚固与传力性能,在试验及后续分析中暂未考虑混凝土截面变化对接头性能的影响。试件设计时考虑了连接钢筋直径、混凝土强度等级及浆锚长度等参数。

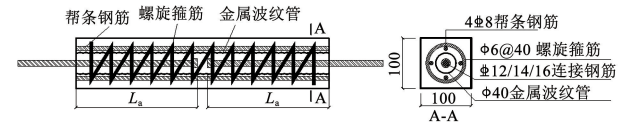


图2 试件设计详图

Fig. 2 Design drawings of specimens

试件设计参数信息见表1,按连接钢筋直径、混凝土强度等级及浆锚长度进行分组,同时,考虑试件离散性,各组同条件试件3个,共计54个。对于连接钢筋直径,结合实际工程剪力墙构件竖向钢筋的常规直径,考虑了12、14、16 mm三种规格;对于混凝土材料,考虑了实际工程剪力墙构件混凝土常用的C30、C40强度等级;对于浆锚长度 $L_a$ 的确定,取受拉钢筋基本锚固长度 $l_a$ <sup>[16]</sup>(C30取 $35d$ 、C40取 $29d$ , $d$ 为连接钢筋直径)的0.5、0.6和0.75倍;对于帮条钢筋,选择工程中常用的8 mm直径钢筋,并初步按本次试验连接钢筋直径最大的16 mm钢筋进行等面积代换进行确定,即采用 $4\Phi 8$ ;对于金属波纹管,考虑其成孔及施工工艺要求,选取 $\Phi 40$ 规格;对于螺旋筋,考虑钢筋制作工艺及接头混凝土浇筑空间要求,按直径6 mm、螺距40 mm、螺旋箍内径67 mm设计。为便于模具制作,部分数据近似按10 mm模数取整。对于连接钢筋镦头,试验前进行了钢筋试镦,考虑镦头的成型稳定性,兼顾相关设备能力,确定镦头直径不小于 $1.3d$ ,高度不小于 $1.0d$ 。

表 1 试件信息

Tab. 1 Specimen details

试件组号	连接钢筋直径 $d$ /mm	混凝土强度等级	浆锚长度 $L_a$ /mm
12-C30-0.5	12	C30	210(17.5d)
12-C30-0.6	12	C30	250(21d)
12-C30-0.75	12	C30	310(26.2d)
12-C40-0.5	12	C40	170(14.5d)
12-C40-0.6	12	C40	210(17.4d)
12-C40-0.75	12	C40	260(21.8d)
14-C30-0.5	14	C30	240(17.5d)
14-C30-0.6	14	C30	290(21d)
14-C30-0.75	14	C30	360(26.2d)
14-C40-0.5	14	C40	200(14.5d)
14-C40-0.6	14	C40	240(17.4d)
14-C40-0.75	14	C40	300(21.8d)
16-C30-0.5	16	C30	280(17.5d)
16-C30-0.6	16	C30	330(21d)
16-C30-0.75	16	C30	420(26.2d)
16-C40-0.5	16	C40	230(14.5d)
16-C40-0.6	16	C40	270(17.4d)
16-C40-0.75	16	C40	260(21.8d)

试件制作所用 C30、C40 混凝土的立方体抗压强度实测值分别为 36.5、48.3 MPa, 换算得相应的混凝土抗拉强度值分别为 2.01、2.35 MPa。试件灌浆料采用 M80 级, 其实测抗压强度值为 91.1 MPa, 抗折强度值为 12.6 MPa, 抗拉强度值为 9.68 MPa。

试件连接钢筋、帮条钢筋选用 HRB400 级, 螺旋筋选用 HPB300 级, 钢筋实测力学性能见表 2。

表 2 钢筋实测力学性能

Tab. 2 Measured mechanic properties of reinforcements

钢筋	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	总伸长率/%
φ6	349	519	201	15.2
φ8	450	642	203	10.3
φ12	440	629	199	11.9
φ14	435	622	202	11.2
φ16	447	637	203	10.5

## 2 加载与量测

试件加载采用单向拉伸试验, 试件两端伸出钢筋通过专用夹具夹持在 MTS 疲劳机的底座及顶部加载端头之间, 通过顶部加载端头的回缩对试件进行单向拉伸, 其加载装置见图 3。采用 MTS 疲劳机进行加载, 加载速率设定为约 0.1 kN/s, 当试件出现钢筋拉断、混凝土断裂或荷载下降时, 试验停止。



图 3 试验加载装置

Fig. 3 Loading setup

试件受拉荷载-位移数据由 MTS 疲劳机直接量测; 连接钢筋浆锚段按一定间距粘贴应变片, 以测量加载过程中钢筋应力分布情况; 帮条钢筋及螺旋筋中部粘贴应变片, 以测量钢筋应力。钢筋应变片布置示意图见图 4。

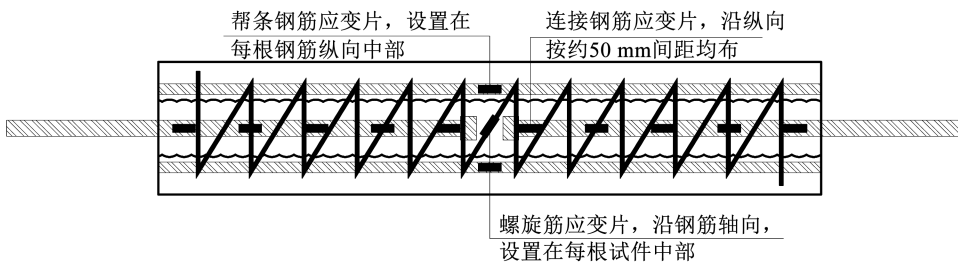


图 4 钢筋应变片布置示意

Fig. 4 Schematic layout of reinforcement strain gauges

## 3 试验现象及结果分析

### 3.1 试件破坏形态

试件出现钢筋拉断和混凝土中部拉断两种破坏

状态, 其中混凝土中部拉断试件根据帮条钢筋破坏状态, 又表现为帮条钢筋滑移、帮条钢筋拉断。代表性试件破坏照片见图 5。同时, 所有试件均未发生灌浆料、金属波纹管及混凝土三者界面之间的黏结

失效现象。

各试件的具体破坏形态见表 3, 其中, A 代表钢筋拉断, B 代表混凝土中部拉断、帮条钢筋滑移, C 代表混凝土中部拉断、帮条钢筋拉断。考虑到材料离散性及试件制作、加载可能产生的误差, 同组试件的控制破坏形态按该组 3 个试件出现 2 次及以上的破坏形态确定。

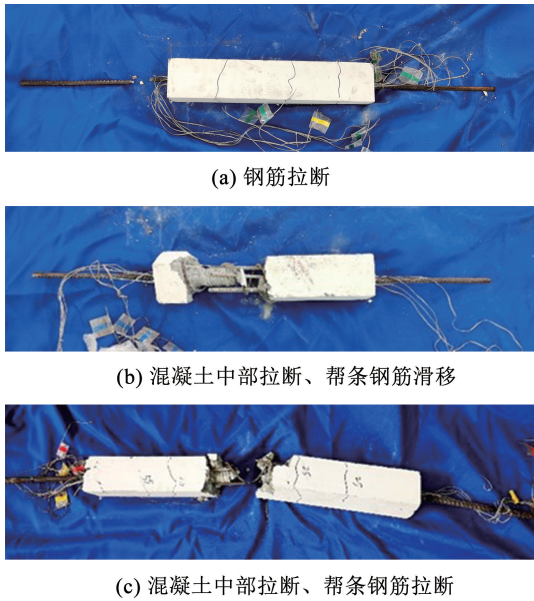


图 5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens

表 3 试件破坏形态统计

Tab. 3 Statistics of specimen failure mode

试件组号	试件破坏形态			控制破坏形态
	试件 1	试件 2	试件 3	
12-C30-0.5	A	A	A	A
12-C30-0.6	A	A	A	A
12-C30-0.75	A	A	A	A
12-C40-0.5	A	A	A	A
12-C40-0.6	A	A	A	A
12-C40-0.75	A	A	A	A
14-C30-0.5	B	B	B	B
14-C30-0.6	A	A	A	A
14-C30-0.75	A	A	A	A
14-C40-0.5	B	B	B	B
14-C40-0.6	A	A	A	A
14-C40-0.75	A	A	A	A
16-C30-0.5	B	B	B	B
16-C30-0.6	C	C	A	C
16-C30-0.75	C	C	A	C
16-C40-0.5	B	B	B	B
16-C40-0.6	A	C	C	C
16-C40-0.75	C	C	A	C

从表 3 可以看出, 对于 12 mm 直径钢筋接头试件, 均出现了理想的钢筋拉断破坏; 对于 14 mm 直径钢筋接头试件, 当浆锚长度为  $0.6l_a$ 、 $0.75l_a$  时, 可实现钢筋拉断破坏, 而当浆锚长度为  $0.5l_a$  时, 由于浆锚长度较短, 造成帮条钢筋长度及其锚固长度也较小, 导致接头受拉过程中帮条钢筋发生滑移而无法充分发挥其强度, 试件中部截面 (仅混凝土及帮条钢筋传递拉力) 受拉承载力降低, 使得试件混凝土中部拉断; 对于 16 mm 直径钢筋接头试件,  $0.5l_a$  浆锚长度条件下同样存在帮条钢筋锚固长度不足问题, 导致其出现混凝土拉断、帮条钢筋滑移,  $0.6l_a$ 、 $0.75l_a$  浆锚长度条件下虽未出现帮条钢筋滑移现象, 但由于 16 mm 直径钢筋极限拉力较大, 而与其他组试件同配置的帮条钢筋承载力相对较低, 导致帮条钢筋被拉断, 未能实现接头断于钢筋。

对比 16-C30-0.5 与 16-C30-0.6、16-C40-0.5 与 16-C40-0.6, 可以发现 16 mm 直径连接钢筋在  $0.6l_a$  浆锚长度条件下即可避免帮条钢筋滑移, 也未出现连接钢筋锚固失效现象。

另外, 所有试件的连接钢筋锚头未发生明显的锚固失效现象, 说明当前锚头构造可保证钢筋端部有效的机械锚固。

### 3.2 试件极限承载力分析

本次试验典型破坏形态的试件荷载-位移曲线见图 6, 其中, 12-C30-0.5 试件为钢筋拉断, 荷载-位移曲线基本再现了钢筋受力全过程; 14-C30-0.5 试件为混凝土中部拉断、帮条钢筋滑移, 荷载-位移曲线未出现明显下降段。帮条钢筋滑移后, 随着位移增大, 荷载基本保持不变, 直至试件变形过大而失效; 16-C30-0.6 试件为混凝土与帮条钢筋拉断, 也出现了明显的下降段, 但试件承载力及变形能力未得到充分发挥。可以看出, 荷载-位移曲线的发展规律与试件破坏形态有较好的一致性。

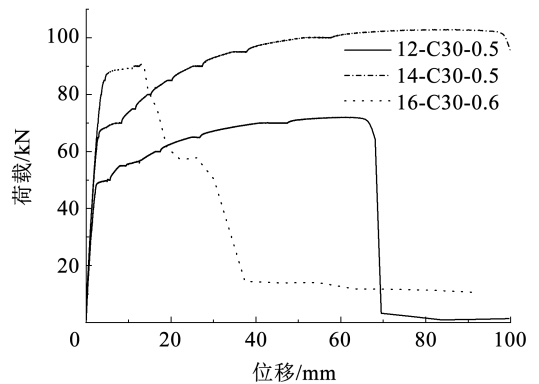


图 6 典型试件荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of typical specimens

各组试件受拉极限承载力及对应的连接钢筋极

限应力见表 4, 其中, 极限拉力取每组试件中与控制破坏形态相同的试件极限拉力的最小值, 极限应力根据极限拉力及连接钢筋截面积进行计算。

表 4 试件极限承载力

Tab. 4 Ultimate bearing capacity of specimens

试件组号	控制破坏形态	极限拉力 $F_t/\text{kN}$	极限应力 $f_t/\text{MPa}$	$(f_t/f_{stk})/\%$
12-C30-0.5	A	70.1	620	1.15
12-C30-0.6	A	68.1	602	1.12
12-C30-0.75	A	66.9	592	1.10
12-C40-0.5	A	67.8	599	1.11
12-C40-0.6	A	70.2	621	1.15
12-C40-0.75	A	71.7	634	1.17
14-C30-0.5	B	94.3	613	1.13
14-C30-0.6	A	100.0	650	1.20
14-C30-0.75	A	98.5	640	1.19
14-C40-0.5	B	85.1	553	1.02
14-C40-0.6	A	102.4	665	1.23
14-C40-0.75	A	100.5	653	1.21
16-C30-0.5	B	90.7	451	0.84
16-C30-0.6	C	99.2	493	0.91
16-C30-0.75	C	115.1	572	1.06
16-C40-0.5	B	105.1	523	0.97
16-C40-0.6	C	129.4	643	1.19
16-C40-0.75	C	125.7	625	1.16

注:  $f_{stk}$  为连接钢筋极限强度标准值, 对于 HRB400 钢筋, 取 540 MPa。

从表 4 可以看出, 各组试件的极限拉力与混凝土强度无明显的规律性关系, 分析认为, 对于钢筋浆锚接头受拉性能, 混凝土仅提供试件中部截面抗拉及对金属波纹管的锚固作用, 而连接钢筋直接锚固于金属波纹管内的灌浆料, 其接头性能将更多由灌浆料材料性能控制, 因此, 试验数据与混凝土强度未能建立直接联系, 同时, 进一步说明, 灌浆料的高强性能使得接头连接性能较为稳定, 且基本不受混凝土强度控制; 同时, 钢筋浆锚长度与试件极限拉力关系也不够明确, 但当同组试件破坏形态由帮条钢筋滑移(破坏形态 B)转变至帮条钢筋拉断(破坏形态 C)或连接钢筋拉断(破坏形态 A)时, 其极限拉力会有相对明显的增大, 分析认为, 钢筋浆锚长度更直接地影响了试件的破坏形态, 并最终导致试件极限拉力变化。

JGJ 107—2016《钢筋机械连接技术规程》规定 I 级接头抗拉强度应满足:  $f_t \geq f_{stk}$ , 钢筋拉断; 或  $f_t \geq 1.10f_{stk}$ , 接头破坏。据此判定: 对于 12 mm 直径连

接钢筋, 按  $0.5l_a$  设计即可满足 I 级接头性能要求; 对于 14 mm 直径连接钢筋, 按  $0.6l_a$  设计即可满足 I 级接头性能要求; 对于 16 mm 直径连接钢筋, 按  $0.6l_a$  设计即可保证帮条钢筋拉断, 但由于混凝土中部拉断而无法实现 I 级接头性能。

### 3.3 钢筋黏结应力分析

根据试件分组及其控制破坏形态, 选择有代表性的试件, 其钢筋黏结应力分布曲线见图 7。其中, 横坐标代表钢筋表面应变片与试件中点(原点)的相对位置, 纵坐标代表钢筋黏结应力, 基于相邻测点间钢筋内力平衡原理, 由钢筋应变实测值按式(1)计算得到。

$$\tau_{ij} = \frac{\Delta\sigma_{ij}}{l_{ij}} \times \frac{A_s}{u_s} = \frac{d}{4} \times \frac{E_s(\varepsilon_j - \varepsilon_i)}{l_{ij}} \quad (1)$$

式中:  $\tau_{ij}$  代表相邻  $i, j$  测点之间的平均黏结应力;  $\Delta\sigma_{ij}$  代表相邻  $i, j$  测点之间的钢筋应力差值, 其由钢筋弹性模量  $E_s$  和测点钢筋应变实测值  $\varepsilon_i, \varepsilon_j$  的差值确定;  $A_s$  代表钢筋直径;  $l_{ij}$  代表相邻  $i, j$  测点之间的距离;  $u_s$  代表钢筋周长;  $d$  代表钢筋直径。

由于加载后期应变片损坏严重, 因此, 试验中未能获得加载全过程的连接钢筋应变数据。

从图 7 可以看出, 所有破坏形态下的试件, 其钢筋黏结应力分布状态基本相似, 整个浆锚长度上出现两处相对明显的应力峰值。靠近张拉端不远处, 由于拉力作用形成明显的应力峰值, 并随着浆锚长度增大而逐渐降低; 而靠近接头中部即连接钢筋镦头端, 镦头的机械锚固作用使得局部黏结刚度较浆锚段明显提高, 使得其黏结应力随着荷载增大而更快增长, 形成另一个相对明显的应力峰值。

通过比较可以发现, 连接钢筋直径与混凝土强度相同的试件, 随浆锚长度增大(比较 16-C30-0.5、16-C30-0.6 与 16-C30-0.75), 相同拉力荷载作用下, 钢筋黏结应力峰值有降低趋势, 分析认为较长的钢筋浆锚长度使得钢筋黏结应力分布长度更长, 从而降低了应力峰值; 连接钢筋直径与浆锚长度相同的试件, 钢筋黏结应力与混凝土强度无明显关系, 分析认为, 连接钢筋主要与灌浆料黏结, 接头受拉性能与混凝土材料强度无直接关联。

同时, 试验获得的钢筋黏结应力达到较高水平, C30 混凝土试件钢筋黏结应力最高为 9.72 MPa, C40 混凝土试件钢筋黏结应力最高为 14.4 MPa, 均远高于相应混凝土的抗拉强度, 分析认为可能由于金属波纹管与帮条钢筋笼双重约束下灌浆料的高强性能以及钢筋镦头的有效机械锚固作用避免或减少了钢筋与灌浆料之间的黏结滑移。

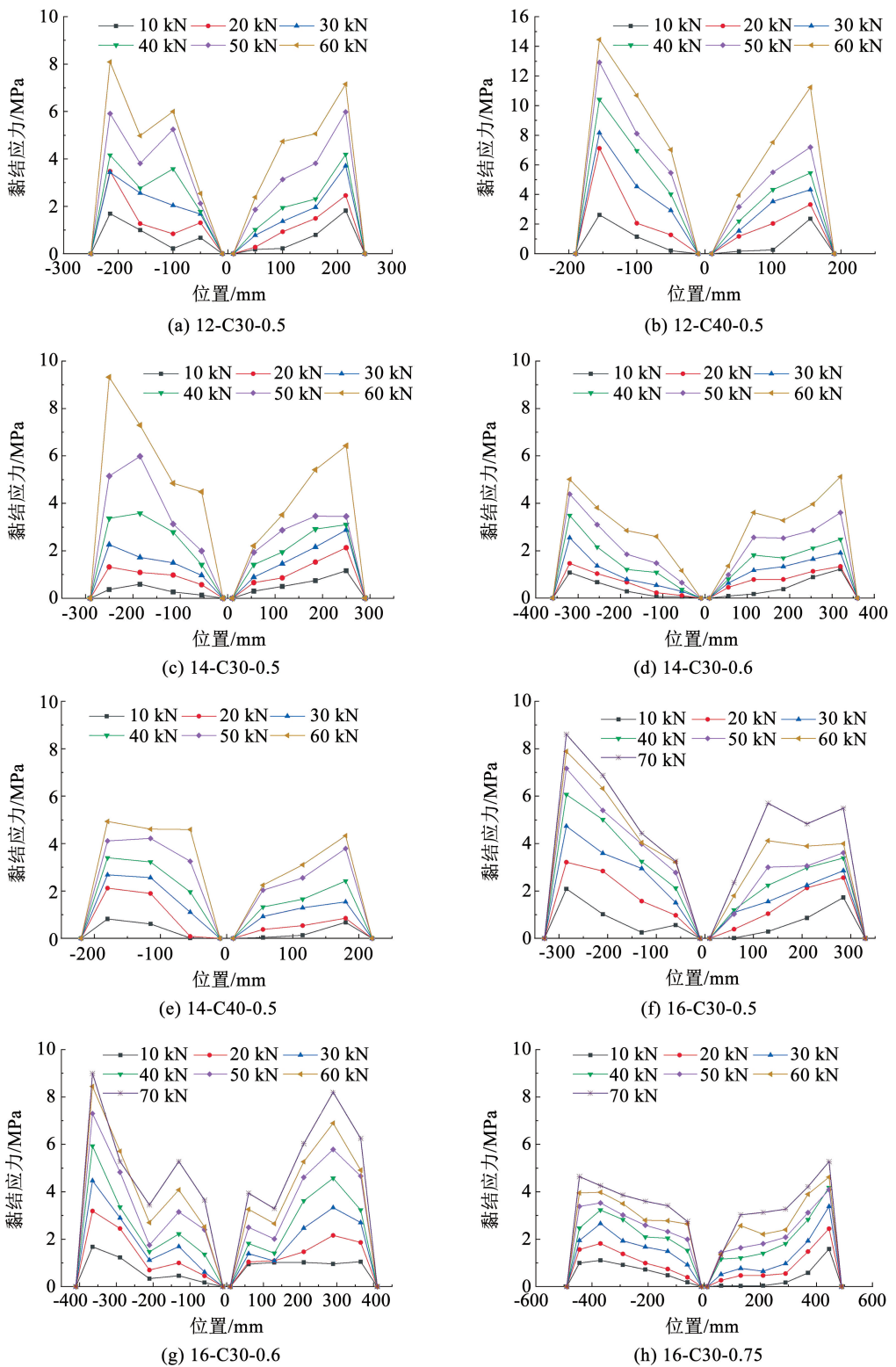


图 7 钢筋黏结应力分布曲线

Fig.7 Rebar bond stress distribution curves

### 3.4 帮条钢筋应力分析

所有试件在拉力达到 30~40 kN 范围内出现横向裂缝,该荷载范围与试件中部截面按混凝土、灌浆料抗拉及同应变下帮条钢筋拉力之和基本接近(C30 试件约 32.4 kN、C40 试件约 35.6 kN)。

根据帮条钢筋应变数据(以 16-C30 组为例,见图 8),试件开裂后,帮条钢筋应力突增,并线性增长,直至帮条钢筋滑移或拉断。同样,由于加载后期应变片严重损坏,未能给出全过程数据。

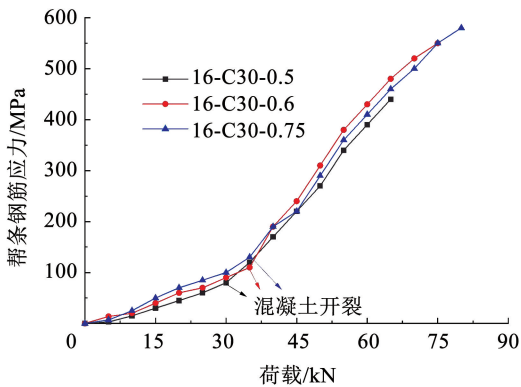


图 8 帮条钢筋应力

Fig. 8 Splice rebar stress

### 3.5 螺旋筋应力分析

螺旋筋应变数据表明,螺旋筋加载过程中应力较小,所有试件螺旋筋峰值应力范围为 36 ~ 58 MPa,且其应力值与连接钢筋直径之间无明显规律性关系。分析认为,单向拉伸试验条件下,螺旋筋无法直接发挥对混凝土的约束作用,其更多作为帮条钢筋的骨架,从而一定程度提高帮条钢筋在混凝土中的锚固性能。混凝土开裂后,由于其跨越裂缝,导致其应力有一定程度增大,但应力水平仍然相对较低。

因此,建议接头受拉设计时,螺旋筋可参考本次试验参数进行设计。

## 4 设计建议

前述相关分析表明,钢筋浆锚对接连接受拉性能主要受钢筋浆锚长度及帮条钢筋承载力控制,此处根据试验结果,对钢筋浆锚长度及帮条钢筋设计提出建议。

### 4.1 钢筋浆锚长度

对于钢筋浆锚对接连接接头,钢筋浆锚长度不仅直接决定连接钢筋锚固受力情况,同时也控制了帮条钢筋承载力的发挥。

根据试件破坏形态及极限承载力分析结果,对于 12 mm 直径连接钢筋试件,当其钢筋浆锚长度为  $0.5l_a$  时,试件即可实现钢筋拉断;对于 14 mm 直径连接钢筋试件,当其钢筋浆锚长度为  $0.6l_a$  时,试件可实现钢筋拉断;对于 16 mm 直径连接钢筋试件,当其钢筋浆锚长度为  $0.6l_a$  时,试件帮条钢筋承载力不足导致提前拉断。由此可见,钢筋浆锚长度为  $0.6l_a$  时,试件破坏形态由帮条钢筋或连接钢筋拉断破坏控制,而不致发生钢筋滑移现象。

同时, $0.6l_a$  条件下各试件的实测钢筋黏结应力处于  $0.5f_a$  与  $0.75f_a$  试件之间,说明相应试件可确保提供可靠的黏结力。

因此,为便于设计,建议按  $0.6l_a$  控制 12 ~ 16 mm

连接钢筋浆锚长度,可保证连接钢筋与帮条钢筋抗拉承载力的有效发挥,并偏安全地未考虑灌浆料的高强度性能,具有足够安全度。

### 4.2 帮条钢筋设计

帮条钢筋发挥着重要的传力作用,且试件中部主要由混凝土及帮条钢筋受拉控制。按  $0.6l_a$  控制钢筋浆锚长度设计时,12、14 mm 直径连接钢筋可断于钢筋,说明帮条钢筋配置可保证接头性能。但 16 mm 直径连接钢筋试件帮条钢筋被拉断,表明其受拉承载力不足导致提前破坏,直接原因则是试件设计时所有试件帮条钢筋配置均为  $4\Phi 8$ ,使得 16 mm 直径连接钢筋试件的帮条钢筋承载力相对偏低。

因此,为确保帮条钢筋破坏晚于连接钢筋破坏,以连接钢筋拉断时、帮条钢筋仍未屈服为前提,构造式(2)。

$$f_{b,y} \times A_b \geq 1.1 \times f_{s,k} \times A_s \quad (2)$$

式中: $f_{b,y}$  为帮条钢筋屈服强度标准值, $A_b$  为帮条钢筋截面面积之和, $f_{s,k}$  为连接钢筋极限强度标准值, $A_s$  为连接钢筋截面面积,1.1 为考虑帮条钢筋不均匀受力的安全系数。

连接钢筋、帮条钢筋均为 HRB400 钢筋时,将  $f_{b,y} = 400$  MPa、 $f_{s,k} = 540$  MPa 代入式(2),可得  $A_b \geq 1.485 \times A_s$ 。

结合试件设计情况,对于 12 mm 直径连接钢筋试件,其帮条钢筋截面之和与连接钢筋截面面积之比为 1.78,满足式(1)的要求,所有试件均为钢筋拉断;对于 14 mm 直径连接钢筋试件,其相应比值为 1.30,稍低于式(2)的要求,考虑材料超强及式(2)保守性,虽然个别试件出现了非理想破坏,但总体上仍然以钢筋拉断或帮条钢筋滑移控制,未发生帮条钢筋拉断的承载力不足现象;对于 16 mm 直径连接钢筋试件,其相应比值仅为 1.0,远低于式(2)的要求,导致多数试件帮条钢筋被拉断,说明在不考虑材料性能离散性及帮条钢筋不均匀受力的前提下,其帮条钢筋承载力仅能刚刚实现与连接钢筋“等强”,安全度明显不足。因此,建议按式(2)进行帮条钢筋“超强”设计,对于 16 mm 直径连接钢筋试件,其帮条钢筋可调整为  $6\Phi 8$ ,使其截面面积之比大于 1.5,以保证接头受力可靠性。

## 5 结论

本文提出了一种预制混凝土构件钢筋浆锚对接连接技术,开展了 12、14、16 mm 三种直径连接钢筋接头受拉性能试验,基于试验现象及结果分析,得到以下结论:

1) 12、14 mm 直径连接钢筋接头分别在浆锚长

度 $0.5l_a$ 、 $0.6l_a$ 时,钢筋拉断,满足I级接头抗拉强度要求;16 mm直径连接钢筋接头在浆锚长度 $0.6l_a$ 时,帮条钢筋承载力不足,导致混凝土被拉断破坏。

2)钢筋浆锚对接连接接头受拉性能由钢筋浆锚长度和帮条钢筋承载力双控。对于钢筋浆锚长度,12~16 mm直径连接钢筋,建议将其控制为 $0.6l_a$ 。对于帮条钢筋设计,在帮条钢筋与连接钢筋牌号相同前提下,12、14 mm直径连接钢筋对应帮条钢筋配置为4 $\Phi$ 8可满足要求,但对于16 mm直径连接钢筋,建议按6 $\Phi$ 8配置,以进一步增加帮条钢筋承载力,使其截面面积之和与连接钢筋截面面积之比宜控制在1.485以上,该措施有效性尚需进一步试验验证。

3)试验采用的钢筋镦头构造,可充分发挥机械锚固作用,保证连接钢筋在小于规范要求的60%基本锚固长度的设计条件下未发生明显黏结失效现象。

4)螺旋筋对接头受拉性能无明显影响,其与帮条钢筋形成钢筋骨架,一定程度提高了帮条钢筋的锚固性能,受拉条件下,可按本次试验参数,即HPB300级钢筋、直径6 mm、螺距40 mm、螺旋箍内径67 mm进行设计,但受压条件下的设计尚需进一步论证。

## 参考文献

- [1]刘良林,肖建庄. 钢筋套筒灌浆连接研究进展[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(1): 235  
LIU Lianglin, XIAO Jianzhuang. An overview of studies on grouted sleeve connections [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(1): 235. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0165
- [2]SAYADI A A, RAHMAN A B A, SAYADI A, et al. Effective of elastic and inelastic zone on behavior of glass fiber reinforced polymer splice sleeve[J]. Construction and Building Materials, 2015(80): 38. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.064
- [3]郑永峰,郭正兴. 变形灌浆套筒连接性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(3): 94  
ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing. Experimental study and finite element analysis on behavior of deformed gout-filled pipe splice[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(3): 94
- [4]亢晋军,韩建强,唐江明,等. 钢套筒-螺栓-结构胶混合连接的钢筋性能研究[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 61  
KANG Jinjun, HAN Jianqiang, TANG Jiangming. Study on properties of rebar with hybrid junction of steel sleeve-bolt-structural adhesive[J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 43(3): 61
- [5]XU F, WANG K, WANG S G, et al. Experimental bond behavior of deformed rebars in half-grouted sleeve connections with insufficient grouting defect [J]. Construction and Building Materials, 2018 (185): 264. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.050
- [6]匡志平,郑冠雨,焦雪涛. 灌浆不足对钢筋套筒连接力学性能影响试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 934  
KUANG Zhiping, ZHENG Guanyu, JIAO Xuetao. Experimental

- study on effect of mechanical behavior of groute sleeve splicing for reinforced bars due to lack of grout[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(7): 934
- [7]李向民,高润东,许清风,等. 灌浆缺陷对钢筋套筒灌浆连接接头强度影响的试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(7): 52  
LI Xiangmin, GAO Rundong, XU Qingfeng, et al. Experimental study on influence of grouting defect on joint strength of grout sleeve splicing of rebars[J]. Building Structure, 2018, 48(7): 52. DOI: 10.19701/j.jzjg.2018.07.010
- [8]郑清林,王霓,陶里,等. 灌浆缺陷对钢筋套筒灌浆连接试件性能影响的试验研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(5): 61  
ZHENG Qinglin, WANG Ni, TAO Li, et al. Experimental study on effects of grout defects on the connection behaviors of grout sleeve splicing for reinforcing bars[J]. Building Science, 2017, 33(5): 61. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2017.05.010
- [9]XU T F, LI Q Y, ZHAO R D, et al. On the early-age bond-slip behavior of an eccentric bar embedded in a grouted sleeve [J]. Engineering Structures, 2019(190): 160. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.04.020
- [10]江佳斐,隋凯,马川峰,等. 预制装配式混凝土螺旋箍筋约束浆锚钢筋搭接性能研究现状[J]. 施工技术, 2018, 47(12): 44  
JIANG Jiafei, SUI Kai, MA Chuanfeng, et al. Review of grout-filled rebar splicing confined by spiral stirrups for precast concrete [J]. Construction Technology, 2018, 47(12): 44
- [11]石棚,王浩,柳家为,等. 钢筋插入式波纹管浆锚连接受拉性能数值分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(6): 810  
SHI Peng, WANG Hao, LIU Jiawei, et al. Numerical analysis of anchorage properties of grouting connection of pre-buried bellows with steel bars inserted [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(6): 810
- [12]郭家旭,胡少伟,齐浩,等. 考虑灌浆料龄期的钢筋-金属波纹管浆锚连接锚固性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(2): 108  
GUO Jiayu, HU Shaowei, QI Hao, et al. Experimental study on anchorage property of rebar-metallic bellows slurry anchor connection considering grout age [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(2): 108
- [13]HOSSEINI S J A, RAHMAN A B A. Effects of spiral confinement to the bond behavior of deformed reinforcement bars subjected to axial tension [J]. Engineering Structures, 2016(112): 1. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.12.038
- [14]MA C, JIANG H, WANG Z. Experimental investigation of precast RC interior beam-column-slab joints with grouted spiral-confined lap connection [J]. Engineering Structures, 2019(196): 109317. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109317
- [15]杨新磊,陆韵芸,赵虎. 基于强搭接理念的钢筋连接技术试验研究[J]. 天津城建大学学报, 2022, 28(4): 248  
YANG Xinlei, LU Yunyun, ZHAO Hu. Experimental study on reinforcement joint technology based on strong lap joint concept [J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2022, 28(4): 248. DOI: 10.19479/j.2095-719x.2204248
- [16]混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015  
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015