

## 套筒约束灌浆料与钢筋黏结强度试验研究

黄远<sup>1,2†</sup>, 张帆<sup>2</sup>, 易伟建<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 为了对装配式混凝土结构中套筒灌浆连接接头钢筋与灌浆料的黏结性能进行研究, 设计了 30 个灌浆套筒连接节点进行拉拔试验, 研究了钢筋锚固长度、灌浆料抗压强度、灌浆料厚度和钢筋直径四个参数对黏结强度的影响。试验结果表明: 随着锚固长度增加, 钢筋与灌浆料之间的黏结强度降低; 随着灌浆料抗压强度增加, 钢筋与灌浆料之间的黏结强度增加; 随着灌浆料厚度的增加, 黏结强度降低, 对于 12 mm 的钢筋, 当灌浆料厚度在 9~11 mm 之间时, 灌浆料厚度对黏结强度影响较小, 当灌浆料厚度超过 11 mm 时, 影响显著增加; 黏结强度随着钢筋直径的增加而增大。根据试验量测的套筒应变和隔离体受力平衡模型, 得到了黏结强度与约束应力、灌浆料抗压强度的关系式, 可供工程实际中套筒灌浆连接节点锚固长度取值参考。

**关键词:** 套筒灌浆; 黏结强度; 破坏形态; 分析模型; 试验研究

**中图分类号:** TU375.4

**文献标志码:** A

## Experimental Study on Bond Strength between Sleeve Confined Grouting and Steel Bars

HUANG Yuan<sup>1,2†</sup>, ZHANG Fan<sup>2</sup>, YI Weijian<sup>1,2</sup>

(1. Hunan Provincial Key Lab on Damage Diagnosis for Engineering Structures, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to study the bond behavior between the steel bar and the grouting material of the sleeve grouting joint in the precast concrete structure, 30 specimens of grouting sleeve are designed for pull-out tests. The effects of four parameters including steel anchorage length, grouting compressive strength, grouting thickness and steel bar diameter on the bond strength of steel bars were studied. The results show that as the anchor length increases, the bond strength between the steel bar and the grout decreases; with the increase of compressive strength of grouting material, the bond strength between reinforcement and grouting material increases. With the thickness of the grout increasing, the bond strength decreases. For 12 mm steel bars, when the thickness of the slurry is between 9 mm and 11 mm, the thickness of the slurry has little effect on the bond strength. When the thickness of the slurry exceeds 11 mm, the effect is significantly increased. The bond strength increases as the diameter of the bar increases. According to the measured sleeve strain and the balance distribution model of the spacer, the relationship between the bond strength and the restraint stress as well as the compressive strength of the grout is obtained, which can provide a reference for

\* 收稿日期:2019-06-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51890901), National Natural Science Foundation of China(51890901)

作者简介:黄远(1982—),男,湖南衡阳人,湖南大学教授,工学博士

† 通讯联系人, E-mail: huangy@hnu.edu.cn

the anchorage length of grouted sleeve connections in the engineering practice.

**Key words:** sleeve grouting; bond strength; failure mode; analytical model; experimental research

钢筋套筒灌浆连接是指在预制构件中预埋套筒,再插入钢筋并灌注浆料而实现钢筋的对接连接,是目前我国装配式混凝土结构受力钢筋连接的主要形式<sup>[1-2]</sup>.

目前,国外学者对不同形式的套筒进行了拉拔性能研究. Ling 等<sup>[3]</sup>设计制作了钢筋焊接套筒(THS)和锥形套筒(WBS); Hosseini 等<sup>[4]</sup>、Alias 等<sup>[5]</sup>设计的螺旋钢筋式套筒; Henin 等<sup>[6]</sup>设计的内螺纹套筒、端部焊钢板式套筒; Seo 等<sup>[7]</sup>设计的钢筋带端头式套筒. 通过改变套筒构造等措施,有效地增加了钢筋与灌浆料之间的黏结性能,避免试件发生钢筋拔出破坏.

国内学者也对钢筋套筒灌浆连接接头的性能进行了研究. 郑永峰等<sup>[8]</sup>设计制作了变形灌浆套筒(GDPS),研究了套筒内腔构造对黏结性能的影响,结果表明:在套筒两端增设肋纹,可有效避免发生套筒灌浆料黏结破坏,当肋纹出现在非弹性段时,减小了钢筋与灌浆料之间的平均黏结强度;黄远等<sup>[9]</sup>设计了14个钢筋半套筒灌浆连接试件进行拉伸试验,研究钢筋直径、钢筋偏移对接头性能的影响,结果表明:钢筋偏移对试件承载力的影响可忽略不计;吴小宝等<sup>[10]</sup>研究了灌浆料养护龄期和钢筋类别对钢筋套筒灌浆连接性能的影响,结果表明:龄期1天以后,荷载位移曲线出现明显的屈服和强化阶段;许成顺等<sup>[11]</sup>研究了钢筋套筒灌浆连接接头在高应力反复拉压荷载作用下的接头性能,结果表明:高应力反复拉压对端部灌浆料造成一定的损伤,但对连接试件的性能无明显影响.

目前国内外套筒灌浆连接接头性能研究主要关注套筒形式的合理性论证,对于套筒中灌浆料和钢筋的黏结性能的研究较少. 因此,本文设计了30个钢筋与套筒约束灌浆料连接试件进行拉拔试验,研究钢筋锚固长度、灌浆料抗压强度、灌浆料厚度和钢筋直径四个参数对黏结强度的影响. 并根据 Einea 等<sup>[12]</sup>提出套筒与灌浆料隔离体约束应力分析模型来分析钢筋与套筒约束灌浆料试件的黏结强度.

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

为了研究套筒中钢筋与灌浆料的黏结性能,设计了10组,每组3个共30个试件. 研究的主要参数包括钢筋锚固长度、灌浆料强度、灌浆料厚度及钢筋直径,试件的参数取值如表1所示. 以标准试件 L16-0.14-D16-4d 为例,第一组表示套筒规格,表示不同钢筋直径(12 mm、16 mm、20 mm)所对应的套筒规格;第二组表示灌浆料的水料比(0.14、0.15、0.16);第三组表示连接钢筋的直径  $d_0$  (12 mm、16 mm、20 mm);第四组表示锚固长度(3  $d_0$ 、4  $d_0$ 、5  $d_0$ ). 套筒连接中的灌浆料厚度  $g$  用公式(1)计算.

$$g = \frac{D - d_0 - 2t}{2} \quad (1)$$

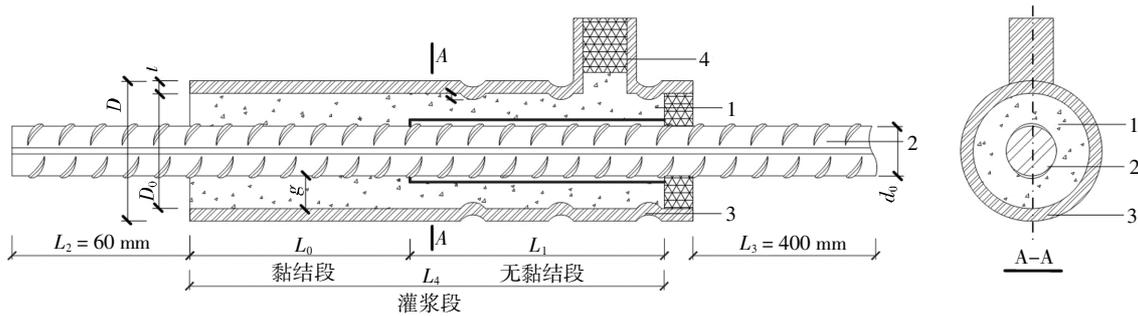
式中: $g$  表示灌浆料厚度 (mm); $D$  表示套筒外径 (mm); $d_0$  表示钢筋直径 (mm); $t$  表示套筒壁厚 (mm). 各符号的含义见图1.

表1 试件参数

Tab.1 Parameters of specimens

试件名称	$D/mm$	$d_0/mm$	$L_0/mm$	$t/mm$	$g/mm$
L12-0.14-D12-4d	38	12	48	3.5	9.5
L16-0.14-D16-4d	42	16	64	3.8	9.2
L16-0.15-D16-4d	42	16	64	3.8	9.2
L16-0.16-D16-4d	42	16	64	3.8	9.2
L16-0.14-D16-3d	42	16	48	3.8	9.2
L16-0.14-D16-5d	42	16	80	3.8	9.2
L16-0.14-D12-4d	42	12	48	3.8	11.2
L20-0.14-D20-4d	45	20	80	4.2	8.3
L20-0.14-D16-4d	45	16	64	4.2	10.3
L20-0.14-D12-4d	45	12	48	4.2	12.3

试件制作时,把全灌浆套筒沿横向中间位置切割成两个大小相等的半套筒,为了保证黏结长度,沿钢筋长度方向设置了无黏结段,无黏结段通过PVC管来隔离钢筋与灌浆料之间的黏结,PVC管缝隙塞入工业橡皮泥以防止漏浆. 钢筋处于套筒中心位置,无偏心. 加载端钢筋伸出400 mm,自由端钢筋伸出60 mm,如图1所示.



1-灌浆料 2-钢筋 3-套筒 4-橡胶塞

图 1 试件尺寸和符号

Fig.1 Dimension of specimen

1.2 材料性能

试验中连接钢筋采用 HRB500 月牙形带肋钢筋,其力学性能如表 2 所示.

表 2 钢筋材料性能

Tab.2 Material properties of reinforcement bar

钢筋直径 $d_0/\text{mm}$	屈服强度 $f_{by}/\text{MPa}$	极限强度 $f_{bu}/\text{MPa}$	断后伸长率/%
12	561	720	8
16	548	700	18
20	550	724	19

试验中灌浆料采用西卡(中国)有限公司生产的 Sika-Grout PC 牌灌浆料. 根据 GB/T 17671—1999 《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》,测得其 40 mm × 40 mm × 160 mm 灌浆料试块抗压强度如表 3 所示. 套筒采用挤压成型钢套筒,其弹性模量  $E_{sl} = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ .

表 3 灌浆料材料性能

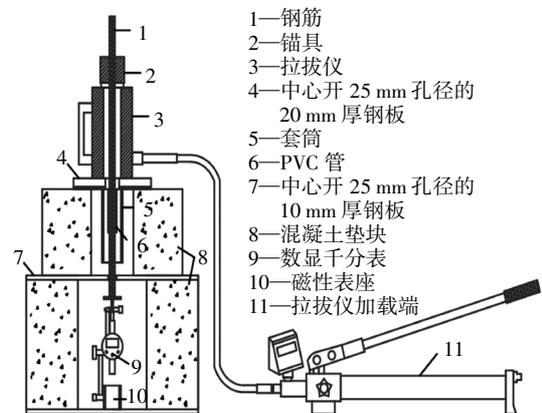
Tab.3 Material properties of grout

水料比	抗压强度 $f_c/\text{MPa}$
0.14	92.5
0.15	81.1
0.16	61.5

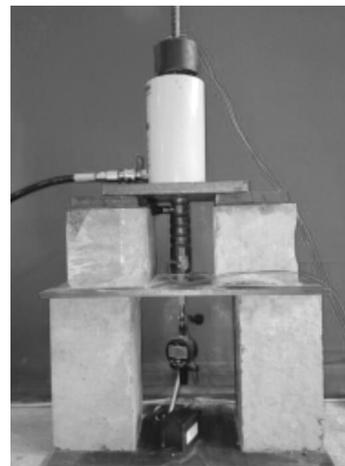
1.3 试验装置及测量布置

试验加载装置如图 2 所示,采用 HC-20 型锚杆拉拔仪进行加载. 数显千分表竖直放置于钢筋自由端部,用以量测拉拔过程中钢筋的滑移. 拉拔荷载 40 kN 之前,加载按力控制,以荷载 2 kN 为增量进行读数,荷载超过 40 kN 以钢筋滑移量每 10  $\mu\text{m}$  为增量进行位移控制读数,以捕获极限荷载. 当拉拔荷载出现明显下降后,以每 500  $\mu\text{m}$  滑移为增量进行读

数,钢筋滑移量达到 20 mm 时停止加载.



(a)加载装置示意图



(b)图片

图 2 试验装置

Fig.2 Test setup

每个试件上设置两个应变片如图 3 所示. S1 沿套筒横向安装在距离套筒自由端  $L_0/3$  黏结段位置处,用以测量套筒由于灌浆料膨胀引起的环向应变; S2 沿加载端钢筋纵向安装在距离套筒承压段一倍钢筋直径位置处,用以测量拉拔试验过程中钢筋的

纵向应变.

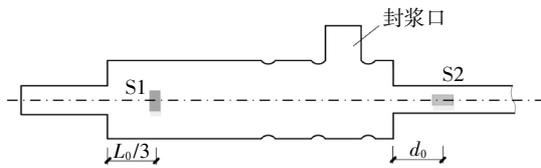


图3 应变片布置  
Fig.3 Strain gauges

## 2 试验结果

各个试件的试验结果如表4所示.  $\varepsilon_{s1}$ 表示试件达到最大承载力时对应的套筒环向应变(mm/mm). 钢筋黏结强度 $\tau_u$ 按公式(2)计算.

表4 试验结果

Tab.4 Test results of specimens

试件编号	$\tau_u$ /MPa	均值/MPa	$s_u$ /mm	$\varepsilon_{s1}/\mu\varepsilon$
L12-0.14-D12-4d-1	34.31		3.8	901
L12-0.14-D12-4d-2	32.46	34.48	2.94	*
L12-0.14-D12-4d-3	36.66		3.6	724
L16-0.14-D16-4d-1	40.10		3.80	893
L16-0.14-D16-4d-2	42.20	40.70	3.90	926
L16-0.14-D16-4d-3	39.80		3.32	980
L16-0.15-D16-4d-1	38.49		3.60	1 034
L16-0.15-D16-4d-2	37.30	38.34	4.35	801
L16-0.15-D16-4d-3	39.22		3.60	925
L16-0.16-D16-4d-1	35.69		2.82	608
L16-0.16-D16-4d-2	35.66	35.45	2.50	623
L16-0.16-D16-4d-3	35.01		4.94	694
L16-0.14-D16-3d-1	44.46		2.45	1 042
L16-0.14-D16-3d-2	43.55	44.68	3.05	906
L16-0.14-D16-3d-3	46.02		4.20	*
L16-0.14-D16-5d-1	33.72		5.02	909
L16-0.14-D16-5d-2	33.10	32.86	2.86	624
L16-0.14-D16-5d-3	31.77		4.60	*
L16-0.14-D12-4d-1	33.52		3.55	392
L16-0.14-D12-4d-2	35.25	34.15	2.88	215
L16-0.14-D12-4d-3	33.67		3.60	756
L20-0.14-D20-4d-1	37.13		3.95	492
L20-0.14-D20-4d-2	38.89	37.97	4.30	553
L20-0.14-D20-4d-3	37.90		4.30	289
L20-0.14-D16-4d-1	39.12		3.38	746
L20-0.14-D16-4d-2	38.56	38.63	3.16	574
L20-0.14-D16-4d-3	38.21		3.2	470
L20-0.14-D12-4d-1	31.96		3.00	150
L20-0.14-D12-4d-2	30.89	32.02	2.34	189
L20-0.14-D12-4d-3	33.20		3.42	139

注:“\*”表示试验过程中应变片损坏,未能测量得到数据.

$$\tau_u = \frac{P_u}{\pi d_0 L_0} \quad (2)$$

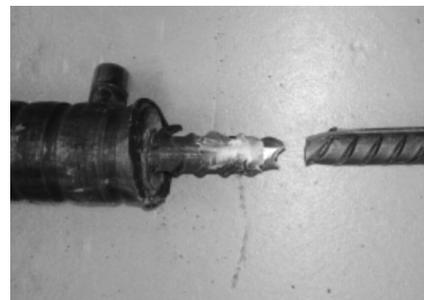
式中: $\tau_u$ 表示钢筋黏结强度(MPa), $P_u$ 表示试件最大承载力(kN), $d_0$ 表示钢筋直径(mm), $L_0$ 表示钢筋锚固长度(mm).

试件的破坏模式为两种:

1)钢筋拔出破坏,如图4(a)所示:试件加载初期黏结-滑移曲线表现出良好的弹性响应,同时试件内灌浆料沿钢筋肋纹表面产生微裂纹并逐渐发展,试件刚度逐渐降低;随着钢筋屈服,钢筋明显伸长,表现在上部钢筋锚具发生明显位移,下部千分表读数基本不变,拉拔仪荷载上下波动;钢筋屈服后,试件处于强化阶段,荷载、滑移持续增加,达到试件最大承载力后,荷载逐渐下降,钢筋的滑移量明显增加,加载到20 mm时,停止加载,如图5所示.



(a)钢筋拔出



(b)钢筋拉断

图4 试件破坏形态

Fig.4 Specimen failure patterns

2)钢筋拉断破坏,如图4(b)所示:只有试件L16-0.14-D16-5d-2发生这种破坏.钢筋拉断发生在试件达到最大承载力后荷载下降段,断裂位置处于距离套筒端部20 mm位置,有明显的颈缩现象.试件最大承载力133.03 kN.

套筒环向应变随着荷载的变化曲线如图6所示.在拉拔荷载初期,套筒环向呈现线性拉伸应变,当荷载达到峰值强度后,套筒环向应变随着荷载的增加而迅速增大,说明此时套筒对灌浆料产生了约束作用.

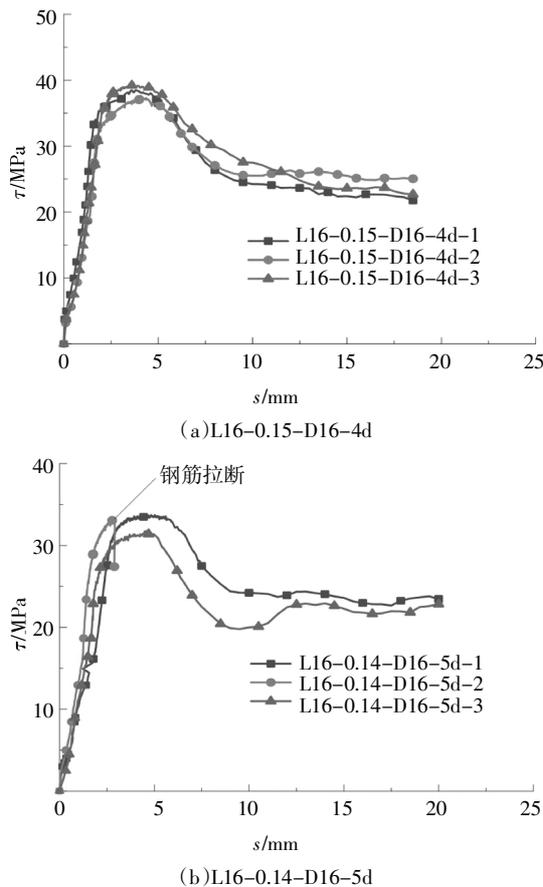


图5 试件典型黏结-滑移曲线

Fig.5 Specimen bond stress-slip curves

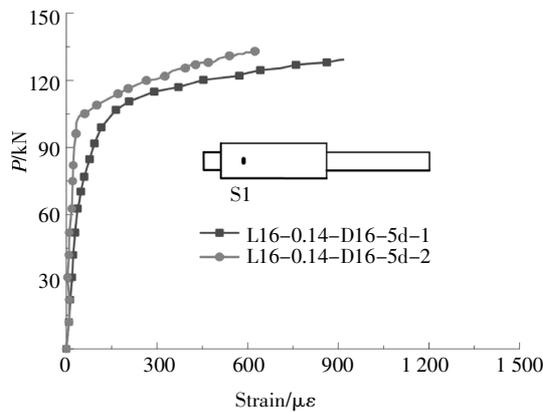


图6 套筒环向应变

Fig.6 Transverse strain responses of sleeve

### 3 试验结果分析

#### 3.1 钢筋锚固长度

图7为16mm直径钢筋的黏结强度在不同锚固长度下的变化情况. 钢筋锚固长度从 $3d_0$ 增加到 $4d_0$ , 钢筋黏结强度平均值从44.68 MPa降低到40.7 MPa, 降低了8.9%, 锚固长度从 $4d_0$ 增加到 $5d_0$ , 黏结

强度平均值从40.7 MPa降低到32.86 MPa, 降低了19.3%. 黏结强度随着锚固长度的增加而降低, 这是由于黏结强度沿钢筋锚固长度范围内分布不均匀导致的, 黏结强度在加载端附近存在一个峰值, 锚固长度越大, 其端部黏结强度峰值对平均黏结强度影响越小, 因此黏结强度越小.

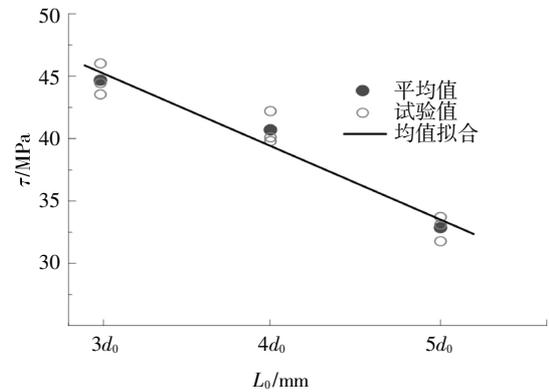


图7 锚固长度对黏结强度的影响

Fig.7 Influence of anchorage length on bond strength

#### 3.2 灌浆料抗压强度

图8为钢筋黏结强度随灌浆料抗压强度变化的情况. 抗压强度从61.5 MPa增加到81.1 MPa, 黏结强度平均值增加了8.2%, 抗压强度从81.1 MPa增加到92.5 MPa时, 黏结强度平均值增加了6.2%. 黏结强度随着抗压强度的增加而增加, 这是因为试件均为钢筋拔出破坏, 其承载力取决于钢筋与灌浆料的机械咬合区域的抗剪强度, 而灌浆料抗压强度增加, 增强了灌浆料的抗剪强度, 黏结强度增加.

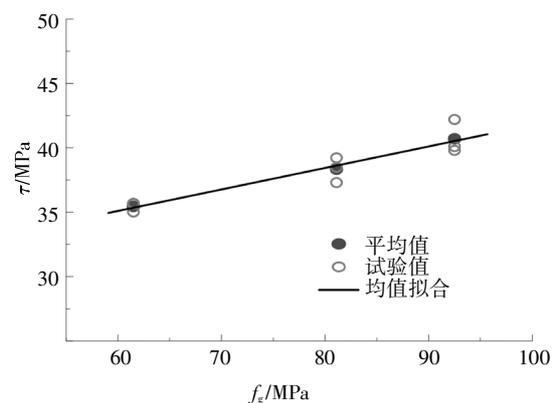


图8 灌浆料抗压强度对黏结强度的影响

Fig.8 Influence of grouting compressive strength on bond strength

#### 3.3 灌浆料厚度

试验通过保持钢筋直径不变, 改变套筒规格的方式改变套筒与钢筋之间的灌浆料厚度, 研究灌浆

料厚度对钢筋黏结性能的影响. 图9为直径12mm的钢筋黏结强度随灌浆料厚度变化的情况. 灌浆料厚度由9.5mm增加到11.2mm, 由11.2mm增加到12.3mm, 黏结强度平均值分别降低了1.0%和6.2%.

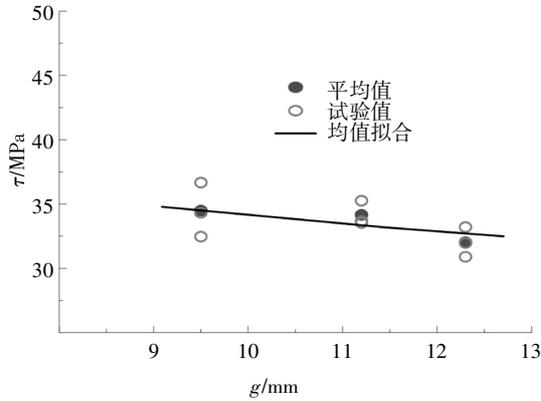


图9 灌浆料厚度对黏结强度的影响

Fig.9 Influence of grout thickness on bond strength

### 3.4 钢筋直径

图10给出了黏结强度随着钢筋直径变化的数据. 钢筋直径从12mm增加到16mm时, 黏结强度呈增大趋势, 钢筋直径从16mm增加到20mm时, 黏结强度又发生了减小. 由于本次试验中黏结强度随着钢筋直径变化的规律不明显, 因此钢筋直径对黏结强度影响还需要进一步的研究.

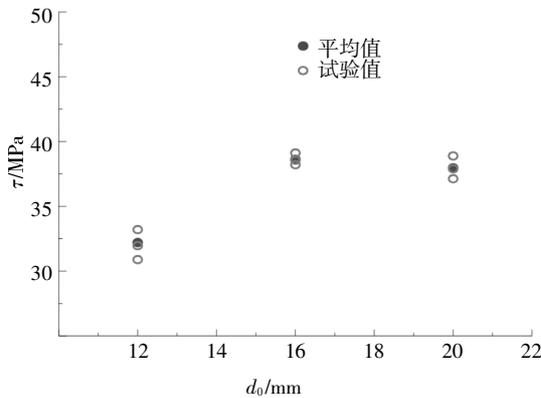


图10 钢筋直径对黏结强度的影响

Fig.10 Influence of reinforcement diameter on bond strength

## 4 黏结强度理论分析

为了分析钢筋与灌浆料之间的黏结强度, 采用Einea等<sup>[12]</sup>提出的套筒与灌浆料隔离体约束应力分析模型来分析钢筋套筒约束灌浆料试件的黏结性能. 如图11所示, 可以推导出了环向拉力 $T_{s1}$ 与约束应力 $u_n$ 的关系.

模型分析时基于以下4个假定:

- 1)由套筒引起的约束应力沿钢筋锚固长度分布均匀;
- 2)约束应力可由套筒的环向应变量化得出;
- 3)黏结应力沿钢筋锚固长度范围内分布均匀;
- 4)由套筒引起的总约束力大小等于作用在钢筋上的总约束力.

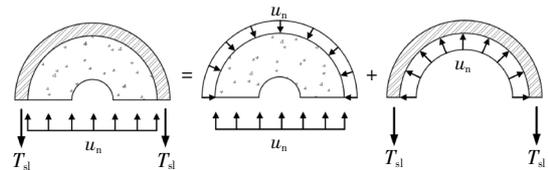


图11 灌浆套筒约束应力模型

Fig.11 Confined stress model of grouting sleeve

套筒的环向拉伸应力是套筒环向应变 $\epsilon_{s1}$ 和弹性模量 $E_{s1}$ 的函数, 如式(3)所示. 同时, 拉伸应力也受套筒横截面积的影响, 如式(4)所示.

$$\sigma_{s1} = \epsilon_{s1} \cdot E_{s1} \tag{3}$$

$$\sigma_{s1} = \frac{T_{s1}}{t} \tag{4}$$

式中: $\sigma_{s1}$ 表示套筒环向拉伸应力(MPa),  $\epsilon_{s1}$ 表示套筒环向应变 (mm/mm),  $E_{s1}$ 表示套筒弹性模量(MPa);  $t$ 表示套筒厚度(mm).

综合公式(3)、(4)可得:

$$T_{s1} = \epsilon_{s1} \cdot t \cdot E_{s1} \tag{5}$$

根据静力平衡条件可得:

$$2T_{s1} = u_n \cdot D_0 \tag{6}$$

联立公式(5)、(6)得到:

$$u_n = \frac{2\epsilon_{s1} \cdot t \cdot E_{s1}}{D_0} \tag{7}$$

式中: $T_{s1}$ 表示套筒环向拉力(N),  $u_n$ 表示套筒提供的约束应力(MPa),  $D_0$ 表示套筒内径(mm).

Untrauer和Henry<sup>[13]</sup>研究表明, 钢筋与混凝土的黏结强度 $\tau_u$ 与钢筋上的约束应力 $u_n$ 和灌浆料抗压强度 $f_g$ 成比例增加, 其关系式为:

$$\tau_u = (A + B\sqrt{u_n}) \cdot \sqrt{f_g} \tag{8}$$

将式(7)代入式(8), 可得:

$$\tau_u = (A + B\sqrt{\frac{2\epsilon_{s1} \cdot t \cdot E_{s1}}{D_0}}) \cdot \sqrt{f_g} \tag{9}$$

式中: $A$ 、 $B$ 通过实验数据回归拟合得到. 将本文试验测试得到的套筒数据(表1)、灌浆料强度(表3)和黏结强度及对应的应变数据(表4)代入公式(9)进行回归分析, 可以回归得到参数 $A$ 取为3.1,  $B$ 取为0.11. 因此钢筋黏结强度的拟合公式如下:

$$\tau_u = (3.1 + 0.11\sqrt{u_n}) \cdot \sqrt{f_g} \quad (10)$$

根据黏结强度  $\tau_u$  可得钢筋套筒约束灌浆连接试件的最大承载力  $P_u$  计算式如下:

$$P_u = \pi \cdot L_0 \cdot d_0 \cdot \tau_u \quad (11)$$

根据式(10)计算得到的各个试件的黏结强度代入式(11)可以得到各个试件的理论计算承载力  $P_{u,pre}$ , 理论计算承载力  $P_{u,pre}$  和试验承载力  $P_{u,exp}$  对比如图12所示。

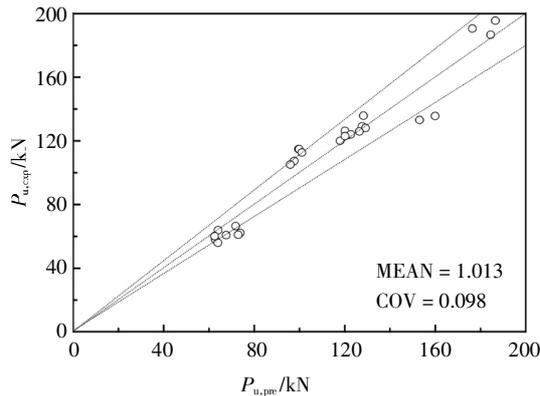


图12 简化公式结果与试验结果对比

Fig.12 Comparison between predictions and test results

## 5 结论

通过套筒灌浆连接静力拉拔试验和分析,可以得到以下结论:

1) 钢筋锚固长度增加,试件最大承载力增加;而随着锚固长度增加,导致钢筋上的黏结应力分布不均匀,黏结强度降低;

2) 灌浆料抗压强度增加,增加了灌浆料抗剪强度,因此试件最大承载力和黏结强度均增加;

3) 套筒内灌浆料厚度增加,钢筋与灌浆料的黏结强度减小,当灌浆料厚度超过 11 mm 时,影响更大;

4) 通过应力模型推导了黏结强度与约束应力、灌浆料抗压强度的关系式,可供工程实际中套筒灌浆连接节点锚固长度取值参考。

## 参考文献

[1] 高向玲,徐龙标,李杰,等. 预制混凝土梁柱节点试验及框架受力性能分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(7):97—103.  
GAO X L, XU L B, LI J, *et al.* Tests of precast concrete beam-column joints and analysis on mechanical behavior of prefabricated RC frame structures [J]. Journal of Hunan University (Natural Sci-

ences), 2017, 44(7): 97—103. (In Chinese)

[2] 徐咏,熊峰,陈江. 装配式剪力墙竖向焊接节点抗剪性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(5): 53—61.  
XU Y, XIONG F, CHEN J. Shear behavior of vertical welded connection in precast shear wall [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(5): 53—61. (In Chinese)

[3] LING J H, RAHMAN A B A, IBRAHIM I S, *et al.* Tensile capacity of grouted splice sleeves [J]. Engineering Structures, 2016, 111: 285—296.

[4] 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—13.

[5] 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.

[6] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction [J]. Engineering Structures, 2015, 83: 154—162.

[7] SEO S Y, NAM B R, KIM S K. Tensile strength of the grout-filled head-splice-sleeve [J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 155—166.

[8] 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—102.  
ZHENG Y F, GUO Z X. Experimental study and finite element analysis on behavior of deformed grout-filled pipe splice [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(3): 94—102. (In Chinese)

[9] 黄远, 朱正庚, 黄登, 等. 钢筋半套筒灌浆连接的静力拉伸试验研究 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 26—32.  
HUANG Y, ZHU Z G, HUANG D, *et al.* Investigation into half grout sleeve splicing for rebars via static tensile test [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2016, 44(2): 26—32. (In Chinese)

[10] 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): 77—82.  
WU X B, LIN F, WANG T. 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): 77—82. (In Chinese)

[11] 许成顺, 刘洪涛, 杜修力. 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—184.  
XU C S, LIU H T, DU X L. Experimental study on connection performance of grouted sleeve splicing for rebars under high stress repeated tension-compression loading [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(12): 178—184. (In Chinese)

[12] EINEA A, YAMANE T, TADROS M K. Grout-filled pipe splices for precast concrete construction [J]. PCI Journal, 1995, 40(1): 82—93.

[13] UNTRAUER R E, HENRY R L. Influence of normal pressure on bond strength [J]. ACI Structural Journal, 1965, 65: 577—585.