

## 不同搭接长度下套筒约束浆锚搭接接头 力学试验研究\*

余琼<sup>†</sup>, 许雪静, 袁炜航, 许志远, 吕西林  
(同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

**摘要:**为改善已有灌浆套筒施工的便利性,提出了一种新型套筒约束浆锚搭接接头,研究了该接头的力学性能.进行了不同搭接长度下16个该搭接接头的拉伸试验,研究了接头的破坏形态、力-位移曲线、承载力、延性、钢筋应变、套筒环向应变等,并基于试验数据及平截面假定对套筒截面的内力进行分析,解释了随搭接长度变化套筒环向(拉、压)应变的变化过程.由于套筒的约束,接头的搭接长度大大减小;试验中套筒的偏转导致试件的刚度、延性小于对应钢筋的刚度、延性;搭接接头套筒中部拉力比对接接头小,对套筒材料抗拉性能要求低,搭接接头钢筋通过灌浆料传递到套筒上的剪应力比对接接头小,对套筒与灌浆料的界面粘结性能要求低.当套筒长度短时,钢筋与灌浆料间出现滑移,使得套筒中部钢筋的拉力变大,套筒与灌浆料合力为压力,反之,套筒与灌浆料合力为拉力;随着搭接长度的增加,加载过程中套筒中部近钢筋侧环向最大压应变增大;极限荷载时,随着搭接长度增加,套筒各测点环向拉应变总体呈降低的趋势.

**关键词:**灌浆料膨胀;套筒环向压应变;搭接与对接;套筒偏转;微量滑移  
**中图分类号:**TU375 **文献标志码:**A

## Experimental Study of Mechanical Properties of Grouted Sleeve Lapping Connector with Different Lap Lengths under Tensile Load

YU Qiong<sup>†</sup>, XU Xuejing, YUAN Weihang, XU Zhiyuan, LU Xilin

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

**Abstract:** To improve the convenience of grouting sleeve construction and explore its mechanical properties, a newly grouted sleeve lapping connector that two overlapped bars were placed, clinging to the wall of a hollow cylindrical standard steel pipe and anchored by high strength grout, was put forward. 16 specimens varied in lap length were tested under tensile load. The failure mode, load displacement curve, ductility and hoop strain of sleeve were discussed. Based on the experimental results and plane section assumption, mechanical property analysis of grouted sleeve lapping connector were conducted. The relationship of sleeve hoop strain varying with lap length was studied. The lapping length is greatly reduced due to sleeve constraint. Because of sleeve deflection, the rigidity and ductility of the specimen are smaller than that of the corresponding steel. The tension in the middle of the lapping connector and the shear transferred through grout to sleeve are smaller than that in butting connector, so there is a lower requirement in anti-pull property of sleeve and bond property between grout and sleeve. When the sleeve length is short,

\* 收稿日期:2016-09-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51322803), National Natural Science Foundation of China(51322803)

作者简介:余琼(1968—),女,安徽庐江人,同济大学副教授,硕士生导师

通信联系人, E-mail: yiongyu2005@163.com

slip in the interface of steel and grout increases the tension of middle steel, thus the resultant force of the sleeve and grout is pressure, on the contrary, the resultant force is tensile force. As the lap length increases, the maximum hoop compressive strain increases in the middle of the sleeve during the loading process. At ultimate load, as the lap length increases, the hoop tensile strain of the sleeve decreases.

**Key words:** expansion of grouting material; hoop strain of the sleeve; lapping and butting connector; deflection of sleeve; microslip

灌浆连接是目前应用较为广泛的预制装配式混凝土结构中钢筋的连接方式,主要有以下几种形式:套筒灌浆(对接)连接,波纹管浆锚连接和插入式预留孔箍筋约束灌浆搭接。

套筒灌浆对接连接如图 1(a)所示,即在对接的两个钢筋外部放置套筒,注入灌浆料,实现两根钢筋的连接,是目前应用最为广泛的接头,有相关的国家规范如:《钢筋连接用灌浆套筒》JG/T 398、《钢筋连接用套筒灌浆料》JG/T 40、《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》JGJ-355-2015.该接头插入钢筋外壁与套筒内壁间隙约为 5~6 mm,施工难度大,工期长;套筒壁厚约 4~8 mm 厚,对其材料、铸造工艺要求较高,造价高。

波纹管连接如图 1(b)所示,在混凝土中预埋波纹管,钢筋插入波纹管,再注入灌浆料以锚固钢筋,该接头在一定范围内有应用,已有规范《预制装配整体式剪力墙结构体系技术规程》(江苏)DGJ32/TJ125-2010、《预应力混凝土用金属波纹管》JG 225-2007.该接头钢筋插入波纹管长度过长,施工难度大,工期长;但金属波纹管提供横向约束,造价较低。

套筒灌浆对接接头的研究较多,文献[1]试验研究了钢筋外形、套筒材料、筒壁构造形式对接头承载力的影响,接头有 4 种破坏形态:一般为套筒外钢筋拉断、钢筋与灌浆料滑移破坏;当套筒内壁未

进行刻痕处理,试件会发生对接钢筋间灌浆料拉断并从套筒内拔出破坏;当套筒为铝材时试件出现筒壁拉断破坏.文献[2]试验研究了套筒长度和形状对接头承载力的影响,并对接头的工作机理和受力特点进行了分析.文献[3]试验研究了套筒内部放置箍筋对接头承载力的影响,而波纹管连接的研究较少,仅文献[4-5]试验研究了钢筋直径、锚固长度对其承载力的影响.以上两种连接都是单根钢筋锚入灌浆料中,由套筒或波纹管约束来提高接头承载力。

插入式预留孔箍筋约束灌浆搭接<sup>[6]</sup>连接是在预埋钢筋的旁侧预留表面粗糙的孔洞,钢筋插入孔洞中,再灌入灌浆料,而预埋、后插入钢筋外围预设沿孔洞长度方向的螺旋筋,约束钢筋的搭接连接,如图 1(c)所示,已有相关规范《装配整体式剪力墙结构技术规程(试行)》(安徽)DB34/T 1874-2013、《装配整体式混凝土结构技术规程》(辽宁)DB21/T1868-2010.该接头钢筋插入螺旋箍筋长度过长,施工难度大,工期长;使用箍筋提供横向约束,造价低。

套筒约束浆锚搭接<sup>[7]</sup>接头是在两搭接钢筋外部放置套筒,并注入灌浆料,实现两钢筋的连接,如图 1(d)所示,这是笔者 2014 年在已有的接头基础上提出的钢筋连接专利技术.套筒约束浆锚搭接接头具有套筒直径较大,装配施工便利、造价低等优势,是比已有的接头技术更进步的专利技术。

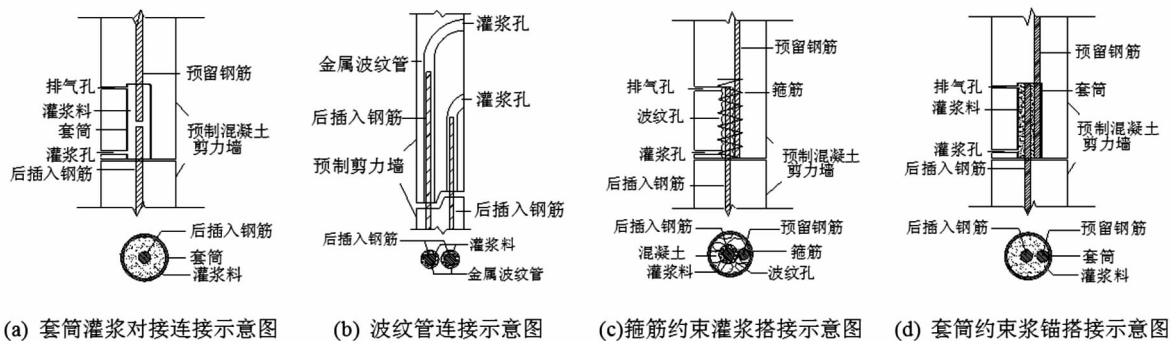


图 1 接头构造示意图

Fig.1 Forms of grouted connection joints of reinforcement bars

以上两种连接都是利用钢筋搭接传力,并利用箍筋或套筒约束,提高接头承载力.箍筋约束灌浆搭接接头研究较少,仅文献[6,8]试验研究了接头受力性能,并给出接头力学分析模型.套筒约束浆锚搭接的研究刚起步,本文探索性研究这一接头的力学性能.

本文进行了16个不同搭接长度的套筒约束浆锚搭接接头力学试验,研究了试件的破坏形态,分析了搭接长度对接头承载力、套筒环向应变的影响,对比分析套筒约束浆锚搭接和对接接头工作机理和力学性能,为该接头的应用奠定理论基础.

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计及制作

试验取两根搭接钢筋贴近且均靠近套筒的较不利的工况进行.为固定钢筋位置,将预留钢筋点焊在两端筒壁后,将后插入钢筋紧贴预留钢筋及筒壁放置,后灌入灌浆料.试件示意图如图2所示,试件的尺寸见表1.

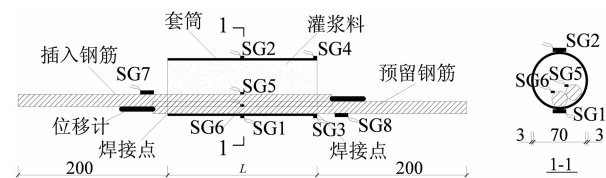


图2 试件示意图及应变片粘贴位置(单位:mm)

Fig.2 Details of specimens and location of strain gauges (unit: mm)

表1 试件尺寸

Tab.1 Dimensions of specimens

| 套筒        | 钢筋直径 $d$ /mm | 搭接长度 $L$ /mm | 数量 |
|-----------|--------------|--------------|----|
| 套筒内径      |              | 100          | 3  |
| $D=70$ mm |              | 150          | 4  |
|           | 18           | 200          | 3  |
| 套筒壁厚      |              | 250          | 3  |
| $S=3$ mm  |              | 300          | 3  |

### 1.2 材料力学性能

型钢套筒为16 Mn钢材,钢筋强度等级均为HRB400,钢筋实测屈服强度为469.2 MPa,极限抗拉强度为602.5 MPa.按文献[9]测得40 mm×40 mm×160 mm的灌浆料试件28 d抗折、抗压强度分别为15.1 MPa、71.2 MPa;参考文献[10]测得150 mm×150 mm×150 mm灌浆料立方体劈裂抗拉强度为6.0 MPa.

### 1.3 加载制度及量测内容

加载前,在预留和后插入钢筋上分别粘贴SG5,6,7,8应变片测量钢筋应变,在筒壁粘贴SG1,2,3,4应变片测量套筒环向应变,具体位置见图2.

试验在万能试验机上进行,屈服前匀速加载,加载速率为2 kN/s,加载至110 kN(钢筋接近屈服)后,以100 mm/min的速率进行位移控制,直至钢筋拉断或钢筋滑移,无法加载.

## 2 试验结果及分析

加载前后试件偏转如图3所示.搭接接头两根钢筋不在同一条直线上,即加载点A点与B1点不在一直线上,加载后,由于侧向无约束,试件会发生偏转,钢筋保持在同一直线AB1上,上部钢筋向右,下部钢筋向左,引起钢筋的弯折和套筒的转动.

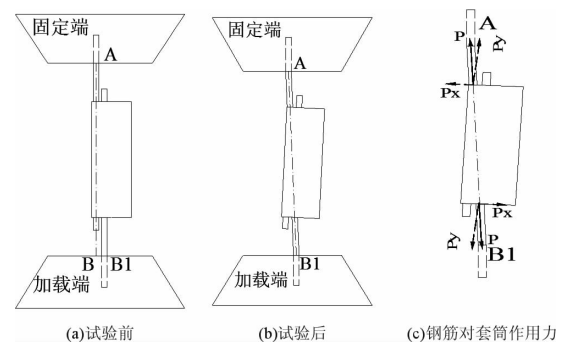


图3 加载后试件偏转及引起力示意图

Fig.3 Deflection of specimen after test and force caused by deflection

### 2.1 试件承载能力

各试件的极限承载力 $P_u$ 和抗拉强度 $f_u$ 、破坏形态如表2所示.

《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》<sup>[11]</sup>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(540 MPa),且破坏时应断于接头外钢筋.接头强度评定示于表3.可见250 mm、300 mm系列试件承载力均满足规范要求,有了套筒的约束,接头的搭接长度大大降低.

表2还列出了钢筋屈服位移 $\delta_y$ 、接头破坏位移 $\delta_u$ 、位移延性系数 $\Delta = \delta_u / \delta_y$ (位移为两加载点间位移),钢筋滑移接头延性系数为1.43~2.21,钢筋拉断接头延性系数为3.33~4.42,钢筋拉断接头延性系数大于钢筋滑移试件<sup>[12]</sup>推荐结构的延性系数为4,部分钢筋拉断试件延性系数比4略小),钢筋材性试验的延性系数为6.4,大于接头的延性,这是与接头在拉伸过程中产生偏转有关,如图3(a)、3

(b)所示,接头拉伸过程中偏转引起加载点间位移增加为 AB1 间长度减去 AB 间长度,屈服荷载时,该量在屈服位移中占的份额大,极限荷载时,该量在极限位移中占的份额小,这样导致接头延性系数降低.当该类接头运用于结构中,周边混凝土可约束接头偏转,接头实际延性降低不多.

表 2 试验数据汇总

Tab.2 Results of specimens under tensile load

| 试件    | $P_u$ /kN | 破坏模式 | $f_u$ /MPa | 是否满足规范 | $\delta_y$ /mm | $\delta_u$ /mm | $\Delta$ |
|-------|-----------|------|------------|--------|----------------|----------------|----------|
| 100-1 | 77.14     | 钢筋滑移 | 303.14     | N      | —              | —              | —        |
| 100-2 | 66.67     | 钢筋滑移 | 261.99     | N      | —              | —              | —        |
| 100-3 | 88.17     | 钢筋滑移 | 346.49     | N      | —              | —              | —        |
| 150-1 | 148.66    | 钢筋滑移 | 584.20     | N      | 23             | 33             | 1.43     |
| 150-2 | 154.92    | 钢筋滑移 | 608.80     | N      | 5              | 9              | 1.80     |
| 150-3 | 142.53    | 钢筋滑移 | 560.11     | N      | 14             | 31             | 2.21     |
| 150-4 | 155.04    | 钢筋拉断 | 609.27     | Y      | 18             | 61             | 3.39     |
| 200-1 | 145.61    | 钢筋滑移 | 572.21     | N      | 18             | 39             | 2.17     |
| 200-2 | 154.37    | 钢筋拉断 | 606.64     | Y      | 15             | 55             | 3.67     |
| 200-3 | 154.05    | 钢筋拉断 | 605.38     | Y      | 15             | 58             | 3.87     |
| 250-1 | 153.12    | 钢筋拉断 | 601.72     | Y      | 22             | 75             | 3.41     |
| 250-2 | 154.63    | 钢筋拉断 | 607.66     | Y      | 14             | 56             | 4.00     |
| 250-3 | 156.11    | 钢筋拉断 | 613.47     | Y      | 18             | 60             | 3.33     |
| 300-1 | 155.14    | 钢筋拉断 | 609.66     | Y      | 16             | 67             | 4.19     |
| 300-2 | 156.05    | 钢筋拉断 | 613.24     | Y      | 15             | 65             | 4.33     |
| 300-3 | 154.55    | 钢筋拉断 | 607.34     | Y      | 12             | 53             | 4.42     |

注:1)以 100-1 为例,100 表示搭接长度,1 表示 1 号试件;

2)N 表示试件的强度指标不满足规范要求, Y 表示强度指标满足规范要求.

表 3  $P=66.7$  kN 及极限荷载时试件中部截面受力

Tab.3 Force of middle section of connectors under  $P=66.7$  kN and  $P=P_u$

| 试件    | $P=66.7$ kN |            |                     | $P_u$ | $P=P_u$   |            |                     |
|-------|-------------|------------|---------------------|-------|-----------|------------|---------------------|
|       | $P_a$ /kN   | $P'_a$ /kN | $P_{st}+P_{ct}$ /kN |       | $P_a$ /kN | $P'_a$ /kN | $P_{st}+P_{ct}$ /kN |
| 100-1 | 2.0         | 61.1       | 3.6                 | 77.1  | -3.4      | 76.1       | 4.4                 |
| 100-2 | 88.1        | 86.5       | -107.9              | 66.7  | 88.1      | 86.5       | -107.9              |
| 100-3 | 30.0        | 101.8      | -65.1               | 88.2  | 34.6      | 119.4      | -65.8               |
| 150-1 | 33.1        | 49.9       | -16.3               | 148.7 | 117.1     | 91.5       | -60.0               |
| 150-2 | 41.7        | -1         | -16.7               | 154.9 | —         | 119.4      | —                   |
| 150-3 | 35.1        | 42.8       | -11.2               | 142.5 | 96.3      | 90.1       | -43.9               |
| 150-4 | 43.8        | 28.5       | -5.6                | 155.0 | 106.9     | 92.9       | -44.8               |
| 200-1 | 20.1        | 42.9       | 3.7                 | 145.6 | 74.7      | 112.0      | -41.1               |
| 200-2 | 18.6        | 30.0       | 18.1                | 154.4 | 82.6      | 109.2      | -37.4               |
| 200-3 | —           | 22.7       | —                   | 154.1 | 95.0      | —          | —                   |
| 250-1 | 29.1        | 18.0       | 19.6                | 153.1 | 104.4     | 52.1       | -3.4                |
| 250-2 | 19.6        | 17.2       | 29.9                | 154.6 | 59.2      | 72.4       | 23.0                |
| 250-3 | 15.8        | 17.4       | 33.5                | 156.1 | 77.2      | 77.0       | 1.9                 |
| 300-1 | 18.1        | 17.2       | 31.4                | 155.1 | 65.3      | 83.8       | 6.1                 |
| 300-3 | —           | 16.4       | —                   | 154.6 | —         | 55.8       | —                   |

注:表示无数据

## 2.2 试件破坏形态

试件有两种破坏形态:套筒外部钢筋拉断、钢

筋与灌浆料滑移,分别如图 4(a)和 5(a)所示,未出现文献[1]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,受灌浆料与钢筋横肋间的机械咬合作用,钢筋受拉时,出现端部灌浆料局部脱落的现象,如图 4(c)、5(b)所示.



(a) 钢筋拉断破坏



(b) 试件一端破坏情况



(c) 试件另一端破坏情况

图 4 250-3 试件外部钢筋拉断破坏

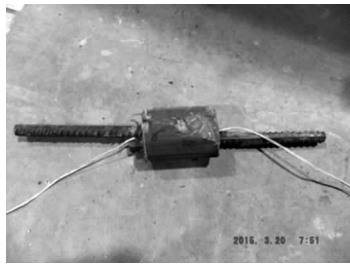
Fig.4 Failure modes of bar tensile failure of specimen 250-3

## 2.3 试件的力-位移曲线分析

图 6(a)、图 6(b)为试件力-位移曲线的对比,可见,由于接头发生了偏转,试件的力-位移曲线屈服台阶不明显,绝大部分试件的刚度小于钢筋材性试验的刚度.图 6(c)为钢筋滑移、拉断典型力-位移曲线.

150-4,200-2,200-3 及 250 组、300 组试件,破坏形态均为套筒外钢筋拉断,力-位移曲线与钢筋拉伸试验的力-位移曲线相同,下降段基本为直线下降(图 6(c)BC段),试件的破坏均为延性.

150-1,150-2,150-3,200-1 试件为钢筋与灌浆料滑移破坏.由于钢筋已屈服,进入强化段,所以钢筋屈服后位移曲线仍有一定上升段;当拉力达到峰



(a) 钢筋与灌浆料滑移破坏



(b) 试件一端破坏情况

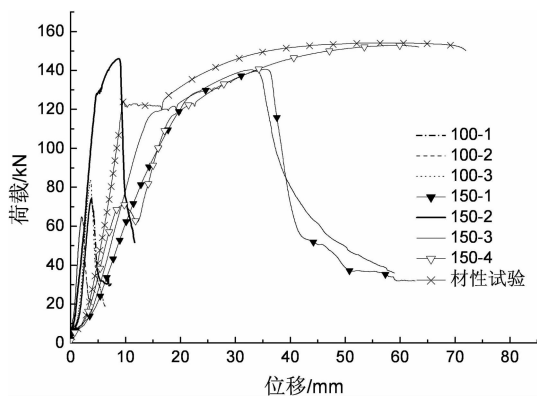


(c) 试件另一端破坏情况

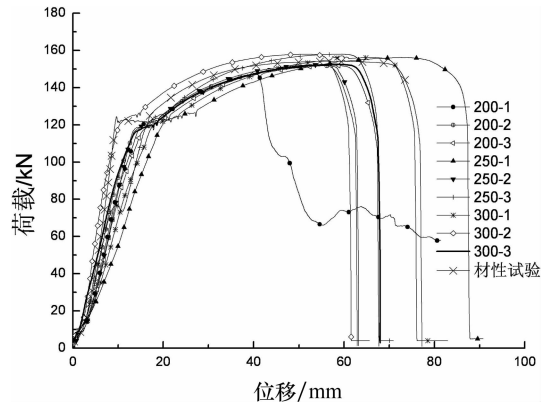
图5 100-3 试件钢筋与灌浆料滑移破坏  
Fig.5 Failure modes of bar-grout bond failure of specimen 100-3

值后,钢筋滑移,承载力迅速下降(图6(c)BC段)后进入平缓下降段(图6(c)CD段).150-2 试件进入屈服平台后很快滑移,故试件屈服平台短.由于钢筋已屈服,以上试件破坏也呈一定的延性.

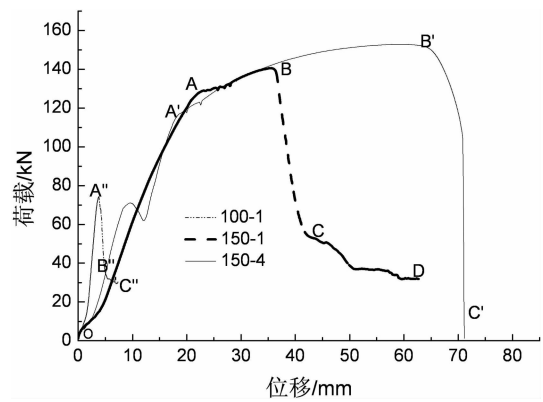
100 系列试件,也发生钢筋与灌浆料滑移破坏.但钢筋未屈服,故曲线上升段很快结束,后钢筋滑移,承载力迅速下降(图6(c)A'B'段),平缓的下降段短(图6(c)B'C'段).试件为脆性破坏.



(a) 100 和 150 系列试件力-位移曲线图



(b) 200, 250 和 300 系列试件力-位移曲线图



(c) 试件典型力-位移曲线图

图6 力-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves

### 3 接头力学分析

#### 3.1 搭接与对接接头传力机理对比

钢筋在套约束灌浆料中的粘结性能与钢筋在混凝土中的粘结性能相同,粘结力由化学胶着力、摩擦力、机械咬合力三部分组成,当钢筋与灌浆料产生微量滑移后,化学胶着力破坏,粘结力主要由机械咬合力和摩擦力提供,当机械咬合力起主要作用时,连接机理如图7(a),(b),(d)<sup>[13]</sup>所示,钢筋与灌浆料机械咬合作用产生切向分量 $\tau$ 和径向分量 $\sigma$ ,其中 $\sigma$ 引起灌浆料膨胀,套筒约束了灌浆料膨胀.

搭接接头的机械咬合作用及套筒的剪应力分布如图7(c)<sup>[14]</sup>所示,搭接接头钢筋部分拉力直接通过灌浆料传递给另一根钢筋,部分拉力从<sup>[15]</sup>灌浆料传递到套筒上再传递给另一根钢筋,套筒的主要作用是约束受力膨胀的灌浆料径向变形,套筒所受的拉力小.

对接接头的机械咬合作用及套筒的剪应力分布图如图7(d)所示,对接接头钢筋拉力通过灌浆料

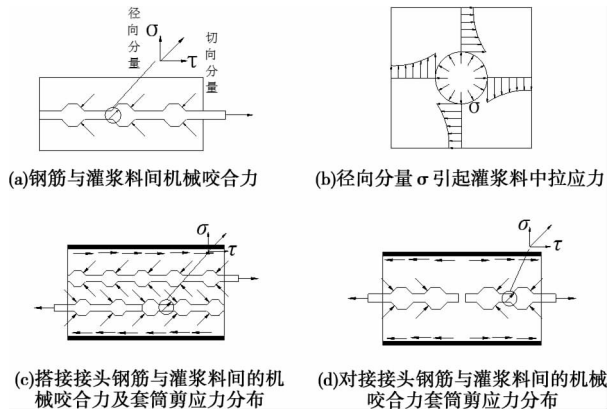


图 7 钢筋与灌浆料粘结机理

Fig.7 Bonding mechanism of bar and grout

传递到套筒上,再传递给另一根钢筋,套筒的主要作用是抗拉,尤其是套筒的中部两根钢筋相对处.在极限情况下,不考虑灌浆料的抗拉强度,套筒的抗拉承载力至少应大于它所连接钢筋的抗拉承载力.当套筒材料强度较低时,对接接头套筒更易被拉断,这也是文献[1]套筒被拉断的原因.

图 8 为取半个套筒进行分析,套筒所受剪应力  $\tau$  之和  $Q$  与套筒中部拉力  $P_{st}$  相等,因此对接接头半个套筒所受剪应力之和也比搭接接头大.当对接接头半套筒所受剪应力之和超过筒壁与灌浆料间的胶结力时,套筒壁与灌浆料间就会发生滑移,而套筒壁与灌浆料间摩擦力较小,导致套筒中部灌浆料承受拉力增大,灌浆料开裂,然后随钢筋被拔出.文献[1]对接接头发生灌浆料随着钢筋一起被拔出现象,本搭接接头并没有发生这种破坏.

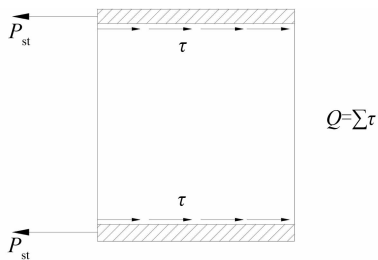


图 8 半个套筒受力分析

Fig.8 Force state for middle section of sleeve

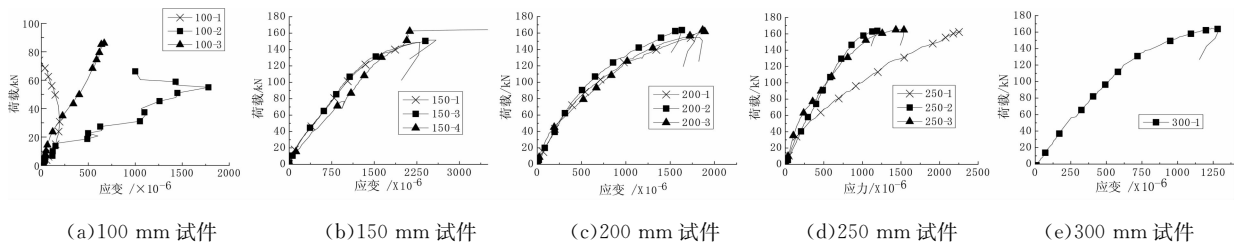


图 10 钢筋 SG5 测点荷载与应变关系曲线

Fig.10 Load-strain curve for SG5 of bar

### 3.2 基于试验数据的搭接接头中部截面受力分析

取半个搭接接头分析,如图 9 所示.  $P_{st}$  和  $P_{ct}$  分别为试件中部截面套筒所受拉力、灌浆料所受拉力合力;  $P_a, P'_a$  为试件中部截面处两根钢筋的拉力,由 SG5,6 应变值乘以弹性模量 ( $E = 2.00 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ) 和钢筋面积而得.图 10、图 11 分别为钢筋 SG5、6 测点荷载与应变关系曲线,100 mm 试件受偏转影响大,试件数据离散型大.总的来说,加载开始时钢筋的应变增加快,加载后期钢筋应变增加慢.

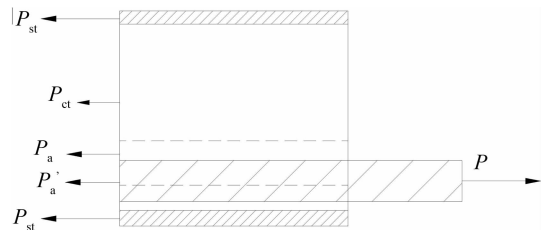


图 9 半个搭接接头受力分析

Fig.9 Force state for middle section of lapping connector

根据平衡条件,可得:

$$P_{st} + P_{ct} = P - P_a - P'_a \quad (1)$$

表 3 为  $P = 66.7 \text{ kN}$ 、极限荷载时不同搭接长度下  $P - P_a - P'_a$ ,即套筒中部套筒壁拉力和灌浆料拉力的合力  $P_{st} + P_{ct}$ .表 3 中 100 系列试件  $P_a, P'_a$  相差较大,这主要是由于试件短,受加载偏转影响大.

由表 3 知,在  $P = 66.7 \text{ kN}$ ,100 mm,150 mm 搭接长度下,  $P_{st} + P_{ct} < 0$ ,试件  $P_{st} + P_{ct}$  为压力,且随着搭接长度增加,压力值减小,这是因为搭接长度小,套筒中钢筋近拉力  $P$  的一段已出现滑移,使得套筒中部钢筋拉力大,致使筒壁及灌浆料受压;200 mm,250 mm,300 mm 搭接长度下,  $P_{st} + P_{ct} > 0$ ,试件  $P_{st} + P_{ct}$  为拉力,且随搭接长度增加,试件中部套筒壁和灌浆料的拉力合力增大,(假定灌浆料与套筒的应变是线性连续的,则套筒壁近钢筋处轴向拉力也增大,该结论用于后文中)套筒中钢筋未出现滑移,套筒中部钢筋拉力小,套筒中部筒壁及灌浆料合力受拉.

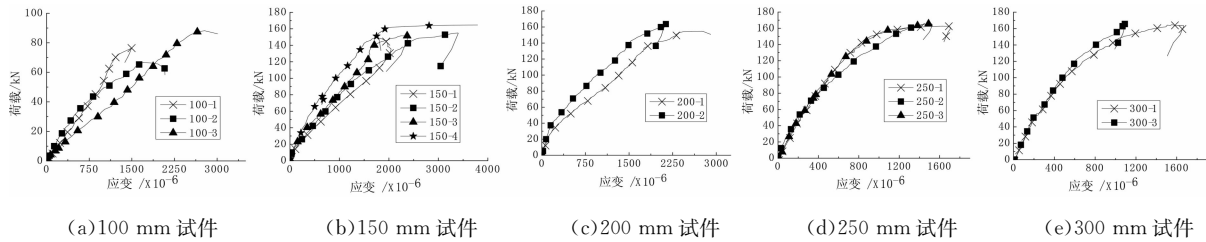


图 11 钢筋 SG6 测点荷载与应变关系曲线  
Fig.11 Load-strain curve for SG6 of bar

由于两根钢筋不在一条直线上,接头偏转,钢筋变形,如图 3(c)所示,钢筋拉力在 AB1 上,接头在两端拉力  $P$  作用下平衡,钢筋拉力  $P$  分解为  $P_x$  和  $P_y$ .对于套筒中部任一截面,其合力为在 AB1 线上的拉力  $P$ ,如图 12(a)所示,也可分解为  $P_x$  和  $P_y$ .

$P_y$  由于不在套筒中心,对套筒截面中心产生类似弯矩作用,如图 12(b)所示, $P_x$  作用面在两根钢筋中心线形成的纵剖面上,对套筒产生剪应力,如图 12(c)所示,因此接头受力非常复杂.为便于问题分析,先忽略  $P_x$  产生的剪应力.

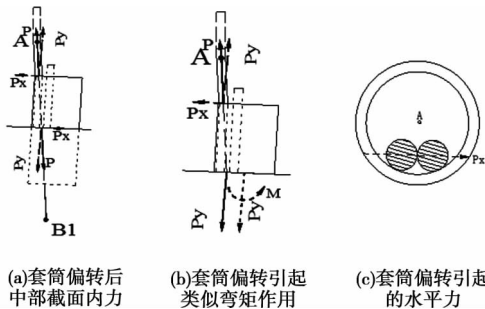


图 12 套筒偏转引起的力

Fig.12 Force caused by sleeve deflection

本试验中,均未发生套筒与灌浆料的滑移,在套筒中部,由于接头基本对称,假定套筒中部截面符合平截面假定.图 13 为  $P_{st} + P_{ct} < 0$  时套筒截面应变分析图,此时套筒及灌浆料的合力为压力,  $P_{st} + P_{ct}$  合力作用位置及产生的内力如图 13(a)所示,  $e$  为合力作用点到套筒中心的距离;  $P_{st} + P_{ct}$  轴力作用在试件横截面上产生的应变如图 13(b)所示;弯矩作用产生的应变如图 13(c)所示;随着接头的几何尺寸的改变,接头可能出现部分截面受压,部分受拉,应变分布如图 13(d)所示;或接头全截面受压,应变分布如图 13(e)所示.由此可见两种情况下近钢筋侧套筒及相邻灌浆料均受压,而钢筋实为受拉,已不符合平截面假定,这是由于搭接长度短,钢筋和灌浆料已出现明显滑移.由表 3 知,极限荷载时,100 mm,150 mm,200 mm 长度试件套筒及灌浆料合力为压力,均为这种受力情况.

图 14 为  $P_{st} + P_{ct} > 0$  时套筒截面应变分析图,此时套筒及灌浆料的合力为拉力,  $P_{st} + P_{ct}$  合力作用位置及产生的内力如图 14(a)所示,轴力作用产生的应变如图 14(b);弯矩作用产生的应变如图 14(c)所示,接头部分截面受压,部分受拉,应变分布如图 14(d);或接头全截面受拉,应变分布如图 14(e).由此可见两种情况下近钢筋侧套筒及相邻灌浆料均受拉,而钢筋也受拉,与平截面假定吻合,由于搭接长度长,钢筋和灌浆料未出现明显滑移.由表 3 知,极限荷载时,250 mm,300 mm 长度试件套筒及灌浆料合力为拉力,均为这种受力情况.

可见随着搭接长度增加,接头受力是从图 13 (d),(e)向图 14(d),(e)转变的过程.

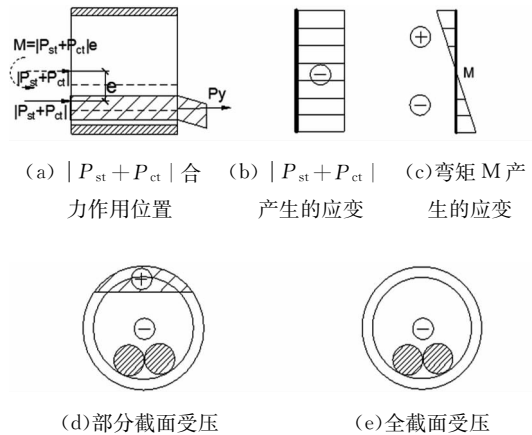


图 13  $P_{st} + P_{ct} < 0$  时搭接受头横截面应变分析

Fig.13 Strain analysis of lapping connector section when  $P_{st} + P_{ct} < 0$

## 4 套筒环向应变曲线分析

### 4.1 套筒环向压应变

100 mm,200 mm,300 mm 搭接长度下,SG1 荷载-套筒应变曲线如图 15 所示.100 mm 试件先是产生微小的压应变,随即向拉(正向)应变发展;300 mm 试件,加载初期环向压应变就发展较大,直到拉力达到 120 kN,压应变才开始减弱,向拉应变发展.

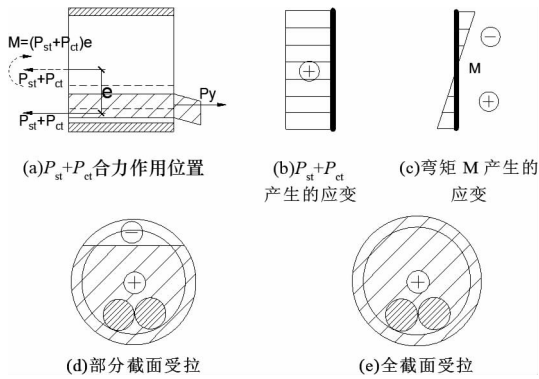
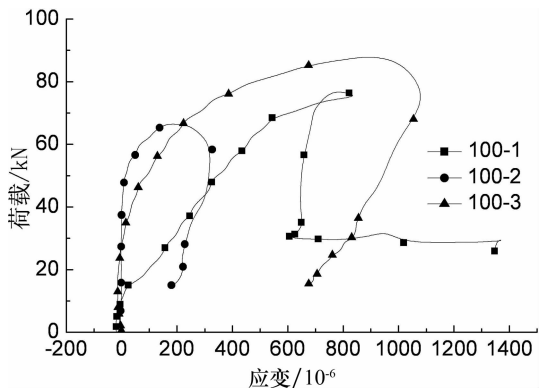


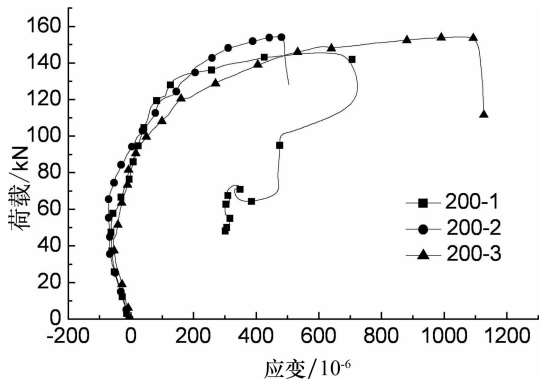
图 14  $P_{st} + P_{ct} > 0$  时搭接接头横截面应变分析  
Fig.14 Strain analysis of lapping connector section when  $P_{st} + P_{ct} > 0$

随着搭接长度的增加,套筒压应变呈增加趋势,最大压应变对应的荷载也增大,经历压应变过程也长,压应变结束也晚.从试验结果来看,绝大部分 SG2 测点产生压应变,但数值较小,无明显规律.

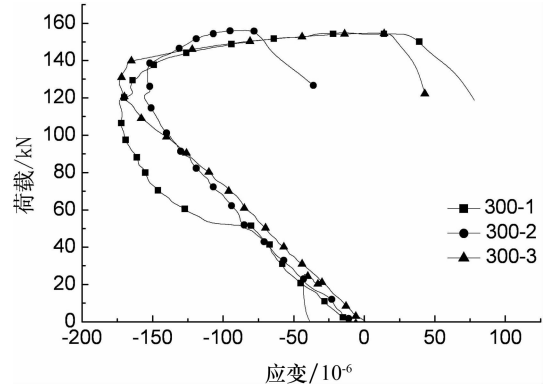
套筒环向应变由两部分力引起,一是套筒本身受轴向力,在加载过程中,钢筋拉力通过灌浆料的粘结力传递到套筒壁,套筒壁受到剪应力,后产生轴向拉(压)力,环向收缩(膨胀),产生压(拉)应变.二是灌浆料膨胀变形,使套筒环向受拉,产生环向拉应变.



(a) 100 mm 试件



(b) 200 mm 试件



(c) 300 mm 试件

图 15 SG1 测点荷载-套筒环向应变曲线

Fig.15 Load-strain curves of SG1

由 3.2 节分析知,搭接长度长的试件,套筒近钢筋侧所受的轴向拉力大,引起套筒的环向极限压应变大.而相同拉力下,在套筒中部,搭接长度长的试件,径向应力  $\sigma$  较小,引起套筒环向拉应力也小,两种应力叠加,搭接长度长的试件,套筒的环向极限压应变大.

#### 4.2 套筒各测点环向应变比较

图 16 为试件典型的荷载-套筒环向应变曲线.表 4 为达极限荷载时套筒环向应变对比.加载初期,SG3 拉应变较大,加载后期,SG4 拉应变大于 SG2,SG3 拉应变大于 SG1,即套筒端部应变大于套筒中部应变,说明套筒端部灌浆料的膨胀比内部大;加载后期,SG3 测点应变大于 SG4,说明在套筒端部靠近钢筋处套筒拉应变大于远离钢筋处套筒拉应变,即如图 7(b)所示,近钢筋处灌浆料膨胀力大,远钢筋处灌浆料膨胀力小.

由图 16 可见,加载后期,随着荷载增大,SG3 测点的应变出现减小现象,即荷载-应变曲线振荡,SG4 测点也出现类似现象,但由于其本身数值小,振荡幅度也小.SG3,SG4 应变片曲线振荡是由端部灌浆料开裂并出现大面积脱落引起.

由表 4 可知,对于 200 mm 及以下搭接长度的套筒(100-3 试件除外),SG1,2 测点均为拉应变.原因如下:由表 3 知,套筒及灌浆料所受的合力为压力,截面应力分布见图 13(d),13(e),构件中部近钢筋处套筒受压,环向膨胀,引起套筒环向拉应变,套筒所受的灌浆料膨胀力引起的拉应变也大,形成 SG1 测点拉应变.构件中部远离钢筋处套筒受压力或拉力,由于搭接长度短,套筒所受的灌浆料膨胀力引起的拉应变也大,SG2 测点仍为环向拉应变.



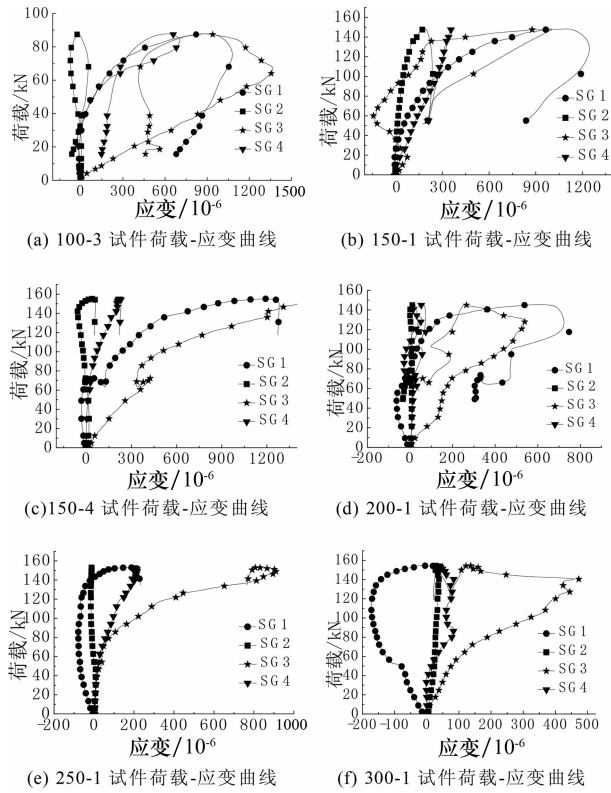


图 16 SG1,SG2,SG3,SG4 测点荷载-应变曲线

Fig.16 Load-strain curves of SG1,SG2,SG3 and SG4

表 4 极限荷载时套筒 SG1,2,3,4 测点应变

Tab.4 Strain values measured by SG1,SG2,SG3 and

SG4 at ultimate load

| 试件    | SG1/ $\mu\epsilon$ | SG2/ $\mu\epsilon$ | SG3/ $\mu\epsilon$ | SG4/ $\mu\epsilon$ |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 100-1 | 750                | 146                | 1 370              | 2 030              |
| 100-2 | 162                | 65                 | 771                | 531                |
| 100-3 | 920                | -15                | 867                | 612                |
| 150-1 | 1 150              | 198                | 1 000              | 371                |
| 150-2 | 735                | 147                | 550                | 746                |
| 150-3 | 474                | 12                 | 335                | 130                |
| 150-4 | 1 190              | 39                 | 1 640              | 221                |
| 200-1 | 663                | 25                 | 255                | 67                 |
| 200-2 | 472                | 21                 | 479                | 117                |
| 200-3 | 1 060              | 157                | 3 807              | 247                |
| 250-1 | 164                | -12                | 824                | 203                |
| 250-2 | -13                | 64                 | 440                | 224                |
| 250-3 | 15                 | -42                | 531                | 147                |
| 300-1 | -16                | 27                 | 146                | 37                 |
| 300-3 | -84                | -19                | -364               | 27                 |
| 300-4 | 11                 | 41                 | 100                | 501                |

由表 4 可知,长度为 250 mm、300 mm 的套筒, SG1,SG2 测点为拉或压应变.由表 3 知,接头套筒及灌浆料所受的合力多为较小拉力,套筒截面应力分布见图 14(d), (e), 构件中部近钢筋处套筒为轴向拉应变,产生环向的压应变,当环向的压应变大于套筒灌浆料膨胀拉应变时,SG1 测点为压应变,

反之 SG1 测点为拉应变;构件中部远离钢筋处套筒亦然.

试件搭接长度变化,接头横截面所受的拉力位置改变,引起接头横截面套筒、灌浆料、钢筋应变改变.

从表 4 看出,当套筒长度大于等于 250 mm 时,极限荷载时套筒中部 SG1,2 应变均小于  $824\mu\epsilon$ ,钢材未屈服,具有一定的安全储备,当套筒长度小于 250 mm 时,个别试件套筒端部 SG3,4 测点环向拉应变特别大,是试件偏心引起钢筋挤压套壁引起.

在极限荷载时测点平均应变与搭接长度的关系如图 17 所示,随着搭接长度的增大(100 mm 搭接长度试件由于偏心影响较大,结果不列入其中),各测点的极限应变总体皆呈降低的趋势;SG1 (SG3)测点曲线下降段的斜率大于 SG2 (SG4)测点,这主要是由于 SG1,3 测点位于贴近钢筋一侧,套筒长度的变化对这一侧的影响较为显著.

250 mm 长试件达极限荷载时,套筒表面应力大,约为 3 MPa,推断套筒与灌浆料间可能存在微量滑移;250 mm 长试件都是钢筋拉断,但破坏状态下,钢筋与灌浆料间也存在微量滑移,因此接头的变形问题值得研究,接头加载、卸载后的残余变形试验是下一步研究的重点.

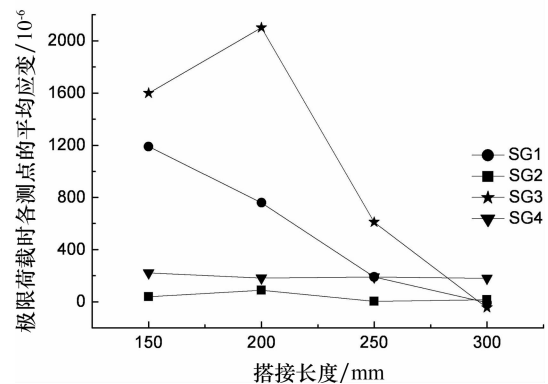


图 17 极限荷载时测点平均应变-搭接长度曲线

Fig.17 The relationship of average strain at ultimate load with length of the sleeve

### 5 结 论

1) 由于试件偏转,接头的力-位移曲线屈服台阶不明显,绝大部分接头刚度小于对应钢筋的刚度,接头延性小于钢筋延性.实际应用中由于接头周边有混凝土约束,可避免这种现象.钢筋拉断破坏试件的极限承载力与单根钢筋相近.由于套筒约束,接头

搭接长度大大减少。

2) 搭接长度小时,套筒中钢筋近拉力  $P$  的一段出现滑移,接头中部钢筋拉力大,筒壁及灌浆料受压;当搭接长度大时,套筒中钢筋未出现滑移,接头中部钢筋拉力小,筒壁及灌浆料受拉。

3) 搭接接头套筒中部拉力比对接接头小,对套筒材料抗拉性能要求低,搭接接头钢筋通过灌浆料传递到套筒上的剪应力比对接接头小,套筒内壁与灌浆料的界面作用力小,对套筒与灌浆料的界面粘结性能要求低。

4) 试件搭接长度变化,接头横截面所受的拉力位置改变,接头横截面应变改变。

5) 随着搭接长度增大,套筒中部近钢筋侧环向最大压应变也增大,经历压应变过程也长。

6) 套筒端部环向拉应变比中部拉应变大;套筒近钢筋侧拉应变比远离钢筋侧拉应变大;搭接长度增大时,接头极限荷载时套筒各测点环向拉应变总体呈降低的趋势。

7) 后续拟进行接头加载、卸载后的残余变形和改变两根钢筋相对位置、接头<sup>[16]</sup>在高应力、大变形反复荷载作用下的试验,对接头的性能进行更深入的研究。

## 参考文献

- [1] 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(1): 530—539.
- [2] 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(3): 90—98.
- [3] 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.
- [4] 陈云钢, 刘家彬, 郭正兴, 等. 预制混凝土结构波纹管浆锚钢筋锚固性能试验研究[J]. 建筑技术, 2014, 45(1): 65—67. CHEN Yungang, LIU Jiabin, GUO Zhengxing, *et al.* Experimental study on grouting connection in bellows for steel bar anchorage of precast concrete structure[J]. Architecture Technology, 2014, 45(1): 65—67. (In Chinese)
- [5] 尹齐, 陈俊, 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, 44(11): 104—107. YIN Qi, CHEN Jun, *et al.* Experimental study of anchorage performance of grouting connection with steel bars inserted pre-buried bellows[J]. Industrial Construction, 2014, 44(11): 104—107. (In Chinese)
- [6] 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. (In Chinese)
- [7] 余琼. 一种新型的约束搭接套筒[P]. ZL 2014 2 0656653.0. 2015.04.01. YU Qiong. A new confined lapping sleeve[P]. ZL 2014 2 0656653.0. 2015.04.01. (In Chinese)
- [8] 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(2): 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(2): 32—35. (In Chinese)
- [9] 国家质量技术监督局. GB/T 17671—1999 水泥胶砂强度检验方法(ISO法)[S]. 北京, 中国标准出版社, 1999: 5—6. Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. GB/T 17671—1999 Method of testing cements-determination of strength (ISO method) [S]. Beijing: China Standard Press, 1999: 5—6. (In Chinese)
- [10] 中华人民共和国建设部和国家质量监督检验检疫局. GB 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京, 中国建筑工业出版社, 2003: 15—18. Ministry of Construction & General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 50081—2002 Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2003: 15—18. (In Chinese)
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 355—2015 钢筋套筒灌浆连接应用技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 2—6. Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. JGJ 355—2015 Technical specification for grout sleeve splicing of rebars [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015: 2—6. (In Chinese)
- [12] SOUDK K A, RIZKALLA S H, LEBANC B. Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations part1: mild steel connections [J]. PCI Journal, 1995, 41(1): 78—96.
- [13] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M]. 上海, 同济大学出版社, 2004: 40—41. GU Xianglin. Basic principle of concrete structure [M]. Shanghai, Tongji University Press, 2004: 40—41. (In Chinese)
- [14] 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. (In Chinese)
- [15] 黄政宇, 钱峰. DSP 早强高强灌浆料综合性能研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(8): 18—22. HUANG Zhenyu, QIAN Feng. Research on the comprehensive properties of early-strength and high-strength grouting materials based on DSP principle [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(8): 18—22. (In Chinese)
- [16] 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: 自然科学版, 2016, 43(11): 132—140. ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxin. Structural performance of innovative grout sleeve splicing for rebars under cyclic loading [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(11): 132—140. (In Chinese)