

DOI:10.11918/202311065

# 搭接长度等对 II 型 APC 接头拉伸性能的影响

余琼<sup>1</sup>, 敖晟瑞<sup>1</sup>, 唐子鸣<sup>1</sup>, 郭霖<sup>2</sup>, 谢青海<sup>2</sup>, 张志<sup>3</sup>, 陈振海<sup>3</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 山西建筑工程集团有限公司, 太原 030006;  
3. 山西二建集团有限公司, 太原 030013)

**摘要:** 为研究搭接长度和钢筋直径对 II 型 APC 接头力学性能的影响, 对 63 个该接头进行单向拉伸试验, 分析了接头破坏模式、极限承载力、延性和黏结应力等。结果表明: 钢筋直径相同时, 随搭接长度增加, 平均黏结应力降低, 试件强度、延性、最大力总伸长率明显提高, 残余变形整体呈下降趋势; 钢筋拉断破坏试件强度、延性、最大力总伸长率和残余变形满足规范要求; 加载过程中, 套筒中部截面短边纵向和长边环向始终受拉; 极限荷载下, 随搭接长度增加, 套筒中部截面短边侧环向压应变先转变为拉应变再向压应变发展, 长边侧纵向压应变转变为拉应变; 相对搭接长度相同时, 极限承载力随钢筋直径增加而提高; 提出的极限黏结强度及临界搭接长度计算公式与试验值吻合较好, 可为实际工程应用提供参考。单拉工况下, 钢筋直径不大于 18 mm 时, 建议接头搭接长度大于  $12d$ 。

**关键词:** II 型 APC 接头; 拉伸性能; 搭接长度; 黏结强度

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)01-0128-12

## Influence of lap length and other factors on tensile performance of type II APC connector

YU Qiong<sup>1</sup>, AO Chengrui<sup>1</sup>, TANG Ziming<sup>1</sup>, GUO Lin<sup>2</sup>, XIE Qinghai<sup>2</sup>, ZHANG Zhi<sup>3</sup>, CHEN Zhenhai<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanxi Construction Engineering Group Co. Ltd., Taiyuan 030006, China; 3. Shanxi Erjian Group Co. Ltd., Taiyuan 030013, China)

**Abstract:** To study the effects of lap length and rebar diameter on the mechanical properties of type II APC connector, 63 specimens were subjected to uniaxial tensile test, and the failure mode, ultimate bearing capacity, ductility, and bond stress of the connector were analyzed. Test results showed that with the same diameter of rebars, as the lap length increased, the average bond stress decreased, and the strength, ductility, and total elongation at maximum force of the specimen had significantly increased. The residual deformation had decreased overall. The strength, ductility, total elongation at maximum force, and residual deformation of the specimen with tensile failure of rebars met the requirements of the specifications. During the loading process, the short side longitudinal and long side circumferential directions of the middle section of the sleeve were always under tension. Under ultimate load, as the lap length increased, the circumferential compressive strain on the short side of the middle section of the sleeve first transformed into tensile strain and then developed towards compressive strain, and the longitudinal compressive strain on the long side transformed into tensile strain. When the relative lap length was the same, the ultimate bearing capacity increased with the rebar diameter increased. The proposed formulas for calculating the ultimate bond strength and critical lap length are in good agreement with experimental values, and provide references for practical engineering applications. Under uniaxial tension, when the diameter of the rebar is not greater than 18 mm, it is recommended that the connector lap length should be greater than  $12d$ .

**Keywords:** type II APC connector; tensile behavior; lap length; bond strength

实际工程中, 预制混凝土结构节点的钢筋连接广泛运用套筒灌浆对接连接, 该连接通过套筒和灌浆料实现钢筋的对接连接。当前, 对套筒灌浆连接的研究愈发深入<sup>[1-4]</sup>, 设计参数合理的套筒灌浆连

接接头力学性能良好, 可满足实际工程需求。套筒灌浆对接连接的传力性能依赖于套筒内壁所设置的剪力键、刻痕等, 这不仅对套筒的材料性能和铸造工艺要求较高, 同时较小套筒内径在施工时给钢筋定

收稿日期: 2023-11-22; 录用日期: 2024-01-16; 网络首发日期: 2024-06-13

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240613.1047.006>

基金项目: 上海市科技计划项目(21ZR1468300)

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; 唐子鸣, tangziming1234@163.com

位插入带来一定困难,影响灌浆质量,降低力学性能。

因此,课题组<sup>[5]</sup>提出套筒灌浆搭接接头,简称 APC(all vertical members precasted in concrete structures)接头,以实现竖向预制构件间的钢筋连接,见图 1。APC 接头构造为:在 2 根搭接钢筋外部放置套筒(I 型 APC 接头),或在 4 根搭接钢筋外部放置套筒(II 型 APC 接头),注入灌浆料养护。与传统套筒灌浆接头相比,APC 接头具有工艺简单,制造成本低,施工方便,灌浆质量好等优势。

当前,针对 I 型 APC 接头的破坏机理、承载能力、延性、钢筋-灌浆料极限黏结强度等进行了系统研究<sup>[6-8]</sup>,其在预制剪力墙和框架柱的抗震试验中表现良好<sup>[9]</sup>。但针对 II 型 APC 接头的研究较少<sup>[6]</sup>,其应用于实际工程的可行性有待进一步研究。

本文通过 63 个 II 型 APC 接头的单向拉伸试

验,研究了搭接长度和钢筋直径对该接头破坏形态、承载能力、套筒应变、钢筋与灌浆料黏结性能的影响,并得到接头极限黏结强度和钢筋拉断临界搭接长度的计算公式。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计及试验方案

本试验设计 4 种钢筋直径(12、14、16、18 mm)和 7 种搭接长度(6d、8d、10d、12d、14d、16d、18d)共 63 个 II 型 APC 接头进行单向拉伸试验。试件外观尺寸见图 2,套筒由 4 mm 厚无缝钢管和 6 mm 厚钢板经 4 条焊缝焊接而成,将 2 根预留钢筋分别点焊到套筒短边侧中部内壁,再将 2 根后插入钢筋分别与预留钢筋紧贴放置,4 根钢筋位于套筒横截面纵向中心线上,最后灌入灌浆料养护。

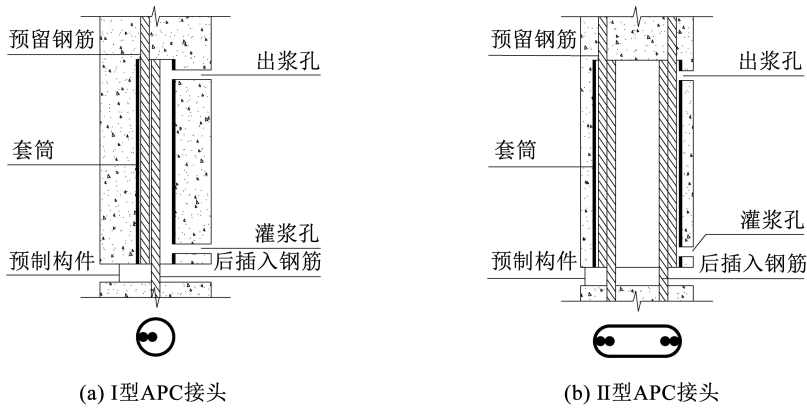


图 1 APC 接头示意

Fig. 1 Schematic of APC connectors

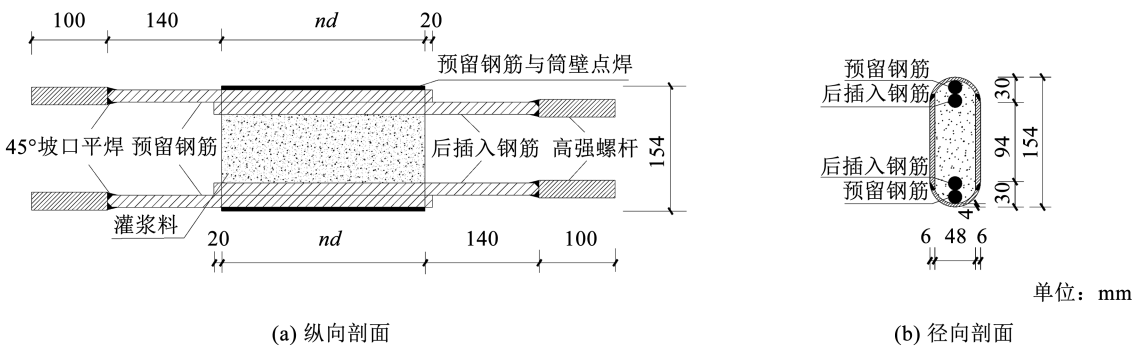


图 2 不同搭接长度试件示意

Fig. 2 Schematic of specimens with different lap lengths

### 1.2 材料性能

采用 H40 型灌浆料,测得 40 mm × 40 mm × 160 mm 试块的抗折强度、抗压强度<sup>[10]</sup>分别为 12.1 MPa、65.4 MPa,150 mm × 150 mm × 150 mm 试块的劈裂抗拉强度为 4.1 MPa,150 mm × 150 mm × 300 mm 试块的轴心抗压强度<sup>[11]</sup>为 75.7 MPa。HRB400 钢筋和套筒 Q235 钢材的力学性能<sup>[12]</sup>见表 1。

表 1 钢材力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of steel

| 钢材种类          | 屈服强度    | 屈服应变                 | 极限强度    |
|---------------|---------|----------------------|---------|
|               | 平均值/MPa | 平均值/10 <sup>-6</sup> | 平均值/MPa |
| 钢筋,直径 12 mm   | 527     | 2 829                | 623     |
| 钢筋,直径 14 mm   | 461     | 2 307                | 646     |
| 钢筋,直径 16 mm   | 452     | 2 261                | 625     |
| 钢筋,直径 18 mm   | 451     | 2 257                | 658     |
| 套筒,4 mm 厚无缝钢管 | 372     | 1 771                | 489     |
| 套筒,6 mm 厚钢板   | 323     | 1 537                | 463     |

### 1.3 加载方案及测量内容

试验加载采用 200 t 电液伺服作动器,见图 3。加载速率为 20 ~ 50 kN/min,先加载至  $0.6f_{yk}$  后卸载至 0 并记录残余变形  $u_0$ ,再加载至试件破坏<sup>[13]</sup>。

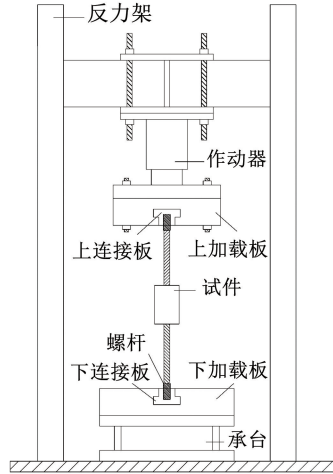
试件外部钢筋和套筒中部截面应变片粘贴位置见图 4。在不同钢筋直径接头中各取 2 个试件,于 4 根钢筋外部粘贴应变片 G1 ~ G4,测量纵向应变。在所有试件的套筒中部截面短边侧、长边侧分别粘

贴应变片 H1 和 Z1、H2 和 Z2,测量套筒环向和纵向应变。

套筒全长度应变测点布置见图 5。选取钢筋直径为 16 mm 和 18 mm、搭接长度分别为  $8d$  和  $10d$  的 2 个试件,于套筒短边侧和长边侧的端部、1/4 处、中部、3/4 处和尾部,分别粘贴应变片 H1 ~ H5 和 Z1 ~ Z5、H6 ~ H10 和 Z6 ~ Z10,测量套筒全长度环向和纵向应变。



(a) 荷载加载装置



(b) 加载装置示意

图 3 加载设备

Fig. 3 Loading equipment

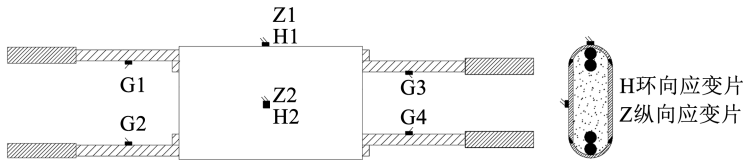


图 4 外部钢筋和套筒中部截面应变片粘贴位置

Fig. 4 Location of strain gauges for outer rebar and the middle section of the sleeve

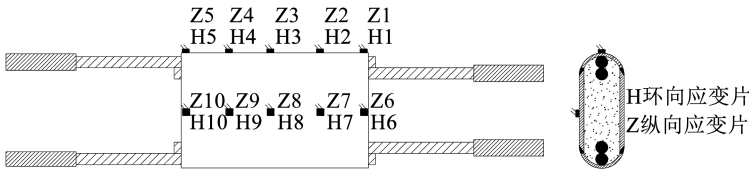


图 5 套筒全长度应变片粘贴位置

Fig. 5 Location of strain gauges along the full length of the sleeve

## 2 试验结果及破坏形式

各试件破坏形式、残余应变  $u_0$ 、最大力总伸长率  $A_{sgt}$ 、位移延性系数  $R_d$ 、极限平均黏结应力  $\bar{\tau}_u$ 、屈服强度实测值与标准值之比  $f_y/f_{yk}$ 、极限强度与屈服强度之比  $f_u/f_y$  和力学性能评判结果见表 2。

图 6 为 II 型 APC 接头典型破坏情况,主要为钢筋拔出破坏和钢筋拉断破坏,后者分为钢筋断于母材处或钢筋 - 螺杆焊接处。钢筋直径 12 mm 的试

件断于钢筋焊接处。钢筋直径 14、16 和 18 mm 的试件,搭接长度分别为  $6d$ 、 $8d$  和  $8d \sim 10d$  时,发生钢筋拔出破坏;当搭接长度分别增长至  $8d$ 、 $10d$  和  $12d$  及以上,发生钢筋拉断破坏。

钢筋拔出破坏时,加载端 2 根后插入钢筋及其间灌浆料同时拔出,钢筋周围灌浆料破碎、脱落严重,固定端预留钢筋与套筒内壁间灌浆料破碎脱落,截面纵向中线产生劈裂裂缝,见图 6(a)、(b);钢筋断于焊接处时,端部灌浆料基本无损伤;钢筋断于母

材处时, 加载端后插入钢筋周围灌浆料破碎、脱落较为严重, 固定端预留钢筋与套筒内壁间灌浆料挤压破碎, 见图 6(c)、(d)。除 12 mm 组外, 绝大多数试件端部相邻 2 根钢筋间灌浆料产生横向裂缝。这主

要是由于加载过程中相邻钢筋存在共线趋势, 后插入钢筋在加载端附近相互靠近, 预留钢筋在固定端附近相互远离, 该趋势随搭接长度增加而减弱。图 7 为拔出破坏试件钢筋共线及端部情况示意。

表 2 试验结果  
Tab. 2 Test results

| 试件编号     | 破坏形式    | $u_0/\text{mm}$ | $A_{\text{sgt}}/\%$ | $R_d$ | $\bar{\tau}_u/\text{MPa}$ | $f_u/\text{MPa}$ | $f_y/f_{yk}$ | $f_u/f_y$ | 接头力学性能评判  |        |        |
|----------|---------|-----------------|---------------------|-------|---------------------------|------------------|--------------|-----------|-----------|--------|--------|
|          |         |                 |                     |       |                           |                  |              |           | 文献[13-14] | 文献[15] | 文献[16] |
| 12-6d-1  | 钢筋断于焊接处 | 0.11            | 3.72                | 2.56  | 22.39                     | 537.46           | 1.21         | 1.11      | N         | N      | N      |
| 12-6d-2  | 钢筋断于焊接处 | 0.13            | 3.09                | 1.99  | 22.23                     | 533.53           | 1.18         | 1.13      | N         | N      | N      |
| 12-6d-3  | 钢筋断于焊接处 | 0.13            | 2.80                | 1.57  | 21.55                     | 517.16           | 1.18         | 1.10      | N         | N      | N      |
| 12-8d-1  | 钢筋断于焊接处 | 0.13            | 3.51                | 1.85  | 16.45                     | 526.41           | 1.17         | 1.12      | N         | N      | N      |
| 12-8d-2  | 钢筋断于焊接处 | 0.11            | 2.50                | 1.72  | 16.57                     | 530.25           | 1.17         | 1.13      | N         | N      | N      |
| 12-8d-3  | 钢筋断于焊接处 | 0.02            | 2.58                | 1.83  | 16.50                     | 528.00           | 1.13         | 1.17      | N         | N      | N      |
| 12-10d-1 | 钢筋断于焊接处 | 0.01            | 2.76                | 1.68  | 13.01                     | 520.30           | 1.17         | 1.11      | N         | N      | N      |
| 12-10d-2 | 钢筋断于焊接处 | 0.05            | 2.15                | 1.75  | 13.27                     | 530.65           | 1.14         | 1.17      | N         | N      | N      |
| 12-10d-3 | 钢筋断于焊接处 | 0.05            | 1.91                | 1.62  | 13.14                     | 525.74           | 1.17         | 1.12      | N         | N      | N      |
| 12-12d-1 | 钢筋断于焊接处 | 0.17            | 1.72                | 2.12  | 11.18                     | 536.54           | 1.14         | 1.18      | N         | N      | N      |
| 12-12d-2 | 钢筋断于焊接处 | 0.21            | 1.41                | 2.09  | 11.05                     | 530.43           | 1.13         | 1.17      | N         | N      | N      |
| 12-12d-3 | 钢筋断于焊接处 | 0.02            | 1.38                | 1.72  | 11.24                     | 539.50           | 1.16         | 1.16      | N         | N      | N      |
| 12-14d-1 | 钢筋断于焊接处 | —               | —                   | —     | —                         | —                | —            | —         | —         | —      | —      |
| 12-14d-2 | 钢筋断于焊接处 | 0.14            | 3.47                | 1.76  | 9.53                      | 533.44           | 1.21         | 1.10      | N         | N      | N      |
| 12-14d-3 | 钢筋断于焊接处 | 0.07            | 3.51                | 2.68  | 9.49                      | 531.71           | 1.15         | 1.15      | N         | N      | N      |
| 14-6d-1  | 钢筋拔出    | 0.12            | 3.36                | 3.46  | 21.37                     | 513.16           | 1.07         | 1.20      | N         | N      | N      |
| 14-6d-2  | 钢筋拔出    | 0.11            | 2.75                | 3.33  | 21.06                     | 505.59           | 1.07         | 1.18      | N         | N      | N      |
| 14-6d-3  | 钢筋拔出    | 0.13            | 2.74                | 2.85  | 20.21                     | 485.34           | 1.07         | 1.14      | N         | N      | N      |
| 14-8d-1  | 钢筋断于母材处 | 0.02            | 8.81                | 7.84  | 19.16                     | 613.58           | 1.09         | 1.41      | Y         | Y      | Y      |
| 14-8d-2  | 钢筋断于母材处 | 0.03            | 8.80                | 7.68  | 19.00                     | 608.25           | 1.08         | 1.41      | Y         | Y      | Y      |
| 14-8d-3  | 钢筋断于母材处 | 0.03            | 7.80                | 6.46  | 18.79                     | 601.59           | 1.05         | 1.43      | Y         | Y      | Y      |
| 14-10d-1 | 钢筋断于母材处 | 0.06            | 10.29               | 6.74  | 15.24                     | 610.07           | 1.05         | 1.45      | Y         | Y      | Y      |
| 14-10d-2 | 钢筋断于母材处 | 0.07            | 8.81                | 6.74  | 15.14                     | 606.01           | 1.08         | 1.40      | Y         | Y      | Y      |
| 14-10d-3 | 钢筋断于母材处 | 0.09            | 8.82                | 8.65  | 15.46                     | 618.81           | 1.06         | 1.46      | Y         | Y      | Y      |
| 14-12d-1 | 钢筋断于母材处 | 0.05            | 10.35               | 6.72  | 12.64                     | 607.11           | 1.09         | 1.39      | Y         | Y      | Y      |
| 14-12d-2 | 钢筋断于母材处 | 0.09            | 7.80                | 6.79  | 12.58                     | 604.19           | 1.05         | 1.43      | Y         | Y      | Y      |
| 14-12d-3 | 钢筋断于母材处 | 0.01            | 7.79                | 5.85  | 12.12                     | 582.25           | 1.08         | 1.35      | Y         | Y      | Y      |
| 14-14d-1 | 钢筋断于母材处 | 0.06            | 12.35               | 10.07 | 10.83                     | 607.05           | 1.08         | 1.41      | Y         | Y      | Y      |
| 14-14d-2 | 钢筋断于母材处 | 0.04            | 8.80                | 7.47  | 10.78                     | 603.86           | 1.06         | 1.42      | Y         | Y      | Y      |
| 14-14d-3 | 钢筋断于母材处 | 0.03            | 3.77                | 3.78  | 9.55                      | 534.84           | 1.03         | 1.30      | N         | Y      | N      |

表 2(续)

| 试件编号     | 破坏形式    | $u_0/\text{mm}$ | $A_{\text{sgt}}/\%$ | $R_d$ | $\bar{\tau}_u/\text{MPa}$ | $f_u/\text{MPa}$ | $f_y/f_{yk}$ | $f_u/f_y$ | 接头力学性能评判  |        |        |
|----------|---------|-----------------|---------------------|-------|---------------------------|------------------|--------------|-----------|-----------|--------|--------|
|          |         |                 |                     |       |                           |                  |              |           | 文献[13-14] | 文献[15] | 文献[16] |
| 16-8d-1  | 钢筋拔出    | 0.12            | 2.78                | 5.04  | 17.47                     | 559.34           | 1.06         | 1.32      | N         | Y      | Y      |
| 16-8d-2  | 钢筋拔出    | 0.05            | 5.28                | 4.35  | 17.35                     | 555.36           | 1.04         | 1.34      | N         | Y      | Y      |
| 16-8d-3  | 钢筋拔出    | 0.08            | 5.29                | 5.71  | 18.08                     | 578.80           | 1.04         | 1.39      | N         | Y      | Y      |
| 16-10d-1 | 钢筋断于母材处 | 0.06            | 11.82               | 7.34  | 15.18                     | 607.61           | 1.08         | 1.41      | Y         | Y      | Y      |
| 16-10d-2 | 钢筋断于母材处 | 0.01            | 8.28                | 4.62  | 13.96                     | 558.72           | 1.01         | 1.38      | Y         | Y      | Y      |
| 16-10d-3 | 钢筋断于母材处 | 0.05            | 8.80                | 7.67  | 14.96                     | 598.68           | 1.06         | 1.41      | Y         | Y      | Y      |
| 16-12d-1 | 钢筋断于母材处 | 0.07            | 10.81               | 5.89  | 12.41                     | 595.89           | 1.07         | 1.40      | Y         | Y      | Y      |
| 16-12d-2 | 钢筋断于母材处 | 0.07            | 10.80               | 8.35  | 12.64                     | 606.89           | 1.02         | 1.49      | Y         | Y      | Y      |
| 16-12d-3 | 钢筋断于母材处 | 0.04            | 7.80                | 7.21  | 12.43                     | 596.93           | 1.05         | 1.42      | Y         | Y      | Y      |
| 16-14d-1 | 钢筋断于母材处 | 0.01            | 9.82                | 6.40  | 10.67                     | 597.56           | 1.07         | 1.40      | Y         | Y      | Y      |
| 16-14d-2 | 钢筋断于母材处 | 0.04            | 7.80                | 8.36  | 10.85                     | 608.18           | 1.06         | 1.44      | Y         | Y      | Y      |
| 16-14d-3 | 钢筋断于母材处 | 0.02            | 8.80                | 9.26  | 10.86                     | 608.53           | 1.04         | 1.46      | Y         | Y      | Y      |
| 16-16d-1 | 钢筋断于母材处 | 0.03            | 10.81               | 9.80  | 9.54                      | 610.97           | 1.02         | 1.49      | Y         | Y      | Y      |
| 16-16d-2 | 钢筋断于母材处 | 0.03            | 11.31               | 8.83  | 9.55                      | 611.27           | 1.05         | 1.45      | Y         | Y      | Y      |
| 16-16d-3 | 钢筋断于母材处 | 0.04            | 10.80               | 7.60  | 9.45                      | 605.27           | 1.02         | 1.48      | Y         | Y      | Y      |
| 18-8d-1  | 钢筋拔出    | 0.06            | 2.51                | 3.17  | 16.32                     | 522.57           | 1.06         | 1.23      | N         | N      | N      |
| 18-8d-2  | 钢筋拔出    | 0.08            | 2.26                | 2.77  | 16.05                     | 513.90           | 1.07         | 1.20      | N         | N      | N      |
| 18-8d-3  | 钢筋拔出    | 0.15            | 2.27                | 3.10  | 16.98                     | 543.60           | 1.04         | 1.31      | N         | Y      | N      |
| 18-10d-1 | 钢筋拔出    | 0.01            | 3.55                | 4.93  | 15.16                     | 606.53           | 1.09         | 1.39      | N         | Y      | Y      |
| 18-10d-2 | 钢筋拔出    | 0.14            | 4.31                | 5.39  | 15.41                     | 616.52           | 1.08         | 1.43      | N         | Y      | Y      |
| 18-10d-3 | 钢筋拔出    | 0.11            | 3.28                | 3.38  | 13.93                     | 557.54           | 1.09         | 1.28      | N         | Y      | Y      |
| 18-12d-1 | 钢筋断于母材处 | 0.03            | 8.57                | 7.65  | 13.33                     | 640.23           | 1.07         | 1.50      | Y         | Y      | Y      |
| 18-12d-2 | 钢筋断于母材处 | 0.01            | 10.82               | 8.33  | 13.44                     | 645.61           | 1.07         | 1.52      | Y         | Y      | Y      |
| 18-12d-3 | 钢筋断于母材处 | 0.02            | 7.80                | 4.62  | 12.64                     | 607.12           | 1.03         | 1.47      | Y         | Y      | Y      |
| 18-14d-1 | 钢筋断于母材处 | 0.01            | 8.82                | 6.88  | 11.44                     | 640.91           | 1.07         | 1.50      | Y         | Y      | Y      |
| 18-14d-2 | 钢筋断于母材处 | 0.00            | 10.33               | 9.20  | 11.62                     | 651.02           | 1.10         | 1.48      | Y         | Y      | Y      |
| 18-14d-3 | 钢筋断于母材处 | 0.01            | 10.53               | 9.10  | 11.60                     | 650.02           | 1.06         | 1.53      | Y         | Y      | Y      |
| 18-16d-1 | 钢筋断于母材处 | 0.06            | 9.31                | 6.14  | 9.83                      | 629.43           | 1.07         | 1.47      | Y         | Y      | Y      |
| 18-16d-2 | 钢筋断于母材处 | 0.02            | 11.32               | 8.86  | 10.12                     | 648.23           | 1.08         | 1.50      | Y         | Y      | Y      |
| 18-16d-3 | 钢筋断于母材处 | 0.01            | 10.32               | 7.66  | 10.06                     | 644.22           | 1.07         | 1.50      | Y         | Y      | Y      |
| 18-18d-1 | 钢筋断于母材处 | 0.01            | 9.32                | 8.54  | 8.98                      | 647.07           | 1.08         | 1.50      | Y         | Y      | Y      |
| 18-18d-2 | 钢筋断于母材处 | 0.05            | 11.33               | 7.96  | 9.03                      | 650.53           | 1.06         | 1.53      | Y         | Y      | Y      |
| 18-18d-3 | 钢筋断于母材处 | 0.02            | 12.32               | 6.11  | 8.94                      | 643.88           | 1.05         | 1.53      | Y         | Y      | Y      |

注：“12-6d-1”为钢筋直径 12 mm、搭接长度 6d 组的 1 号试件，余同。“—”表示无法测得该数据，“Y”表示接头力学性能满足规范的要求，“N”表示接头力学性能不满足规范的要求。

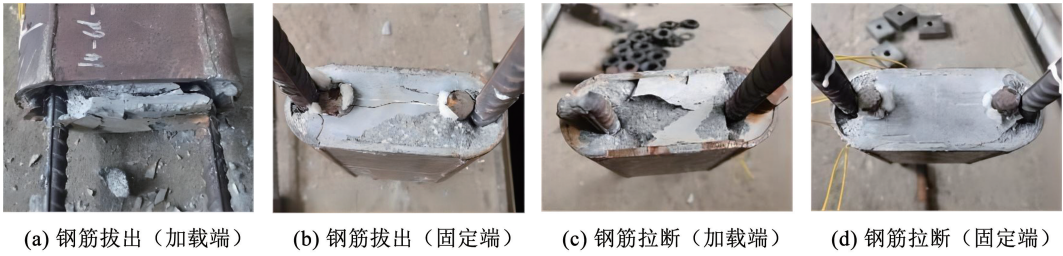


图 6 试件破坏情况

Fig. 6 Failure of specimens

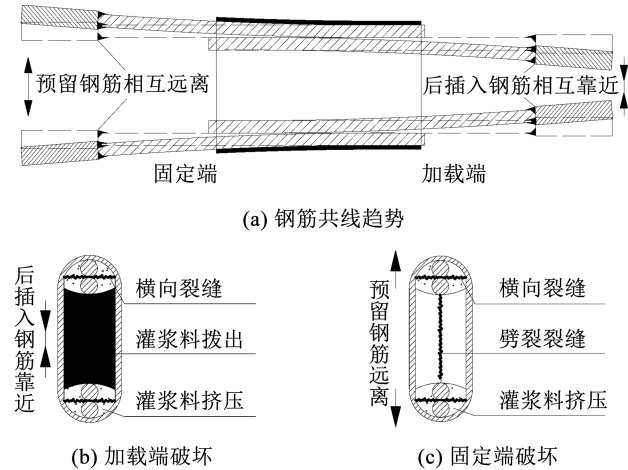


图 7 钢筋共线及拔出破坏试件端部示意

Fig. 7 Schematic of collinearity of rebars and the end of specimens with pull-out failure

### 3 APC 接头力学性能

#### 3.1 外部钢筋荷载 - 应变曲线

图 8 为试件外部钢筋荷载 - 纵向应变曲线。各曲线具有明显弹性段、屈服段, 试件屈服荷载略小于材性试验中 2 根钢筋屈服荷载之和。同一试件的 4 根外部钢筋荷载 - 纵向应变曲线趋势一致, 极限抗拉强度相同, 可认为加载时试件同端钢筋受力基本一致。

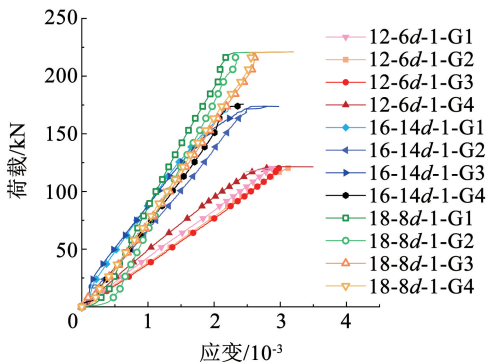


图 8 试件外部钢筋荷载 - 纵向应变曲线

Fig. 8 Load-longitudinal strain curves of specimen external rebars

#### 3.2 试件荷载 - 位移曲线

图 9 为试件荷载 - 位移曲线。除 12 mm 组试

件外, 其余试件荷载 - 位移曲线具有明显弹性段、屈服段、强化段和下降段, 其中钢筋拔出破坏试件 (14-6d、16-8d、18-8d 和 18-10d 组) 强化段发展不充分, 极限承载力由钢筋与灌浆料间黏结强度决定。当 14、16 和 18 mm 组试件搭接长度分别增加至 8d、10d 和 12d 时, 试件极限承载力提高, 钢筋母材颈缩后拉断; 继续增加搭接长度, 试件极限承载力基本不变, 约为 2 根钢筋极限承载力之和的 97%。12 mm 组试件断于钢筋焊接处, 其荷载 - 位移曲线波动幅度较大, 极限荷载仅略大于 2 倍钢筋屈服荷载, 主要为焊接质量所致。

#### 3.3 接头强度分析

规范<sup>[13-15]</sup>要求 I 级接头满足: 破坏荷载大于钢筋屈服荷载, 钢筋于套筒外部破坏; 抗拉强度与钢筋极限强度标准值之比  $f_u/f_{sk} \geq 1.10$ , 抗拉强度与屈服强度之比  $f_u/f_y \geq 1.25$ , 屈服强度实测值与标准值之比  $f_y/f_{yk} \leq 1.30$ 。ACI-318<sup>[16]</sup>要求机械连接接头抗拉强度与屈服强度之比  $f_u/f_y \geq 1.25$ 。

根据表 2, 钢筋拔出破坏试件中, 仅 16-8d 组满足规范<sup>[13-15]</sup>强度要求; 除 12 mm 组和 14-14d-3 外, 钢筋拉断破坏试件皆满足规范<sup>[13-15]</sup>承载力要求; 除 14-6d-3 外的试件均满足 ACI-318<sup>[16]</sup>要求。综上, 当 14、16、18 mm 组试件破坏形式为钢筋拉断破坏时, 接头强度指标满足国内外规范要求, 且规范<sup>[13-15]</sup>对接头强度要求高于 ACI-318<sup>[16]</sup>。

#### 3.4 接头变形性能分析

12 mm 组试件拉断于焊接处, 力学性能欠佳, 本节未对其变形性能进行分析。同等规格试件相关变形性能指标离散较小, 取平均值分析。

##### 3.4.1 搭接长度对最大力总伸长率和延性的影响

图 10(a)、(b) 分别为搭接长度对试件最大力总伸长率  $A_{sgt}$  和位移延性系数  $R_d$  的影响。其中, 延性系数  $R_d$  为极限位移与屈服位移之比。钢筋拔出破坏试件大多不满足变形性能要求, 除 14-14d-3 外的钢筋拉断破坏试件, 均满足  $A_{sgt} \geq 6\%$ <sup>[13-14]</sup>、 $R_d \geq 4\%$ <sup>[16-17]</sup>。随搭接长度增加, 最大力总伸长率和位移延性系数明显提高, 二者在破坏形式转为钢筋拉

断后趋于稳定。这是由于接头变形主要源自钢筋变形,随搭接长度增加,套筒对灌浆料和钢筋的约束能力不断提高,极限荷载下钢筋变形程度逐渐增大,试

件变形性能持续增强。当发生拉断破坏后,变形性能取决于钢筋材性。

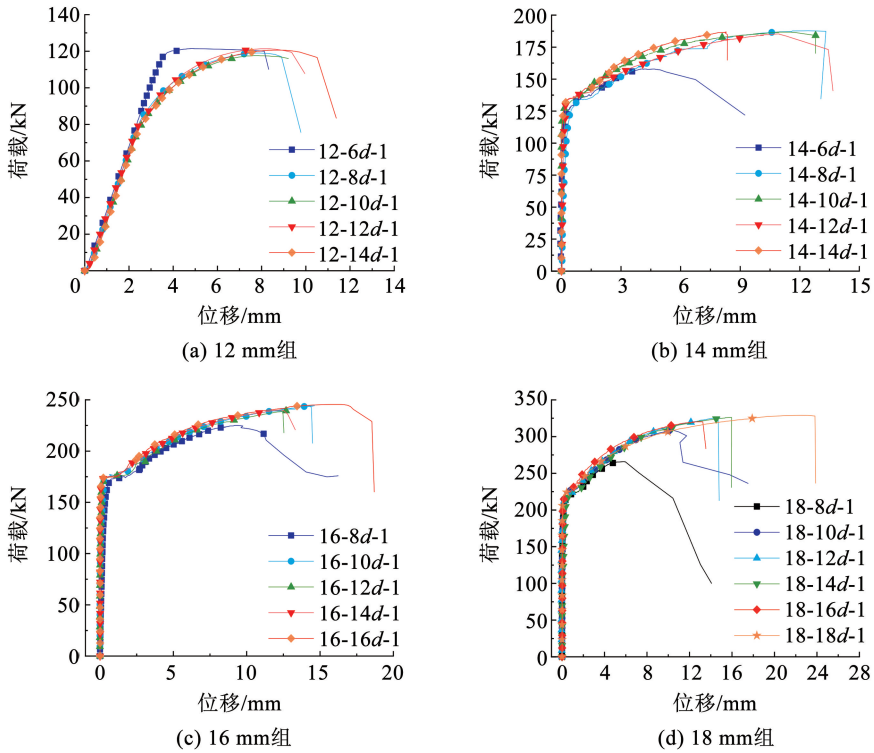


图 9 试件荷载 - 位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of specimens

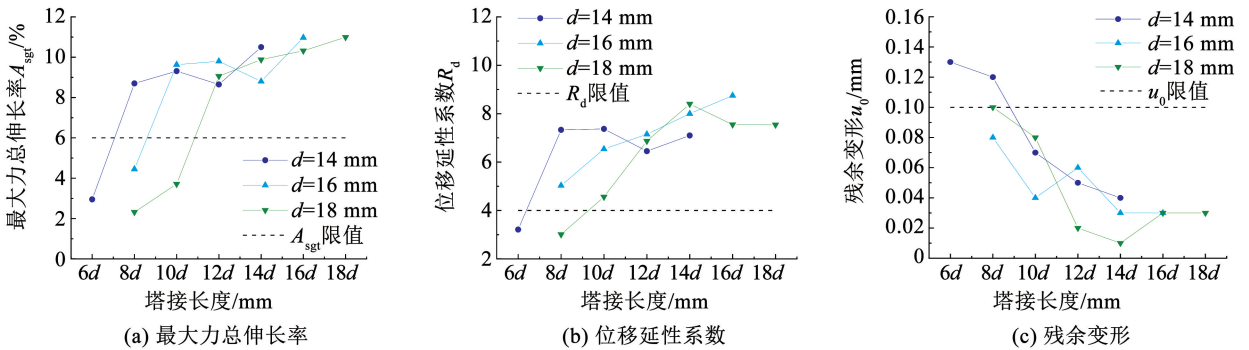


图 10 搭接长度对试件变形性能的影响

Fig. 10 Influence of lap length on deformation performance of specimens

### 3.4.2 搭接长度对残余变形的影响

搭接长度对试件残余变形的影响见图 10(c)。钢筋搭接长度小于 10d 的拔出破坏试件  $u_0$  大于 0.10 mm,不满足文献[13-14]要求。拉断破坏试件  $u_0$  皆小于 0.10 mm,满足要求。

随搭接长度增加,试件残余变形  $u_0$  总体呈下降趋势。 $u_0$  由钢筋残余变形和套筒内部钢筋 - 灌浆料微滑移组成。拔出破坏试件(14-6d、16-8d、18-8d 和 18-10d 组)内部钢筋与灌浆料的平均黏结应力较大, $u_0$  主要由数值较大的钢筋 - 灌浆料微滑移组

成。拉断破坏试件搭接长度较大,平均黏结应力相对较小,进而钢筋 - 灌浆料微滑移较低, $u_0$  主要来自数值较小的钢筋残余变形。

### 3.5 搭接长度对套筒应变影响

14~18 mm 组试件荷载 - 应变曲线规律一致,本节选取 12 mm 组和 16 mm 组试件作为典型试件进行分析。

#### 3.5.1 套筒中部截面荷载 - 纵向应变曲线

图 11 为不同搭接长度下典型试件荷载 - 纵向应变曲线。纵向应变 Z1、Z2 始终未超过材性试验

屈服应变最小值  $1\ 500 \times 10^{-6}$ , 套筒中部截面处于弹性工作阶段。外荷载加载至屈服荷载后, 12 mm 组试件破坏, 其余试件原本线性增长的 Z1、Z2 表现出一定的向压应变方向发展趋势。这是由于加载后期搭接钢筋黏结应力拉 - 压转变点逐渐向中部截面靠近, 该处黏结应力减小, Z1 处纵向拉应力存在转变为压应力的趋势<sup>[7]</sup>。图 11(d) 中曲线平直段源于部分灌浆料达极限黏结状态而破碎, 灌浆料和钢筋间产生微滑移, 形成新的黏结状态。

图 12 为极限荷载下不同搭接长度对 Z1、Z2 的

影响。结合图 11, 随搭接长度增加, 加载前期 Z2 由压应变逐渐转为拉应变, 加载后期 Z1、Z2 向压应力发展的趋势明显减弱, 极限荷载下 Z1 基本为线性增长的拉应变, Z2 由压应变转变为不断增加的拉应变。分析原因, 随搭接长度增加, 拉 - 压转变荷载增大, 转变点向中部截面的移动减缓, 中部截面黏结应力减小的趋势逐渐消失, 极限荷载下数值不断提高<sup>[7]</sup>, 其在套筒上引起的轴向力不断提高。同时灌浆料膨胀变形减小, 泊松效应下引起的纵向压应力减小。

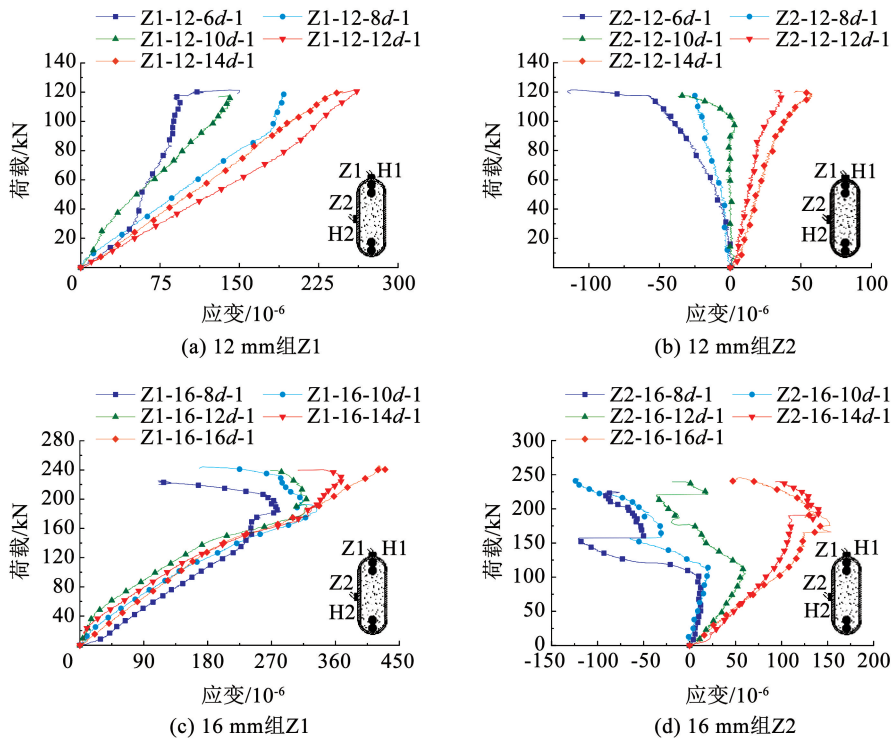


图 11 不同搭接长度试件套筒中部截面典型荷载 - 纵向应变曲线

Fig. 11 Typical load-longitudinal strain curves for middle section of specimens with different lap lengths

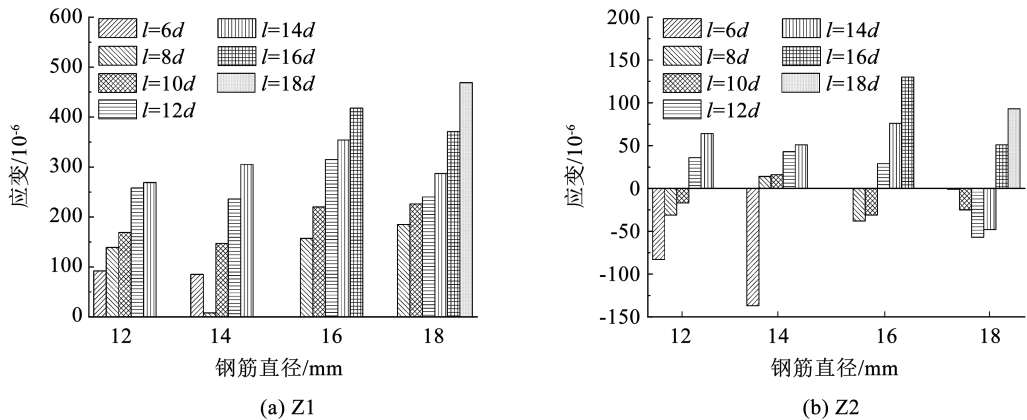


图 12 极限荷载下搭接长度对 Z1、Z2 的影响

Fig. 12 Influence of lap length on Z1 and Z2 under ultimate load

### 3.5.2 套筒中部截面荷载 - 环向应变曲线

图 13 为典型试件套筒中部截面荷载 - 环向应

变曲线。套筒中部截面始终处于弹性工作阶段。加载前期, H1、H2 分别为线性增加的压应变、拉应变。

加载后期,钢筋拔出破坏试件 H1 迅速增大,钢筋拉断破坏试件 H1、所有试件 H2 向拉应变方向快速发展。H2 数值明显大于 H1 数值,极限状态下钢筋共线趋势令后插入钢筋间灌浆料受压后更倾向于向长边侧变形。

图 14 为搭接长度对极限荷载下 H1、H2 的影响。极限荷载下,随搭接长度增加,12 mm 组试件 H1 不断减少并转变为压应变;其余组试件应变 H1 先向拉应变方向发展,再向压应力方向发展。这是由于临近极限荷载时,较短搭接长度试件的灌浆料易出现如图 7(b)、(c)所示裂缝,钢筋共线趋势加

剧,套筒长边侧灌浆料在长边方向上受相互靠近的后插入钢筋挤压而向长边膨胀,从套筒中部至套筒端部短边侧灌浆料开裂加深。原本受灌浆料膨胀变形控制的 H1 转而受黏结应力控制,H1 逐渐转变为压应变(图 13(b))。随搭接长度增加,该趋势因套筒对灌浆料约束作用的增强而消失,H1 主要受灌浆料膨胀变形控制。继续增加搭接长度,灌浆料膨胀变形持续降低,其产生的环向拉应变不断减小,H1 主要受黏结应力控制。随搭接长度增加,钢筋拔出趋势和灌浆料膨胀变形减弱,受此因素控制的 H2 持续降低。

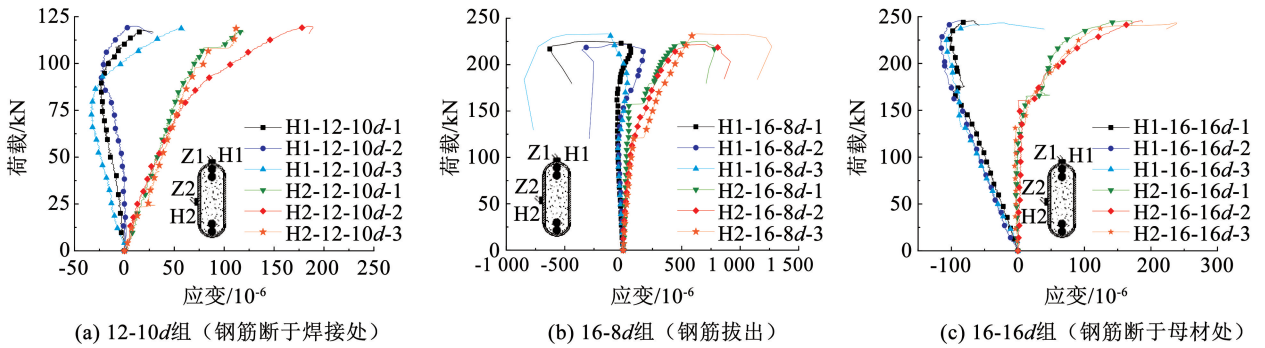


图 13 典型试件套筒中部截面荷载 - 环向应变曲线

Fig. 13 Typical load-circumferential strain curves for middle section

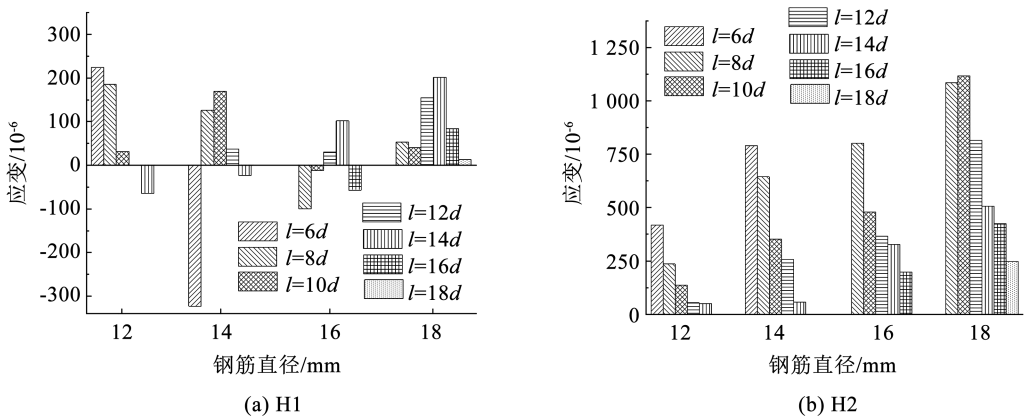


图 14 极限荷载下搭接长度对 H1、H2 的影响

Fig. 14 Influence of lap length on H1 and H2 under ultimate load

### 3.6 套筒全长度应变分布

拔出破坏试件 16-8d-2 和 18-10d-2 的搭接长度临近钢筋拉断临界搭接长度,黏结应力达到极限且应变变化规律明显,故选取二者测量套筒全长度应变分布。

#### 3.6.1 套筒全长度纵向应变分布

典型试件纵向应变沿套筒长度分布见图 15。各测点附近套筒均在弹性阶段工作,各测点应变随荷载增加不断增大。荷载从零增加至屈服荷载前,

Z2 ~ Z4 为拉应变,其余测点为压应变。试件屈服后继续增加荷载,Z2 ~ Z4 转变为快速增长的压应变。这是由于短边侧纵向应变受黏结应力控制,此时黏结应力 0 点从加载端向固定端移动,这与文献[7]研究结果一致。Z5 因受力较小在加载过程中应变变化不大。加载过程中,纵向应变基本呈中部高两端低的单峰形,其中长边侧应变主要受灌浆料变形控制,可知灌浆料在端部的膨胀变形强于中部。

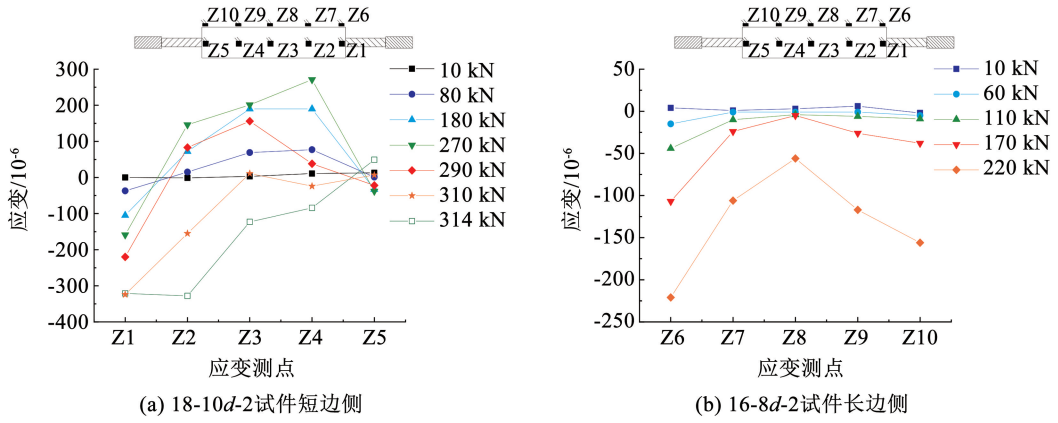


图 15 典型试件套筒全长度纵向应变分布

Fig. 15 Typical distribution of longitudinal strain along the full length of the sleeve

3.6.2 套筒全长度环向应力分布

图 16 为典型试件套筒环向应变沿套筒长度分布情况。各测点附近套筒均在弹性阶段工作。加载前期,各测点应变主要为不断增加的拉应变。当临近破坏荷载,H1、H2、H4、H5 迅速转变为压应变,这是由于在钢筋共线趋势影响下,灌浆料倾向于向套筒长边侧膨胀,套筒端部短边侧与钢筋间灌浆料产生横向裂缝并挤压破碎(图 7)。由于中部截面对灌浆料的约束强于端截面,短边侧环向应变分布基本呈凹形。图 16(b)表明在钢筋共线趋势影响下,越靠

近加载端,灌浆料越倾向于向长边侧膨胀,长边侧环向应变分布呈半峰形。

3.7 搭接长度和直径对接头承载能力的影响

图 17 为搭接长度对极限承载力和平均黏结应力的影响。由表 2 和图 17 可知:12 mm 组试件拉断于焊接处,极限承载力不受搭接长度增加的影响,仅为 2 根钢筋母材极限承载力之和的 85%;14 ~ 18 mm 组试件随搭接长度增加,极限承载力从由黏结强度决定转变为由钢筋材性决定,数值先提高后基本保持不变,平均黏结应力降低。

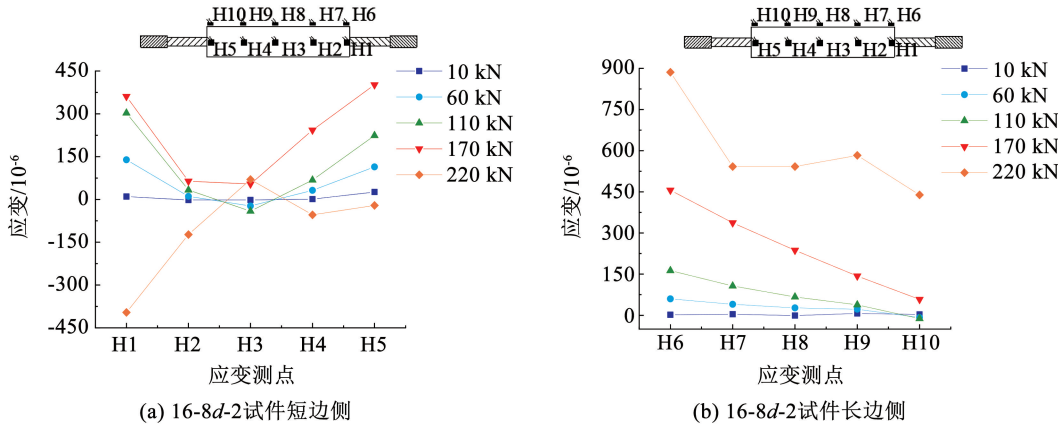


图 16 典型试件套筒全长度环向应变分布

Fig. 16 Typical distribution of circumferential strain along the full length of the sleeve

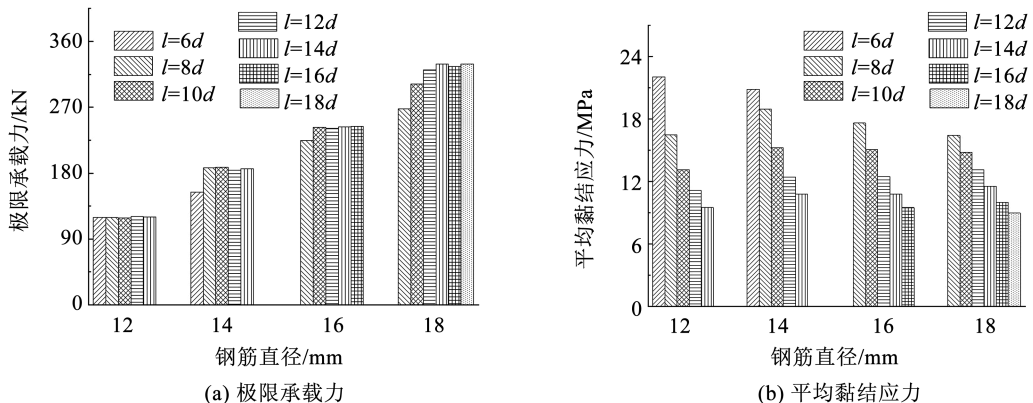


图 17 搭接长度对力学性能的影响

Fig. 17 Influence of lap length on mechanical properties

相对搭接长度相同的试件,随钢筋直径增大,钢筋-灌浆料机械咬合作用长度增长,同一套筒截面上受力钢筋面积增加,更多钢筋横肋参与同灌浆料的机械咬合作用,试件极限承载力增加。

## 4 极限黏结强度和临界搭接长度公式

### 4.1 极限黏结强度计算公式

文献[18]通过搭接钢筋对拉试验得出影响黏结强度的主要因素为:灌浆料强度、相对保护层厚度、配箍率及相对搭接长度。基于此,文献[7]提出 I 型 APC 接头极限黏结强度公式:

$$\bar{\tau}_u = \left( \alpha + \beta \frac{d}{l} \right) \left( \gamma + m \frac{D}{d} + n \rho_{sv} \right) f_{ts} \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $m$ 、 $n$  为待定常系数, $d$  为钢筋直径, $l$  为

搭接长度, $D$  为套筒内径, $f_{ts}$  为灌浆料抗拉强度,含钢率  $\rho_{sv}$  为套筒横截面钢材面积与其余面积之比。

将本次试验和文献[6]中拔出破坏试件的相关数据代入式(1),拟合出 II 型 APC 接头极限黏结强度公式:

$$\bar{\tau}_u = \left( 0.55 + 12.94 \frac{d}{l} \right) \left( 0.79 - 0.018 \frac{D_1}{d} + 6.24 \rho_{sv} \right) f_{ts} \quad (2)$$

式中  $D_1$  为套筒短边内径。

将两次试验拔出破坏试件的相关参数代入式(2),对极限黏结应力拟合值  $\bar{\tau}_u$  与试验值  $\bar{\tau}_{ue}$  进行比较,结果见表 3。 $\bar{\tau}_u/\bar{\tau}_{ue}$  范围为 0.96 ~ 1.14,平均值为 1.04,标准差为 0.02,变异系数为 0.02。故式(2)对试验数据整体拟合程度较好。

表 3 极限黏结应力拟合值和试验值对比

Tab. 3 Comparison between fitted and experimental value of ultimate bond stress

| 数据来源     | 试件编号     | $d/l$ | $D_1/d$ | $\rho_{sv}$ | $f_{ts}/\text{MPa}$ | $\bar{\tau}_u/\text{MPa}$ | $\bar{\tau}_{ue}/\text{MPa}$ | $\bar{\tau}_u/\bar{\tau}_{ue}$ |
|----------|----------|-------|---------|-------------|---------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 本次试验     | 14-6d-1  | 0.167 | 3.429   | 0.279       | 3.41                | 22.81                     | 21.37                        | 1.07                           |
|          | 14-6d-2  | 0.167 | 3.429   | 0.279       | 3.41                | 22.81                     | 21.06                        | 1.08                           |
|          | 14-6d-3  | 0.167 | 3.429   | 0.279       | 3.41                | 22.81                     | 20.21                        | 1.13                           |
|          | 16-8d-1  | 0.125 | 3.000   | 0.279       | 3.41                | 18.33                     | 17.47                        | 1.05                           |
|          | 16-8d-2  | 0.125 | 3.000   | 0.279       | 3.41                | 18.33                     | 17.35                        | 1.06                           |
|          | 16-8d-3  | 0.125 | 3.000   | 0.279       | 3.41                | 18.33                     | 18.08                        | 1.01                           |
|          | 18-8d-1  | 0.125 | 2.667   | 0.279       | 3.41                | 18.37                     | 16.32                        | 1.13                           |
|          | 18-8d-2  | 0.125 | 2.667   | 0.279       | 3.41                | 18.37                     | 16.05                        | 1.14                           |
|          | 18-8d-3  | 0.125 | 2.667   | 0.279       | 3.41                | 18.37                     | 16.98                        | 1.08                           |
|          | 18-10d-1 | 0.100 | 2.667   | 0.279       | 3.41                | 15.63                     | 15.16                        | 1.03                           |
| 18-10d-3 | 0.100    | 2.667 | 0.279   | 3.41        | 15.63               | 13.93                     | 1.12                         |                                |
| 文献[6]    | 18-204-1 | 0.088 | 3.333   | 0.143       | 4.63                | 12.72                     | 12.75                        | 1.00                           |
|          | 18-204-2 | 0.088 | 3.333   | 0.143       | 4.63                | 12.72                     | 13.23                        | 0.96                           |
|          | 18-255-1 | 0.071 | 3.333   | 0.143       | 4.63                | 11.00                     | 10.89                        | 1.01                           |
|          | 18-255-3 | 0.071 | 3.333   | 0.143       | 4.63                | 11.00                     | 10.93                        | 1.01                           |
|          | 20-227-1 | 0.088 | 3.000   | 0.143       | 4.63                | 12.75                     | 12.63                        | 1.01                           |
|          | 20-227-2 | 0.088 | 3.000   | 0.143       | 4.63                | 12.75                     | 13.15                        | 0.97                           |
|          | 20-283-1 | 0.071 | 3.000   | 0.143       | 4.63                | 11.05                     | 10.73                        | 1.03                           |
|          | 20-283-2 | 0.071 | 3.000   | 0.143       | 4.63                | 11.05                     | 10.76                        | 1.03                           |
|          | 22-248-1 | 0.089 | 2.727   | 0.143       | 4.63                | 12.85                     | 12.83                        | 1.00                           |
|          | 22-248-3 | 0.089 | 2.727   | 0.143       | 4.63                | 12.85                     | 12.43                        | 1.03                           |

### 4.2 钢筋拉断临界搭接长度

文献[6-8]指出试件钢筋拉断临界搭接长度公式:

$$l_{cr} = \frac{df_u}{4\bar{\tau}_u} \quad (3)$$

式中  $l_{cr}$  为钢筋拉断临界搭接长度。

联立式(2)和式(3)得到钢筋拉断临界搭接长度计算公式:

$$l_{cr} = \frac{df_u}{\left( 1.74 - 0.04 \frac{D_1}{d} + 13.73 \rho_{sv} \right) f_{ts}} - 23.53d \quad (4)$$

将两次试验中试件钢筋拉断临界搭接长度拟合

值  $l_{cr}$  与试验值  $l_{cre}$  比较,结果见表 4。钢筋拉断临界搭接长度拟合值与试验值近似,式(4)的拟合程度较好,可作为实际工程参考。

表 4 试件拉断临界搭接长度拟合值与试验值

Tab. 4 Fitted value and experimental value of critical lap length for specimen fracture mm

| 试件编号     | 本次试验     |           | 文献[6]    |          |
|----------|----------|-----------|----------|----------|
|          | $l_{cr}$ | $l_{cre}$ | 试件编号     | $l_{cr}$ |
| 12-6d-1  | 123.8    | 72        | 16-227-3 | 230.9    |
| 14-8d-1  | 142.3    | 112       | 18-255-3 | 256.6    |
| 16-10d-1 | 161.0    | 160       | 20-283-1 | 282.6    |
| 18-12d-1 | 180.0    | 216       | 22-312-3 | 308.3    |
|          |          |           |          | 227      |
|          |          |           |          | 255      |
|          |          |           |          | 283      |
|          |          |           |          | 312      |

为保证试件满足相关规范力学性能要求,根据表4,当钢筋直径为14、16、18 mm时,II型APC接头最小套筒长度分别取 $10d$ 、 $10d$ 和 $12d$ 。因此单拉工况下钢筋直径不大于18 mm时,建议该接头搭接长度大于 $12d$ 。

## 5 结 论

通过以钢筋直径和搭接长度为变量的II型APC接头单向拉伸试验得到以下结论:

1) 试件整体破坏形式分为钢筋拔出破坏和钢筋拉断破坏,后者分为钢筋于母材处拉断和于钢筋-螺杆焊接处拉断。

2) 随搭接长度增加,试件的强度、最大力总伸长率、延性显著提高,残余变形总体下降,当试件于钢筋母材处拉断破坏,其力学性能满足国内外规范要求。

3) 极限荷载下,随搭接长度增加:试件套筒中部短边侧纵向拉应变向压应力发展的趋势减弱,环向压应变先转变为线性增加的拉应变,再向压应变方向发展。长边侧纵向压应变向拉应变转变,环向应变为不断减小的拉应变。

4) 对套筒进行了全长度应变测量,极限荷载下纵向应变沿全长度分布整体呈单峰形,环向应变短边侧分布呈凹形,长边侧分布呈半峰形。

5) 随搭接长度增加,试件极限承载力先增加后保持不变,平均黏结应力降低。相对搭接长度相同时,随钢筋直径增加,试件极限承载力增加。

6) 极限黏结强度公式及钢筋拉断临界搭接长度公式适用性良好,单拉工况下钢筋直径不大于18 mm时,建议接头搭接长度大于 $12d$ 。

## 参 考 文 献

[1] LING J H, RAHMAN A B A, IBRAHIM I S, et al. Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load[J]. Construction and Building Materials, 2012, 33: 90. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.001

[2] LU Zhiwei, HUANG Jun, LI Yubo, et al. Mechanical behaviour of grouted sleeve splice under uniaxial tensile loading[J]. Engineering Structures, 2019, 186: 421. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.02.033

[3] ZHANG Wangxi, WANG Jia, ZHU Zhengrong, et al. Tensile behavior of fully-grouted sleeve connection by natural cooling after elevated temperature[J]. Fire Safety Journal, 2022(127): 0379. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103514

[4] 鲍佳文, 高强, 唐林, 等. 钢筋套筒灌浆连接拉伸性能的精细有限元分析[J]. 浙江大学学报, 2023, 57(4): 814  
BAO Jiawen, GAO Qiang, TANG Lin, et al. Refined finite element analysis of tensile property of grout sleeve splicing of rebars[J]. Journal of Zhejiang University, 2023, 57(4): 814. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2023.04.019

[5] 余琼. 一种新型的约束搭接套筒: ZL 201420656653.0[P]. 2015-04-01  
YU Qiong. A new confined lapping sleeve: ZL 201420656653.0[P]. 2015-04-01

[6] 余琼, 魏晋文, 魏雨桐, 等. 套筒约束两根钢筋浆锚搭接拉伸试验研究[J]. 湖南大学学报, 2019, 46(11): 20  
YU Qiong, WEI Jinwen, WEI Yutong, et al. Experimental study of grouted sleeve lapping connectors of two bars under tensile load[J]. Journal of Hunan University, 2019, 46(11): 20. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2019.11.003

[7] 余琼, 王子沁, 白少华, 等. 套筒灌浆搭接接头拉伸试验及受力机理分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(4): 109  
YU Qiong, WANG Ziqin, BAI Shaohua, et al. Sleeve lap joint grouting tensile test and stress mechanism analysis[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(4): 109. DOI: 10.11918/202006123

[8] 余琼, 唐子鸣, 张星魁, 等. 后插钢筋位置等对APC接头拉伸性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(10): 84  
YU Qiong, TANG Ziming, ZHANG Xingkui, et al. Influence of the position of the post-installed rebar and other factors on tensile performance of APC connector[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(10): 84. DOI: 10.11918/202112130

[9] 余琼, 唐子鸣, 张星魁, 等. 套筒灌浆搭接连接的L型预制剪力墙抗震试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(9): 72  
YU Qiong, TANG Ziming, ZHANG Xingkui, et al. Test on seismic behavior of L-shaped precast shear wall with grouted sleeve lapping connector[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(9): 72. DOI: 10.11918/202207038

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

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

[12] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021  
Metallic materials—tensile testing—Part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021

[13] 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  
Technical specification for grout sleeve splicing of rebars: JGJ 355—2015[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015

[14] 钢筋机械连接技术规程: JGJ 107—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016  
Technical specification for mechanical splicing of steel reinforcing bars: JGJ 107—2016[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016

[15] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010  
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010

[16] Building code requirements for structural concrete: ACI 318-19[S]. Michigan: American Concrete Institute, 2019

[17] SOUDKI K A, RIZKALLA S H, LEBLANC B. Horizontal connections for precast concrete hear walls subjected to cyclic deformations Part 1: mild steel connections[J]. Pci Journal, 1995, 40(4): 78

[18] 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  
XU Youlin, WANG Hong, SHEN Wendu. An experimental study on performance of rebar lap[J]. Building Structure, 1993(4): 20. DOI: 10.19701/j.jzjg.1993.04.005