

# HRB635 级高强钢筋与 C70 高强混凝土 黏结锚固性能试验研究

陈安英<sup>1</sup>,王月童<sup>1</sup>,蒋庆<sup>1</sup>,梁俊晖<sup>1</sup>,朱华<sup>2</sup>

(1.合肥工业大学土木与水利工程学院,安徽合肥 230009;2.安徽省建筑科学研究设计院,安徽合肥 230031)

**摘要** 目的 研究 HRB635 级高强钢筋与 C70 高强混凝土之间黏结锚固性能,为工程应用提供参考。方法 设计制作了 5 组 45 个直锚试件进行拉拔试验,分析了锚固长度、配箍率、混凝土保护层厚度等因素对锚固性能的影响。结果 试件极限承载力随配箍率和锚固长度的增加而增加,但当箍筋率  $\rho_{sv}$  大于 1.26%,锚固长度  $l_a$  大于 15d 后,配箍率和锚固长度的增加不再对试件极限承载力产生明显的影响;对于未配置箍筋的试件,当试件保护层厚度从 2d 增加到 3d 时,试件极限承载力随着保护层厚度的增加而增加,但当保护层厚度大于 3d 后,保护层厚度的增加对试件极限承载力基本没有影响。结论 在进行 HRB635 级高强钢筋和 C70 高强混凝土试件设计时,锚固长度可按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中相关公式进行计算,且具有足够的安全储备。

**关键词** HRB635 级钢筋;高强混凝土;锚固性能;拉拔试验

中图分类号 TU375

文献标志码 A

**引用格式:**陈安英,王月童,蒋庆,等. HRB635 级高强钢筋与 C70 高强混凝土黏结锚固性能试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(1): 29-37. (CHEN Anying, WANG Yuetong, JIANG Qing, et al. Experimental study on bond behavior between HRB635 steel bars and C70 high-strength concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(1): 29-37.)

## Experimental Study on Bond Behavior between HRB635 Steel Bars and C70 High-strength Concrete

CHEN Anying<sup>1</sup>, WANG Yuetong<sup>1</sup>, JIANG Qing<sup>1</sup>, LIANG Junhui<sup>1</sup>, ZHU Hua<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, China, 230009; 2. Anhui Institute of Building Research & Design, Hefei, China, 230031)

**Abstract:** The bond anchorage performance between HRB635 high strength steel bar and C70 high strength concrete is studied to provide reference for engineering application. Pull-out tests were carried out on 5 groups of 45 bond-anchoring specimens with different anchorage length, stirrup

收稿日期:2023-08-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52378152)

作者简介:陈安英(1981—),男,副教授,博士,主要从事钢结构和土木工程施工等方面研究。

ratio and concrete cover thickness, and the influence of each parameter variable on the bond performance of steel bar and recycled concrete was analyzed. The results show that for the specimens with stirrups, the increase of stirrup ratio and anchorage length of steel bars will lead to the increase of ultimate bearing capacity of the specimens. However, when stirrup ratio  $\rho_{sv}$  is not less than 1.26% and the anchorage length  $l_a$  is not less than  $15d$ , the increase of stirrup ratio and anchorage length has no obvious effect on the increase of ultimate bearing capacity of the specimen. For the specimen without stirrups, when the thickness of the protective layer of the specimen increases from  $2d$  to  $3d$ , the increase of the thickness of the concrete protective layer has a significant effect on the increase of the ultimate bearing capacity, but when the thickness of the protective layer  $c$  is greater than  $3d$ , the increase of the thickness of the protective layer has no effect on the ultimate bearing capacity of the specimen. For HRB635 grade high strength steel bar anchorage specimens, when the concrete strength reaches C70, the anchorage length can be designed according to the relevant formula of anchorage length in the Code for Design of Concrete Structures (GB 50010-2010), and has sufficient safety reserve.

**Key words:** HRB635 steel bar; high strength concrete; bond anchorage property; pull-out test

高强钢筋具有更高的抗拉强度、足够的安全储备、节约钢材用量等优点。美国、英国等国家较早对高强钢筋和高强混凝土黏结锚固性能开展研究<sup>[1-4]</sup>,并且普遍采用 500 ~ 700 MPa 等级的钢筋,而我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[5]</sup>(以下简称《规范》)中在计算锚固长度时给出的钢筋屈服强度标准值最高为 500 MPa,因此开展针对高强钢筋与高强混凝土黏结锚固问题的研究对于推广高强钢筋、完善优化现有锚固理论非常重要。毛达岭<sup>[6]</sup>、谢剑等<sup>[7]</sup>主要研究了 HRB500 级钢筋与混凝土黏结锚固性能。李艳艳<sup>[8]</sup>、王新玲<sup>[9]</sup>、王毅红<sup>[10]</sup>、李可等<sup>[11]</sup>通过试验研究了 HRB600、T63 级高强钢筋与 C60 及以下强度等级混凝土的黏结锚固性能,研究结果表明,当未配置横向箍筋时,试件多发生劈裂破坏,延性较差;普通钢筋和高强钢筋与混凝土的平均黏结强度均随着混凝土强度的增大而增大,高强钢筋与混凝土的平均黏结强度受混凝土强度的影响更为显著。丁红岩等<sup>[12]</sup>对 HTB650 高强钢筋锚固试件进行拔出试验,结果表明,在低强度混凝土试件中黏结强度实测值与《规范》<sup>[5]</sup>中计算结果基本相同,在高强度混凝土试件中两者偏差较大。张建伟等<sup>[19]</sup>通过 HRB600 级

高强钢筋与高强混凝土黏结锚固性能试验得出;HRB600 级钢筋与高强混凝土试件多发生脆性破坏,配置横向箍筋或加入钢纤维可以显著改善其延性,通过试验得出的基本锚固长度远小于采用《规范》<sup>[5]</sup>中公式计算的结果。

尽管一些学者对 500 MPa 以上的高强钢筋与混凝土之间的黏结锚固性能进行了研究,但是关于 C60 级以上混凝土的锚固性能研究相对较为有限。因此,笔者设计制作了 5 组 45 个 C70 混凝土和 HRB635 级高强钢筋直锚试件,并进行中心拉拔试验,分析了配箍率、锚固长度、混凝土保护层厚度等因素对高强钢筋与高强混凝土黏结锚固性能的影响,并提出箍筋加密构造措施,探索该措施下为充分发挥钢筋材料强度所需锚固长度,为 HRB635 级高强钢筋的工程应用和推广提供依据与参考。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验采用直径为 20 mm 的 HRB635 级高强钢筋作为锚固钢筋,直径为 8 mm 的 HRB400 级钢筋作为箍筋。钢筋材性试验结果如表 1 所示。所采用混凝土的设计强度等

级均为 C70,通过材性试验得到其立方体抗压强度为 75.3 MPa,通过《规范》<sup>[5]</sup> 公式换算其轴心抗拉强度为 4.43 MPa。

表 1 钢筋材料力学性能试验结果

Table 1 Test results of mechanical properties of steel bar materials

| 钢筋型号   | d/mm | 屈服强度<br>f <sub>y</sub> /MPa | 抗拉强度<br>f <sub>u</sub> /MPa |
|--------|------|-----------------------------|-----------------------------|
| HRB400 | 8    | 476.12                      | 636.52                      |
| HRB635 | 20   | 668.79                      | 875.80                      |

1.2 试件设计

根据《规范》<sup>[5]</sup> 规定,带肋钢筋基本锚固长度公式为

$$l_{ab}=0.14\frac{f_y}{f_t}d.$$
 (1)

锚固长度计算公式为

$$l_a=\xi_a l_{ab}.$$
 (2)

式中:f<sub>t</sub> 为混凝土轴心抗拉强度设计值,MPa,f<sub>t</sub> 在混凝土强度等级高于 C60 时按成 C60 取值,为获得合理的基本锚固长度,混凝土轴心抗拉强度设计值 f<sub>t</sub> 可按 C70 取值<sup>[13]</sup>; f<sub>y</sub> 为钢筋屈服强度设计值,MPa;d 为钢筋直径,mm;ξ<sub>a</sub> 为钢筋锚固长度修正系数,《规范》<sup>[5]</sup> 中 ξ<sub>a</sub> 取 0.75。

f<sub>t</sub> 取为 2.14 MPa,得到基本锚固长度 l<sub>ab</sub> 为 34d,锚固长度 l<sub>a</sub> 为 26d。为探索锚固试件钢筋达到抗拉强度所需要的锚固长度,并分析箍筋加密构造措施对减小锚固长度的有效性,结合《规范》<sup>[5]</sup> 值,在设计试件时,未配置箍筋试件的设计锚固长度为 30d,配置箍筋试件的设计锚固长度为 10d~25d。

设计制作 5 组 45 个直锚试件,试件截面均为 180 mm×180 mm,如图 1 所示。混凝土强度均为 C70,钢筋直径为 20 mm,如表 2 所示。N 为试验对照组;N1~N3 组(配箍率与锚固长度组)配置 8 mm 的 HRB400 级横向箍筋,用来分析箍筋加密和锚固长度对锚固性能的影响;N6 组(保护层厚度组)用来分析保护层厚度对锚固性能的影响。N6 组

为偏心置筋,其他组均为中心置筋,N 组和 N6 组未配置箍筋。

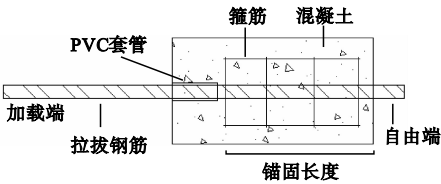


图 1 试件示意图

Fig. 1 Reinforcement details of specimens

表 2 试件参数

Table 2 Specimen parameters

| 试件编号 | l <sub>a</sub> /mm | c/mm   | 箍筋配置   | 试件/个 |
|------|--------------------|--------|--------|------|
| N    | 600(30d)           | 80(4d) | —      | 3    |
| N1-A | 500(25d)           | 80(4d) | φ8@100 | 3    |
| N1-B | 400(20d)           | 80(4d) | φ8@100 | 3    |
| N1-C | 300(15d)           | 80(4d) | φ8@100 | 3    |
| N1-D | 200(10d)           | 80(4d) | φ8@100 | 3    |
| N2-A | 500(25d)           | 80(4d) | φ8@80  | 3    |
| N2-B | 400(20d)           | 80(4d) | φ8@80  | 3    |
| N2-C | 300(15d)           | 80(4d) | φ8@80  | 3    |
| N2-D | 200(10d)           | 80(4d) | φ8@80  | 3    |
| N3-A | 500(25d)           | 80(4d) | φ8@60  | 3    |
| N3-B | 400(20d)           | 80(4d) | φ8@60  | 3    |
| N3-C | 300(15d)           | 80(4d) | φ8@60  | 3    |
| N3-D | 200(10d)           | 80(4d) | φ8@60  | 3    |
| N6-A | 600(30d)           | 60(3d) | —      | 3    |
| N6-B | 600(30d)           | 40(2d) | —      | 3    |

注:l<sub>a</sub> 为锚固长度;c 为保护层厚度。

1.3 加载与测量

采用 30 t 穿心式千斤顶,配合专用反力架对试件进行中心拉拔加载,在试件底面、钢筋加载端和自由端分别固定一个位移计,用于测量钢筋相对于混凝土的滑移,如图 2 所示。按照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)中要求进行分级加载,每级荷载为设计极限的 10%,每级荷载保持 5~10 min,通过压力传感器测量拉拔过程中试件在每级荷载下的拉拔力,观察裂缝的形状与分布,并记录试验数据,整套操作持续至试件发生破坏。在钢筋表面均匀布置 5 个应变片,动态采集数据,采集频率为 10 Hz,应变

片测点布置如图3所示。

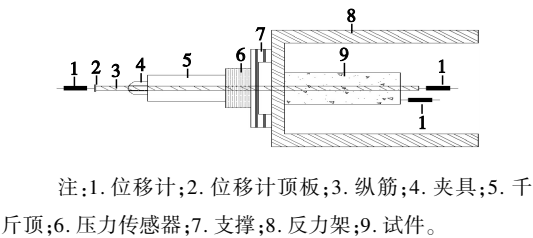


图2 加载装置图  
Fig. 2 Loading device diagram

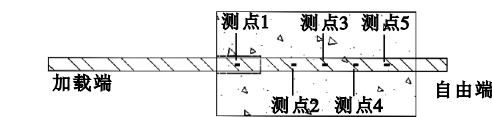


图3 钢筋测点布置图  
Fig. 3 Steel measuring points layout diagram

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验结果与现象

表3为5组45个直锚试件的拉拔试验结果和现象。

表3 主要试验结果

Table 3 Main test results

| 试件编号 | $F_u/\text{kN}$ | 破坏特征             |
|------|-----------------|------------------|
| N    | 247.71          | 钢筋拉断破坏           |
| N1-A | 251.12          | 钢筋拉断破坏           |
| N1-B | 250.48          | 钢筋拉断破坏           |
| N1-C | 248.34          | 钢筋拉断破坏           |
| N1-D | 178.26          | 钢筋拔出破坏           |
| N2-A | 253.62          | 钢筋拉断破坏           |
| N2-B | 255.47          | 钢筋拉断破坏           |
| N2-C | 259.73          | 钢筋拉断破坏           |
| N2-D | 219.01          | 钢筋屈服后拔出破坏        |
| N3-A | 253.84          | 钢筋拉断破坏           |
| N3-B | 257.73          | 钢筋拉断破坏           |
| N3-C | 256.87          | 钢筋拉断破坏           |
| N3-D | 248.13          | 钢筋屈服后拔出破坏/钢筋拉断破坏 |
| N6-A | 243.35          | 劈裂破坏,同时发生钢筋拉断破坏  |
| N6-B | 223.39          | 钢筋屈服后混凝土劈裂破坏     |

注:  $F_u$  为试件极限承载力。

试验破坏形态可分为钢筋拔出破坏、钢筋屈服后拔出破坏、钢筋屈服后混凝土劈裂破坏和钢筋拉断破坏,如图4所示。

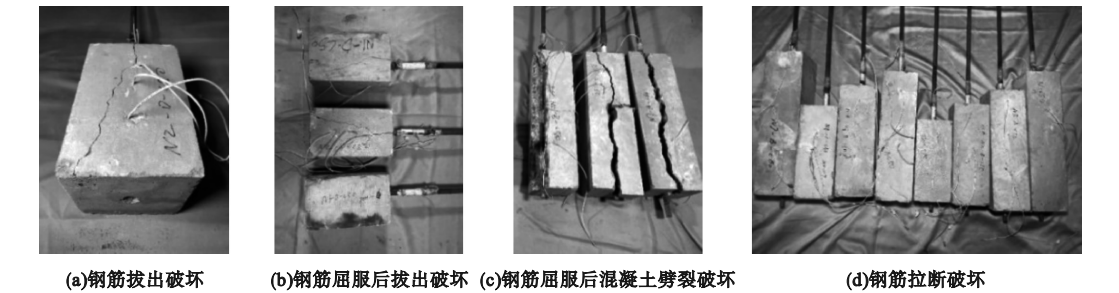


图4 试件破坏现象

Fig. 4 Specimen failure phenomenon

#### 2.1.1 钢筋拔出破坏和钢筋屈服后拔出破坏

N1~N3组中锚固长度最小的试件( $l_a$ 为 $10d$ )均发生此类黏结滑移破坏。由于配箍率较低,N1组试件钢筋在被拔出时未发生屈服,破坏形态为钢筋拔出破坏。N2、N3组试件钢筋在被拔出时已经屈服,破坏形态为钢筋屈服后拔出破坏,如图4(a)所示。这两种破坏形态相似,都是在加载端混凝土保护层处先发生开裂,并形成纵向裂缝,随着荷载不断增加,这些裂缝的宽度逐渐扩大,并沿纵

向向自由端发展,直到贯通整个试件;当黏结力达到极限状态时,自由端开始发生滑移现象。此外,通过测量N1~N3组发生此类破坏试件的裂缝宽度,发现随着箍筋加密,混凝土表面纵向裂缝的宽度逐渐减小。

#### 2.1.2 钢筋屈服后混凝土劈裂破坏

钢筋屈服后混凝土劈裂破坏均发生在未配置箍筋且保护层较小的试件,如图4(b)所示。试件破坏现象为在加载端混凝土保护层较小处开裂,产生纵向微裂缝,随着荷载的增



加,裂缝的宽度逐渐扩大,并从加载端向自由端延伸;当荷载达到钢筋屈服荷载后,加载端滑移速率不断增大,表面裂缝发展成两条较宽的主裂缝,并贯通整个试件;当达到极限荷载时,试件发生吱吱的响声,随后突然在裂缝处发生劈裂,并且伴随剧烈响声。

2.1.3 钢筋拉断破坏

当试件钢筋锚固长度  $l_a$  大于  $15d$ ,且具有足够的横向约束力时,试件发生钢筋拉断破坏,在加载端夹具处断裂,如图 4(c) 所示。钢筋自由端无相对滑移,试件表面基本不产生竖向微裂缝。

2.2 加载端滑移变化规律

钢筋与混凝土相对滑移测量装置如图 5 所示,相对滑移公式<sup>[14]</sup>为

$$S_L = S_F - \varepsilon_{AB} L_{AB} \tag{3}$$

式中: $S_L$  为钢筋加载端相对滑移,mm; $S_F$  为钢筋自由端相对滑移,mm; $L_{AB}$  为 PVC 管距夹具间距离,mm; $\varepsilon_{AB}$  为 AB 段钢筋的变形,mm。

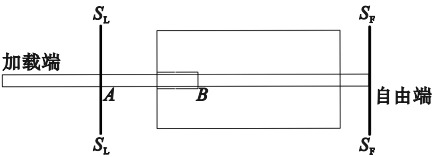


图 5 加载端相对滑移测量

**Fig. 5** Measurement of relative slip at loading end

根据破坏形态,试件的荷载 - 加载端滑移曲线可分为四种,如图 6 所示。第一种为试件 N1-D 发生钢筋拔出破坏曲线,滑移曲线特征是当达到极限荷载后,荷载陡降,加载端滑移迅速增加,随着荷载继续施加,荷载趋近于定值,加载端滑移不断增大,直至钢筋拔出。第二种为试件 N2-D 发生钢筋屈服后拔出破坏曲线,曲线特征可分为微滑移段、滑移段、滑移损伤加重段、下降段及残余变形五个阶段<sup>[15]</sup>。首先是微滑移段,此阶段滑移较小,承载力的增加速率相对较快;滑移段表现为钢筋在达到屈服阶段后曲线有一段较长的滑移段,荷载增加速率缓慢。当到达极限荷

载后,曲线特征与拔出破坏曲线特征相似,承载力开始下降,结构仍然存在残余滑移变形。第三种为试件 N6-B 发生钢筋屈服后混凝土劈裂破坏曲线,曲线特征为钢筋在达到屈服阶段后有一段较长平直的滑移段,当达到极限荷载后试件突然劈裂破坏,承载力降为零。第四种为试件 N1-B 发生钢筋拉断破坏的荷载 - 加载端滑移曲线,该试件锚固长度较长,且配有箍筋,钢筋与混凝土黏结强度较高,曲线特征表现为有明显的屈服阶段,当钢筋进入屈服阶段后随着荷载的增大,加载端滑移增加的速度逐渐加快,黏结强度逐渐减小,直至发生钢筋拉断。

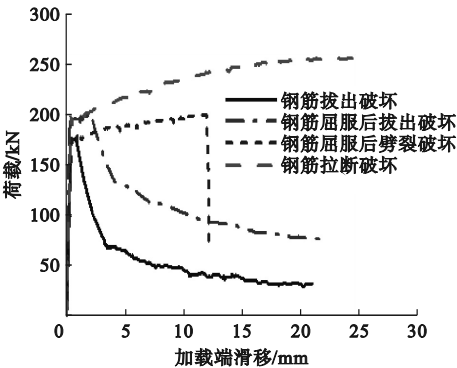


图 6 不同破坏形态荷载 - 加载端滑移曲线

**Fig. 6** Load-load end slip curves of different failure modes

2.3 钢筋应变变化规律

对试件不同位置处钢筋应变进行测量,结果如图 7 所示。因为 N1 ~ N3 组为同一参数,试件数目较多,所以只选取部分试件的钢筋应变分布曲线。当钢筋进入屈服阶段后,无法准确地测量此时的钢筋应变,所以图 7 中钢筋应变在超过屈服应变后用其屈服应变表示。

由图 7 可知,各试件钢筋在未达到屈服时,钢筋应变和荷载均呈现线性增加的关系。试件在施加荷载后,靠近加载端 1 号应变片处钢筋应变较大,而自由端钢筋应变基本为 0,钢筋应变沿加载端至自由端逐渐减小,并且加载端的钢筋应变变化速率远高于自由端的。当荷载达到钢筋的屈服荷载时,加载端

钢筋首先达到屈服,随着荷载的进一步增加,钢筋沿加载端向自由端不断达到屈服应变;当达到极限荷载,试件发生破坏,锚固长度较短试件的自由端应变高于锚固长度较长的。从图 7(a) ~ 7(b) 可知,当试件发生钢筋屈服后拔出破坏时,钢筋锚固段内屈服长度随锚固长度的增加而增加,如果试件的锚固长度达到一定值后,试件发生钢筋拉断破坏,此

时钢筋的锚固段内屈服长度不再受锚固长度的影响。从图 7(c) ~ 7(e) 可知,N2-A 试件距加载端距离 20d 处的钢筋应变基本为 0,而 N2-D 试件靠近自由端 5 号应变片处钢筋应变达到了  $1.0 \times 10^{-3}$ ,远高于 N2-A 的。从图 7(f) ~ 7(i) 可知,锚固段的钢筋屈服长度会随着配箍率、混凝土强度和保护层厚度的增加而减小。

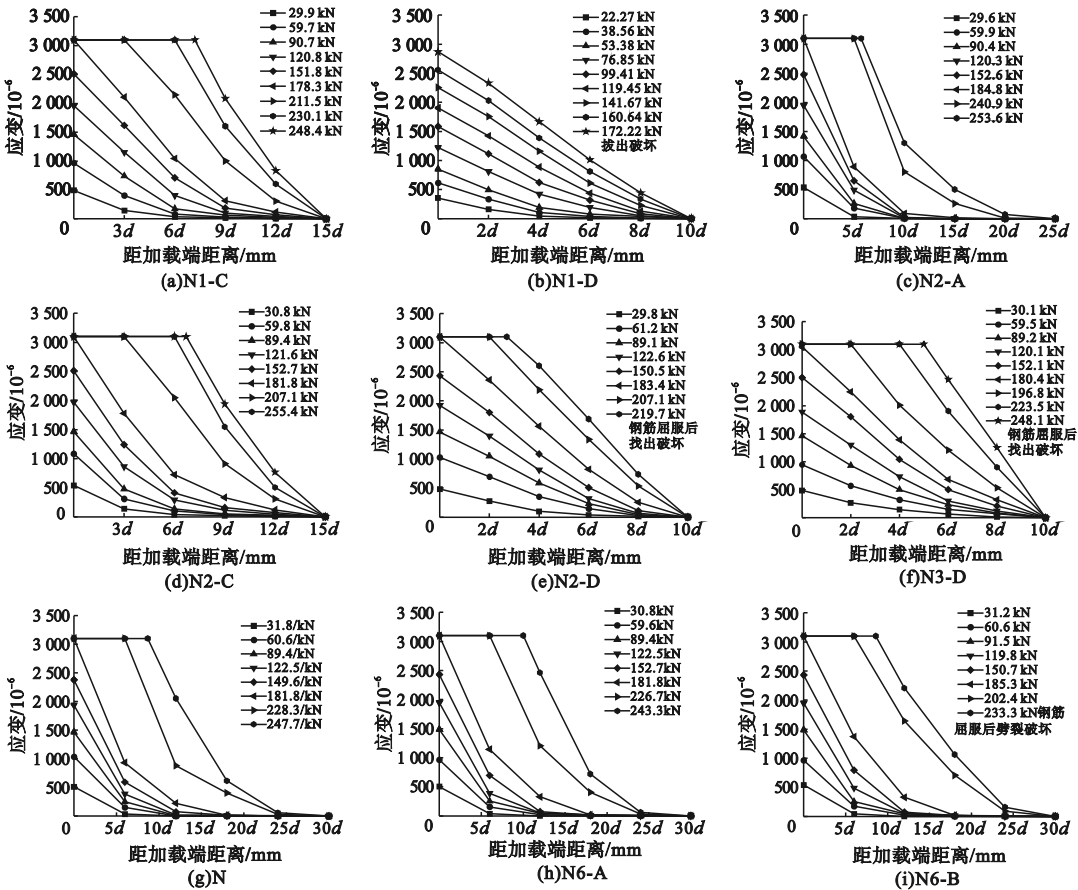


图 7 不同位置钢筋应变变化规律

Fig. 7 The variation law of steel bar strain at different positions

3 各参数对锚固性能影响

3.1 锚固长度对锚固性能的影响

图 8 为 N1、N2、N3 组试件的荷载 - 加载端滑移曲线,图 9 为锚固长度和配箍率对试件极限承载力影响曲线。

由表 3 可知,锚固长度  $l_a$  为 10d 的试件均发生黏结滑移破坏,随着锚固长度的增加,试件由滑移破坏转为钢筋拉断破坏。由图 8

和图 9 可以看出,试件锚固长度在 10d ~ 15d 时,曲线变化显著,其极限承载力随锚固长度的增加而增加;当试件锚固长度在 15d ~ 25d 时,试件发生钢筋拉断破坏时,图 9 曲线变得平缓,锚固长度增加后,试件极限承载力未发生显著变化。究其原因当锚固长度较长时,高应力区域相对较小,且主要集中在加载端,自由端应力较小,试件在发生黏结滑移破坏前钢筋先被拉断。

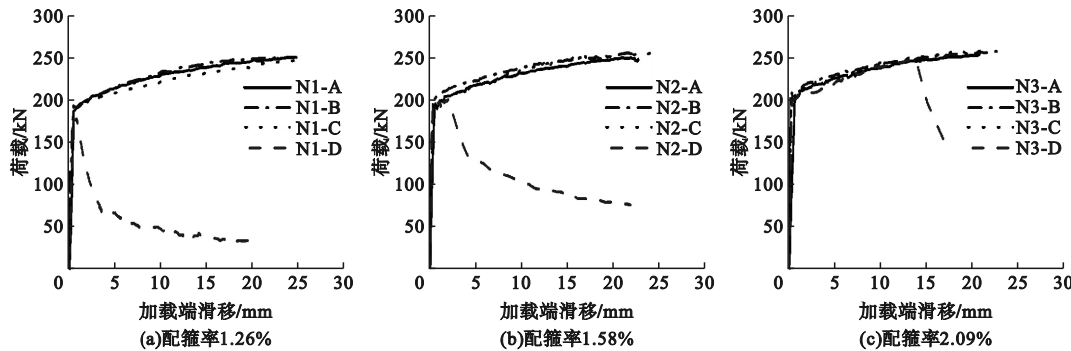


图 8 不同锚固长度下荷载 - 加载端滑移曲线

Fig. 8 Load-load end slip curves under different anchorage lengths

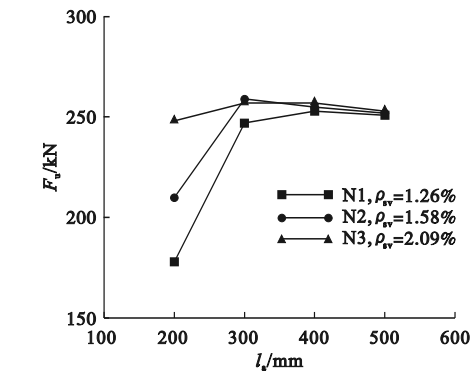


图 9 锚固长度和配箍率对试件极限承载力影响

Fig. 9 The influence of anchorage length and reinforcement ratio on the ultimate bearing capacity of the specimen

3.2 配箍率对锚固性能的影响

图 10 为不同配箍率下的荷载 - 加载端滑移曲线。N1 组的配箍率  $\rho_{sv}$  为 1.26%, N2 组  $\rho_{sv}$  为 1.58%, N3 组  $\rho_{sv}$  为 2.09%, 各组锚固长度分别为  $10d$ 、 $15d$  和  $20d$ 。由图 10 可知, 试件锚固长度  $l_a$  为  $10d$  时, 随着配箍率

的增加, 试件破坏形态由钢筋拔出破坏转为钢筋屈服后拔出破坏, 试件极限承载力也有显著的提升, 结合图 9 可以看出, 试件极限承载力与配箍率基本呈现线性增加。这是因为在混凝土产生劈裂裂缝之后, 箍筋对混凝土有明显的约束作用, 抑制了裂缝的发展, 增加了黏结强度。当试件锚固长度  $l_a$  大于  $15d$  后, 试件均发生钢筋拉断破坏, 由图 9 可以看出, 配箍率的增加未对试件极限承载力产生明显的影响。由表 3 可知, 配箍率  $\rho_{sv}$  为 1.26% 和  $\rho_{sv}$  为 1.58%、钢筋锚固长度  $l_a$  为  $15d$  的试件, 与试件配箍率  $\rho_{sv}$  为 2.09%、锚固长度  $l_a$  为  $10d$  均发生钢筋拉断破坏。这说明随着箍筋加密, HRB635 级钢筋越能充分发挥其材料强度, 所需的锚固长度也逐渐减小。并且配置箍筋试件锚固长度只需要《规范》<sup>[5]</sup> 计算值  $26d$  的一半, 这说明采用《规范》<sup>[5]</sup> 值设计箍筋加密试件的受拉钢筋锚固长度具有足够的安全储备。

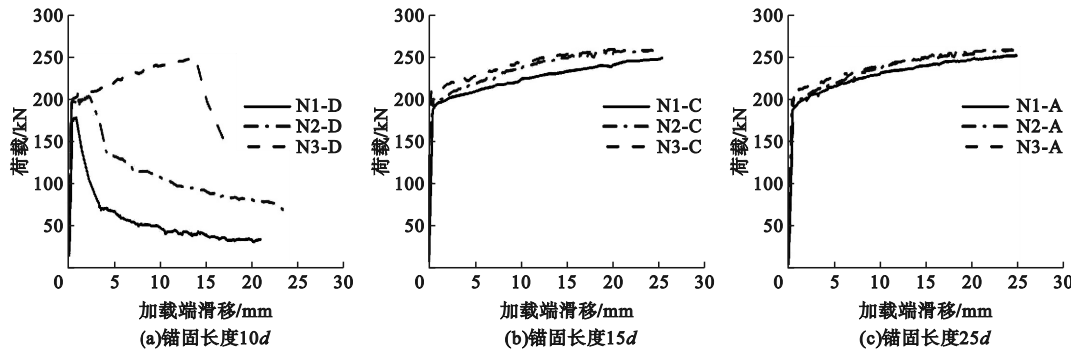


图 10 不同配箍率下荷载 - 加载端滑移曲线

Fig. 10 Load-load end slip curves under different stirrup ratios

3.3 混凝土保护层厚度对锚固性能的影响

对照组试件 N 和 N6-A、N6-B 试件保护层厚度分别为  $2d$ 、 $3d$  和  $4d$ , 锚固长度均为  $30d$ 。这三组试件荷载-加载端滑移曲线和相对保护层厚度对极限承载力影响曲线, 分别如图 11、图 12 所示。

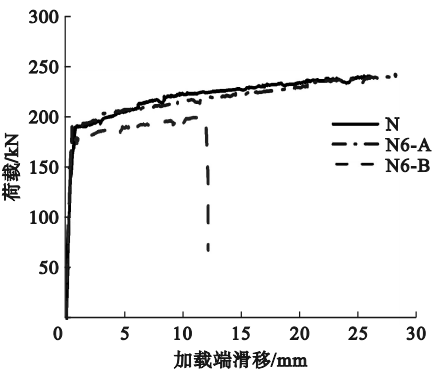


图 11 不同保护层厚度下荷载-加载端滑移曲线  
Fig. 11 Load-load end slip curves under different protective layer thickness

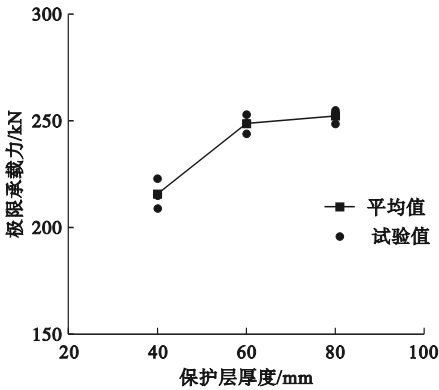


图 12 保护层厚度对试件极限承载力影响  
Fig. 12 The influence of protective layer thickness on the ultimate bearing capacity of the specimen

由图 11 可知, 当钢筋达到强化阶段时, 试件的黏结强度随保护层厚度的增加而有所提高, 并且对于保护层厚度较大的试件当达到极限承载力时加载端滑移量相对较小。结合图 12 可以看出, 保护层厚度对于锚固性能影响较大, 尤其是对于发生劈裂破坏的试件。当试件保护层厚度从  $2d$  增加到  $3d$  时, 试件承载力随着保护层厚度的增加而增加。这是因为在一定范围内, 随着保护层厚度的增加,

试件横向约束力提高, 推迟了混凝土劈裂裂缝的产生<sup>[10]</sup>, 从而提升试件极限承载力; 当保护层厚度从  $3d$  增加到  $4d$ , 试件破坏形态均转为钢筋拉断破坏, 曲线变得平缓, 保护层厚度对锚固性能的影响减弱。

由表 3 可知, 对未配置箍筋的试件, 试件锚固长度  $l_a$  为  $30d$  时, N6-B 组 ( $2d$ ) 钢筋屈服后混凝土发生劈裂破坏, 钢筋不能充分发挥材料强度; N6-A 组 ( $3d$ )、N 组 ( $4d$ ) 发生钢筋拉断破坏, 钢筋能够充分发挥材料强度。这说明随混凝土保护层厚度的增加, 试件由劈裂破坏转为钢筋拉断破坏。对比试验结果和采用《规范》<sup>[5]</sup> 所计算出的基本锚固长度得出, 未配置箍筋试件的锚固长度可按《规范》<sup>[5]</sup> 的基本锚固长度取值, 且所需保护层厚度  $c$  不小于  $3d$ 。

4 结 论

(1) HRB635 级高强钢筋与 C70 高强混凝土构件破坏形态可分为 4 类: 配有箍筋构件在锚固长度不足时为拔出破坏或钢筋屈服拔出破坏; 未配箍筋构件, 当相对保护层厚度较小时为钢筋屈服后混凝土劈裂破坏; 当构件配置箍筋或具有足够的相对保护层和锚固长度时为钢筋拉断破坏。

(2) 对于配置箍筋的构件, 当锚固长度  $l_a$  为  $10d$  时, 构件极限承载力随配箍率的增加而增加; 当锚固长度  $l_a$  大于  $15d$  后, 配箍率的增加未对构件极限承载力产生明显的影响; 对于未配置箍筋的构件, 当构件保护层厚度从  $2d$  增加到  $3d$  时, 构件承载力随着保护层厚度的增加而增加; 当保护层厚度从  $3d$  增加到  $4d$  时, 保护层厚度的增加对构件极限承载力基本没有影响。

(3) 在进行 HRB635 级高强钢筋与 C70 高强混凝土锚固长度设计时, 当配箍率  $\rho_{sv}$  大于  $1.26\%$  时, 锚固长度可按《规范》<sup>[5]</sup> 中锚固长度计算公式取值, 且具有足够的安全储备; 对未配置箍筋的构件, 保护层厚度  $c$  需大于



3d, 构件锚固长度可按《规范》<sup>[5]</sup> 中基本锚固长度取值。

## 参考文献

- [1] AZIZINAMINI A, STARK M, ROLLER J J, et al. Bond performance of reinforcing bars embedded in high strength concrete [J]. ACI structural journal, 1993, 90(5): 554 – 561.
- [2] CHUN S C, OH B, LEE S H, et al. Anchorage strength and behavior of headed bars in exterior beam-column joints [J]. ACI structural journal, 2009, 106(5): 579 – 590.
- [3] TOTH M, BOKOR B, SHARMA A. Anchorage in steel fiber reinforced concrete-concept, experimental evidence and design recommendations for concrete cone and concrete edge breakout failure modes [J]. Engineering structures, 2019, 181(15): 60 – 75.
- [4] PRINCE M J R, SINGH B. Investigation of bond behaviour between recycled aggregate concrete and deformed steel bars [J]. Materials & structures, 2014, 15(2): 154 – 168.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [6] 毛达岭, 刘立新, 范丽. HRB500 级钢筋粘结锚固性能的试验研究 [J]. 工业建筑, 2004(12): 67 – 69.  
(MAO Daling, LIU Lixin, FAN Li. Experimental study on bond-anchorage properties of HRB500 steel bars in concrete [J]. Industrial construction, 2004(12): 67 – 69.)
- [7] 谢剑, 韩超, 宋晓程, 等. 高强钢筋与高强混凝土粘结锚固性能试验研究 [J]. 建筑科学, 2015, 31(5): 1 – 5.  
(XIE Jian, HAN Chao, SONG Xiaocheng, et al. Experimental study on bonding properties between high-strength reinforcing bar and high-strength concrete [J]. Building science, 2015, 31(5): 1 – 5.)
- [8] 李艳艳, 苏恒博. 600 MPa 钢筋粘结锚固性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2017, 47(24): 19 – 25.  
(LI Yanyan, SU Hengbo. Experimental research on bond-anchorage property of 600 MPa steel bars [J]. Building structure, 2017, 47(24): 19 – 25.)
- [9] 王新玲, 吴凯鑫, 朱俊涛. 600 MPa 级钢筋与高强混凝土黏结锚固性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2019, 49(7): 113 – 118.  
(WANG Xinling, WU Kaixin, ZHU Juntao. Experimental research on bonding-anchorage properties between 600 MPa steel bar and high strength concrete [J]. Industrial construction, 2019, 49(7): 113 – 118.)
- [10] 王毅红, 赵一迪, 牛行行, 等. 新型高强钢筋与混凝土黏结锚固性能试验 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(6): 507 – 512.  
(WANG Yihong, ZHAO Yidi, NIU Hanghang, et al. Experimental study of bond-anchorage properties of a new type high-strength rebar with concrete [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2020, 53(6): 507 – 512.)
- [11] 李可, 徐朝阳, 吴凯鑫, 等. 600 MPa 级钢筋与高强混凝土黏结 – 滑移关系研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(2): 54 – 60.  
(LI Ke, XU Zhaoyang, WU Kaixin, et al. Study on bond-slip relationship between 600MPa reinforcement steel bars and high strength concrete [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2021, 42(2): 54 – 60.)
- [12] 丁红岩, 刘源, 李海瑞, 等. 高强钢筋与混凝土锚固性能研究 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(4): 376 – 384.  
(DING Hongyan, LIU Yuan, LI Hairui, et al. Anchoring behavior between high-strength steel bar and concrete [J]. Journal of Tianjin university (science and technology), 2016, 49(4): 376 – 384.)
- [13] 张建伟, 李晨, 冯曹杰, 等. HRB600 级钢筋与高强混凝土的黏结性能试验研究 [J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(6): 566 – 574.  
(ZHANG Jianwei, LI Chen, FENG Caojie, et al. Experimental study on bond behavior between HRB600 steel bars and high-strength concrete [J]. Journal of Beijing university of technology, 2019, 45(6): 566 – 574.)
- [14] 易伟建, 郑明明. 屈服后钢筋黏结锚固性能试验研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 79 – 89.  
(YI Weijian, ZHENG Mingming. Experimental study on bond anchorage properties of steel bar after yielding [J]. Journal of Hunan university (natural sciences), 2022, 49(3): 79 – 89.)
- [15] 曹万林, 刘熙, 乔崎云, 等. 钢筋中高强再生混凝土黏结滑移性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(S2): 127 – 134.  
(CAO Wanlin, LIU Xi, QIAO Qiyun, et al. Experimental study on bond slip behavior of ordinary and high strength recycled concrete and steel bars [J]. Journal of building structures, 2016, 37(S2): 127 – 134.)
- (责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)