

文章编号:1671-6833(2004)02-0054-05

HRB 500 钢筋粘结锚固性能及设计建议

毛达岭<sup>1</sup>, 刘立新<sup>1</sup>, 范 丽<sup>2</sup>

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 平顶山工学院设计院, 河南 平顶山 467000)

摘 要: 通过对 72 个 HRB 500 钢筋粘结锚固试件的拉拔试验, 研究 HRB 500 钢筋的粘结锚固性能. 在试验的基础上给出了 HRB 500 钢筋粘结强度的计算公式, 并在可靠度分析的基础上提出了 HRB 500 钢筋混凝土构件的锚固长度设计建议. 研究表明: HRB 500 钢筋的粘结锚固性能与普通月牙肋钢筋相同, 其粘结性能随混凝土的强度提高而提高; 当  $c/d < 4.5$ , 粘结强度随保护厚度的增大而增大, 随锚固长度的增加而降低. 锚固长度可按现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002) 的规定公式计算.

关键词: HRB 500 钢筋; 粘结锚固; 可靠度  
中图分类号: TU 502<sup>+</sup>.6 文献标识码: A

0 引言

HRB 500 钢筋是指强度标准值为 500 MPa 的热轧带肋钢筋, 这种钢筋已列入我国国家标准《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》(GB 1499-1998), 但因缺乏相应的钢筋混凝土构件的试验资料而尚未列入我国现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002) 中. 而在发达国家, 500 MPa 的钢筋已成为混凝土结构中的非预应力主导筋. 为尽快使我国混凝土结构用钢筋与国际接轨, 促进高强度钢筋在实际工程中的应用, HRB 500 钢筋混凝土构件性能的试验研究就成为关键. HRB 500 钢筋的粘结锚固性能试验就是其中之一. 本文通过 72 个试件的拉拔试验, 研究混凝土强度、保护层厚度、锚固长度和配箍率对 HRB 500 钢筋粘结锚固性能的影响, 确定 HRB 500 钢筋在混凝土中的锚固长度, 并提出 HRB 500 钢筋在工程实际应用中的锚固长度设计建议.

HRB 500 钢筋是月牙肋钢筋, 其外形参数与其他热轧带肋钢筋相同. 本试验所采用的 HRB 500 钢筋均由北京首钢集团提供, 表 1 为实测 HRB 500 钢筋的力学性能.

从表中可以看出, HRB 500 钢筋实测的屈服强度均大于 500 MPa, 强屈比在 1.2~1.3 之间,  $\delta_5$ ,  $\delta_g$  均超过 GB 1499-1998 的要求, 是一种强度高、

延性好的钢筋.

表 1 HRB 500 钢筋力学性能试验结果  
Tab. 1 Mechanical capacity of HRB 500 steel bar

$d /$ mm	$f_y^0 /$ (N·mm <sup>-2</sup> )	$f_t^0 /$ (N·mm <sup>-2</sup> )	强屈比	$\delta_5 /$ %	$\delta_g /$ %	$E_s /$ (N·mm <sup>-2</sup> )
8	560	680	1.21	22.5	9.45	$2.10 \times 10^5$
12	515	659	1.28	31.7	17.0	$2.11 \times 10^5$
18	567	709	1.25	27.8	15.4	$2.13 \times 10^5$
25	537	700	1.30	25.2	13.5	$2.05 \times 10^5$

说明: 1.  $f_y^0$  为屈服强度;  $f_t^0$  为抗拉强度;  $\delta_5$  为断口伸长率;  $\delta_g$  为均匀伸长率;  $E_s$  为弹性模量; 2. 表中所列  $f_y^0$ ,  $f_t^0$ ,  $\delta_5$ ,  $\delta_g$ ,  $E_s$  均为试验结果的平均值.

1 试验概况

1.1 试件的设计与制作

根据试验要求, 设计了 A、B、C、D 四组共 72 个试件, 分别对应于混凝土强度、保护层厚度、锚固长度和配箍率影响的试件<sup>[1]</sup>. 试件示意图见图 1, 各组试件的具体情况见表 2. 其中 A、B、C 组试件为中心置筋, D 组试件的薄保护层是通过偏心置筋实现的. 试件所用混凝土均为普通碎石混凝土.

1.2 试验项目观测及结果

整个试验在 WE-30 型液压式万能材料试验

收稿日期: 2003-10-07; 修订日期: 2003-12-18

基金项目: 河南省自然科学基金科研项目(0040041800)

作者简介: 毛达岭(1975-), 女, 河南省唐河县人, 郑州大学硕士研究生.

机上进行,并根据《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)的要求分级加载.分别在试件两端安装百分表量测各级荷载下加载端和自由端滑移,人工读数.拉拔力由试验机油压表读出,并用荷载传感器读数校核.试验装置示意图图 2.

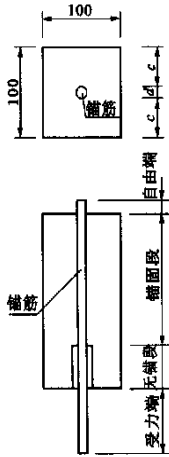
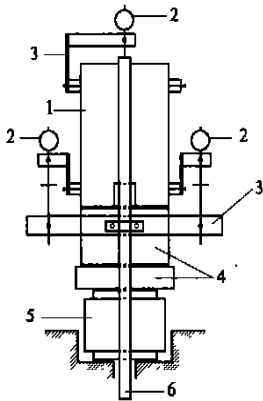


图 1 试件示意图  
Fig. 1 Test specimen sketch

根据试件从荷载为零直至破坏的各级荷载值及对应的滑移值,由  $\tau=\frac{F}{\pi d l_a}$  计算平均粘结应力得到各试件的粘结应力滑移曲线.图 3 为拉拔试件的典型粘结滑移曲线.



1. 试件;2. 百分表;3. 仪表架;  
4. 垫块;5. 荷载传感器;6. 锚筋

图 2 试验装置示意图  
Fig. 2 Test equipment sketch

表 2 拔出试验试件表

Tab. 2 Pull-out test specimens list						
试件编号	设计混凝土强度等级	锚筋直径 $d/\text{mm}$	锚固长度 $l_a/\text{mm}$	保护层厚度 $c/\text{mm}$	配箍状况	试件个数
A-I	C20	12	120	44	—	6
A-II	C30	12	120	44	—	6
A-III	C40	12	120	44	—	6
B-I	C30	8	80	46	—	6
B-II	C30	18	180	41	—	6
B-III	C30	25	250	37.5	—	6
C-I	C30	12	60	44	—	6
C-II	C30	12	180	44	—	6
C-III	C30	12	240	44	—	6
C-IV	C30	12	300	44	—	6
D-I	C30	18	180	15	$\phi 4@80$	6
D-II	C30	18	180	25	$\phi 4@80$	6

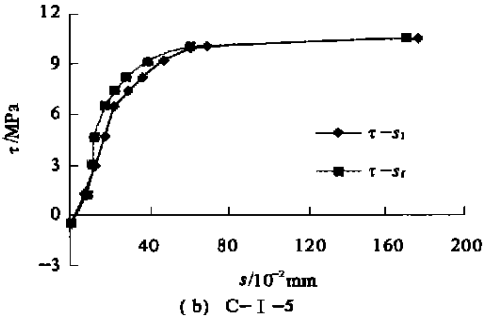
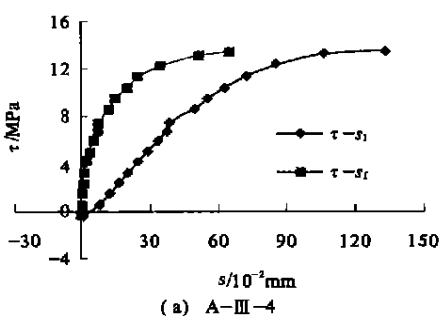


图 3 粘结滑移曲线  
Fig. 3 Bond-slip curve

从图 3 中可以看出,HRB 500 钢筋与其他月牙肋钢筋的粘结锚固性能类似,大致可分为 3 个阶段:微滑移段、滑移段和劈裂段<sup>2~4</sup>。当拉拔力较小时,粘结锚固力主要由钢筋和混凝土之间的化学胶结力提供,加载端滑移 $s_1$  较小,自由端无滑移,这一阶段是微滑移段。当拉拔力逐渐增大,化学胶结力破坏,自由端开始滑移,且滑移 $s_f$  随拉拔力的增大逐渐加快,自由端与加载端的滑移愈加接近,此为滑移段。这一阶段也是化学胶结力丧失,摩阻力和机械咬合力起主要作用的阶段。劈裂段是临近破坏时,由于凸肋与混凝土之间的咬合力产生较大的横向拉应力而使试件发生劈裂。对于无横向配筋的试件,试件多被劈裂成两半而破坏,个别锚固长度较大的则以钢筋屈服为破坏特征。对于有横向配筋的试件,由于箍筋的约束作用,混凝土均未发生劈裂,直至混凝土压碎、钢筋屈服而破坏,表现出明显的塑性破坏特征。

## 2 影响 HRB 500 钢筋粘结锚固强度的主要因素

### 2.1 混凝土强度

A 类试件 3 组共 18 个, $f_{cu}=25.1\sim34.0\text{ MPa}$ ,探讨混凝土强度的影响。试验表明,粘结锚固强度随混凝土强度的提高而提高,并与抗拉强度 $f_t$  成正比,这是由于无论内裂、劈裂、挤压或摩阻都与混凝土的质量特别是抗裂性能有关。由试验值  $\tau$  和相应的抗拉强度 $f_t$  经统计回归得到如下关系式:

$$\tau_u=8.89f_t-7.47\tag{1}$$

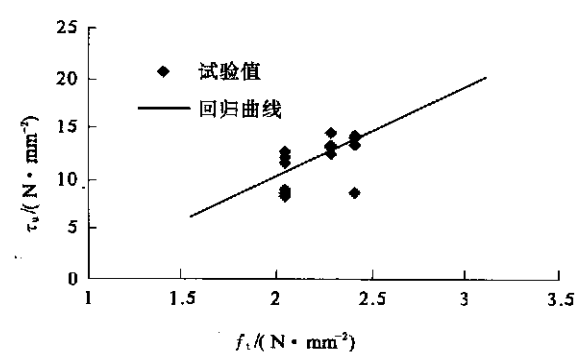


图 4 混凝土强度与粘结强度的关系  
Fig. 4 Relationship between concrete strength and bond strength

### 2.2 保护层厚度

B 类试件 3 组 18 个, $d=8\sim25\text{ mm}$ , $c/d=1.5\sim5.75$ ,并利用了条件相近的 A 类试件,探讨保护层厚度的影响。由于直径变化对粘结锚固强度的影响不大,因此采用相对保护层厚度 $c/d$  来消除

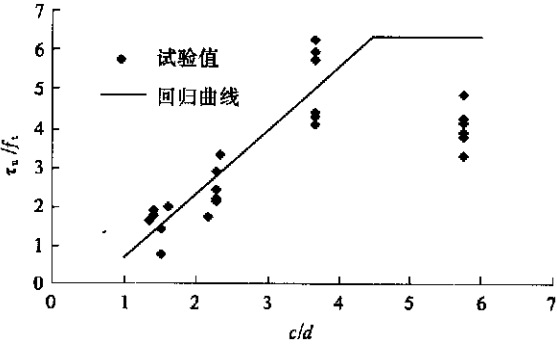


图 5 粘结强度与保护层厚度的关系  
Fig. 5 Relationship between bond strength and concrete cover thickness

B 类试件中钢筋直径变化的影响,并用  $\tau_u/f_t$  来消除混凝土强度的影响。试验表明,当保护层厚度较薄时, $\tau_u/f_t$  随  $c/d$  的增大而增大,且成正比。而当保护层厚度更大时, $\tau_u/f_t$  反而下降,因此  $c/d$  必然存在一个临界值。根据大量的试验资料及近似的受力模型计算表明, $c/d$  的临界值约为 4.5。在对  $c/d<4.5$  的试件回归后,得到保护层厚度影响的关系如下:

$$\tau_u/f_t=1.59c/d-0.88,c/d<4.5\tag{2}$$

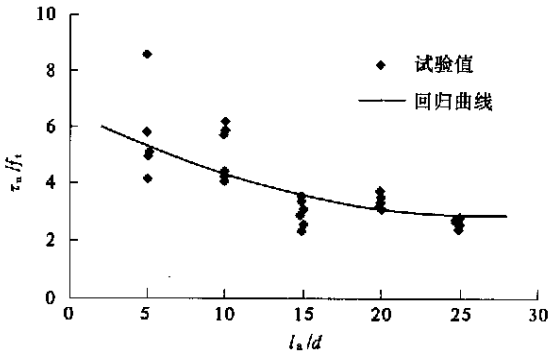


图 6 粘结强度与锚固长度的关系  
Fig. 6 Relationship between bond strength and anchoring length

### 2.3 锚固长度

C 类试件 4 组共 24 个, $l_a=59\sim300\text{ mm}$ , $l_a/d=4.92\sim25$ ,并利用条件相近的部分 A 类试件,探讨锚固长度的影响。试验表明,随锚固长度的增加,拉拔力  $F$  增加,但平均粘结锚固强度减小。锚长较短时,变化明显,锚长较大( $l_a/d>10$ ) 时,渐趋平缓。经统计回归后,锚固长度的影响关系如下:

$$\tau_u/f_t=15.7d/l_a+2.28\tag{3}$$

### 2.4 横向配箍率

D 类试件 2 组共 12 个, $\rho_{sv}=0.628\%\sim$

1.047%,探讨配箍率的影响.表3为D类试件与部分B类试件的试验结果.

表3 配箍率的影响

Tab.3 effect of transverse steel ratio

试件 组号 (N·mm <sup>-2</sup> )	$f_t /$	$\rho_{sv} / \%$	$\tau_u / f_t$	$l_a / d$	$c / d$	$d /$ mm
D-I	2.09	1.047	2.18	10	0.833	18
D-II	2.07	0.628	2.46	10	1.389	18
B-III	2.13	0	1.76	10	1.5	25

从试验结果可以看出,配置横向箍筋可以大大提高钢筋在混凝土中的粘结强度,而且大量的试验资料表明,劈裂后的粘结强度增量与劈裂面上的配箍率大体成正比,且可以表示为如下关系式: $\Delta \tau = 20 \rho_{sv} f_t$ ,式中, $\rho_{sv} = A_{sv1} / (c s_{sv})$ 为劈裂面的配箍率.其中, $A_{sv1}$ 为单肢箍筋的面积, $c$ 为保护层厚度, $s_{sv}$ 为箍筋间距.

综合以上各因素,在大量试验资料分析的基础上,考虑影响粘结强度的主要因素并适当加以简化,经统计回归后,得到HRB 500钢筋的粘结锚固强度计算公式为

$\tau_u = (1.41 + 0.59 c / d + 2.37 d / l_a + 24.6 \rho_{sv}) f_t \quad (4)$

3 锚固可靠度分析与设计建议

3.1 锚固承载力极限状态

锚固于混凝土中的钢筋,在拉拔力  $F$  的作用下可能因钢筋屈服而失效,也可能发生锚固破坏.在某一特定的锚固长度(临界锚固长度  $l_a^c$ )下,锚固力可等于屈服力,锚固破坏与钢筋屈服同时发生,这个状态称为锚固承载力极限状态.由平衡条件,可得锚固承载力极限状态方程为

$f_y = 4 \tau_u l_a / d \quad (5)$

按照一般的构造要求和工程习惯做法,取保护层厚度  $c / d = 1$ ,箍筋直径  $d_{sv} / d = 0.25$ ,箍筋间距  $s_{sv} / d = 15$ ,将式(4)代入式(5),可得临界锚固长度的计算公式为

$l_a / d = 0.12 f_y / f_t - 1.14 \quad (6)$

取  $f_y = 420 \text{ MPa}$ ,利用式(6)可得不同混凝土强度等级的临界锚固长度值,具体结果见表4.

3.2 可靠指标

考虑到锚固可靠性对结构正常发挥其功能具有重要的意义,故其设计可靠度取值宜高于结构构件一般承载能力或正常使用极限状态设计时的设计可靠度取值<sup>[9]</sup>.对于安全等级为二级的结构

构件,取锚固承载力可靠指标  $\beta_a = 3.95$ ,相应的失效概率  $p_{fa} = 4.0 \times 10^{-5}$ .

表4 HRB 500 钢筋的锚固长度  $l_a / d$

Tab.4 anchoring length of HRB 500 steel bar  $l_a / d$

混凝土强度等级	C20	C30	C40
JC 方法解	54.9	42.5	35
临界锚固长度	44.68	34.1	28.33
规范设计值	53.45	41.12	34.39

说明《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)规定的带肋钢筋受拉锚固长度  $l_a$  的计算公式为: $l_a / d = 0.14 f_y / f_t$ ,这里取  $f_y = 420 \text{ MPa}$ .

对于正常的设计,锚固破坏不应先于受力钢筋达到屈服,所以在极限情况下,锚固失效概率  $p_{fa}$  应是钢筋应力超过屈服强度事件与锚固力屈服力事件同时发生的概率,可表达为: $p_{fa} = P \{ \tau = \tau_u, \sigma = f_y \} = p_f \cdot p_{f_y}$ .由《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)知,钢筋应力达到屈服强度( $\sigma = f_y$ )的可靠指标  $\beta = 3.2$ ,相应的失效概率运算值  $p_f = 6.9 \times 10^{-4}$ .故可求得粘结锚固应力达到极限( $\tau = \tau_u$ )事件的失效概率  $p_{f0} = \frac{p_{fa}}{p_f} = 5.8 \times 10^{-2}$ ,相应的可靠指标  $\beta_0 = 1.57$ .

3.3 JC 方法解

JC 法的基本思路是:对非正态分布随机变量作当量正态化处理,将其转换为等效正态随机变量,然后利用改进的一次二阶矩法求解结构可靠指标.

将极限状态方程(5)改写为  $R - S = 0$  的通用形式:

$4 \Omega_p \frac{l_a}{d} \tau_u - f_y = 0 \quad (7)$

式中: $\Omega_p = \tau_u^0 / \tau_u$ ,为计算模式准确性系数,即试验观测值与回归统计计算值的比值.将极限状态方程中的全部随机变量  $f_y, f_t, \Omega_p, l_a, d, c, d_{sv}, s_{sv}$  均看成服从正态分布相互独立的基本变量,利用改进的一次二阶矩法求解给定可靠指标  $\beta_0$  下的未知参数——锚固长度  $l_a$ .这种方法需要求解下列方程组:

$X_i^* = \mu_{X_i} + \alpha_{X_i} \beta_{\alpha_{X_i}} \quad (8)$

$\alpha_{X_i} = \frac{-\frac{\partial g}{\partial X_i} |_{p^*} \cdot \alpha_{X_i}}{\left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} |_{p^*} \cdot \alpha_{X_i} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (9)$

$g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) = 0 \quad (10)$

式中: $X_i$  为各基本变量; $X_i^*$  为各基本变量在设计验算点 $p^*$  的值; $g=4\alpha_p\frac{l_a}{d}\tau_u-f_y$  为极限状态函数;统计参数  $\mu_{X_i}$ ,  $\sigma_{X_i}$  由大量统计数据确定;可靠指标  $\beta_0$  按前采用.

用计算机迭代求解 JC 方法的解如表 4 所示.表中还列出了临界锚固长度和现行规范设计长度<sup>[9]</sup>.

从表 4 中可以看出 JC 方法解与规范设计锚固长度的比值在 1.01~1.03 之间,十分稳定.说明 HRB 500 钢筋的设计锚固长度仍可按现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 规定的公式计算.

4 结论

试验研究表明,HRB 500 钢筋的粘结锚固性能与其他普通月牙肋钢筋相同,其主要影响因素为混凝土强度、保护层厚度、锚固长度和配箍率.

HRB 500 钢筋的粘结强度随混凝土强度的提高而提高;当  $c/d < 4.5$  时,粘结强度随保护层厚度的增大而增大,当保护层厚度过大时,由于外围的混凝土对粘结锚固不再起作用,因而粘结强度也不再增大;HRB 500 钢筋的平均粘结强度随锚固

长度的增加而降低,且随锚固长度的增大,其影响力逐渐减小,因此,盲目增大钢筋的锚固长度是没有意义的;最后,配箍可以增大 HRB 500 钢筋的粘结强度,改变构件的破坏形态,使其由通常的脆性劈裂破坏变为延性破坏,对结构的抗震设计意义重大.

根据对 HRB 500 钢筋的可靠度分析表明:其设计锚固长度 $l_a$  仍可按现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 规定的公式计算,这里取 $f_y=420\text{ MPa}$ .

参考文献:

[ 1 ] 管品武. 冷轧扭钢筋粘结锚固性能的试验研究[J]. 郑州工业大学学报,1997,18( 1 ):8~16.  
[ 2 ] 王传志,滕智明. 钢筋混凝土结构理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1985.254~295.  
[ 3 ] 徐有邻. 变形钢筋—混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 北京:中国建筑科学研究院,1990.22~42.  
[ 4 ] 高丹盈,谢晶晶,李趁趁. 纤维聚合物筋混凝土粘结性能的基本问题[J]. 郑州大学学报(工学版),2002,23( 1 ):1~5.  
[ 5 ] 邵卓民,沈文都,徐有邻. 钢筋混凝土的锚固可靠度及锚固设计[J]. 建筑结构,1987,( 4 ):36~49.  
[ 6 ] GB 50010—2002,混凝土结构设计规范[S].

Bond —anchorage Properties and Proposed Design of HRB<sup>500</sup> Steel Bars in Concrete

MAO Da —ling<sup>1</sup>, LIU Li —xin<sup>1</sup>, FAN Li <sup>2</sup>

( 1.College of Civil Engineering ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002,China ;2.Hongdingshan College of Technology ,Hongdingshan 467000,China)

**Abstract :** Based on 72 HRB 500 pull —out tests ,this paper investigates the bond —anchorage properties of HRB 500 steel bars . Then the calculating formula of bond strength has been established on the tests , and the design of an —anchoring length by way of reliability analysis of HRB 500 steel bars concrete elements is proposed . The result is that the bond —anchorage property of HRB 500 steel bar is identical to that of common crescent ribbed bar ,the anchoring length can be designed with the formula in 《code for design of concrete structures》( GB 50010—2002) .

**Key words :** HRB 500 steel bar ; bond anchorage ; reliability