

文章编号:1671-6833(2007)01-0042-05

超细晶粒钢筋粘结锚固性能的试验研究

刘立新, 李 千, 李洪彦, 张艳丽, 毛达岭

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:通过对48个超细晶粒钢筋粘结锚固试件的拉拔试验,对超细晶粒钢筋的粘结锚固性能进行了全面研究.在试验的基础上对超细晶粒钢筋的粘结强度进行了分析计算,并给出了粘结锚固长度的取值建议.研究表明,虽然超细晶粒钢筋属推广的新型工程材料,轧制工艺与传统钢筋不同,但超细晶粒钢筋的粘结锚固性能与普通热轧带肋钢筋(月牙纹)基本相同,其设计锚固长度 l_a 仍可按现行《混凝土结构设计规范》GB50010-2002规定的公式计算;另外考虑到近年来高强混凝土的应用日益增多,且当混凝土强度等级为C40~C80时,现行规范的设计锚固长度计算公式仍能较好适用于超细晶粒钢筋,建议锚固长度计算公式中混凝土强度等级的上限可提高到C60.

关键词:超细晶粒钢筋;粘结锚固;强度分析

中图分类号: TU 502⁺.6

文献标识码: A

0 引言

超细晶粒钢筋是我国新研究开发的采用控制钢筋轧制温度技术生产的一种新型细晶粒钢筋,它具有强度高延性好的特点,由于对轧制工艺上进行了改进,钢材中不需加入钒、铌等低合金元素,故能为国家节约许多宝贵的低合金资源.由于该钢筋属新研制材料,故在工程应用上缺乏依据,为了促进该种钢筋的推广应用,必须对此种钢筋进行全面的试验研究与分析,本文即是针对其粘结锚固性能试验研究的成果.试验用400 MPa和500 MPa两种钢筋,通过材料的验证性试验表明超细晶粒钢筋均有明显的屈服台阶,其实测屈服强度分别达到500 MPa级和400 MPa级的要求,强屈比 $\sigma_b/f_y = 1.2 \sim 1.3$,断口伸长率 δ_5 均在20%以上,均匀伸长率 δ_{gt} 均大于10%,强度和延性均较好,超细晶粒钢筋的弹性模量 $E_s = 2.0 \times 10^5 \sim 2.12 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,与普通热轧钢筋基本相同.

1 试验概况

1.1 试验方案和试验方法

根据试验要求,超细晶粒钢筋的粘结锚固拔出试件分为16组,每组3个试件,共48个;其中

A-1~A-4组的主要变化参数为混凝土强度;B-1~B-3组的主要变化参数为钢筋直径和保护层厚度;C-1~C-5组的主要变化参数为锚固长度;D-1~D-4组主要考虑配箍率的影响.粘结锚固拔出试验方案见表1.锚固拔出试验在万能试验机上进行,用特制夹具分别固定在混凝土和钢筋上,以量测加荷端和自由端的滑移.图1为粘结锚固拔出试验的示意图.

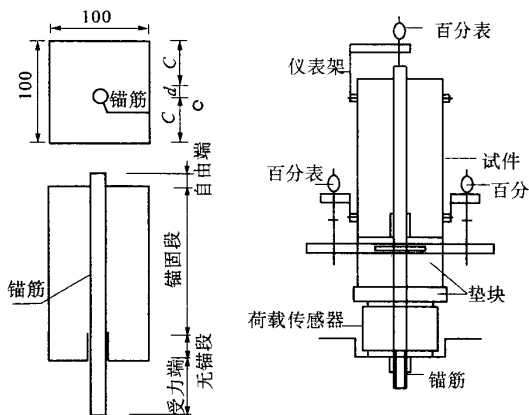


图1 试件示意图

Fig.1 Test specimen sketch

1.2 试验现象和试验结果

在拉拔试验过程中,当拉拔力较小时,粘结锚

收稿日期:2006-10-10;修订日期:2006-11-28

基金项目:国家863计划资助项目(2004AA33G050).

作者简介:刘立新(1947-),男,湖北汉川人,郑州大学教授,博士生导师,主要研究领域为混凝土、砌体结构基本理论及工程应用.

固力主要由钢筋和混凝土之间的化学胶结力提供,加载端滑移较小,自由端基本无滑移;当拉拔力逐渐增大,化学胶结力逐渐破坏,自由端开始滑移;随着拉拔力继续增大,滑移逐渐加快,临近破坏时,由于钢筋凸肋与混凝土之间的咬合力产生较大的横向拉应力,使试件发生劈裂.对于不配横向箍筋的试件,最后试件被劈裂成两半或多半而破坏(A组至C组);对于配有横向箍筋的试件,因为有箍筋的约束,不发生劈裂破坏,最后混凝土压碎钢筋被缓慢拔出而破坏(D组);当混凝土强度较高、钢筋锚固长度较大时,钢筋在较大的拉拔力作用下屈服甚至拉断,不发生粘结锚固破坏.试验表明,随着混凝土强度的提高,钢筋和混凝土之间的化学胶结力增大,自由端滑移推迟,甚至自由

端滑移和试件的劈裂破坏同时发生,劈裂面肋间的混凝土只有靠近加荷端处有少量被挤碎,其它处肋间的混凝土基本无挤碎痕迹.超细晶粒钢筋试件(A-1-2)的参数为 $f_{cu}=43.1\text{ MPa}$, $d=15.74\text{ mm}$, $l_a=166.2\text{ mm}$, $c/d=2.74$, $l_a/d=10.56$,平均粘结力滑移曲线如图2所示.

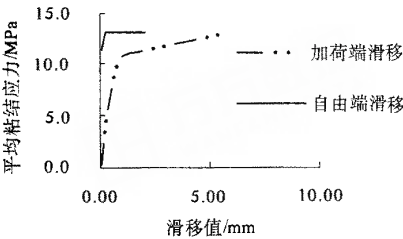


图2 超细晶粒钢筋试件的粘结滑移曲线
Fig.2 Bond-slip curve

表 1 超细晶粒钢筋拔出试验方案
Tab.1 Pull-out test specimens list

试件 编号	钢筋类别	实测混凝土 强度平均值 f_{cu}/MPa	锚筋直径 d/mm	锚固长度 l_a/mm	保护层厚度 c/mm	配箍状况	试件个数
A-1	超细晶粒 400	43.1	16	160	42.0	—	3
A-2	超细晶粒 400	61.6	16	160	42.0	—	3
A-3	超细晶粒 400	85.2	16	160	42.0	—	3
A-4	超细晶粒 400	90.4	16	160	42.0	—	3
B-1	超细晶粒 500	32.3	10	100	45.0	—	3
B-2	超细晶粒 400	49.4	25	250	37.5	—	3
B-3	超细晶粒 400	54.5	25	250	25.0	—	3
C-1	超细晶粒 400	44.0	16	80	42.0	—	3
C-2	超细晶粒 400	48.8	16	240	42.0	—	3
C-3	超细晶粒 400	44.0	16	320	42.0	—	3
C-4	超细晶粒 400	47.5	25	200	37.5	—	3
C-5	超细晶粒 400	56.0	25	375	37.5	—	3
D-1	超细晶粒 400	48.8	16	160	15.0	$\Phi^b5.5@80$	3
D-2	超细晶粒 400	42.4	16	160	25.0	$\Phi^b5.5@80$	3
D-3	超细晶粒 400	85.2	16	160	15.0	$\Phi^b5.5@80$	3
D-4	超细晶粒 400	90.4	16	160	25.0	$\Phi^b5.5@80$	3

2 超细晶粒钢筋粘结锚固性能分析

$$f_t=0.88\times0.395f_{cu}^{0.55}\tag{2}$$

2.1 影响粘结锚固性能的主要因素^[1-9]

$$\rho_{sv}=\frac{A_{sv1}}{cs}\tag{3}$$

为了分析超细晶粒钢筋的粘结锚固性能,将各组的试验结果剔除有缺陷试件的数值后取平均值列于表2中.表中平均粘结强度按(1)式计算,混凝土抗拉强度按(2)式计算,横向钢筋配箍率 ρ_{sv} 按(3)式计算, A_{sv1} 为单根钢筋的截面面积, c 为保护层厚度, s 为横向钢筋的间距.

$$\bar{\tau}_u=\frac{F_u}{\pi dl_a}\tag{1}$$

2.1.1 混凝土强度

试验结果表明,在其它条件大致相同时,超细晶粒钢筋与混凝土的平均粘结强度 $\bar{\tau}_u$ 随着混凝土强度的提高而提高,大致与混凝土的抗拉强度 f_t 成正比关系,与普通热轧带肋钢筋相同.在 $d=15.74\text{ mm}$, $c/d=2.59\times2.65$, $L_a/d=10.55\sim10.63$ 条件下的试验曲线如图3所示.

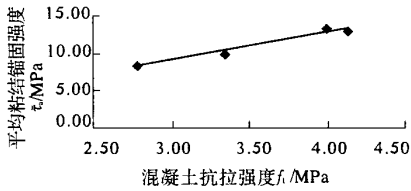


图3 混凝土强度的影响(平均值)

Fig.3 Relationship between concrete strength and bond Strength (mean value)

2.1.2 钢筋直径

超细晶粒钢筋与混凝土的相对平均粘结强度 $\bar{\tau}_u/f_t$ 随着钢筋直径 d 的增大而降低,与普通热轧带肋钢筋相同. 在 $f_{cu} = 32.3 \sim 90.4$ MPa, $c/d = 0.98 \sim 2.65$, $l_a/d = 5.07 \sim 20.26$ 条件下的试验曲线如图4所示.

2.1.3 锚固长度

在 $f_{cu} = 43.1 \sim 90.4$ MPa, $d = 15.74 \sim 24.47$ mm,

表2 超细晶粒钢筋的粘结锚固性能分析

Tab.2 Analysis of the bond-anchorage properties of ultra-fine grain steel bars

试件编号	$\bar{\tau}_u/\text{MPa}$	$\bar{\tau}_u/f_t$	c/d	l_a/d	ρ_{sv}	$\bar{\tau}_u^c/f_t$	$\bar{\tau}_u/\bar{\tau}_u^c$
A-1	8.40	3.048	2.656	10.553	—	3.131	0.973
A-2	10.07	3.046	2.624	10.597	—	3.110	0.979
A-3	10.36	3.335	2.598	10.623	—	3.093	1.078
A-4	13.34	3.221	2.605	10.629	—	3.097	1.040
B-1	16.24	6.911	4.778	9.845	—	4.506	1.534
B-2	6.89	2.322	1.488	9.542	—	2.415	0.961
B-3	6.50	2.073	0.981	10.360	—	2.074	1.000
C-1	11.29	4.050	2.484	5.070	—	2.331	1.216
C-2	9.08	3.092	2.560	15.775	—	2.975	1.039
C-3	6.35	2.278	2.503	20.260	—	2.898	0.786
C-4	5.49	1.885	1.442	8.079	—	2.431	0.775
C-5	5.05	1.589	1.500	15.247	—	2.329	0.682
D-1	9.76	3.335	1.321	10.052	0.014	2.544	1.311
D-2	11.65	4.300	1.550	10.692	0.012	2.645	1.626
D-3	10.96	2.737	1.042	10.623	0.015	2.739	1.151
D-4	13.53	3.270	1.645	10.635	0.011	2.688	1.216

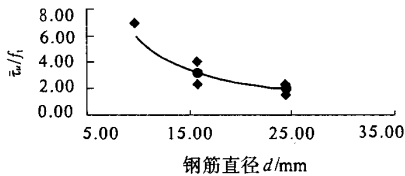


图4 钢筋直径的影响

Fig.4 Relationship between diameter of steel bar and bond strength

$c/d = 0.98 \sim 2.65$ 时,超细晶粒钢筋与混凝土的相对平均粘结强度 $\bar{\tau}_u/f_t$ 随着相对锚固长度 l_a/d 的增大而降低(图5),也与普通热轧带肋钢筋相同.

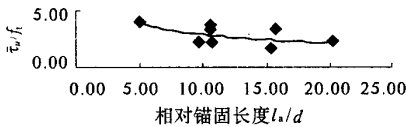


图5 锚固长度的影响

Fig.5 Relationship between bond strength and anchoring length

2.1.4 保护层厚度

在 $f_{cu} = 32.3 \sim 90.4$ MPa, $d = 9.67 \sim$

万方数据

24.47 mm, $l_a/d = 5.07 \sim 20.26$ 的条件下,超细晶粒钢筋与混凝土的相对平均粘结强度 $\bar{\tau}_u/f_t$ 随着相对保护层厚度 c/d 增大而提高,与普通热轧带肋钢筋相同如图6所示.

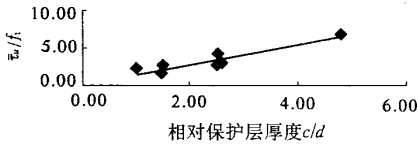


图6 保护层厚度的影响图

Fig.6 Relationship between bond strength and concrete cover thickness

2.1.5 横向钢筋配箍率

随着横向钢筋的配箍率 $\rho_{sv} = A_{sv1}/cs$ 的增大,超细晶粒钢筋与混凝土的相对平均粘结强度 $\bar{\tau}_u/f_t$ 有一定提高,大致成线性关系在 $c/d = 1.32 \sim 1.64$, $l_a/d = 9.54 \sim 10.69$ 条件下的试验曲线如图7所示.

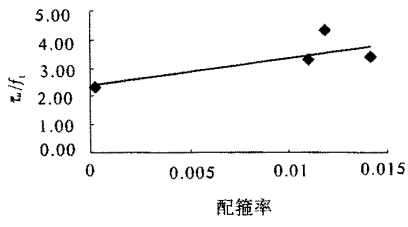


图 7 横向钢筋配箍率的影响

Fig. 7 Relationship between transverse steel ratio and bond strength

2.2 超细晶粒钢筋粘结强度的计算

为了比较超细晶粒钢筋和普通热轧钢筋的粘结锚固强度,引入我国《混凝土结构设计规范》粘结锚固专题研究组建议的月牙纹外形热轧钢筋的极限粘结强度 $\bar{\tau}_u$ 的计算公式如下^[2]:

$$\bar{\tau}_u = (0.82 + \frac{0.9}{l_a/d})(1.6 + 0.7 \frac{c}{d} + 20\rho_{sv})f_t \quad (4)$$

根据拉拔试件的各项试验参数按式(4)计算得到的平均相对粘结强度 $\bar{\tau}_u/f_t$ 和实测的极限粘结强度 τ_u/f_t 也列于表 2 中。从表中可以看出,实测的极限粘结强度 τ_u 和计算极限粘结强度 $\bar{\tau}_u$ 比较接近,比值 $\tau_u/\bar{\tau}_u$ 的平均值 $\mu = 1.087$,变异系数 $\delta = 0.230$,符合较好。因此,《混凝土结构设计规范》粘结锚固专题研究组提出的月牙纹外形热轧

钢筋的极限粘结强度 $\bar{\tau}_u$ 的计算公式仍可适用于超细晶粒钢筋。

2.3 超细晶粒钢筋设计锚固长度取值的建议

钢筋锚固设计的目的是给出锚固于混凝土中的钢筋在拉拔力作用下钢筋屈服而不发生粘结锚固破坏的必要而充分的锚固长度 l_a ,锚固承载力的极限状态方程为

$$f_y A_s = \bar{\tau}_u \pi d_a \quad (5)$$

将 $A_s = \pi d^2/4$ 及式(4)代入式(5),偏于安全取 $c/d = 1$,横向箍筋的直径 $d_v = d/4$,箍筋的间距 $s = 15d$,可求得锚固长度 l_a 的计算公式为

$$l_a = (0.125 \frac{f_y}{f_t} - 1.1)d \quad (6)$$

《混凝土结构设计规范》GB 50010-2002 规定的带肋(月牙纹)钢筋的受拉锚固长度 l_a 的计算公式为^[3]

$$l_a = \alpha \frac{f_y}{f_t} d = 0.14 \frac{d}{f_t} \quad (7)$$

式中: γ_y, f_t 分别为钢筋和混凝土抗拉强度设计值。取超细晶粒 500 级和 400 级钢筋抗拉强度设计值分别为 $f_y = 420 \text{ MPa}$ 、 $f_y = 360 \text{ MPa}$ (与 HRB500 级、400 级相同),取混凝土强度等级为 C20、C30、C40、C50 \geq C60,按(6)式、(7)式计算的锚固长度 l_a 列于表 3。

表 3 锚固长度计算比较
Tab. 3 Comparative calculation of anchoring length

钢筋品种	f_y 取值/MPa	混凝土强度等级	f_t /MPa	l_a/d	l_a^*/d	l_a/l_a^*
超细晶粒 500 级钢筋	420	C20	1.10	53.45	46.63	1.146
		C30	1.43	41.12	35.62	1.154
		C40	1.71	34.39	29.60	1.162
		C50	1.89	31.11	26.68	1.166
		\geq C60	2.04	28.82	24.63	1.170
超细晶粒 400 级钢筋	360	C20	1.10	45.82	39.81	1.151
		C30	1.43	35.24	30.37	1.160
		C40	1.71	29.47	25.22	1.169
		C50	1.89	26.67	22.71	1.174
		\geq C60	2.04	24.70	20.96	1.178

说明: l_a 为按(7)式计算的《混凝土结构设计规范》规定的锚固长度, l_a^* 为按(6)式计算的锚固长度, d 为锚固钢筋直径。

从表 3 中可以看出,按(7)式计算的《混凝土结构设计规范》规定的锚固长度 l_a 与按式(6)计算的锚固长度 l_a^* 的比值 l_a/l_a^* 均在 1.15 到 1.18 左右,十分稳定,且 500 MPa 级钢筋与 400 MPa 级钢筋的比值 l_a/l_a^* 基本一样,说明超细晶粒钢筋的设计锚固长度 l_a 仍可按现行《混凝土结构设计规范》GB50010-2002 规定的公式(7)计算。

现行《混凝土结构设计规范》GB50010-2002 的设计锚固长度计算公式规定当混凝土强度等级

$> \text{C40}$ 时,仍按 C40 级混凝土计算。本次试验结果表明,当混凝土强度等级为 C40 ~ C80 (试验混凝土最高强度达到 C90) 时,规范的设计锚固长度计算公式仍能较好适用,考虑到近年来高强混凝土的应用日益增多,建议锚固长度计算公式中混凝土强度等级的上限可提高到 C60。

3 结论

虽然轧制工艺与材料不同,但超细晶粒钢筋

的粘结锚固性能与普通热轧带肋钢筋(月牙纹)基本相同,其设计锚固长度 l_a 仍可按现行《混凝土结构设计规范》GB50010-2002 规定的公式计算;

试验结果表明,当混凝土强度等级为 C40 ~ C80 时,现行规范的设计锚固长度计算公式仍能较好适用,考虑到近年来高强混凝土的应用日益增多,建议锚固长度计算公式中混凝土强度等级的上限可提高到 C60.

参考文献:

- [1] 毛达岭,刘立新,范 丽. HRB500 钢筋粘结锚固性能及设计建议[J]. 郑州大学学报(工学版)2004, 25(2):54-58.
- [2] 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.
- [3] GB50010-2002,混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [4] 管品武,刘立新,徐有邻. 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.
- [5] 王艺霖,段 伟. 钢筋与混凝土之间粘结应力的计算问题研究[J]. 建筑技术开发 2005,32(7):27-28,39.
- [6] 管品武,孟会英,李 丽. 钢筋与砼间粘结锚固性能及粘结作用机理[J]. 郑州工业大学学报,2001,22(3):65-68.
- [7] 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.
- [8] 梁兴文,王社良,李晓文. 混凝土结构设计原理[M]. 北京:科学出版社,2003:40-46.
- [9] A. H. 尼尔逊著. 过镇海,方鄂华,庄崖屏,等译校. 混凝土结构设计(第12版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003,138-152.

Experimental Investigation of Bond - anchorage Properties of Ultra - fine Grain Steel Bar

LIU Li - xin, LI Qian, LI Hong - yan, ZHANG Yan - li, MAO Da - ling

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on 48 ultra - fine grain steel bars pull - out test, this paper investigates into the bond - anchorage properties of ultra - fine grain steel bars. Then the calculating formula of bond strength has been established on the tests, and the anchoring length of ultra - fine grain steel bars in the design of concrete elements is proposed too. The result is that the bond - anchorage property of ultra - fine grain 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* (GB50010 - 2002). Considering the wider use of high - strength concrete in civil engineering of china today, it is proposed that the upper limit of class of concrete strength in formula should be updated to C60.

Key words: ultra - fine grain steel bar; bond - anchorage; analysis of strength