

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.003



600 MPa 高强钢筋与混凝土的粘结锚固性能试验研究

李艳艳^{1,2}, 李晓清¹, 苏恒博¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘要:为研究 600 MPa 高强钢筋与混凝土粘结锚固性能, 设计了 72 个棱柱体试件进行拉拔试验, 对 600 MPa 高强钢筋粘结锚固的破坏形态及粘结应力分布进行分析, 通过建立基本粘结-滑移关系及位置函数, 确定 600 MPa 高强钢筋在混凝土结构中的粘结-滑移本构关系。采用一次二阶矩法进行可靠度分析, 提出锚固长度设计建议。研究表明: 600 MPa 高强钢筋粘结锚固的破坏形态及粘结应力分布与普通钢筋类似且粘结锚固性能良好, 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 基本锚固长度计算公式依然适用于 600 MPa 高强钢筋。

关键词: 高强钢筋; 粘结性能; 本构关系; 锚固长度

中图分类号: TU511.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)02-0019-07

Experimental analysis of bond-anchorage properties between 600 MPa high strength reinforcement and concrete

Li Yanyan^{1,2}, Li Xiaoqing¹, Su Hengbo¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China;

2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: Pull-out tests were carried out on 72 concrete specimens reinforced with 600 MPa high strength reinforcement to investigate the bond-anchorage properties between 600 MPa high strength reinforcement and concrete. Failure pattern and bond stress distribution of specimens were studied, respectively. The bond-slip constitutive relations of 600 MPa high strength reinforcement were established through basic form of bond-slip and position function. Through establishing the calculation formula of ultimate bonding strength for 600 MPa high strength reinforcement, bond-anchorage length was established via reliability analysis of JC. The results showed that the failure pattern, bond stress distribution between 600 MPa high strength reinforcement and other strength reinforced bars no obvious difference. Basic anchorage length formula of GB50010-2010 still can be applied to 600 MPa high strength reinforcement.

Keywords: high strength reinforcement; bond properties; constitutive relations; anchorage length

收稿日期: 2016-05-04

基金项目: 河北省自然科学基金(E2015202035); 天津市建委科技项目(2016—8)

作者简介: 李艳艳(1979-), 女, 教授, 博士, 主要从事结构工程研究, (E-mail) nicole_820@163.com。

Received: 2016-05-04

Foundation item: Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2015202035); Science and Technology Research Project of Tianjin Construction (No. 2016-8)

Author brief: Li Yanyan(1979-), professor, PhD, main research interest: structural engineering, (E-mail) nicole_820@163.com

钢筋混凝土共同受力的基础是两者共同协调发挥作用,而共同协调的关键就在于粘结锚固作用。粘结锚固作用是混凝土结构研究的基本问题,随着建筑材料及理论研究的不断发展,钢筋与混凝土粘结锚固问题的研究也在不断深入。近年来,关于再生混凝土、陶粒混凝土等特殊混凝土与普通钢筋及锈蚀钢筋等特殊钢筋的粘结锚固问题成为研究热点。Prince 等^[1]、王晨霞等^[2]研究了再生混凝土与钢筋的粘结性能,Zhang 等^[3]、张欢欢等^[4]研究了陶粒混凝土与钢筋的粘结性能。同时,反复荷载、重复荷载等特殊工况以及冻融、火灾等特殊环境作用下钢筋与混凝土的粘结性能备受关注。冀晓东等^[5]、Rania 等^[6]、Huang 等^[7]研究了周期荷载作用下钢筋与混凝土的粘结退化机理,Arel 等^[8]、Khalaf 等^[9]对高温、火灾环境下钢筋与混凝土的粘结性能进行了试验研究。

高强钢筋作为一种新型建筑材料,其与混凝土的粘结锚固问题是推广应用高强钢筋的关键问题。学者们曾进行过很多关于高强钢筋与混凝土粘结锚固性能方面的研究^[10-13],但主要集中于普通钢筋以及强度在 500 MPa 及以下钢筋,而对更高强度钢筋与混凝土粘结锚固性能的研究比较缺乏。随着中国大力推广高强钢筋,HRB500 钢筋已经编入现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),600 MPa 高强钢筋的推广使用也是势在必行。高强钢筋因设计强度明显高于普通钢筋,所需锚固力远远高于普通钢筋,有必要针对 600 MPa 高强钢筋与混凝土之间粘结锚固性能进行研究。本文利用棱柱体试件拉

拔试验,研究 600 MPa 高强钢筋与混凝土的粘结应力分布、本构关系等。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验采用 600 MPa 级热轧带肋高强钢筋,直径为 18、25 mm,其屈服强度实测值分别为 654.30、622.30 MPa。试验所用混凝土为商品混凝土。试验用试件与立方体试块(150 mm×150 mm×150 mm)同时浇筑完成,同条件下养护至 28 d,根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)对标准立方体试件进行抗压性能试验,结果如表 1 所示。

表 1 混凝土力学性能试验结果

Table 1 The test results of concrete mechanical properties

混凝土设计 强度等级	立方体抗压 强度/MPa	轴心抗压 强度/MPa	轴心抗拉 强度/MPa	弹模/ 10 ⁴ MPa
C40	47.32	31.65	2.90	3.41
C50	54.27	35.11	3.02	3.52
C55	53.60	34.55	2.95	3.51
C60	67.42	43.27	3.29	3.68

试验设计 A、B、C、D、CX、DX 共 6 类 72 个试件,其中 A、B、C、D 分别研究混凝土强度、保护层厚度、锚固长度、配箍率对 600 MPa 高强钢筋粘结锚固性能的影响,CX、DX 研究粘结应力沿锚固长度的分布规律,具体试件参数见表 2。

表 2 试件主要参数及试验结果

Table 2 The test main parameter and results of Specimen

组别	直径/mm	混凝土设计 强度等级	保护层厚 度/mm	钢筋埋 长/mm	配箍	极限强 度/MPa	破坏形态	个数
A-I	18	C40	66	180	0	8.92	混凝土劈裂	3
A-II	18	C50	66	180	0	10.45	混凝土劈裂	3
A-III	18	C60	66	180	0	11.56	混凝土劈裂	3
B-I	25	C50	62.5	250	0	9.35	混凝土劈裂	3
C-I	18	C50	66	90	0	20.82	混凝土劈裂	3
C-II	18	C50	66	270	0	9.01	混凝土劈裂	3
C-III	18	C50	66	350	0	7.71	混凝土劈裂	3
D-I	18	C50	25	180	φ6@60	11.69	混凝土拉裂	3
D-II	18	C50	25	180	φ6@70	9.05	混凝土拉裂	3
D-III	18	C50	35	180	φ6@70	12.95	混凝土拉裂	3
D-IV	18	C50	25	180	φ6@80	11.87	混凝土拉裂	3
D-V	18	C50	35	180	φ6@80	14.84	钢筋屈服	3
D-VI	18	C55	25	180	φ6@50	14.43	混凝土压碎	3
D-VII	18	C55	25	180	φ6@100	13.72	混凝土拉裂	3

续表 2

组别	直径/mm	混凝土设计强度等级	保护层厚度/mm	钢筋埋长/mm	配箍	极限强度/MPa	破坏形态	个数
D-VIII	18	C55	35	180	$\phi 6@100$	10.92	混凝土拉裂	3
CX-I	18	C50	66	90	0	13.57	混凝土劈裂	3
CX-II	18	C50	66	180	0	12.61	混凝土劈裂	3
CX-III	18	C50	66	270	0	9.53	混凝土劈裂	3
CX-IV	18	C50	66	350	0	7.46	钢筋屈服	3
DX-I	18	C50	25	180	$\phi 6@60$	12.34	混凝土拉裂	3
DX-II	18	C50	25	180	$\phi 6@70$	10.82	混凝土拉裂	3
DX-III	18	C50	35	180	$\phi 6@70$	12.16	混凝土拉裂	3
DX-IV	18	C50	25	180	$\phi 6@80$	8.87	混凝土拉裂	3
DX-V	18	C50	35	180	$\phi 6@80$	11.17	混凝土拉裂	3

1.2 试验方法

试件加载端采用内径较锚筋大 2 mm, 长度为 40 mm 塑料管, 将钢筋与混凝土隔开, 以防止加载端局部挤压对锚筋受力造成影响。整个试验在 WAW-1000 电液伺服万能试验机上完成, 加载制度参考《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012), 采用连续加载, 试验装置如图 1 所示。试验时加载端采用位移计量测钢筋与加载端、自由端截面混凝土相对位移, 位移计安装如图 2 所示。在钢筋外表面延钢筋埋长对钢筋进行开槽并贴应变片, 量测钢筋应变, 采用 DH3816 进行应变信号采集, 应变片间距为 20 mm, 开槽钢筋贴应变片情况如图 3 所示。



图 1 试验装置

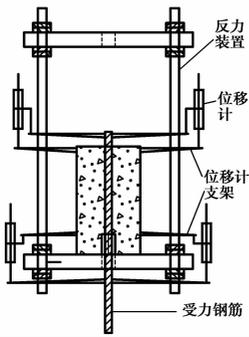


图 2 位移计安装示意

Fig. 1 The test device Fig. 2 The installation instruction of displacement meter

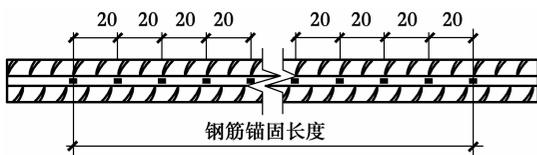


图 3 开槽钢筋贴应变片示意

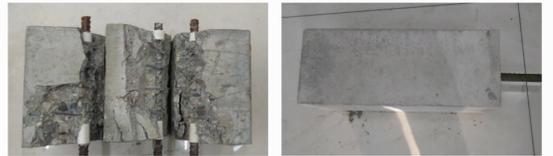
Fig. 3 The installation instruction of strain gauge in slotted rebar

2 破坏形态

试件破坏形态可分成 4 类(图 4): 混凝土劈裂破坏、混凝土拉裂后钢筋拔出破坏、混凝土压碎破坏以及钢筋屈服破坏。



(a) 混凝土劈裂破坏(B-I-1) (b) 拉裂后钢筋拔出(D-VII组)



(c) 混凝土压碎破坏(D-VI组) (d) 钢筋屈服破坏(C-III-1)

图 4 破坏形态

Fig. 4 The failure mode

1) 未配置横向箍筋试件基本发生劈裂破坏。从试验开始直到试件劈裂前, 试件表面无裂缝出现, 到达极限荷载时, 试件发生瞬间劈裂破坏并伴有剧烈声响, 如图 4(a) 所示。

2) 当试件配置少量横向箍筋, 采用偏心置筋, 试件的破坏方式为混凝土被拉裂后锚筋拔出破坏。其破坏形态, 如图 4(b) 所示。

3) 当试件配置较多箍筋, 混凝土保护层厚度较小时, 试件的破坏方式为混凝土压碎后混凝土大面积剥落、箍筋外露而锚固失效破坏。破坏形态见图 4(c)。

4) 当锚固长度较大时, 部分试件的锚筋发生屈服, 即在混凝土破坏之前锚筋已经达到屈服。大部分试件完好无损, 极少试件会出现细微裂缝, 如图 4

(d)所示。

对比以往研究文献^[11],发现配置箍筋适当、保护层厚度满足要求时,同条件下,600 MPa 高强钢筋与其它级别高强钢筋粘结破坏形态类似;保护层厚度相对较小时,600 MPa 高强钢筋试件出现混凝土压碎破坏现象。

600 MPa 高强钢筋与普通钢筋相比设计应力较高,高应力状态下容易出现锚筋周围混凝土压碎先于锚筋拔出破坏,当混凝土保护层厚度满足要求时,

则不会出现。因此,在应用 600 MPa 高强钢筋时,应当较其它低强度等级钢筋适当加大钢筋间距,保证钢筋周围有足够混凝土握裹层厚度。

3 粘结应力分布

通过钢筋内贴应变片的方法得到钢筋应变延锚长分布情况,进而得到粘结应力沿锚固长度的分布情况,不同锚固长度试件粘结应力分布曲线如图 5 所示。

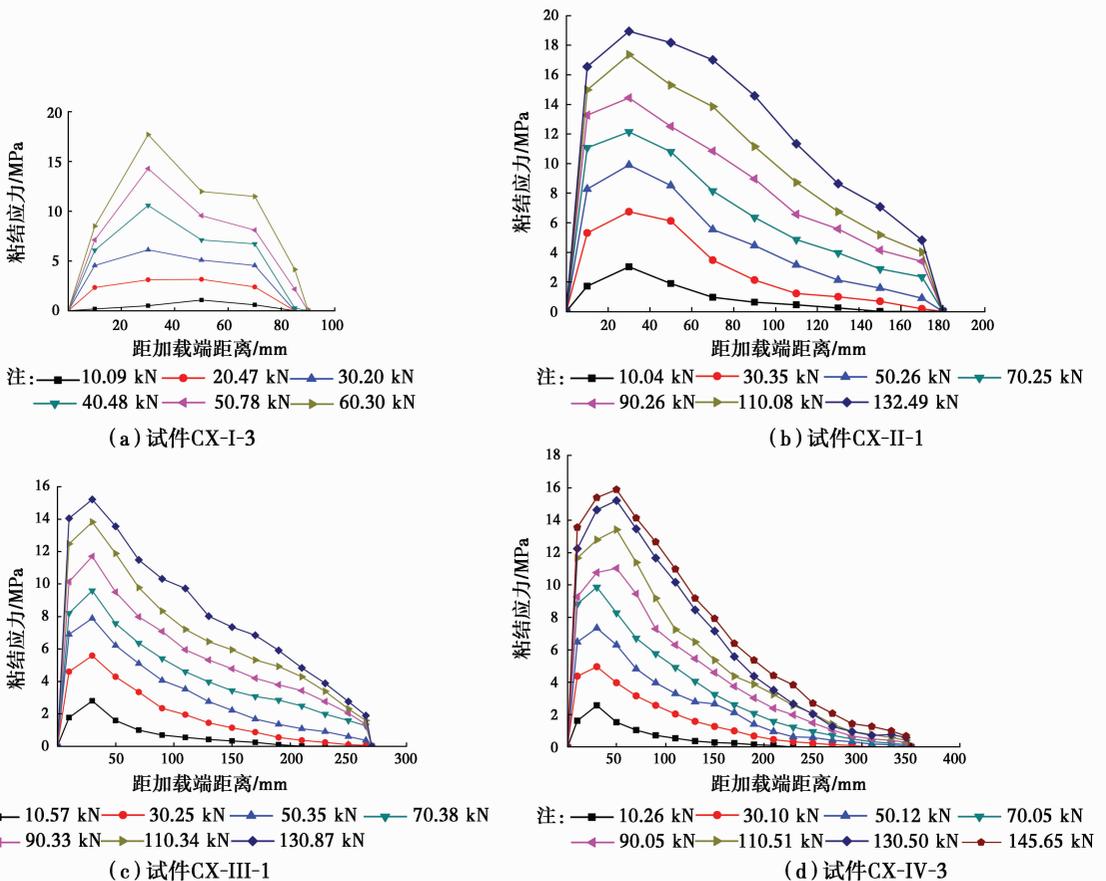


图 5 粘结应力分布

Fig. 5 The bond stress distribution

观察两者界面粘结应力分布曲线特点,其分布规律为:

1)试件加载端粘结应力近似为 0,沿着加载端向自由端,粘结应力迅速增加,大多数试件粘结应力在锚固深度 0.15~0.9 处经过一段稳定后,粘结应力迅速降低,曲线斜率减小,到达自由端时粘结应力为零。

2)各级荷载下粘结应力的分布规律基本相似,不同的试件也有极为相似的规律。锚固长度较小的试件其粘结应力分布较均匀,高应力区域较大;相对

于锚长较小试件,锚固长度较大的试件其粘结应力分布不够均匀,高应力区域较小,并且靠近加载端,同普通热轧带肋钢筋相类似。

4 粘结-滑移本构关系

4.1 基本粘结-滑移关系

试验研究表明,未配置横向箍筋的 CX 组试件基本发生瞬间劈裂破坏,试件丧失承载能力,粘结-滑移曲线只有上升段;配置箍筋短锚 DX 组试件发生拔出破坏时,可以测出全曲线,但试验数据较为离

散。本文基于全部开槽试件 CX、DX 组试验数据进行粘结-滑移曲线上升段进行分析,粘结应力及对应滑移如图 6。粘结应力值、滑移值取值分别为平均粘结应力值、自由端与加载端滑移平均值。

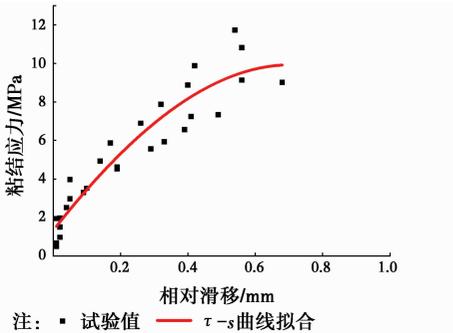


图 6 平均粘结应力-滑移关系

Fig. 6 The relationship between average bond stress and slip

观察试验数据规律,并对其进行拟合,结果以三次曲线形式表示,如式(1),此式即为基本粘结-滑移关系 $\Phi(s)$ 。

$$\Phi(s) = 1.33 + 22.41s - 11.78s^2 - 3.86s^3 \quad (1)$$

4.2 粘结-滑移位置函数

位置函数 $\psi(x)$ 描述了不同位置处粘结刚度 ($\tau-s$ 曲线斜率) 的相对大小,是个相对函数(图 7)。位置函数的取得方法详细如下:取相同滑移下不同位置处的粘结应力连成曲线,该曲线反映了粘结锚固刚度沿锚固长度的变化规律;将不同位置的粘结应力曲线无量纲化,即把纵坐标的粘结应力除以平均粘结应力,横坐标的锚固位置除以锚固长度。

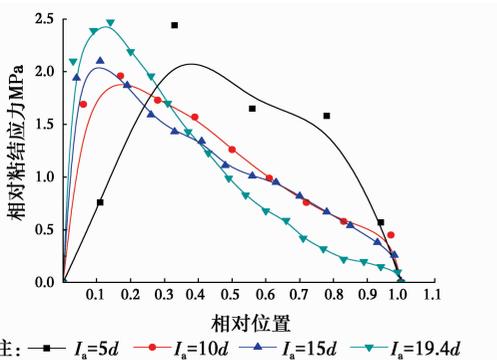


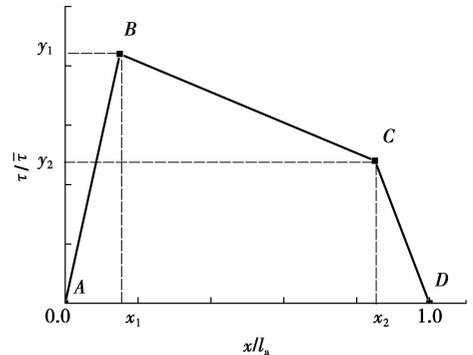
图 7 不同锚固长度位置函数

Fig. 7 The position function of different anchorage length

由此曲线可以观察到不同锚固长度试件粘结应力的分布有着相同的规律:自由端位置的粘结应力为 0,加载粘结应力近似趋向于 0,其趋势经历了迅速增加、相对稳定、急剧减小 3 个阶段,稳定区域在 0.15~0.9 倍锚固长度范围内。而在此分布规律

下,较短锚固长度 5d 和 10d 的试件有着相似分布趋势,较长锚固长度 15d 和 19.4d 的试件有着更为相似分布趋势。

结合粘结应力分布的特点,对位置函数进行简化处理,提出折线模型(图 8)。整个模型由 3 条折线,4 个控制点 A(0,0)、B(X_1, Y_1)、C(X_2, Y_2) 和 D(1.0,0) 组成。



注: —■— $\tau-s$

图 8 位置函数折线模型

Fig. 8 The broken line model of position function

由于锚固长度 5d、10d、15d 和 19.4d 的分布规律相似,通过数值拟合方法对数据拟合得到控制点的坐标 A(0,0)、B(0.15,2.15)、C(0.9,0.75)、D(1,0),其位置关系以分段函数表示,如式(2)。

$$\psi(x) \begin{cases} 14.33x & (x \leq 0.15) \\ -1.87x + 2.43 & (0.15 < x \leq 0.9) \\ -7.5x + 7.5 & (0.9 < x \leq 1) \end{cases} \quad (2)$$

参考文献[14-15]利用基本粘结-滑移关系 $\Phi(s)$ 、位置函数 $\psi(x)$ 表达 600 MPa 高强钢筋与混凝土之间的粘结-滑移本构关系,如式(3)所示。

$$\tau = \Phi(s)\psi(x) \quad (3)$$

5 锚固长度可靠度设计

5.1 粘结强度

通过 72 个棱柱体粘结锚固试件拉拔试验数据,考虑混凝土强度、保护层厚度、锚固长度、配箍率影响因素,同时参考国内外试验研究资料,经统计回归分析,提出 600 MPa 高强钢筋与混凝土粘结强度计算公式。

$$\tau_u = \left(0.75 + 4.00 \frac{d}{l_a}\right) \cdot$$

$$\left(1.81 + 0.34 \frac{c}{d} + 57.31\rho_{sv}\right) f_t \quad (4)$$

式中: d 为钢筋直径; c 为护层厚度; ρ_{sv} 为配箍率; f_t 为混凝土抗拉强度; l_a 为锚固长度。

试验分析结果表明:极限粘结强度的试验值与回归计算值的比值 τ_u^0/τ_c^0 的平均值 $\mu = 1.058$, 变异系数为 0.167 , 计算值与试验实测值基本一致。

5.2 锚固长度

5.2.1 极限状态方程 粘结锚固破坏可能发生劈裂破坏、混凝土拉裂后拔出破坏、混凝土压碎破坏以及钢筋屈服破坏,当锚固力与钢筋屈服力相等时,前 3 种破坏状态与钢筋屈服同时发生,即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

$$4\left(\frac{l_a}{d}\right)\tau_u - f_y = 0 \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),得到 600 MPa 高强钢筋发生粘结锚固破坏时的极限状态方程

$$4\Omega_p \left(\frac{l_a^0}{d^0}\right) \left(0.75 + 4.00 \frac{d^0}{l_a^0}\right) \left(1.81 + 0.34 \frac{c^0}{d^0} + 45.01 \frac{(d_{sv}^0/d^0)^2}{(c^0/d^0)(s_{sv}^0/d^0)}\right) f_t - f_y = 0 \quad (6)$$

式中: Ω_p 为计算模式准确性系数; $\mu_{\Omega_p} = 1.058$; $\delta_{\Omega_p} = 0.167$ 。

5.2.2 临界锚固长度 参考一般的工程习惯做法,偏不利地取保护层厚度 $c/d = 1$, 箍筋直径 $d_{sv}/d = 0.25$, 箍筋间距 $s_{sv}/d = 15$, $\rho_{sv} = A_{sv}/(cs_{sv}) = \pi d_{sv}^2/(4cs_{sv}) = 0.327\%$, 代入式(4), 得到 600 MPa 高强钢筋临界锚固长度计算公式

$$\frac{l_a}{d} = 0.143 \frac{f_y}{f_t} - 5.33 \quad (7)$$

5.2.3 可靠度分析锚固长度 为保证粘结锚固破坏状态的发生不早于钢筋屈服状态,取可靠指标 $\beta_a = 3.95$, 相应失效概率 $p_{fa} = 4.0 \times 10^{-5}$ 。《建筑结构可靠性设计规范统一标准》规定结构构件按照承载能力极限状态进行设计,当破坏类型为延性破坏时,可靠指标 $\beta = 3.2$, 相应失效概率 $p_{fy} = 6.87 \times 10^{-4}$ 。此处钢筋粘结锚固破坏状态即粘结应力的峰值极限状态。取事件“粘结锚固破坏状态不早于钢筋屈服状态”为随机事件,相应失效概率为 p_{f_0} , 相应可靠指标为 β_0 。

$$p_{f_0} = p(\tau = \tau_u \mid \sigma_s = f_y) = \frac{p_{f_a}}{p_{f_y}} = 5.82 \times 10^{-2} \quad (8)$$

$$\beta_0 = 1.57 \quad (9)$$

当计算可靠指标 $\beta_0^c > \beta_0 = 1.57$ 时,以低于失效概率 $p_{f_0} = 5.82 \times 10^{-2}$ 保证随机事件“粘结锚固破坏状态不早于钢筋屈服状态”的发生。

利用一次二阶矩 JC 法将 d 、 c 、 ρ_{sv} 、 l_a 、 f_t 等基本

变量当量正态化,对极限状态方程进行迭代求解,最终得出最不利状态下计算可靠指标 $\beta_0^c = 2.99 > \beta_0 = 1.57$, 求解方程得到具有一定可靠度的锚固长度取值,结果见表 3。

表 3 600 MPa 高强钢筋锚固长度

Table 3 The anchorage length of 600 MPa high strength reinforcement

混凝土强度	临界值 l_a/d	JC 值 l_a^c/d	规范值 l_a^b/d
C40	38.16	42.02	42.57
C50	34.01	37.51	38.52
C55	32.61	35.98	37.14
C60	31.12	34.36	35.69

注:混凝土结构设计规范(GB 50010—2010)规定的带肋钢筋基本锚固长度 l_a 的计算公式: $l_a/d = 0.14f_y/f_t$, 取 $f_y = 520$ MPa。

表 3 中 3 组数据分别为计算临界锚固长度、可靠度分析锚固长度及《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定带肋钢筋基本锚固长度,对比 3 组数据发现:临界锚固长度、JC 法分析锚固长度均低于规范取值。因此,600MP 高强钢筋的基本锚固长度可以按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)相关公式进行计算取值。

6 结论

1)600 MPa 高强钢筋粘结应力分布规律与普通带肋钢筋相类似,并且粘结应力峰值出现在锚固深度 0.15 倍处左右。

2)通过建立基本粘结-滑移关系、位置函数,提出适合 600 MPa 高强钢筋与混凝土的粘结-滑移本构关系。

3)600 MPa 高强钢筋的基本锚固长度可以按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)相关公式进行计算取值,抗拉强度设计值取 520 MPa。

参考文献:

- [1] PRINCE M J R, SINGH B. Investigation of bond behaviour between recycled aggregate concrete and deformed steel bars [J]. Structural Concrete, 2014, 15 (2): 154-168.
 - [2] 王晨霞,王宇,李敬红,等.再生混凝土与锈蚀钢筋间的粘结性能试验研究[J].土木建筑与环境工程, 2016, 38 (1): 46-53.
- WANG C X, WANG Y, LI J H, et al. Experimental analysis on bond behavior between recycled concrete and corroded steel bars [J]. Journal of Civil,

- Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38 (1):46-53. (in Chinese)
- [3] ZHANG D X, YANG W J. Experimental research on bond behaviors between shale ceramsite lightweight aggregate concrete and bars through pullout tests [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27 (9): 06014030.
- [4] 张欢欢,吕振利,刘阳. 钢纤维高强陶粒混凝土与钢筋的粘结性能试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(4): 79-84.
- ZHANG H H, LYU Z L, LIU Y. Experimental research on bond behavior between steel fiber reinforced High strength ceramsite concrete and rebar [J]. Building of Structures, 2016, 46 (4): 79-84. (in Chinese)
- [5] 冀晓东,宋玉普. 冻融循环后光圆钢筋与混凝土粘结性能退化机理研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 70-74.
- JI X D, SONG Y P. Mechanism of bond degradation between concrete and plain steel bar after freezing and thawing [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32 (1): 70-74. (in Chinese)
- [6] RANIA A H, KHALED S, TIM T. Confinement effect on the bond behaviour of beams under static and repeated loading [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 934-943.
- [7] HUANG L, CHI Y, XU L H, et al. Local bond performance of rebar embedded in steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic loading [J]. Construction and Building Materials, 2016, 103:77-92.
- [8] AREL H A, YAZICI S. Effect of different parameters on concrete-bar bond under high temperature [J]. ACI Materials Journal, 2014, 111(6):663-640.
- [9] KHALAF J, HUANG Z H, FAN M. Analysis of bond-slip between concrete and steel bar in fire [J]. Computers and Structures, 2016, 162:1-15.
- [10] 刘立新,李殿文,陈萌. 细晶粒热轧带肋钢筋粘结锚固性能试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(2):61-65.
- LIU L X, LI D W, CHEN M. Experimental study on bond-anchora of hot rolled rebbed bars of fine grains in concrete [J]. Industrial Construction, 2011, 41(2):61-65. (in Chinese)
- [11] 刘平,李艳艳,刘坤. HRB500 钢筋粘结性能的试验与分析[J]. 河北工业大学学报, 2012, 41(1):76-80.
- LIU P, LI Y Y, LIU K. Bond performance of HRB500 steel [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2012, 41(1):76-80. (in Chinese)
- [12] LI H T, DEEKS A J, SU X Z. Experimental study on compressive bond anchorage properties of 500 MPa steel bars in concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(2):04013005.
- [13] 邓宗才,袁常兴. 高强钢筋与活性粉末混凝土黏结性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3):69-78.
- DENG Z C, YUAN C X. Experimental study on bond capability between high strength rebar and reactive powder concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3):69-78. (in Chinese)
- [14] 高丹盈,陈刚, HADI M N S, 等. 钢筋与钢纤维混凝土的黏结-滑移性能及其关系模型[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(7):132-139.
- GAO D Y, CHEN G, HADI M N S, et al. Bond-slip behavior and constitutive model between rebar and steel fibre reinforced concrete [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(7):132-139. (in Chinese)
- [15] 杨海峰,邓志恒,覃英宏. 钢筋锈蚀后与再生混凝土间粘结-滑移本构关系研究[J]. 工程力学, 2015, 32(10): 114-122.
- YANG H F, DENG Z H, QIN Y H. Experimental study on bond-slip relationship between corroned rebar and recycled concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2015, 32(10): 114-122. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)