

# 双相体不锈钢筋与混凝土锚固设计 及可靠度分析

徐春一,苑永胜,逯彪,郭奕含

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究双相体不锈钢筋的粘结锚固性能,解决因钢筋锈蚀引起的混凝土结构耐久性问题. 方法 对11组66个双相体不锈钢筋与混凝土的粘结锚固试件进行中心拔出试验,分析双相体不锈钢筋与混凝土的粘结锚固特点和影响粘结锚固性能的主要因素及变化规律. 结果 基于试验数据,统计回归出了双相体不锈钢筋粘结强度计算公式;在结构可靠度分析的基础上,采用中心点法推导出了双相体不锈钢筋混凝土构件的临界锚固长度计算公式;在普通钢筋基本锚固长度计算公式的基础上,给出了合理的锚固长度设计建议. 结论 笔者所推出的双相体不锈钢筋的粘结强度计算公式与锚固长度设计建议公式,能够为不锈钢筋的相关规范编写及其工程应用提供可靠的理论依据和设计参考.

**关键词** 双相体不锈钢筋;粘结锚固;锚固长度设计;可靠度

中图分类号 TU502.6

文献标志码 A

## Anchorage Design and Reliability Analysis of Duplex Stainless Reinforcing Steel

XU Chunyi, YUAN Yongsheng, LU Biao, GUO Yihan

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The bond and anchorage properties of duplex stainless steel bars are studied to solve the durability problem of concrete structures caused by corrosion of steel bars. Based on pull-out tests of the 11 th group of 66 duplex stainless steel reinforced concrete bond-anchorage specimens. The characteristics of bond-anchorage, and the main factors and the changing regulation affecting the performance of the bond-anchorage of duplex stainless steel reinforced concrete is analyzed. Based on the tests results, the bonding strength calculating formula of duplex stainless reinforced steel is regressed. Based on the reliability analysis of structural, the critical anchorage length formula of duplex stainless reinforced concrete members is exported by using the Central Point Method. Based on the comparison of the bond-anchorage length calculating formula of the ordinary steel bars in

收稿日期:2018-05-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51408373)

作者简介:徐春一(1983—),女,副教授,博士,主要从事现代砌体结构、新型混凝土结构和预制装配式结构方面研究.

the code for design of concrete structures,the reasonable design of anchorage length is given. The formula for calculating the bond strength of duplex stainless steel bars and the suggested formula for anchorage length design provide reliable theoretical basis and design reference for the compilation of relevant codes of stainless steel bars and their engineering applications.

**Key words:** duplex stainless steel reinforcement;bond anchorage;anchorage length design;reliability

近年来,由于钢筋锈蚀引起的结构早期失效甚至坍塌的事故屡见不鲜,钢筋锈蚀对混凝土结构耐久性产生很大的影响<sup>[1-3]</sup>,因此钢筋锈蚀问题亟待解决.采用不锈钢筋替代碳素钢筋,可以有效解决钢筋锈蚀问题.

越来越多的研究学者在不锈钢钢筋混凝土力学性能方面做出研究:美国 Michigan Technological University<sup>[4]</sup>对 191 个不锈钢钢筋混凝土梁的梁端进行了粘结试验;G. J. Vanden Berg<sup>[5]</sup>等认为混凝土中,不锈钢筋的屈服流变阶段与普通钢筋类似;张国学<sup>[6-7]</sup>通过对不锈钢筋混凝土梁进行了抗弯及抗震试验,得出结论:无论是抗弯性能还是抗震性能,不锈钢筋混凝土均表现良好;耿会涛<sup>[8]</sup>研究了不锈钢筋与混凝土的粘结性能,得出不锈钢筋与混凝土的粘结性能良好,同时给出了不锈钢筋与混凝土粘结力计算公式.目前,大多数学者集中研究不锈钢的抗腐蚀性能<sup>[9-10]</sup>,而对结构性能的研究相对较

少.为尽快使不锈钢筋在工程中得到广泛应用,笔者进行了双相体不锈钢筋与混凝土的粘结锚固性能试验研究,在试验结果的基础上,统计回归出双相体不锈钢筋在混凝土中的粘结强度计算公式,在结构可靠度分析的基础上提出了双相体不锈钢筋混凝土构件的锚固长度设计建议,为不锈钢筋的相关规范编写及工程应用提供了理论依据.

1 试验设计

1.1 材性试验

本试验所用试件双相体不锈钢筋(1.4362)按照英国标准《BS6744—2001 + A2—2009》<sup>[11]</sup>选用,钢筋直径取  $d = 12\text{ mm}$ 、 $16\text{ mm}$ 、 $20\text{ mm}$  三种,不锈钢筋外形形状为月牙纹,试验执行标准《金属拉伸试验方法》(GB228—2010),测得钢筋的屈服强度和抗拉强度.试验结果见表 1.

表 1 不锈钢筋力学性能试验结果

Table 1 Test results of mechanical properties of stainless steel bars

钢筋直径	屈服强度	抗拉强度	强屈比	均匀伸长率	断后伸长率	弹性模量
$d/\text{mm}$	$\sigma_s/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$		$A_5/\%$	$A_{gt}/\%$	$E_s/10^5\text{ MPa}$
12	540	730	1.35	22.5	13.73	2.08
16	539	726	1.34	18.23	11.08	2.11
20	542	752	1.39	20.36	10.11	2.05

试验所用混凝土的强度等级分别为 C30、C40 和 C50.根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2002)和《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)<sup>[12]</sup>测得混凝土立方体抗压强度试验平均值和轴心抗拉强度平均值,结果如表 2 所示.

表 2 混凝土力学性能试验结果

Table 2 Test results of mechanical properties of concrete

混凝土设计	立方体抗压强度	轴心抗拉强度
强度等级	平均值/MPa	平均值/MPa
C30	31.50	2.22
C40	43.53	2.69
C50	50.04	2.81

1.2 试件设计与制作

本试验试件设计及制作均参照《混凝土结构试验方法标准》(GB50152—2012),共设计11组试件,每组6个试件,分别研究混凝土强度、钢筋直径、锚固长度、保护层厚度以及配箍率对不锈钢筋粘结锚固强度的影响,试件简图如图1所示,试件设计方案见

表3.

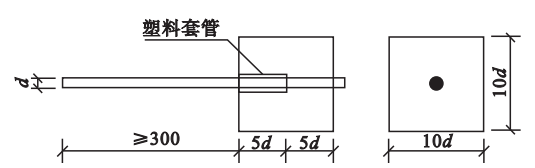


图1 拔出试件简图

Fig.1 Draw out the sample sketch

表3 拉拔试验设计方案

Table 3 Design scheme of drawing test

钢筋种类	试件编号	直径 $d/\text{mm}$	混凝土 强度	钢筋 位置	保护层厚 $c/\text{mm}$	配箍 情况	锚固长度 $l_a/\text{mm}$
不锈钢 钢筋	16-B-5	16	C30	中心	72	—	80
	16-B-5L	16	C40	中心	72	—	80
	16-B-5H	16	C50	中心	72	—	80
	16-B-10	16	C30	中心	72	—	160
	16-B-15	16	C30	中心	54	—	240
	12-B-5	12	C30	中心	90	—	60
	20-B-5	20	C30	中心	48	—	100
	16-B-5P1	16	C30	偏心	32	—	80
	16-B-5P2	16	C30	偏心	48	—	80
	16-B-5G1	16	C30	中心	72	$\Phi 6@60$	80
普通钢筋	16-B-5G2	16	C30	中心	72	$\Phi 6@30$	80
	16-H-5	16	C30	中心	72	—	80

1.3 试验方法

本次中心拉拔试验采用力控制加载方式进行加载,加载装置为沈阳建筑大学拉压试验室的WE-30型液压式万能材料试验机.根据《混凝土结构试验方法标准》(GB50152—2012)的要求分级加载.试验数据通过DH3816静态应变仪进行采集.

2 试验现象

本试验的破坏形式主要有两种,分别为混凝土劈裂破坏和钢筋拔出破坏.在混凝土劈裂破坏的试验中,加载初期试件变化不明显,但随着荷载不断增大,试件发出劈裂声并随之破坏,此时停止试验;在钢筋拔出破坏的试验中,加载初期试件变化不明显,但随着荷载不断增大,不锈钢筋拔出速率也不断增大,

直到钢筋拔出,试件破坏,此时停止试验,整个试验过程中,混凝土表面未出现裂缝.

3 影响粘结锚固性能的主要因素

根据式(1)计算中心拉拔试件的粘结应力.

$$\tau = \frac{F}{\pi d l_a}.$$

(1)

式中: $\tau$ 为粘结应力,MPa; $F$ 为试验破坏荷载,kN; $d$ 为钢筋直径,mm; $l_a$ 为锚固长度,mm.

3.1 混凝土强度的影响

钢筋与混凝土粘结性能的重要影响因素是混凝土强度,为研究混凝土强度对不锈钢筋粘结性能的影响,笔者设计了三组混凝土强度等级不同的拉拔试件分别为:16-B-5、16-B-5L、16-B-6H,共18个试件.试验表明,极限粘结强度随着混凝土强度的提

高而提高,并与抗拉强度成正比(见图2). 根据不锈钢筋拉拔试件的极限粘结应力试验值  $\tau_u$  和对应的混凝土抗拉强度  $f_t$  经回归得到:

$$\tau_u = 10.62f_t - 13.17. \tag{2}$$

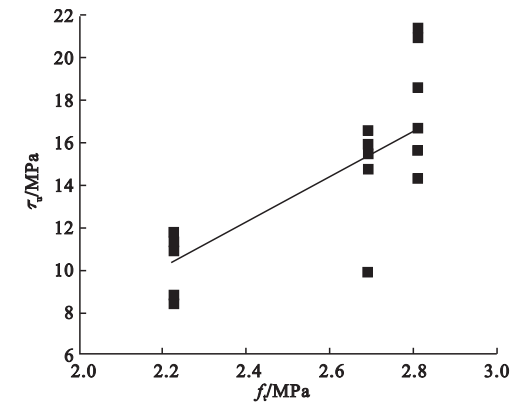


图2 混凝土抗拉强度对粘结强度的影响  
Fig. 2 Effect of tensile strength of concrete on bond strength

3.2 钢筋直径的影响

不锈钢筋混凝土中心拉拔试件中分析钢筋直径变化对极限粘结强度影响的试件为 12-B-5、16-B-5、20-B-5 三组试件, 钢筋直径分别为 12 mm、16 mm、20 mm. 试验表明,随着钢筋直径  $d$  的增大,承载力有所增大,极限粘结应力随之减小,但下降幅度不大,如图3所示. 根据试验数据回归得到钢筋直径对粘结锚固强度影响的关系式:

$$\frac{\tau_u}{f_t} = -0.01 d + 0.96. \tag{3}$$

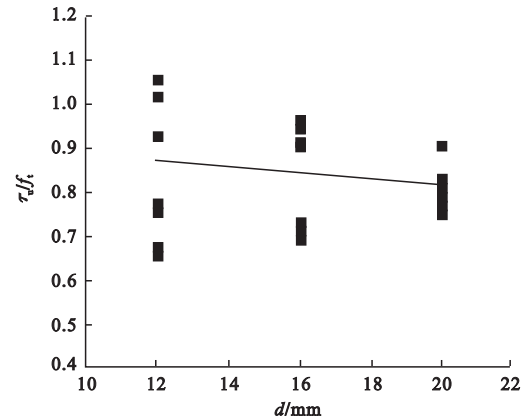


图3 钢筋直径对粘结强度的影响  
Fig. 3 Effect of reinforcement diameter on bond strength

3.3 锚固长度的影响

不锈钢筋混凝土中心拉拔试验中分析锚固长度变化对极限粘结强度影响的试件有: 16-B-5、16-B-10、16-B-15 三组, 不锈钢筋直径  $d = 16\text{ mm}$ , 混凝土强度等级为 C30, 相对锚固长度  $l_a/d = 5、10、15$ . 试验表明,相对锚固长度  $l_a/d$  越大, 极限拉拔力越大, 但相对粘结锚固强度  $\tau_u/f_t$  却越小(见图4). 这是因为粘结应力沿锚长分布不均匀, 当锚固长度较短时, 高应力区相对较大, 相对锚固强度  $\tau_u/f_t$  较高, 而当锚固长度较大时, 锚固区内的粘结应力很不均匀, 高应力区相对较短, 所以相对锚固强度  $\tau_u/f_t$  较低. 根据试验数据回归得到锚固长度对不锈钢筋粘结性能影响的关系式如下:

$$\tau_u/f_t = -0.013l_a/d + 0.9. \tag{4}$$

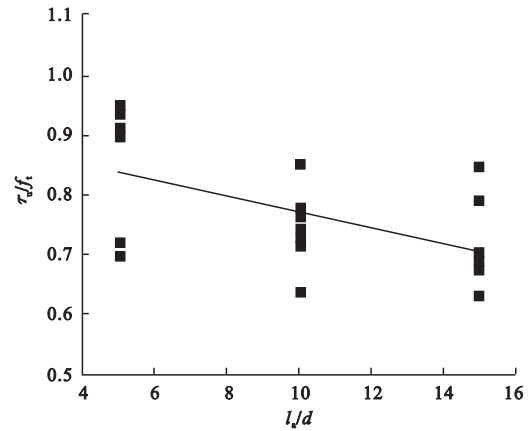


图4 锚固长度对粘结强度的影响  
Fig. 4 Effect of anchorage length on bond strength

3.4 保护层厚度的影响

不锈钢筋混凝土拉拔试验中的偏心拉拔试验组为 16-B-5P1 和 16-B-5P2 两组, 保护层厚度分别为 32 mm 和 48 mm, 并与中心置筋试件(保护层厚度为 72 mm) 形成对比试件组, 对比分析保护层厚度对粘结锚固性能的影响. 结果表明,随着相对保护层厚度  $c/d$  的增大, 相对粘结强度  $\tau_u/f_t$  随之增大, 如图5所示. 对试验数据回归分析得到保护层厚度对粘结锚固强度影响的关系式:

$$\tau_u/f_t = 0.11c/d + 0.38. \tag{5}$$

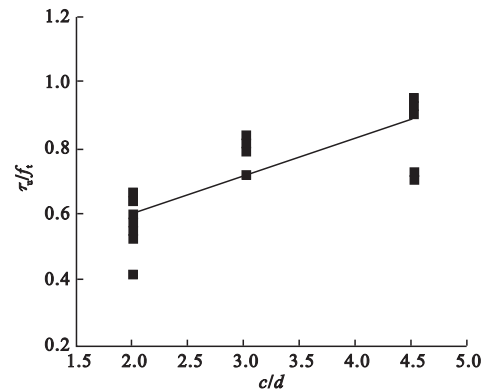


图5 保护层厚度对粘结强度的影响

Fig. 5 Effect of protective layer thickness on bond strength

3.5 配箍率的影响

探讨配箍率对双相体不锈钢筋混凝土粘结锚固性能影响的试件组为 16-B-5G1 以及 16-B-5G2, 配箍率分别为 0.654 5 和 1.309, 并于不配箍筋试件 16-B-5 形成对比试件组. 试验表明, 随着配箍率  $\rho_{sv}$  的增大, 粘结锚固强度也随之增大(见图 6). 由于箍筋的作用, 在混凝土纵向劈裂裂缝产生后仍然保持对钢筋的侧向约束, 配箍试件一般发生钢筋拔出破坏, 所以配箍能够保持后期粘结强度, 显著改善结构延性. 对试验数据回归分析得到配箍率对粘结锚固强度影响的关系式:

$$\tau_u/f_t = 11.86\rho_{sv} + 0.86. \tag{6}$$

式中:  $\rho_{sv} = \frac{A_{sv1}}{cS_{sv}}$  为劈裂面配箍率; 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.

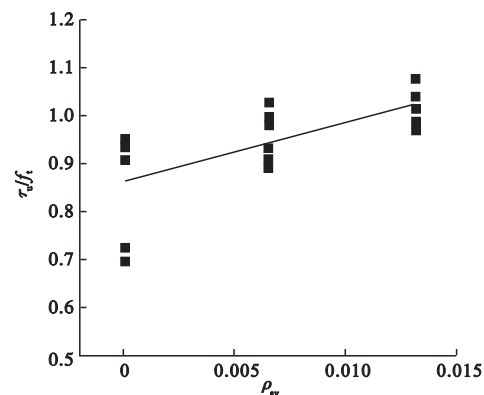


图6 配箍率对粘结强度的影响

Fig. 6 Effect of stirrup ratio on bond strength

4 粘结强度计算公式

综合分析影响不锈钢筋粘结强度的主要因素, 在试验结果及徐有邻<sup>[13-15]</sup>、毛达岭<sup>[16]</sup>等的研究分析的基础上, 统计回归得到双相体不锈钢筋与混凝土的极限粘结强度计算公式:

$$\tau_u = \left( 0.71 + 2.22 \frac{d}{l_a} \right) \times (1.28 + 0.73 \frac{c}{d} + 20.6\rho_{sv}) f_t. \tag{7}$$

根据式(7)所得的极限粘结强度计算值  $\tau_u$  和实测值  $\bar{\tau}_u$  见表 4.  $\frac{\bar{\tau}_u}{\tau_u}$  的平均值约为 0.96, 由此可知, 计算值与试验值较为吻合.

表4 极限粘结强度实测值与计算值对比

Table 4 Comparison between measured and calculated values of ultimate bond strength

试件编号	$f_t/\text{MPa}$	$c/d$	$l_a/d$	$\rho_{sv}/\%$	粘结强度/MPa		$\bar{\tau}_u/\tau_u$
					$\bar{\tau}_u$	$\tau_u$	
16-B-5	2.22	4.5	5	0	10.51	11.69	0.899
16-B-10	2.22	4.5	10	0	9.74	9.44	1.031
16-B-15	2.22	4.5	15	0	8.93	8.69	1.027
12-B-5	2.22	4.5	5	0	10.62	11.69	0.908
20-B-5	2.22	4.5	5	0	9.91	11.69	0.847
16-B-5L	2.69	4.5	5	0	14.89	14.17	1.051
16-B-5H	2.81	4.5	5	0	17.08	14.80	1.154
16-B-5P1	2.22	3	5	0	9.24	8.88	1.039
16-B-5P2	2.22	2	5	0	6.81	7.01	0.970
16-B-5G1	2.22	4.5	5	0.654	11.43	12.04	0.949
16-B-5G2	2.22	4.5	5	1.309	12.01	12.38	0.970

5 锚固可靠度分析与设计建议

5.1 锚固承载力极限状态

当钢筋与混凝土之间达到锚固承载力极限状态时, 锚固力等于屈服力, 锚固破坏与钢筋屈服同时发生, 由平衡条件可得到混凝土结构中钢筋的锚固承载力极限状态方程为

$$f_y = 4\tau_u l_a/d. \tag{8}$$

将式(7)代入式(8), 并偏于安全取  $c/d=1$ , 横向箍筋直径  $d_{sv}/d=0.25$ , 箍筋间距  $s_{sv}/d=15$ , 可得临界锚固长度的计算式为

$$l_a/d = 0.168 f_y/f_t - 3.126. \tag{9}$$



取  $f_y = 450 \text{ MPa}$ , 通过式(9)得出 C30、C40 和 C50 强度等级混凝土的临界锚固长度(见表5)。

表5 锚固长度计算比较

Table 5 Comparison of calculated anchorage length

混凝土强度等级	锚固长度/mm		
	临界值	近似方法解	规范设计值
C30	49.74	51.68	44.06
C40	41.08	41.67	36.84
C50	36.87	39.49	33.33

5.2 可靠指标

结构可靠概率通常为了方便研究的计算和表达,结构可靠度分析中结构的可靠度通常用结构的失效概率来衡量。以“不锈钢筋应力达到屈服( $\sigma_s = f_y$ )”和“不锈钢筋混凝土粘结应力达到最大值( $\tau = \tau_u$ )”同时出现的状态作为锚固可靠度分析的依据,建立锚固极限状态的概率表达式

$$p_{fa} = P(\sigma_s = f_y, \tau = \tau_u) = P(\sigma_s = f_y)P(\tau = \tau_u | \sigma_s = f_y) = p_{f0}p_f. \tag{10}$$

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001)中规定,当基本构件安全等级为二级时,钢筋应力达到屈服强度( $\sigma_s = f_y$ )的可靠指标  $\beta = 3.2$ ,则相应的失效概率为

$$p_f = P(\sigma_s = f_y) = \Phi(-\beta) = \Phi(-3.2) = 6.9 \times 10^{-4}. \tag{11}$$

我国粘结锚固专题组通过长期的试验研究,确定结构构件的安全等级为二级时,锚固承载力可靠指标及相应的失效概率为: $\beta_a = 3.95, p_{fa} = \Phi(-\beta_1) = 4.0 \times 10^{-5}$ . 所以可得到在“钢筋受力端应力达到屈服强度”的前提下发生“钢筋混凝土构件的粘结应力达到最大值”事件的允许概率及相应的可靠指标为

$$p_{f0} = p(\sigma_s = f_y | \tau = \tau_u) = \frac{p_{fa}}{p_f} = 5.82 \times 10^{-2}. \tag{12}$$

$$\beta_{01} = 1.57. \tag{13}$$

5.3 近似方法解

5.3.1 极限状态方程

根据极限状态下的平衡条件,可以建立下列关系式:

$$F_u = \pi d l_a \tau_u. \tag{14}$$

式中: $F_u$  为极限拉拔力; $d$  为钢筋直径; $l_a$  为

临界锚固长度; $\tau_u$  为极限粘结应力。

极限拉拔力  $F_u$  可表示为

$$F_u = \eta \frac{\pi d^2}{4} f_y. \tag{15}$$

式中: $\eta$  为应力丰度系数; $f_y$  为钢筋的屈服应力。

将式(15)代入式(14)中可以得到锚固问题的极限状态方程:

$$g = 4 \left( \frac{l_a}{d} \right) \tau_u - \eta f_y = 0. \tag{16}$$

令  $S$  表示效应, $R$  表示抗力,则:

$$S = \eta f_y. \tag{17}$$

$$R = 4 \left( \frac{l_a}{d} \right) \tau_u. \tag{18}$$

所以,式(16)可表示为通常的极限状态方程:

$$R - S = 0. \tag{19}$$

5.3.2 效应  $S$  的特征参数

由式(17)得到效应的表达式为

$$S = f_y. \tag{20}$$

可得  $S$  的平均值  $\mu_s = \mu_{f_y} = 559 \text{ MPa}$ , 变异系数  $\delta_s = \delta_{f_y} = 0.064$ 。

5.3.3 抗力  $R$  的特征参数

由式(18)得到抗力  $R$  的表达式为

$$R = \Omega_p \cdot R_p = \Omega_p \cdot 4 \left( \frac{l_a}{d} \right) \tau_u. \tag{21}$$

式中: $\Omega_p$  为计算公式准确性的系数,为试验值与计算值的比值;经计算笔者取  $\mu_{\Omega_p} = 0.9859, \delta_{\Omega_p} = 0.0871$ 。

将式(21)改写为如下表达式:

$$R_p = R(f_{ts}, l_a/d, c/d, d_{sv}/d, S_{sv}/d). \tag{22}$$

根据随机变量函数统计参数的计算公式,求抗力  $R$  的统计参数。

平均值为

$$\mu_{R_p} = R(\mu_{f_{ts}}, \mu_{l_a}, \mu_c, \mu_{d_{sv}}, \mu_{S_{sv}}, \mu_d). \tag{23}$$

方差为

$$\sigma_{R_p}^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial R_p}{\partial X_i} \right)^2 \cdot \sigma_{X_i}^2. \tag{24}$$

变异系数为

$$\delta_{R_p} = \frac{\sigma_{R_p}}{\mu_{R_p}}. \tag{25}$$

式中: $X_i$  表示函数  $R_p$  中有关的随机变量  $f_{ts}, l_a, c, d_{sv}, S_{sv}, d$ 。

对于双相体不锈钢筋,根据粘结强度  $\tau_u$  表达式及抗力  $R$  表达式可以得到:

$$R = \Omega_p \cdot 4 \cdot \left( \frac{l_a^0}{d^0} \right) \cdot \left( 0.71 + 2.22 \frac{d^0}{l_a^0} \right) \cdot \left[ 1.28 + 0.73 \frac{c^0}{d^0} + 20.6 \frac{(d_{sv}^0/d^0)^2}{(c^0/d^0)(S_{sv}^0/d^0)} \right] f_{ts}. \tag{26}$$

令  $R = 4 \cdot \Omega_p \cdot L \cdot T \cdot f_{ts}$ , 由统计参数计算式 (23) ~ (25) 及一般的构造要求和工程习惯做法, 计算求得抗力  $R$  的统计参数:

平均值为

$$\mu_R = 4\mu_{\Omega_p}\mu_L\mu_T\mu_{f_t} = \left( 18.08 + 5.95 \frac{l_a}{d} \right) \mu_{f_{ts}}. \tag{27}$$

方差为

$$\delta_R = \sqrt{\delta_{\Omega_p}^2 + \delta_L^2 + \delta_T^2 + \delta_{f_t}^2} = \sqrt{0.00837 + \left( \frac{0.0575 l_a/d}{0.73 l_a/d + 2.22} \right)^2 + \delta_{f_{ts}}^2}. \tag{28}$$

5.3.4 锚固长度计算

综合随机变量  $S$  与  $R$  均服从对数正态

$$\ln \left( 18.08 + 5.95 \frac{l_a}{d} \right) + \ln \mu_{f_{ts}} - \ln \mu_s - 1.57 \sqrt{0.00837 + \left[ \frac{0.0575 (l_a/d)}{2.22 + 0.73 (l_a/d)} \right]^2 + \delta_{f_{ts}}^2} = 0. \tag{31}$$

5.4 规范设计值

当计算中充分利用钢筋的抗拉强度时, 受拉钢筋的锚固长度应按下列公式计算<sup>[12]</sup>, 计算结果见表5.

$$l_a = 0.14 \frac{f_y}{f_t} d. \tag{32}$$

其中, 钢筋的外形系数取 0.14;  $f_y$  为钢筋的抗拉强度设计值, 取  $f_y = 450$  MPa;  $f_t$  为混凝土轴心抗拉强度设计值.

5.5 锚固长度设计建议

通过对表 5 中各锚固长度 ( $\frac{l_a}{d}$ ) 计算公式计算结果的对比分析可以看出, 通过可靠度理论中的中心点法计算出的近似方法解与规范<sup>[12]</sup>中给出的钢筋基本锚固长度计算公式得出的设计锚固长度的比值在 1.13 ~ 1.18, 且较为稳定. 所以, 可将规范<sup>[12]</sup>中普通钢筋基本锚固长度计算公式乘以修正系数  $\alpha_B$  作为双相体不锈钢筋基本锚固长度计算公式, 即:

$$l_{ab} = \alpha_B \alpha \frac{f_y}{f_t} d. \tag{33}$$

式中:  $l_{ab}$  为受拉钢筋的基本锚固长度;  $f_y$  为钢筋的抗拉强度设计值;  $f_t$  为普通混凝土轴心抗拉强度设计值;  $d$  为钢筋直径;  $\alpha$  为锚固钢

筋分布, 功能函数表示为

$$Z = \ln \left( \frac{R}{S} \right) = \ln R - \ln S. \tag{29}$$

由此可知,  $Z$  服从正态分布,  $Z$  的可靠指标表达式为

$$\beta_0 = \frac{\mu_{\ln R} - \mu_{\ln S}}{\sqrt{\sigma_{\ln R}^2 + \sigma_{\ln S}^2}} \approx \frac{\ln \mu_R - \ln \mu_S}{\sqrt{\delta_R^2 + \delta_s^2}}. \tag{30}$$

代入相应的统计参数, 可得到锚固长度计算公式. 将不同等级混凝土抗拉强度的统计参数  $\mu_{f_{ts}}, \delta_{f_{ts}}$  代入, 经计算机迭代求解出不锈钢筋锚固长度的近似计算值(见表 5).

筋的外形系数;  $\alpha_B$  为双相体不锈钢筋对普通钢筋基本锚固长度修正系数, 可考虑取 1.2.

6 结 论

(1) 双相体不锈钢筋与混凝土粘结锚固试验的破坏现象分别为混凝土劈裂破坏和钢筋拔出破坏. 随着混凝土强度的提高, 破坏越突然, 延性较差, 配制一定量的箍筋可以显著改善其延性.

(2) 与普通钢筋混凝土类似, 混凝土强度越高, 粘结锚固性能越好; 粘结锚固性能亦随着相对保护层厚度和横向配箍率的提高而提高; 但钢筋直径越大, 粘结锚固性能越差.

(3) 基于试验结果, 统计回归出双相体不锈钢筋的粘结强度计算公式, 该公式的计算结果与实测值吻合较好.

(4) 在结构可靠度分析的基础上, 采用中心点法推导出了双相体不锈钢筋混凝土构件的临界锚固长度计算公式; 工程设计时, 建议在普通钢筋基本锚固长度计算公式的基础上乘以修正系数 1.2 作为双相体不锈钢筋的锚固长度计算公式.

参考文献

[1] 张永利. 锈蚀钢筋混凝土构件粘结性能及承

- 载性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2011.  
(ZHANG Yongli. Bond properties and bearing capacity of corroded reinforced concrete member[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.)
- [2] 李睿, 曾珂, 毛满, 等. 锈蚀钢筋与混凝土之间黏结滑移性能的比较研究[J]. 混凝土, 2018(9): 59-63+69.  
(LI Rui, ZENG Ke, MAO Man, et al. Comparison and research on bond behavior of concrete with corroded rebar[J]. Concrete, 2018(9): 59-63+69.)
- [3] 赵卓, 曾力, 王飞, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁受弯承载力与失效模式研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(17): 88-92+65.  
(ZHAO Zhuo, ZENG Li, WANG Fei, et al. Study on flexural capacity and failure mode of corroded reinforced concrete beams[J]. Building structure, 2017, 47(17): 88-92+65.)
- [4] Michigan Technological University. Research annual reports(FY2000-FY2002), department of transportation, Michigan Technological University[R]. USA, March, 2003.
- [5] VANDEN BERG G J, 梁爱华. 不锈钢筋用于混凝土的研究[J]. 建筑技术, 2000, 31(2): 105-107.  
(VANDEN BERG G J, LIANG Aihua. A study and research of stainless steel in concrete structure[J]. Architecture technology, 2000, 31(2): 105-107.)
- [6] 张国学, 徐永生, 丁舟. 不锈钢筋混凝土梁受弯性能的试验研究[J]. 铁道建筑, 2008(2): 13-15.  
(ZHANG Guoxue, XU Yongsheng, DING Zhou. Experimental study on the flexural behavior of the stainless steel reinforced concrete beams[J]. Railway engineering, 2008(2): 13-15.)
- [7] 张国学, 赵峰. 不锈钢筋混凝土梁抗震性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(5): 35-40.  
(ZHANG Guoxue, ZHAO Feng. Experimental study on the seismic performance of the stainless steel reinforced concrete beams[J]. China railway science, 2010, 31(5): 35-40.)
- [8] 耿会涛. 桥梁用不锈钢筋与构件受力性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.  
(GENG Huitao. Experimental study on mechanical properties of stainless steel bars and members on bridges[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.)
- [9] 张颖. 不锈钢筋混凝土板疲劳性能试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.  
(ZHANG Ying. Experimental study on fatigue performance of stainless steel reinforced concrete slab[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.)
- [10] 李承昌, 何伟南. 不锈钢筋与混凝土的粘结性能[J]. 公路交通科技, 2016, 33(12): 15-20.  
(LI Chengchang, HE Weinan. Bonding properties of stainless-steel bars and concrete[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2016, 33(12): 15-20.)
- [11] 英国标准学会. 混凝土增强和使用的不锈钢材要求和试验方法: BS6744—2001+A2—2009[S]. 英国: [s. n.], 2009.  
(GB-BSI. Stainless steel bars for the reinforcement of and use in concrete-requirements and test methods: BS6744—2001+A2—2009[S]. UK: [s. n.], 2009.)
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.  
(Ministry of Construction of the PRC. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [13] 徐有邻. 变形钢筋—混凝土粘结性能试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1990.  
(XU Youlin. Experimental study on bonding properties of deformed steel bars-concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 1990.)
- [14] 徐有邻, 沈文都, 汪洪. 钢筋混凝土粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(3): 26-37.  
(XU Youlin, SHEN Wendu, WANG Hong. Experimental study on bonding and anchoring behavior of reinforced concrete[J]. Journal of building structures, 1994, 15(3): 26-37.)
- [15] 徐有邻. 钢筋与混凝土粘结锚固的分析研究[J]. 建筑科学, 1992, 4(3): 18-24.  
(XU Youlin. Analysis and research on bonding and anchoring of steel bar and concrete[J]. Building science, 1992, 4(3): 18-24.)
- [16] 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, 34(12): 67-69.  
(MAO Daling, LIU Lixin, FAN Li. Experimental study on bonding performance of HRB500 grade steel bars[J]. Industrial Architecture, 2004, 34(12): 67-69.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)