

锈蚀钢筋与再生混凝土粘结性能

王晨霞,张梦培,曹芙波,彭献峰

(内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘要 目的 研究不同锈蚀率的锈蚀钢筋与再生混凝土间的粘结滑移性能. 方法 通过6组锈蚀率分别为0%,0.5%,1%,1.5%,2%,3%的中心拔出试件,采用钢筋中心开槽内贴应变片和通电加速锈蚀的试验方法进行先锈蚀后中心拉拔试验. 结果 拉拔试验中所有试件均发生劈裂破坏,且所有试件自由端滑移较小,锈蚀率为3.39%时自由端几乎无滑移. 锈蚀率对锈蚀钢筋与再生混凝土之间的粘结性能影响较大,钢筋锈蚀率小于0.5%时,锈蚀对粘结强度是有益的;锈蚀率小于1.05%时,钢筋局部应变曲线呈上凸形态,锈蚀率大于1.05%时呈下凹形态;锈蚀率越大,粘结应力越集中在加载端附近. 结论 通过位置函数 $\varphi(x, \rho_w)$ 和平均粘结滑移关系 $\bar{\tau}(\bar{s})$,建立了考虑锈蚀率和粘结位置的粘结-滑移本构关系.

关键词 再生混凝土;钢筋锈蚀;锈蚀率;位置函数;本构关系;粘结滑移

中图分类号 TU375

文献标志码 A

Bonding Properties of Corroded Steel Bar and Recycled Concrete

WANG Chenxia, ZHANG Mengpei, CAO Fubo, PENG Xianfeng

(School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010)

Abstract: In order to study the bond-slip properties between corroded steel bars and recycled concrete with different corrosion rates, six groups of theoretical corrosion rates of 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 3% were designed for center drawing. The center drawing test was carried out by attaching strain gauges in the center slot of the steel bar and energizing to accelerate the corrosion with power. The results show that all the specimens have split failure and the free end slip is small. When the corrosion rate is 3.39%, the free end has almost no slip. The corrosion rate has a greater influence on the bonding performance between the corroded steel bar and the recycled concrete. When the corrosion rate is less than 0.5%, the corrosion is beneficial to the bonding strength; when the corrosion rate is less than 1.05%, the local strain curve of the steel bar is convex, when the corrosion rate is greater than 1.05%, it is concave; the greater the corrosion rate, the more concentrated the bonding stress near the loading end. Considering the corrosion rate and the bond

收稿日期:2019-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51868061);内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2020MS05071)

作者简介:王晨霞(1977—),女,副教授,博士,主要从事再生混凝土耐久性方面研究.

position, the bond-slip constitutive relationship is established through the position $\varphi(x, \rho_w)$ and the average bond-slip relationship $\bar{\tau}(\bar{s})$.

Key words: recycled concrete; steel bar corrosion; corrosion rate; position function; constitutive relation; bond-slip

将废弃的混凝土进行一系列工序制成再生混凝土,不仅可以保护环境还可以节约资源. 钢筋与再生混凝土的粘结性能是再生混凝土设计与使用的重要因素. P. S. Moallemi 等^[1]通过对不同替代率和钢筋直径的再生混凝土进行中心拉拔试验,提出了再生混凝土与钢筋的粘结应力计算公式. K. Pandurangan 等^[2]对再生粗骨料进行酸、机械和热法处理后通过半梁试验对再生混凝土与钢筋的粘结应力进行测试,认为酸处理粗骨料后的再生混凝土与钢筋粘结力最好. S. W. Kim 等^[3]通过线性回归研究了再生粗骨料替代率和水胶比对再生混凝土与钢筋粘结性能的影响. 杨海峰等^[4-5]通过改变再生粗骨料取代率、保护层厚度、配箍率等,综合分析了其对再生混凝土与钢筋粘结性能的影响规律,建立极限粘结强度计算公式. 董宏英等^[6-7]通过改变再生粗骨料取代率、再生细骨料取代率、钢筋类型等变量进行钢筋-再生混凝土粘结滑移性能试验,得出了钢筋与再生混凝土界面粘结性能的本构关系. 并研究了栓钉与拉结筋构造对圆钢管高强混凝土粘结-滑移性能的影响,得出无构造措施下钢管再生混凝土的粘结性能比同强度普通混凝土更好. 曹芙蓉等^[8-9]通过半梁试验,研究了钢筋锈蚀后与再生混凝土的粘结力的变化,得出钢筋锈蚀率与粘结强度的关系. 程东辉等^[10]研究了钢筋与钢纤维再生混凝土的锚固性能,提出极限粘结强度计算公式,为再生混凝土粘结锚固性能的研究提供理论与试验基础. 白国良等^[11]采用正交试验对型钢与再生混凝土之间的粘结滑移性能进行研究,结果表明型钢再生混凝土与型钢普通混凝土的破坏形态类似,再生粗骨料取

代率、再生混凝土强度、型钢保护层厚度、型钢埋置长度对平均粘结强度有一定影响. 笔者通过中心拉拔试验,以锈蚀率为变量研究再生混凝土与锈蚀钢筋间的粘结性能,并建立锈蚀钢筋与再生混凝土间粘结-滑移本构关系,为再生混凝土耐久性研究奠定基础.

1 试验

1.1 试验材料

水泥采用 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥;细骨料为天然河砂,表观密度为 $2\ 560\ \text{kg}/\text{m}^3$,细度模数为 2.7;再生粗骨料为某仓库地坪拆除后的废弃混凝土,并用机械切割出 6 个 $150\ \text{mm} \times 150\ \text{mm} \times 150\ \text{mm}$ 的立方体,测得抗压强度平均值为 $44.5\ \text{MPa}$. 对再生混凝土块破碎后筛分成 $5 \sim 31.5\ \text{mm}$ 连续级配的再生粗骨料,并按《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)中的要求进行清洗、晾晒. 测得再生粗骨料压碎指标为 14.5%,表观密度为 $2\ 455\ \text{kg}/\text{m}^3$,堆积密度为 $1\ 277\ \text{kg}/\text{m}^3$,24 h 吸水率为 5.3%,再生粗骨料取代率为 100%.

1.2 试件设计

设计 6 组中心拉拔试件,主要参数如表 1 所示. 钢筋为直径 18 mm 的 HRB400 级钢筋,抗拉强度为 $560\ \text{MPa}$,屈服强度为 $412\ \text{MPa}$,锚固长度为 $10d$ (d 为测试钢筋直径). 将试件拉拔端套上 PVC 管作为无粘结区,并将管内灌满石蜡. 无粘结区长度为 50 mm. 在无粘结区靠近自由端的部分焊上金属片,将金属片与位移计连接可测出加载端的滑移;通过金属片测量滑移值,能够消除由于无粘结区钢筋的变形对加载端位移的影响. 试件设置如图 1 所示. 再生混凝土配合比

如表 2 所示。

表 1 试件参数设计

Table 1 Specimen parameter design

组别	设计锈蚀率/%	截面长宽/mm	试件数量/个
D1	0	150 × 150	3
D2	0.5	150 × 150	3
D3	1	150 × 150	3
D4	1.5	150 × 150	3
D5	2	150 × 150	3
D6	3	150 × 150	3

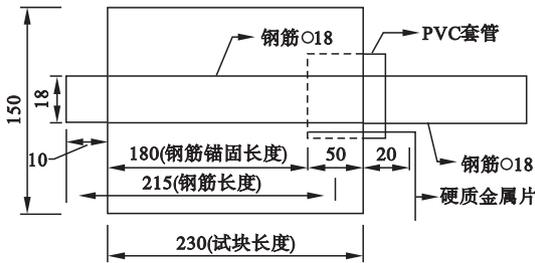


图 1 中心拉拔试件

Fig. 1 Center pull-out specimen

表 2 混凝土配合比

Table 2 Recycled concrete mix ratio

水胶比	材料用量/(kg·m ⁻³)				减水剂/%	28 d 抗压强度/MPa
	水泥	砂子	再生粗骨料	水		
0.54	400	662	993	215	0.5	36.5

通过钢筋开槽内贴应变片的方式测量钢筋应变,具体操作为钢筋沿纵向切为相等两半,并沿轴心纵向开槽,槽宽 4 mm、深 2 mm,应变片在两半钢筋槽内交错布置,间距 20 mm,所有应变片导线由钢筋尾部引出并用环氧树脂将凹槽填平并对两根半圆钢筋点焊,最后对两半圆钢筋连接面用环氧树脂密封,防止锈蚀试验时应变片破坏,钢筋处理如图 2 所示。

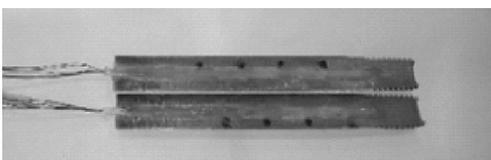


图 2 钢筋开槽黏贴应变片

Fig. 2 Strain gauges for reinforcement and slotting

拉拔钢筋的设计锈蚀率分别为 0%、

0.5%、1%、1.5%、2%、3%,混凝土搅拌时采用 5% 的 NaCl 溶液拌和,以增加混凝土内部导电离子浓度,更加精确地控制锈蚀率^[12],锈蚀方法按照肖建庄^[13]再生混凝土中心拉拔试验钢筋快速锈蚀的方法进行,锈蚀装置如图 3 所示。



图 3 钢筋快速锈蚀装置

Fig. 3 Rebar rapid corrosion device

1.3 加载与量测

中心拔出试验在 600 kN 液压伺服试验机上进行,试件加载时使用特制的加载工具,试件加载端和自由端均设有精度为 0.01 mm 的位移计,以精确测量钢筋加载端和自由端与混凝土的相对滑移量;加载过程分两个阶段:一阶段采用荷载控制方法,当施加荷载达到 80% 极限荷载前,加载速率控制在 0.03 kN/s;二阶段采用位移控制方法,当施加荷载大于 80% 极限荷载时,加载速率为 0.005 mm/s。当混凝土破坏或钢筋发生较大滑移时结束加载。试验数据通过 TDS-530 高速静态数据采集仪自动采集,加载装置如图 4 所示。

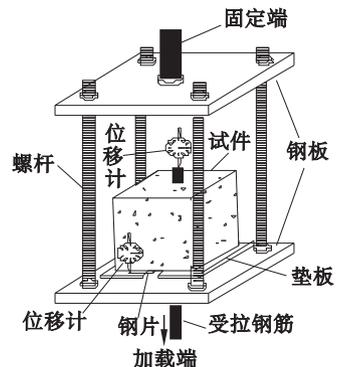


图 4 加载装置

Fig. 4 Loading device

2 试验结果

2.1 快速锈蚀试验现象

锈蚀率小于 1.05% 的试件表面无明显现象,锈蚀率大于 1.05% 时试件表面产生裂缝,锈蚀率越大裂缝的宽度也越大;锈胀裂缝形态主要有 2 种:一是裂缝基本与钢筋平行,由自由端开裂,但未贯穿整个试件;二是裂缝贯穿混凝土试块,形成一条主裂缝,裂缝周围伴有暗红色锈迹,部分试件锈胀裂缝如图 5 所示。

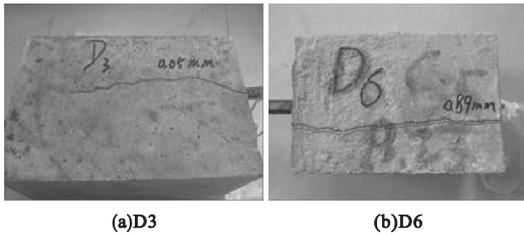


图 5 锈胀裂缝

Fig. 5 Corrosive crack

2.2 拉拔试验现象

部分试件的破裂面如图 6 所示。

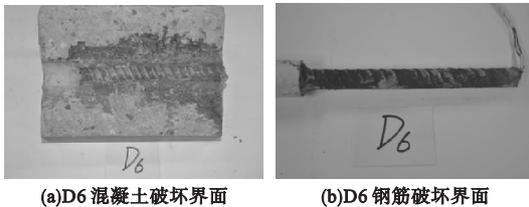


图 6 钢筋和混凝土破坏界面

Fig. 6 Steel bar and concrete with failure interface

所有试件均发生混凝土劈裂破坏,因为试件均未配置箍筋.锈蚀率大于 1.05% 的试件破坏沿着锈胀裂缝发展,随着试件发出“嘭”的劈裂破坏声,混凝土块分成 2~3 块.破坏后钢筋横肋之间有刮犁的混凝土粉末。

3 试验结果分析

3.1 不同锈蚀率的曲线

根据试验测得的荷载值、加载端及自由端的滑移值,计算出各个试件的平均粘结应力与平均滑移值。

$$\bar{\tau} = P / \pi d l_a \quad (1)$$

$$\bar{s} = \frac{1}{2}(s_l + s_f) \quad (2)$$

式中: $\bar{\tau}$ 为平均粘结应力; P 为外加荷载; l_a 为粘结长度; \bar{s} 为平均滑移值; d 为钢筋直径; S_l 为加载端位移; S_f 为自由端位移。

各试件平均粘结-滑移曲线如图 7 所示.由于所有试件均未配箍筋,加荷持续到一定值时试件发生劈裂破坏,故其平均粘结-滑移曲线下降段不明显或没有下降段.由图 7 可以看出,①随着钢筋锈蚀率的增大,试件平均粘结应力先上升后下降,锈蚀率为 1.05% 时平均粘结应力最大,除了 D2 组其他组的平均滑移值均小于 0.3 mm,说明 D2 组试件在钢筋发生滑移后,残余粘结应力仍较高,试件还可以承受一定荷载.②锈蚀率越大 $\bar{\tau}-\bar{s}$ 曲线越接近线性,说明锈蚀率越大粘结应力破坏越严重,粘结力对钢筋滑移的影响在减小。

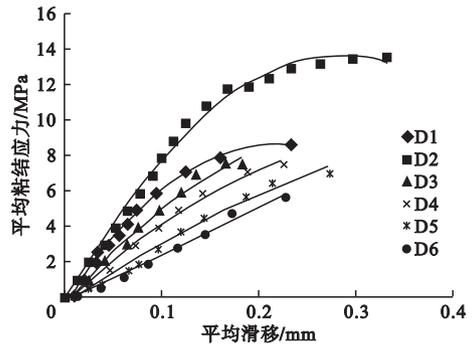


图 7 平均粘结-滑移曲线

Fig. 7 Average bond-slip curve

3.2 不同锚固位置处钢筋的应变

钢筋应变沿锚固长度分布规律如图 8 所示.所有试件的钢筋应变都是从加载端向自由端逐渐减小,最后趋近于 0,这是因为粘结应力阻碍了拉力的传递,随着钢筋测点远离加载端,钢筋的应变也越来越小.钢筋锈蚀率不同,钢筋的应变分布也不同:①D1 组钢筋在加载端附近应变变化较快,在锚固段中部时变化较慢,靠近自由端时再次加快,D2 组锚固段内钢筋应变变化基本相同,说明锈蚀率为 0.5% 时,粘结力分布较均匀,钢筋的应

变变化接近线性. ②试件的锈蚀率小于 1.05% 时, 应变曲线比较饱满, 呈现出上凸的状态, 锈蚀率大于 1.05% 的试件, 钢筋应变曲线为向下凹的状态, 锈蚀率越大, 下凹越明显,

说明钢筋锈蚀率大于 1.05% 时, 锚固段内的钢筋应变向加载端附近聚集, 此时拉应力还未传到自由端或传递较少, 自由端应变较小, 试件已经沿锈胀裂缝发展发生劈裂破坏.

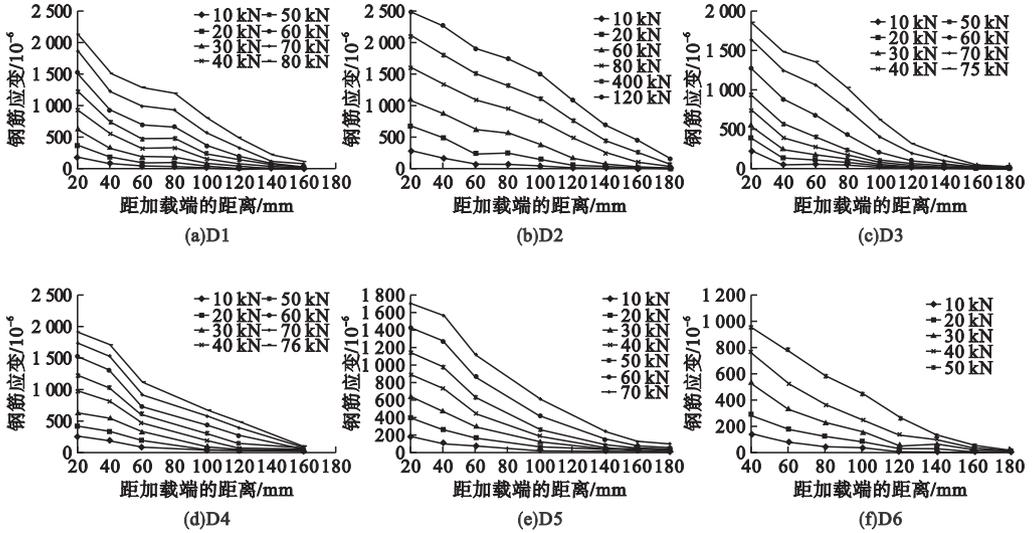


图 8 钢筋应变沿锚固长度分布规律

Fig. 8 Steel strain distribution along anchorage length

3.3 粘结应力在锚固段内的分布

钢筋不同锚固位置处粘结应力称局部粘

结应力, 计算方法按照参考文献[14], 粘结应力沿锚固长度分布规律如图 9 所示.

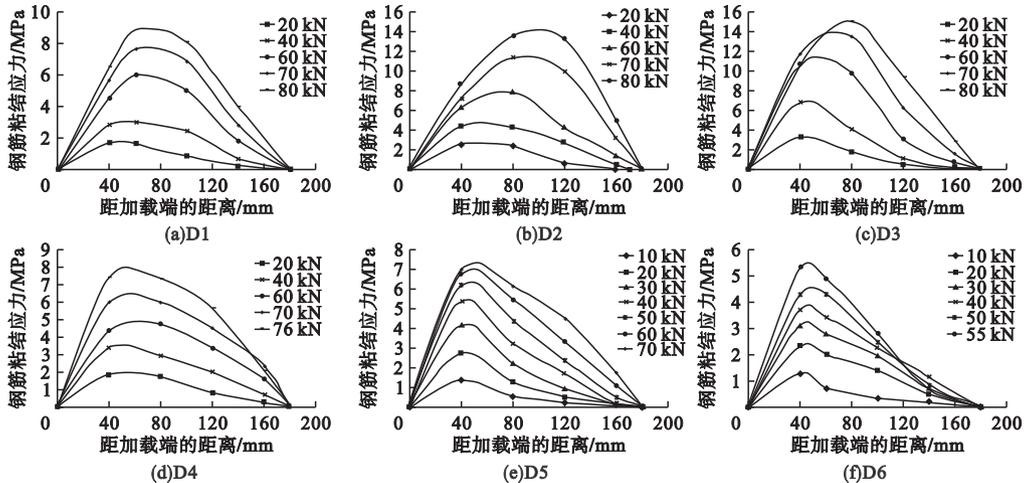


图 9 粘结应力沿锚固长度分布规律

Fig. 9 Bond stress distribution along anchorage length

锈蚀率小于 1.05% 时, 局部粘结应力的最大值在距离加载端约 80 mm 处, 在锚固段的中间位置, 整个锚固段内的应力基本呈正态分布. 锈蚀率大于 1.05% 时, 局部粘结应力的最大值在距加载端 40 mm 左右, 锈蚀率越大最大粘结应力越接近加载端. 原因是锈蚀率小

于 1.05% 时, 加载时钢筋横肋两边的混凝土一侧受拉一侧受压, 由于横向力的作用, 受拉侧的粘结应力最先破坏, 受压一侧仍有粘结应力, 加载端滑移后, 破坏由加载端向自由端传递, 破坏传递到中间位置时, 加载端附近钢筋横肋受压面的粘结也受到破坏, 此时锚固段内

的最大应力开始减小,最大应力出现在破坏区和未破坏区的过度区,即中间部位. 锈蚀率超过 1.05% 时由于试件经锈蚀试验本身锈胀裂缝较明显,当试件受到拉应力,加载端发生滑移,锈胀裂缝开始继续发展,自由端还未滑移

试件就发生劈裂破坏,表现为局部最大粘结力靠近加载端.

3.4 相对滑移量在锚固长度内分布

按照文献[14]计算各测点在锚固段内的相对滑移变化曲线(见图 10).

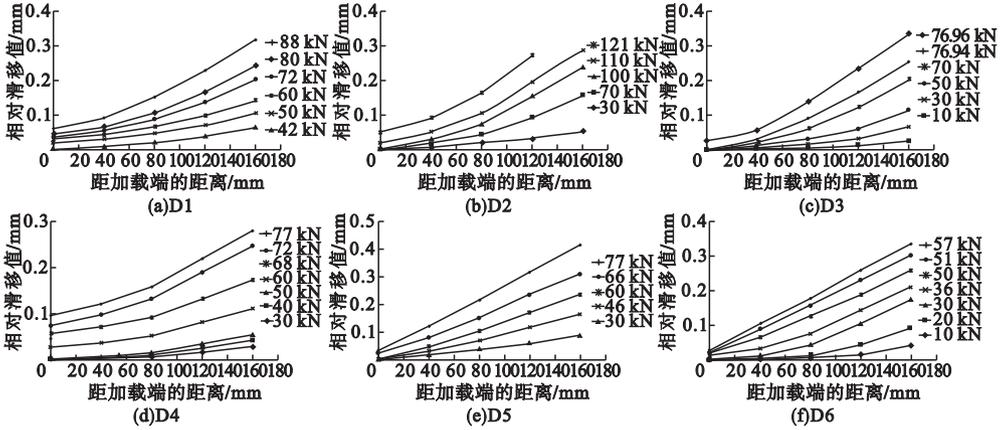


图 10 相对滑移值沿锚固长度变化规律

Fig. 10 Relative slipping variation law along anchorage length

锈蚀率小于 1.05% 时,相对滑移值增加较缓慢,说明自由端发生较小滑移时,试件还能抵抗拉应力的破坏,因为一定量的锈蚀产物增强了再生混凝土与钢筋间的粘结应力. 当锈蚀率大于 1.05% 时,相对滑移值增加较快,且锈蚀率越大增长越快,D5 和 D6 组试件相对滑移值基本成线性增加. 自由端发生滑移后试件很快达到极限荷载状态.

3.5 不同锚固位置处的粘结滑移曲线

根据测得的局部粘结应力与相对滑移分

布,可以绘制出不同锚固位置 x (距加载端的距离) 处的 τ - s 曲线(见图 11). 从图可以看出,不同锚固位置处粘结滑移曲线不是均匀分布的,在发生滑移初期,粘结强度增加较快,曲线接近线性,随后曲线变得平缓,粘结强度出现下降,相对滑移值不断增大;锈蚀率小于 1.64% 时,曲线的初始斜率整体较大,滑移发展较慢,锈蚀率大于 1.64% 时曲线的初始斜率变小,滑移发展加快,说明钢筋锈蚀率对钢筋与再生混凝土之间的相对滑移影响较大.

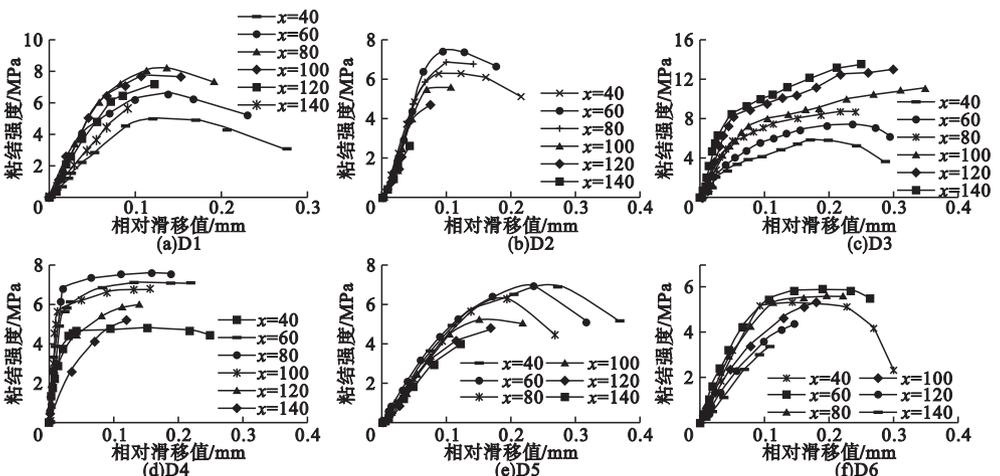


图 11 不同锚固位置处粘结滑移曲线

Fig. 11 Bond-slip curves at different anchorage positions

4 粘结 - 滑移本构关系

4.1 平均粘结应力 - 滑移本构方程

不同锚固位置处的 τ - s 曲线有所不同, 为了合理表达锚固段内各点的 τ - s 关系, 对图 7 中 $\bar{\tau}$ - \bar{s} 曲线进行线性回归分析得到平均粘结滑移关系:

$$\bar{\tau} = 6.21 + 5.85e^{-0.5a} - 12.09e^{-0.5b} - 9.68e^{-0.5(a+b)}. \quad (3)$$

式中: $\bar{\tau}$ 为平均粘结应力, MPa; \bar{s} 为平均滑移值, mm; ρ_w 为锈蚀率, $0\% \leq \rho_w \leq 3.0\%$,

$$a = \left(\frac{\rho_w \cdot 10^2 \cdot d - 8.47}{14.13} \right)^2, b = \left(\frac{\bar{s} + 0.23}{0.21} \right)^2.$$

式(3)与试验结果的相关系数在 0.998 以上, 图 12 为 $\rho = 0.5\%$ 时的拟合曲线与试验曲线对比, 吻合度较好.

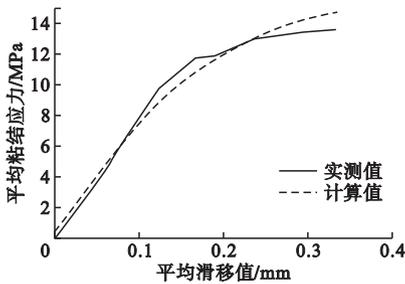


图 12 拟合曲线与试验曲线对比

Fig. 12 Comparison of formula curve and test curve

4.2 粘结滑移位置函数

引入反映钢筋锈蚀率、粘结长度位置变

表 3 D2、D5 组拟合结果

Table 3 D2、D5 group fitting results

编号	锚固长度/ mm	拟合公式相关系数							相关系数
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	
D2	140	0.000 4	-0.686 1	1.134 5	0.245 9	-0.543 4	0.213 5	-0.026 5	0.999 849
	120	0.000 0	9.868 4	-21.195 5	17.395 1	-6.542 0	1.168 3	-0.080 7	0.999 779
	100	-0.000 3	0.389 9	-0.448 9	0.358 6	0.070 4	-0.051 4	0.005 5	0.999 939
	80	0.000 1	0.199 2	-0.256 0	0.541 3	-0.163 4	0.023 3	-0.001 8	0.999 994
	60	-0.000 3	1.694 9	-2.949 4	2.654 7	-0.920 5	0.144 8	-0.008 8	0.999 994
	40	-0.000 8	1.687 8	-3.678 4	3.223 2	-1.064 5	0.155 9	-0.008 6	0.999 947
D5	140	0.030 4	-7.931 5	16.634 4	-8.489 3	1.895 8	-0.181 1	0.005 1	0.999 371
	120	0.048 3	-8.224 4	13.565 6	-5.235 5	0.660 2	0.021 0	-0.007 0	0.997 251
	100	0.041 0	-4.120 6	6.877 2	-2.298 0	0.240 5	0.009 5	-0.002 2	0.997 220
	80	0.010 0	-2.405 2	3.820 9	0.050 8	-0.700 8	0.191 8	-0.015 5	0.998 644
	60	-0.000 7	1.533 7	-1.845 9	2.258 2	-0.941 3	0.168 6	-0.011 2	0.999 752
	40	0.001 5	-3.427 6	8.029 8	-5.012 2	1.466 8	-0.200 0	0.010 0	0.999 250

化的位置函数 $\varphi(x, \rho_w)$, 表示不同锚固位置处粘结滑移关系变化规律:

$$\varphi(x, \rho_w) = \tau(s) / \bar{\tau}(\bar{s}). \quad (4)$$

求解位置函数 $\varphi(x, \rho_w)$ 时, 在相同滑移值的条件下, 用式(3)求得各粘结点 x 处的粘结应力 $\bar{\tau}(\bar{s})$. 为了准确得出相同滑移值下不同粘结位置 x (距加载端的距离) 处的粘结应力, 笔者先拟合出不同 x 值处的粘结应力 τ 与滑移值 s 的关系式, 再代入 s 计算出相应的粘结应力. 以 D2、D5 组为例说明具体作法, 利用图 11 中 D2、D5 组试件在锚固段内各点粘结 - 滑移关系曲线的的数据, D2、D5 组拟合结果如表 3 所示. 拟合出相应位置处的粘结滑移关系:

$$\tau = P_1 + P_2 \cdot s^{0.5} + P_3 \cdot s + P_4 \cdot s^{1.5} + P_5 \cdot s^2 + P_6 \cdot s^{2.5} + P_7 \cdot s^3. \quad (5)$$

式中: s 为滑移值, 10^{-2} mm; τ 为粘结应力, MPa; $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7$ 为拟合系数.

将拟合结果代入式(4), 得出不同锚固位置处的粘结滑移公式, 再把滑移值代入各式, 得到相应的粘结应力值. 粘结应力除以平均粘结应力 $\bar{\tau}$, 即得到位置函数 $\varphi(x, \rho_w)$ 的曲线 (见图 13). 局部平均粘结力 $\bar{\tau}_1$ 为

$$\bar{\tau}_1 = \frac{\sum_{i=1} \tau_1 \pi d \Delta l_i}{\pi d l_a}. \quad (6)$$

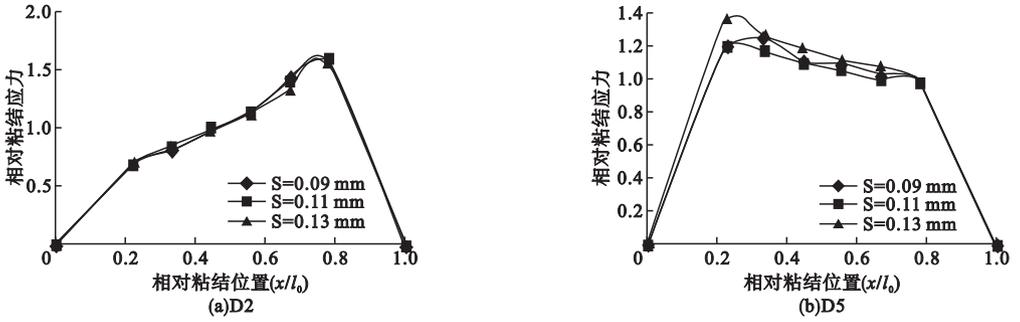


图 13 粘结锚固位置函数

Fig. 13 Bonding anchor position function

由图 13 可知位置函数曲线大致分为上升段、中间段和下降段,因此采用分段函数进行拟合。又因上升段和下降段接近直线,所以设上升段和下降段曲线的斜率分别为 k_1 和 k_2 ,最后拟合出 $\varphi(x, \rho_w)$ 曲线的表达式为

$$\varphi(x, \rho_w) = \begin{cases} k_1 \cdot \frac{x}{l_a}, & (0 \leq x \leq 0.2l_a); \\ 0.04 + 5.48 \frac{x}{l_a}, & (0.2l_a \leq x \leq 0.8l_a); \\ k_2 \cdot \left(\frac{x}{l_a} - 1\right), & (0.8l_a \leq x \leq l_a). \end{cases} \quad (7)$$

式中: $k_1 = \frac{5.33 - 0.54 \xi \cdot d^*}{1 - 0.1 \xi \cdot d^*}$; $k_2 = \frac{-9.93 + 4.7 \xi \cdot d^*}{1 - 0.68 \xi \cdot d^*}$;
 $\xi = 100 \rho_w$, ρ_w 为锈蚀率。

将位置函数 $\varphi(x, \rho_w)$ 与平均粘结应力 - 滑移基本方程 $\bar{\tau}(\bar{s})$ 结合文献[15]即得到最终反映不同锚固位置处的粘结 - 滑移本构方程 $\tau(x)$, 计算值和实测值对比如图 14 所示, 可以看出计算值与实测值吻合度较高。

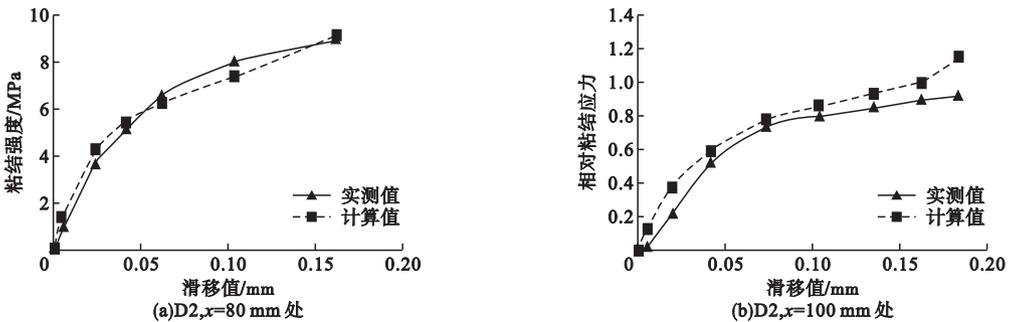


图 14 拟合结果与试验结果对比图

Fig. 14 Comparison of fitting results and test results

5 结论

(1) 快速锈蚀试验中锈蚀率小于 1.05% 的试件, 表面无明显现象, 锈蚀率大于 1.05% 的试件表面产生裂缝。所有试件中心拔出试验均发生劈裂破坏。

(2) 钢筋锈蚀率小于 0.5% 时, 锈蚀对粘结强度是有益的; 锈蚀率超过 2.24% 以后, 自由端几乎未滑移时混凝土已发生破坏。

(3) 锈蚀率小于 0.5% 时局部粘结应力的分布基本在锚固段中间位置, 当锈蚀率达到 3.39% 时局部粘结应力集中在距加载端 40 ~ 60 mm 的位置, 随锈蚀率的增大粘结应力向加载端附近聚集, 钢筋锈蚀可以改变局部粘结应力的分布。

(4) 通过位置函数 $\varphi(x, \rho_w)$ 和平均粘结滑移关系 $\bar{\tau}(\bar{s})$, 建立了考虑锈蚀率和粘结位置的粘结 - 滑移本构关系。

参考文献

- [1] MOALLEMI P S, SHAHRIA A M. Investigation of compressive bond behavior of steel rebar embedded in concrete with partial recycled aggregate replacement [J]. In structures, 2016, 7: 153 - 164.
- [2] PANDURANGAN K, DAYANITHY A, OM PRAKASH S. Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete [J]. Construction & building materials, 2016, 120: 212 - 221.
- [3] KIM S W, YUN H D, PARK W S. Bond strength prediction for deformed steel rebar embedded in recycled coarse aggregate concrete [J]. Materials & design, 2015, 83: 257 - 269.
- [4] 杨海峰, 陈卫, 张天宝, 等. 再生混凝土 - 钢筋粘结锚固可靠度设计 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2019, 50(1): 189 - 197. (YANG Haifeng, CHEN Wei, ZHANG Tianbao. Reliability of bonding between recycled concrete and steel rebar [J]. Journal of central south university (science and technology), 2019, 50(1): 189 - 197.)
- [5] 杨海峰, 吕梁胜, 邓志恒, 等. 横向配箍约束再生混凝土 - 钢筋粘结性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1): 36 - 41. (YANG Haifeng, Lü Liangsheng, DENG Zhiheng. Research on bond behavior between recycled concrete and steel rebar for confinement of transverse stirrups [J]. Journal of building materials, 2017, 20(1): 36 - 41.)
- [6] 董宏英, 孙文娟, 曹万林, 等. 钢筋 - 再生混凝土粘结滑移性能试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 82 - 90. (DONG Hongying, SUN Wenjuan, CAO Wanlin. Experimental study on bond-slip behavior between steel bars and recycled concrete [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2017, 49(12): 82 - 90.)
- [7] 董宏英, 陈学鹏, 曹万林. 栓钉与拉结筋对圆钢管混凝土粘结性能的影响 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2020, 48(6): 113 - 118. (DONG Hongying, CHEN Xuepeng, CAO Wanlin. Influence of studs and tie bars on the bond behavior of concrete-filled circular steel tubes [J]. Journal of huazhong university of science and technology (natural science edition), 2020, 48(6): 113 - 118.)
- [8] 曹芙波, 卢志明, 王晨霞, 等. 冻融循环后钢筋与再生混凝土粘结性能梁式试验有限元分析 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2019, 35(6): 1099 - 1110. (CAO Fubo, LU Zhiming, WANG Chenxia. Finite element analysis of bond behavior between steel bars and recycled concrete after freeze-thaw cycles in the beam-type test [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science) 2019, 35(6): 1099 - 1110.)
- [9] 曹芙波, 王宇, 王晨霞, 等. 锈蚀钢筋再生混凝土粘结滑移梁式试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 297 - 305. (CAO Fubo, WANG Yu, WANG Chenxia. Experimental study on bond-slip behavior of recycled concrete beam reinforced with corroded bars [J]. Construction and building materials, 2016, 37(5): 297 - 305.)
- [10] 程东辉, 宋超, 何国玉. 钢筋与钢纤维再生混凝土锚固性能研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2020, 36(3): 439 - 448. (CHENG Donghui, SONG Chao, HE Guoyu. Study on anchorage performance of rebar and steel fiber recycled concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science) 2020, 36(3): 439 - 448.)
- [11] 白国良, 尹玉光, 刘超, 等. 型钢再生混凝土粘结滑移性能试验分析 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增刊2): 135 - 142. (BAI Guoliang, YIN Yuguang, LIU Chao, et al. Experimental study on bond-slip behavior between section steel and recycled aggregate concrete insteel reinforced recycled concrete structures [J]. Journal of building structures, 2016, 37(S2): 135 - 142.)
- [12] 仲伟球, 贡金鑫. 钢筋电化学快速锈蚀试验控制方法 [J]. 建筑技术开发, 2002, 29(4): 28 - 29. (ZHONG Weiqiu, GONG Jinxin. Control method for quick electro-chemical corrosion experiment of rebars [J]. Building technique development, 2002, 29(4): 28 - 29.)
- [13] 肖建庄. 再生混凝土 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.)
- [14] 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 Chenxia, WANG Yu, LI Jinghong. Experimental analysis on bond behavior between recycled concrete and corroded steel bars [J]. Journal of civil architectural & environmental engineering, 2016, 38(1): 46 - 53.)
- [15] 赵羽习, 金伟良. 钢筋与混凝土粘结本构关系的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2002(1): 32 - 37. (ZHAO Yuxi, JIN Weiliang. Test study on bond streaa-slip relationship of concrete and steel bar [J]. Journal of building structures, 2002, 23(1): 32 - 37.)

(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)