

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.03.007

锈蚀钢筋与混凝土间粘结力和滑移量静力分析

龚亮英^{1,3}, 彭波峰^{2,3}, 赵迎新³, 刘又文³

(1. 湖南省建筑工程集团总公司 海外工程公司, 湖南 长沙 410004;
2. 长沙洞井建筑股份有限公司 工程部, 湖南 长沙 410004; 3. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 建立了锈蚀钢筋与混凝土间粘结力和滑移量静力分析模型, 利用复势函数方法和线性本构滑移模型, 获得了反平面剪切载荷作用下锈蚀钢筋混凝土界面上, 不同点的粘结力和滑移量封闭形式解析解。研究了钢筋锈蚀率、钢筋直径、混凝土保护层厚度、反平面剪切载荷、箍筋间距和箍筋直径对锈蚀钢筋与混凝土间粘结力和滑移量的影响, 为进一步研究锈蚀后钢筋混凝土结构的力学性能提供理论依据。

关键词: 钢筋混凝土; 锈蚀率; 粘结力; 滑移量; 解析解

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)03-0029-06

Static Analysis of Bond Stress and Slip between Corroded Rebar and Concrete

Gong Liangying^{1,3}, Peng Bofeng^{2,3}, Zhao Yingxin³, Liu Youwen³

(1. Overseas Engineering Company, Hunan Construction Engineering Group, Changsha 410004, China;
2. Engineering Department, Changsha Dongjing Building Stock Company Ltd, Changsha 410004, China;
3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The static model of the bond stress and slip between corroded rebar and concrete is established. By using the complex variable method and the linear constitutive mode of slip, the closed form analytic solutions are obtained under antiplane shear loads for the bond stress and the slip of different points on the interface of corroded reinforced concrete. The impacts of the corrosion rate, diameter of rebar, thickness of concrete cover, antiplane shear loads, spacing of stirrup and diameter of stirrup on the bond stress and the slip between corroded rebar and concrete are studied. It provides the theoretical basis for further research on structural mechanics of corroded concrete.

Keywords: reinforced concrete; corrosion ratio; bond stress; slip; analytical solution

0 引言

钢筋和混凝土这两种材料能够结合在一起共同工作, 除了二者具有相近的线膨胀系数外, 更主要的是混凝土硬化后, 钢筋与混凝土之间产生了良好的粘结。钢筋锈蚀后, 钢筋的握裹力因为锈蚀物使保护层开裂而受影响; 而且, 钢筋锈蚀使得钢筋和

混凝土之间增加了一个过渡层, 这也直接影响两者间的粘结力^[1-8]。所以, 研究锈蚀对钢筋与混凝土之间粘结力的影响, 对于构件的修复加固具有重要意义。文献[9-10]通过实验研究与理论分析, 提出了钢筋与混凝土的粘结界面线性本构模型。对未锈蚀钢筋混凝土粘结本构关系已有研究的基础上, 综合考

收稿日期: 2012-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11172094, 11172095)

作者简介: 龚亮英(1981-), 女, 湖北崇阳人, 湖南省建筑工程集团总公司工程师, 硕士, 主要研究方向为工程力学和施工管理, E-mail: gongliangying@tom.com

考虑锈蚀率、钢筋直径等因素,文献[11-13]通过实验和数据拟合,得到了锈蚀钢筋混凝土的极限粘结强度退化公式。本文将建立锈蚀钢筋与混凝土间粘结力和滑移量静力分析模型,利用复势函数方法研究反平面剪切载荷作用下,锈蚀钢筋混凝土界面上不同点的粘结力和滑移量的封闭形式解析解,并研究钢筋锈蚀率、钢筋直径、混凝土保护层厚度、反平面剪切载荷、箍筋间距和箍筋直径对锈蚀钢筋与混凝土间粘结力和滑移量的影响。希望能为进一步研究锈蚀后钢筋混凝土结构的力学性能打下基础。

1 问题描述和求解

锈蚀钢筋混凝土单元如图1所示, I 区为锈后钢筋, II 区为锈蚀层, III 区为混凝土。锈蚀钢筋混凝土单元上,作用反平面剪切载荷为 τ_{xz}^0 和 τ_{yz}^0 。根据文献[14],锈蚀后钢筋净半径 $R_1 = \sqrt{1-\rho}d/2$,钢筋外锈层半径 $R_2 = \sqrt{(n-1)\rho+1}d/2$,其中 d 为钢筋未锈蚀时直径; ρ 为钢筋锈蚀率,按钢筋截面质量损失计算; n 为钢筋锈蚀后体积膨胀率,通常为2~4。原问题简化为一个反平面三相剪切问题。

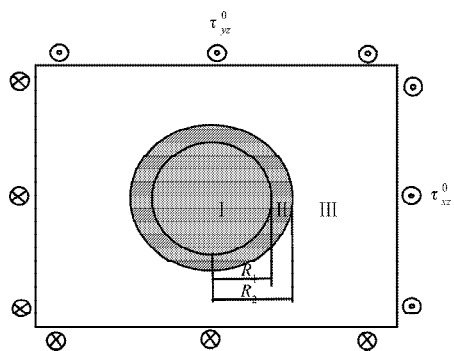


图1 反平面剪切载荷作用下锈蚀钢筋混凝土单元

Fig. 1 The unit of corroded reinforced concrete subjected to antiplane shear loads

根据复变函数理论和文献[15]知,反平面位移、剪切应力和面力主矢可用关于 $z=x+iy$ 的复势函数 $f(z)$ 表示如下:

$$w = \text{Re}[f(z)], \tag{1}$$

$$\tau_{rz} - i\tau_{\theta z} = e^{i\theta} E f'(z), \tag{2}$$

$$T = \int_A^B (\tau_{zx} dy - \tau_{zy} dx) = E \text{Im}[f(z)]_A^B. \tag{3}$$

式中: w 是反平面位移;

τ_{rz} 和 $\tau_{\theta z}$ 是极坐标系中的应力分量;

T 是弧 AB 上的面力矢量;

τ_{zx} 和 τ_{zy} 是直角坐标系中的应力分量;

E 是材料的剪切模量。

定义 I, II 和 III 区的应力函数分别为:

$$f_1(z) = f_{10}(z) = o(z), |z| < R_1; \tag{4}$$

$$f_2(z) = f_{20}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^{-k-1} + \sum_{k=0}^{\infty} b_k z^{k+1}, R_1 < |z| < R_2; \tag{5}$$

$$f_3(z) = \Gamma z + f_{30}(z), |z| > R_2. \tag{6}$$

式中: $f_{10}(z), f_{20}(z), f_{30}(z)$ 分别是3个区域内的全纯函数;

$o(z)$ 是 z 的高阶无穷小量;

a_k 和 b_k 是环形区域中全纯函数 $f_{20}(z)$ 的罗朗级数展开系数;

$\Gamma = (\tau_{xz}^0 - i\tau_{yz}^0)/E_3$, τ_{xz}^0 和 τ_{yz}^0 是锈蚀钢筋混凝土单元上作用的反平面剪切载荷;

$$f_{30}(z) = o(1/z);$$

E_3 为混凝土弹性模量。

锈后钢筋与锈蚀层界面连接处的应力和位移边界条件可表示为:

$$\begin{cases} T_2(t) - T_1(t) = 0, \\ w_2(t) - w_1(t) = 0, \\ |t| = R_1. \end{cases} \tag{7}$$

式中 $T_1(t), T_2(t)$ 和 $w_1(t), w_2(t)$ 分别表示从 I, II 区趋近锈后钢筋与锈蚀层界面连接处的应力和位移。

钢筋与混凝土的粘结-滑移本构关系,是钢筋混凝土结构有限元分析中的基本条件之一,也是研究钢筋混凝土界面粘结性能的必要条件,所以粘结本构关系的可靠性,直接影响分析结果的正确性。本文采用徐有邻等人[9]提出的钢筋与混凝土的粘结界面线性本构模型,模拟锈蚀层与混凝土间粘结力与滑移量之间的关系。

$$\begin{cases} \tau_{rz2}(t) = m[w_3(t) - w_2(t)], \\ |t| = R_2. \end{cases} \tag{8}$$

式中: $\tau_{rz2}(t)$ 为锈蚀层与混凝土间粘结力;

$$m = 2\tau_m / [s_m(1+\alpha)], \text{ 其中,}$$

$\tau_m = [1.6 + 0.7c/d + 20A_{sv}/(cS_{sv})]f_t$ 为峰值粘结应力, c 为混凝土保护层厚度, d 为钢筋直径, A_{sv} 为箍筋横截面积, S_{sv} 为箍筋间距, f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值, $s_m = 0.0368d$ 为峰值粘结应力对应的滑移量, α 为指数,一般 $0 \leq \alpha \leq 1$,通常取0.4。

综合考虑锈蚀率、钢筋直径等因素的影响,锈蚀钢筋混凝土的峰值粘结应力[11]退化为

$$\tau_{m0} = \eta \tau_m, \tag{9}$$

式中 $\eta = 1.0 - (10.544 - 1.586c/d)\rho$ 为粘结强度的钢筋

锈蚀影响因素。

锈蚀层与混凝土界面连接处的应力边界条件可表示为

$$T_3(t) - T_2(t) = 0, |t| = R_2 \circ \quad (10)$$

为便于分析, 在相应的区域内引入如下新的解析函数:

$$f_{1*}(z) = \bar{f}_1(R_1^2/z) = o(1/z), \quad (11)$$

$$f_{2*}(z) = \bar{f}_2(R_1^2/z) = \bar{G}_N(R_1^2/z) + \bar{G}_P(R_1^2/z), \quad (12)$$

$$f_{2**}(z) = \bar{f}_2(R_2^2/z) = \bar{G}_N(R_2^2/z) + \bar{G}_P(R_2^2/z), \quad (13)$$

$$f_{3*}(z) = \bar{f}_3(R_2^2/z) = \bar{\Gamma}R_2^2/z + f_{30*}(z), \quad (14)$$

式中: $G_N(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^{-k-1}$, $G_P(z) = \sum_{k=0}^{\infty} b_k z^{k+1}$ 。

根据式(1), (3)~(5), (11)~(12), 式(7)可表示为:

$$\left[\begin{array}{l} [E_1 f_1(t) + E_2 f_{2*}(t)]^+ \\ |t| = R_1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} [E_2 f_2(t) + E_1 f_{1*}(t)]^- \\ |t| = R_1 \end{array} \right], \quad (15)$$

$$\left[\begin{array}{l} [f_1(t) - f_{2*}(t)]^+ \\ |t| = R_1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} [f_2(t) - f_{1*}(t)]^- \\ |t| = R_1 \end{array} \right], \quad (16)$$

考虑式(4), (5), (11), (12), (15)和(16), 由广义刘维尔定理^[16]得:

$$g_1(z) = \begin{cases} E_1 f_1(z) + E_2 f_{2*}(z), \\ E_2 f_2(z) + E_1 f_{1*}(z); \end{cases} \quad (17)$$

$$g_2(z) = \begin{cases} f_1(z) - f_{2*}(z), \\ f_2(z) - f_{1*}(z). \end{cases} \quad (18)$$

式中: $g_1(z) = E_2 G_P(z) + E_2 \bar{G}_P(R_1^2/z)$;

$$g_2(z) = G_P(z) - \bar{G}_P(R_1^2/z) \circ$$

由式(17)和(18)可得

$$f_2(z) = G_P(z) + \frac{E_2 - E_1}{E_2 + E_1} \bar{G}_P(R_1^2/z). \quad (19)$$

根据式(1), (3), (5), (6), (13)和(14), 式(8)和式(10)可表示为:

$$\left[\begin{array}{l} [E_2 f_2(t) + E_3 f_{3*}(t)]^+ \\ |t| = R_2 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} [E_3 f_3(t) + E_2 f_{2**}(t)]^- \\ |t| = R_2 \end{array} \right], \quad (20)$$

$$\left[\begin{array}{l} [f_2(t) - f_{3*}(t) + E_2/(mR_2)tf_2'(t)]^+ \\ [f_3(t) - f_{2**}(t) + E_2/(mR_2)tf_2'(t)]^- \end{array} \right] \circ \quad (21)$$

考虑式(5), (6), (13), (14), (20)和(21), 由广义刘维尔定理得

$$g_3(z) = \begin{cases} E_2 f_2(z) + E_3 f_{3*}(z), \\ E_3 f_3(z) + E_2 f_{2**}(z); \end{cases} \quad (22)$$

$$g_4(z) = \begin{cases} f_2(z) - f_{3*}(z) + \frac{E_2}{mR_2} tf_2'(z), \\ f_3(z) - f_{2**}(z) + \frac{E_2}{mR_2} tf_2'(z); \end{cases} \quad (23)$$

式中:

$$g_3(z) = E_2 G_N(z) + E_2 \bar{G}_N(R_2^2/z) + E_3 \Gamma z + E_3 \bar{\Gamma} R_2^2/z;$$

$$g_4(z) = G_N(z) - \bar{G}_N(R_2^2/z) + E_2/(mR_2)zG_N'(z) +$$

$$E_2/(mR_2)z[\bar{G}_N(R_2^2/z)] + \Gamma z - \bar{\Gamma} R_2^2/z \circ$$

由式(22)和(23)可得

$$\begin{aligned} f_2(z) = & G_N(z) + (E_2 - E_3)/(E_2 + E_3) \bar{G}_N(R_2^2/z) - \\ & \frac{E_2 E_3}{(E_2 + E_3) m R_2} z G_P'(z) + \\ & \frac{E_2 E_3}{[(E_2 + E_3) m R_2] z} [\bar{G}_N(R_2^2/z)] + \\ & 2 E_3 \Gamma / (E_2 + E_3) z. \end{aligned} \quad (24)$$

为了同时满足锈后钢筋与锈蚀层界面和锈蚀层与混凝土界面上的边界条件, 锈蚀层中的解析函数 $f_2(z)$ 应该具有相同的形式, 由此可以确定未知系数 a_k 和 b_k :

$$\begin{aligned} a_0 = & \frac{2 E_3 \bar{\Gamma}}{(E_2 + E_3)} \left/ \left[\left[1 + \frac{E_2 E_3}{(E_2 + E_3) m R_2} \right] \frac{E_2 + E_1}{E_2 - E_1} R_1^{-2} - \right. \right. \\ & \left. \left. \left[\frac{E_2 - E_3}{E_2 + E_3} + \frac{E_2 E_3}{(E_2 + E_3) m R_2} \right] R_2^{-2} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} b_0 = & \frac{2 E_3 \Gamma}{E_2 + E_3} \left/ \left[1 + \frac{E_2 E_3}{(E_2 + E_3) m R_2} - \right. \right. \\ & \left. \left. \left[\frac{E_2 - E_3}{E_2 + E_3} + \frac{E_2 E_3}{(E_2 + E_3) m R_2} \right] \frac{E_2 - E_1}{E_2 + E_1} R_1^2 R_2^{-2} \right] \right\}; \end{aligned} \quad (26)$$

$$a_k = b_k = 0 (k \geq 1) \circ \quad (27)$$

将式(25)~(27)代入式(5)得

$$f_2(z) = a_0 z^{-1} + b_0 z \circ \quad (28)$$

锈蚀钢筋的滑移应力和滑移量的弹性解析解可表示为

$$\tau_0 = E_2 \left[e^{i\theta} (-a_0 R_2^{-2} + b_0) + e^{-i\theta} (-\bar{a}_0 R_2^{-2} + \bar{b}_0) \right] / 2, \quad (29)$$

$$s_0 = \tau_0 / m \circ \quad (30)$$

2 算例分析与讨论

设锈蚀钢筋混凝土构件截面为 $b \times h = 250 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, 混凝土强度为 C40, 混凝土轴心抗拉强度 $f_t = 1.71 \text{ MPa}$, 弹性模量为 $E_3 = 32.5 \text{ GPa}$; 钢筋型号为 HRB335, 钢筋抗拉强度 $f_y = 300 \text{ MPa}$, 弹性模量为

$E_1=200$ GPa。铁锈是一种复杂的复合物，其性能既不符合弹性也不符合弹塑性或塑性，不同条件下生成的铁锈会有不同组成成份，其性能也会不同。本文参照文献[17]取值如下：铁锈名义泊松比 $\nu_2=0.49$ ，名义弹性模量 $E_2 = 6\ 000(1-2\nu_2)(\text{N}/\text{mm}^2)$ 。将以上数据结合公式(29)和(30)，研究粘结力及滑移量随界面上不同点角度变化的数值曲线规律。

当混凝土保护层厚度为 $c=25$ mm，锈蚀前钢筋直径为 $d=8$ mm，反平面剪切载荷为 $F_1=F_2=2 \times 10^7$ N，采用双肢箍筋 $\Phi 8@100$ mm时，不同的钢筋锈蚀率 ρ ，对锈蚀钢筋混凝土界面上不同点 θ 的粘结力 τ_0 及滑移量 s_0 的影响曲线，如图2和3所示。由图可知，当钢筋锈蚀率越小时，锈蚀钢筋与混凝土间粘结力及滑移量都越大；钢筋锈蚀率越大则反之。

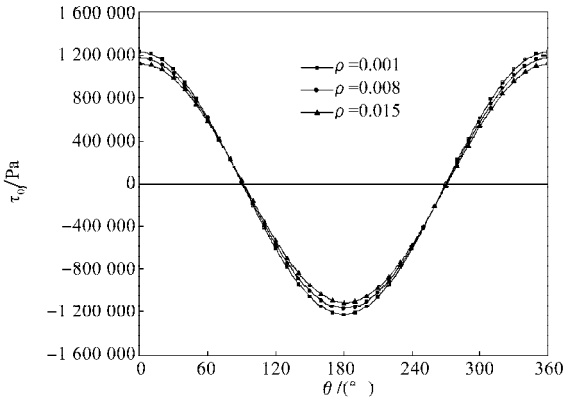


图2 不同 ρ 对不同点 θ 的粘结力 τ_0 的影响曲线
Fig. 2 The influence curves of bond stress τ_0 between corroded rebar and concrete with different position θ

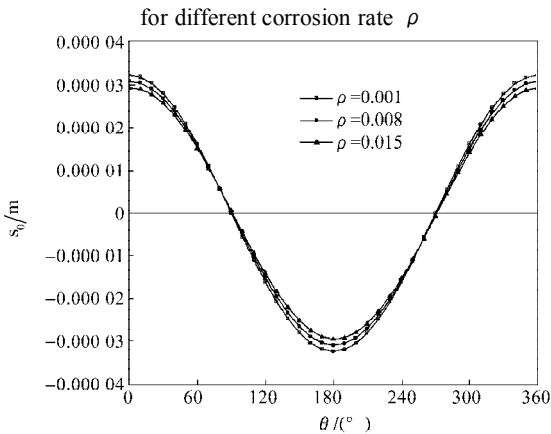


图3 不同 ρ 对不同点 θ 的滑移量 s_0 的影响曲线
Fig. 3 The influence curves of slip s_0 between corroded rebar and concrete with different position θ for different corrosion rate ρ

当混凝土保护层厚度为 $c=25$ mm，反平面剪切载荷为 $F_1=F_2=2 \times 10^7$ N，钢筋锈蚀率为 $\rho=0.01$ ，采用双肢箍筋 $\Phi 8@100$ mm时，锈蚀前不同直径 d 的钢筋，对锈蚀钢筋混凝土界面上不同点 θ 的粘结力 τ_0 及滑移量 s_0 的影响曲线，如图4和5所示。由图可知，当

选用的钢筋直径越小时，锈蚀钢筋与混凝土间粘结力越大而滑移量越小；钢筋直径越大则反之。

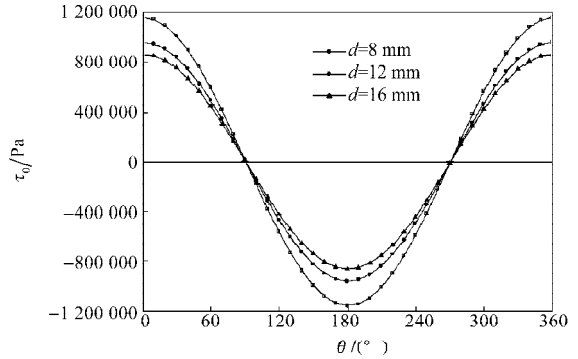


图4 不同 d 对不同点 θ 的粘结力 τ_0 的影响曲线
Fig. 4 The influence curves of bond stress τ_0 between corroded rebar and concrete with different position θ for different diameters of rebar d

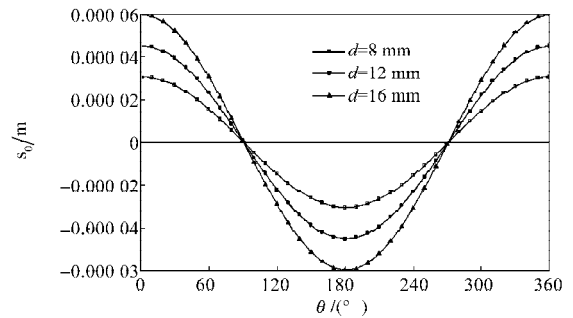


图5 不同 d 对不同点 θ 的滑移量 s_0 的影响曲线
Fig. 5 The influence curves of slip s_0 between corroded rebar and concrete with different position θ for different diameters of rebar d

当锈蚀前钢筋直径为 $d=8$ mm，反平面剪切载荷为 $F_1=F_2=2 \times 10^7$ N，钢筋锈蚀率为 $\rho=0.01$ ，采用双肢箍筋 $\Phi 8@100$ mm时，不同混凝土保护层厚度 c ，对锈蚀钢筋混凝土界面上不同点 θ 的粘结力 τ_0 及滑移量 s_0 的影响曲线，如图6和7所示。由图可知，混凝土保护层越厚时，锈蚀钢筋与混凝土间粘结力越大，混凝土保护层越薄则反之，而钢筋滑移量没有明显变化。

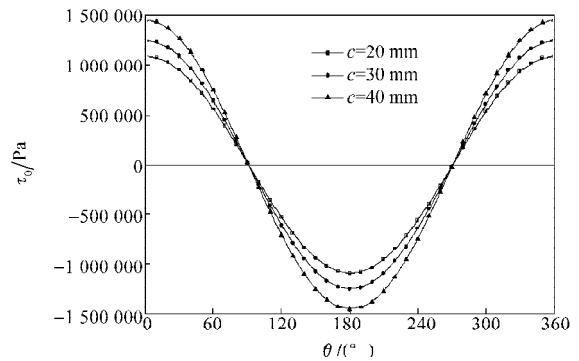


图6 不同 c 对不同点 θ 的粘结力 τ_0 的影响曲线
Fig. 6 The influence curves of bond stress τ_0 between corroded rebar and concrete with different position θ for different thickness of concrete cover c

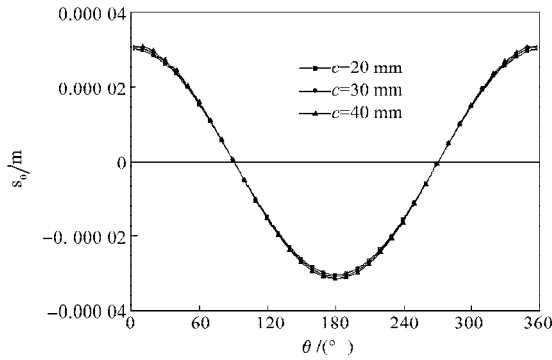


图7 不同 c 对不同点 θ 的滑移量 s_0 的影响曲线

Fig. 7 The influence curves of slip s_0 between corroded rebar and concrete with different position θ for different thickness of concrete cover c

当混凝土保护层厚度为 $c=25$ mm, 锈蚀前钢筋直径为 $d=8$ mm, 钢筋锈蚀率为 $\rho=0.01$, 采用双肢箍筋 $\Phi 8@100$ mm 时, 不同反平面剪切载荷 F_1 和 F_2 , 对锈蚀钢筋混凝土界面上不同点 θ 的粘结力 τ_0 及滑移量 s_0 的影响曲线, 如图8和9所示。由图可知, 反平面剪切载荷越大时, 锈蚀钢筋与混凝土间粘结力及滑移量都越大; 反平面剪切载荷越小则反之。

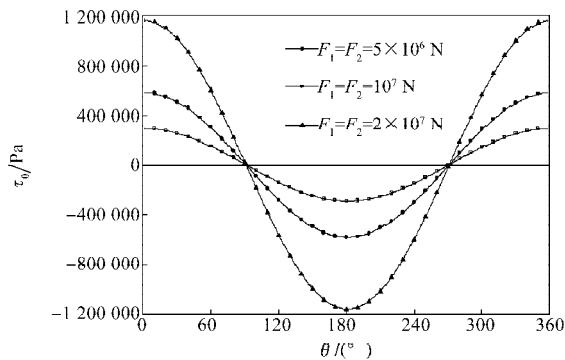


图8 不同 F_1 和 F_2 对不同点 θ 的粘结力 τ_0 的影响曲线

Fig. 8 The influence curves of bond stress τ_0 between corroded rebar and concrete with different position θ for different antiplane shear loads F_1 and F_2

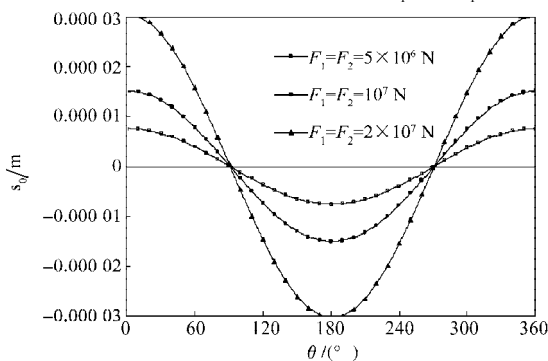


图9 不同 F_1 和 F_2 对不同点 θ 的滑移量 s_0 的影响曲线

Fig. 9 The influence curves of slip s_0 between corroded rebar and concrete with different position θ for different antiplane shear loads F_1 and F_2

当混凝土保护层厚度为 $c=25$ mm, 锈蚀前钢筋直径为 $d=8$ mm, 反平面剪切载荷为 $F_1=F_2=2 \times 10^7$ N, 钢筋锈蚀率为 $\rho=0.01$, 采用双肢箍筋 $\Phi 8@S_{sv}$ mm 时, 不同箍筋间距 S_{sv} 对锈蚀钢筋混凝土界面上不同点 θ 的粘结力 τ_0 及滑移量 s_0 的影响曲线, 如图10和11所示。由图可知, 当箍筋间距越小时, 锈蚀钢筋与混凝土间粘结力越大; 当箍筋间距越大时, 锈蚀钢筋与混凝土间粘结力越小。而箍筋间距的大小对钢筋滑移量的影响很小。

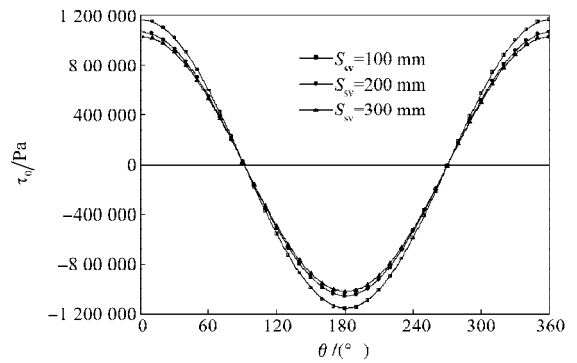


图10 不同 S_{sv} 对不同点 θ 的粘结力 τ_0 的影响曲线

Fig. 10 The influence curves of bond stress τ_0 between corroded rebar and concrete with different position θ for different spacing of stirrup S_{sv}

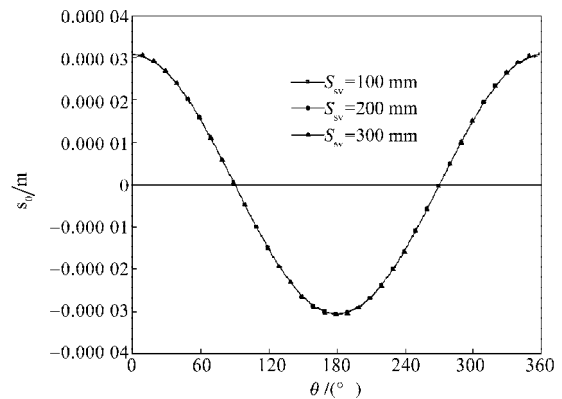


图11 不同 S_{sv} 对锈不同点 θ 的滑移量 s_0 的影响曲线

Fig. 11 The influence curves of slip s_0 between corroded rebar and concrete with different position θ for different spacing of stirrup S_{sv}

当混凝土保护层厚度为 $c=25$ mm, 锈蚀前钢筋直径为 $d=8$ mm, 反平面剪切载荷为 $F_1=F_2=2 \times 10^7$ N, 钢筋锈蚀率为 $\rho=0.01$, 采用双肢箍筋 $\Phi 8@100$ mm 时, 不同箍筋直径 D_0 对锈蚀钢筋混凝土界面上不同点 θ 的粘结力 τ_0 及滑移量 s_0 的影响曲线, 如图12和13所示。由图可知, 当箍筋直径越大时, 锈蚀钢筋与混凝土间粘结力越大; 当箍筋直径越小时, 锈蚀钢筋与混凝土间粘结力越小。而箍筋直径的大小对钢筋滑移量没有明显影响。

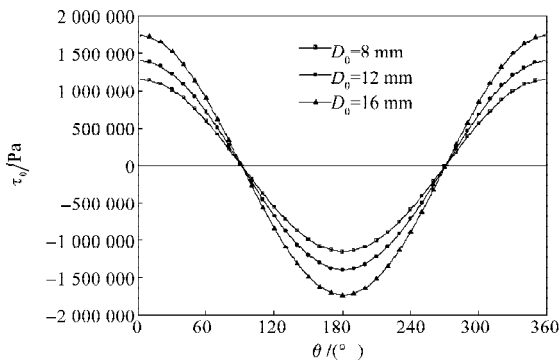


图 12 不同 D_0 对不同点 θ 的粘结力 τ_0 的影响曲线
Fig. 12 The influence curves of bond stress τ_0 between corroded rebar and concrete with different position θ for different diameters of stirrup D_0

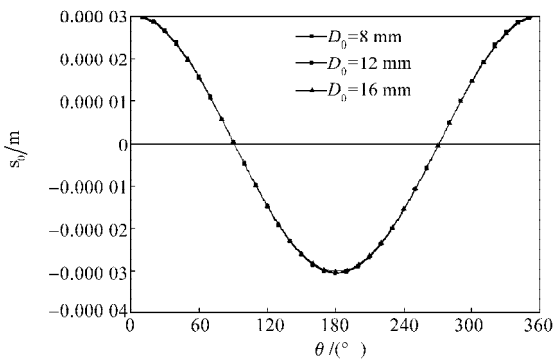


图 13 不同 D_0 对不同点 θ 的滑移量 s_0 的影响曲线
Fig. 13 The influence curves of slip s_0 between corroded rebar and concrete with different position θ for different diameters of stirrup D_0

3 结论

建立了锈蚀钢筋与混凝土间粘结力和滑移量静力分析模型,利用复势函数方法获得了反平面剪切载荷作用下锈蚀钢筋混凝土界面上不同点的粘结力和滑移量封闭形式解析解,并研究了钢筋锈蚀率、钢筋直径、混凝土保护层厚度、反平面剪切载荷、箍筋间距和箍筋直径等对锈蚀钢筋与混凝土间粘结力和滑移量的影响。分析表明,当钢筋锈蚀率越小时,锈蚀钢筋与混凝土间粘结力及滑移量都越大。当选用的钢筋直径越小时,锈蚀钢筋与混凝土间粘结力越大而滑移量越小。混凝土保护层越厚时,锈蚀钢筋与混凝土间粘结力越大,而钢筋滑移量没有明显变化。反平面剪切载荷越大时,锈蚀钢筋与混凝土间粘结力及滑移量都越大。箍筋间距越小时,锈蚀钢筋与混凝土间粘结力越大,而箍筋间距对锈蚀钢筋滑移量的影响很小。箍筋直径越大时,锈蚀钢筋与混凝土间粘结力越大,而箍筋直径对锈蚀钢筋滑移量没有明显影响。

参考文献:

- [1] Amleh L, Mirza S. Corrosion Influence on Bond between Steel and Concrete[J]. Structural Journal, 1999, 96(3): 415-423.
- [2] 张国学, 宋建夏, 刘晓航. 钢筋锈蚀对钢筋混凝土构件粘结力的影响[J]. 工业建筑, 2000, 30(2): 37-39.
Zhang Gouxue, Song Jianxia, Liu Xiaohang. Effect of Bars Corrosion on Bond in Reinforced Concrete Structures[J]. Industrial Construction, 2000, 30(2): 37-39.
- [3] Williamson S J, Clark L A. Effect of Erosion and Load on Reinforcement Bond Strength[J]. Structural Engineering International, 2002, 12(2): 117-122.
- [4] 蒋德稳, 袁迎曙, 陈广超. 混凝土中钢筋锈蚀层力学性能的初探[J]. 混凝土, 2005(7): 33-35.
Jiang Dewen, Yuan Yingshu, Chen Guangchao. Mechanics Performance of Rebar Corrosive Layer in Concrete[J]. Concrete, 2005(7): 33-35.
- [5] Shannag M J, Al-Ateek S A. Flexural Behavior of Strengthened Concrete Beams with Corroding Reinforcement [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(9): 834-840.
- [6] 卫军, 徐港, 王青. 锈蚀钢筋与混凝土粘结应力模型研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 112-116.
Wei Jun, Xu Gang, Wang Qing. Bond Strength Modeling for Corroded Reinforcing Bar in Concrete[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 112-116.
- [7] 王磊, 马亚飞, 张建仁, 等. 锈蚀钢筋粘结性能对比试验研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(6): 91-96.
Wang Lei, Ma Yafei, Zhang Jianren, et al. Contrast Experimental Study on Bond Property of Corroded Reinforcement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(6): 91-96.
- [8] Bastidas-Arteaga E, Schoefs F. Stochastic Improvement of Inspection and Maintenance of Corroding Reinforced Concrete Structures Placed in Unsaturated Environments [J]. Engineering Structures, 2012, 41: 50-62.
- [9] 徐有邻, 沈文都, 汪洪. 钢筋砼粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(3): 26-36.
Xu Youlin, Shen Wendu, Wang Hong. An Experimental Study of Bond-Anchorage Properties of Bars in Concrete [J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(3): 26-36.
- [10] 蒋德稳, 邱洪兴. 拔出型试验钢筋与混凝土间滑移量的简化解法[J]. 东南大学学报, 2009, 39(4): 830-834.
Jiang Dewen, Qiu Hongxing. Simplified Solution of the Slip between Rebar and Concrete Based on Pull-Out Test[J]. Journal of Southeast University, 2009, 39(4): 830-834.
- [11] 袁迎曙, 余索, 贾福萍. 锈蚀钢筋混凝土的粘结性能退化的试验研究[J]. 工业建筑, 1999, 29(11): 47-50.
Yuan Yingshu, Yu Suo, Jia Fuping. Deterioration of Bond

(下转第 75 页)