

混凝土构件锈蚀胀裂时的钢筋锈蚀率

赵羽习, 金伟良

(浙江大学 结构工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 本文建立了由于钢筋锈蚀导致的混凝土保护层胀裂时的钢筋混凝土构件的力学模型, 应用弹性力学理论得到了混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率的解析表达式, 并讨论了与混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率相关的各个影响因素, 得到以下结论: 随着混凝土保护层厚度和混凝土等级的增加, 混凝土胀裂时的钢筋锈蚀率会增大; 混凝土内钢筋直径的减小, 也会导致混凝土胀裂时钢筋锈蚀率的增加; 不同的钢筋锈蚀产物, 有着不同的铁锈膨胀率, 随着铁锈膨胀率的减小, 混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率增大; 而铁锈的名义弹性模量和名义泊松比对混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率影响很小。

关键词: 钢筋锈蚀; 胀裂力; 锈蚀率; 耐久性

中图分类号: TU375 **文献标识码:** A

埋在混凝土中的钢筋发生锈蚀以后, 其产生的铁锈的体积是相应钢筋体积的2~4倍^[1], 因而会向四周膨胀, 而钢筋四周的混凝土会限制它的膨胀, 产生了交界面上的压力, 这种压力就称为钢筋锈胀力。随钢筋锈蚀率的增加, 钢筋锈胀力将导致混凝土保护层受拉而开裂, 钢筋混凝土构件一旦受钢筋锈胀力而出现混凝土纵向开裂以后, 混凝土对钢筋的保护大大减弱, 二氧化碳等有害介质可以直接接触到钢筋, 钢筋锈蚀速度加快^[1], 这对钢筋混凝土构件的耐久性是十分不利的, 因而, 出现纵向开裂是钢筋混凝土构件耐久性极限状态的标志之一。作者曾对混凝土保护层胀裂时的钢筋锈胀力进行研究, 得到了一些有用的结论^[2]。但是钢筋锈胀力难以应用于实际工程, 而混凝土保护层开裂时的钢筋锈蚀率, 则是为工程界所熟悉的参数。对于混凝土保护层开裂时的钢筋锈蚀率的确定, 国内外已有不少研究成果^[3~9]。以往的研究成果在得出混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀量的计算表达式时, 往往依赖于该研究的试验数据或有限元分析结果, 使得表达式有一定的局限性。本文根据力学理论知识, 建立了混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率的分析模型, 推导出了混凝土保护层胀裂时钢筋锈蚀率的解析表达式, 可计算该时的钢筋锈蚀率, 本文还讨论了影响混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率的各项因素。

1 理论分析

1.1 力学基本知识 根据力学知识^[10]可知, 环状受力的轴对称物体的应力和位移为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{A}{r^2} + 2C; \sigma_\theta = -\frac{A}{r^2} + 2C; \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0 \\ u_r = \frac{1}{E} \left[-(1+\nu) \frac{A}{r} + 2C(1-\nu u)r \right]; u_\theta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2003-07-09

基金项目: 浙江省科技计划项目(2003C23024)

作者简介: 赵羽习(1973-), 女, 浙江杭州人, 博士, 副研究员, 主要从事混凝土结构耐久性的研究。

式中： r_r 、 r_θ 、 r_τ 分别为受力物体径向、环向和剪切应力； ν 为材料的泊松比； u_r 、 u_θ 分别为径向和环向位移；A、C 为系数，对于如图 1 所示的圆环受力情况， $A=a^2b^2(q_b-q_a)/(b^2-a^2)$ ； $2C=(q_aa^2-q_bb^2)/(b^2-a^2)$ 。

1.2 钢筋锈胀力作用下的受力模型 以混凝土和钢筋铁锈作为研究对象，对混凝土保护层层裂时的钢筋锈胀力进行研究。对于保护层厚度为 c 的混凝土和直径为 d 的钢筋，在钢筋锈胀力作用下可进行如图 2 分解：(1) 外围混凝土，其受钢筋锈胀力作用变形为 δ_1 ；(2) 内部钢筋，其锈蚀自由膨胀后名义直径变为 d_1 ，而钢筋净直径为 d_p ，钢筋锈蚀后自由膨胀的 d_1 受钢筋锈胀力作用变形为 δ_2 。显然，各变量符合变形协调关系为

$$R + \delta_1 = R_1 - \delta_2 \quad (2)$$

式中： $R=d/2$ ； $R_1=d_1/2$ 。

经分析可知，锈蚀后钢筋净直径 d_p 和名义直径 d_1 分别为^[11]

$$d_p = \sqrt{1-\rho}d ; d_1 = \sqrt{(n-1)\rho+1}d \quad (3)$$

式中： n 为钢筋锈蚀后体积膨胀率，通常为 2~4； ρ 为钢筋锈蚀率，按钢筋截面重量损失率计算。

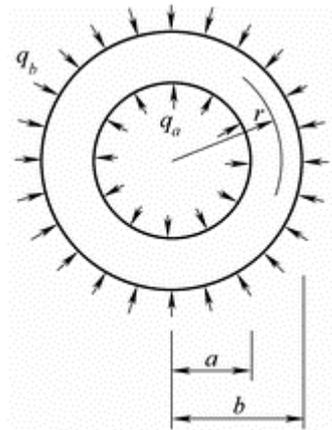


图 1 环状受力物体

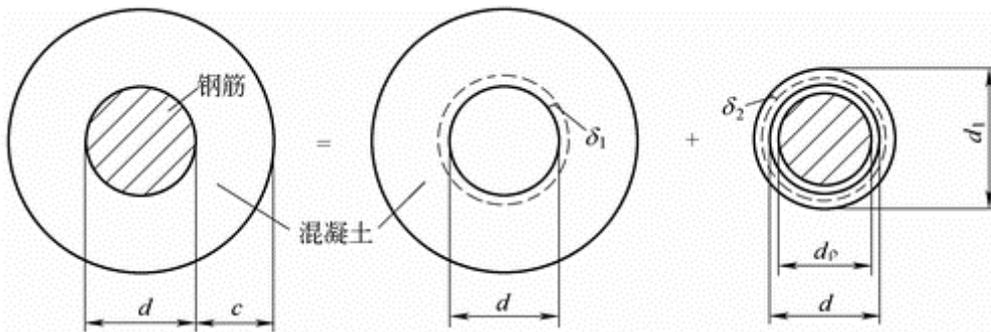


图 2 钢筋混凝土构件受钢筋锈胀力变形

1.3 外围混凝土的受力情况 外围混凝土的受力情况相当于如图 1 所示的环状受力轴对称物体，可应用弹性力学理论进行分析研究。在钢筋锈胀力的作用下，混凝土会产生径向变形，使得与铁锈交界面处的混凝土产生径向位移 δ_1 。相应于外围混凝土的受力情况，其已知条件为：当 $a=R$ 时， $q_a=q$ ；当 $b=R+c$ 时， $q_b=0$ 。将相应的已知条件代入到环状受力的轴对称物体的应力和位移表达式(1)，可以得到混凝土在钢筋锈胀力 q 作用下与铁锈交界面处的径向位移

$$\delta_1 = u_{r1} = \frac{q}{E_c} \left[(1+\nu_c) \frac{R(R+c^2)}{2Rc+c^2} + (1+\nu_c) \frac{R^3}{2Rc+c^2} \right] \quad (4)$$

式中： E_c 和 ν_c 分别为混凝土的弹性模量 (N/mm^2) 和泊松比； q 为钢筋锈蚀而产生的钢筋锈胀力 (N/mm^2)； R 为钢筋半径 (mm)； c 为混凝土保护层厚度 (mm)。

1.4 铁锈的受力情况 锈蚀后的钢筋，铁锈自由膨胀的受力情况也相当于环状受力的轴对称物体，如图 2 所示。在钢筋锈胀力的作用下，铁锈会产生径向变形，使得与混凝土交界面处的铁锈产生径向位移为 δ_2 。对应于铁锈的受力情况，其已知条件为：当 $r=R$ 时， $r_r=-q$ ，当 $r=R$ 时， $u_r=0$ 。将相应的已知条件代入到环

状受力的轴对称物体的应力和位移表达式(1)，可以得到铁锈在钢筋锈胀力 q 作用下与混凝土交界面处的径向位移

$$\delta_2 = u_{r2} = \frac{q(1-\nu_r^2)R_1}{E_r} \frac{R_\rho^2 - R_1^2}{(1-\nu_r)R_\rho^2 + (1+\nu_r)R_1^2} \quad (5)$$

将式(3)代入式(5)，并进一步简化得到

$$\delta_2 = -\frac{n(1-\nu_r^2)R\sqrt{(n-1)\rho+1}}{E_r \{[(1+\nu_r)n-2]+2/\rho\}} q \quad (6)$$

式中： E_r 和 ν_r 分别为铁锈的弹性模量(N/mm^2)和泊松比。

应该指出的是，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，在不同条件下生成的铁锈会有不同的组份，性能也会发生变化。因此，为简单起见， δ_2 按弹性力学方法等效计算，铁锈名义弹性模量 E_r 和名义泊松比 ν_r 参照文献[4]取值如下： $\nu_r=0.49$ ； $E_r=6000(1-2\nu_r)$ 。铁锈名义弹性模量 E_r 和名义泊松比 ν_r 的取值对计算结果的影响很小，这在以后的讨论中可以看出。

1.5 混凝土保护层开裂时的钢筋锈蚀率 将 δ_1 、 δ_2 的表达式代入式(2)，可以得到钢筋锈胀力

$$q = \frac{\sqrt{(n-1)\rho+1}-1}{\frac{(1+\nu_c)(R+c)^2 + (1-\nu_c)R^2}{E_c(2Rc+c^2)} + \frac{n(1-\nu_r^2)\sqrt{(n-1)\rho+1}}{E_r \{[(1+\nu_r)n-2]+2/\rho\}}} \quad (7)$$

一般试验研究认为混凝土开裂时的钢筋锈胀力与钢筋直径 d 、混凝土抗拉强度 f_{tk} 及保护层厚度 c 有关^[7-9]。根据弹性力学理论，按截面均匀受拉考虑，混凝土保护层开裂时钢筋锈胀力为

$$q^* = \frac{2c}{d} f_{tk} \quad (8)$$

而事实上，在钢筋锈胀力作用下混凝土截面环向拉应力分布是不均匀的，考虑混凝土环向不均匀拉应力的情况，混凝土保护层开裂时钢筋锈胀力为^[11]

$$q^* = (0.3+0.6\frac{c}{d})f_{tk} \quad (9)$$

式(8)表达方便，适用混凝土保护层厚度相比钢筋直径较小的情况，而式(9)考虑了混凝土保护层受不均匀环向拉应力的情况，比较符合实际混凝土构件的受力情况，计算结果偏于安全。本文以后的计算将采用式(9)的 q^* 表达式。

当 $q=q^*$ 时，根据式(7)和式(9)可以得到混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率 ρ^* 的方程

$$\frac{\sqrt{(n-1)\rho^* + 1} - 1}{\frac{(1+v_c)(R+c)^2 + (1-v_c)R^2}{E_c(2Rc+c^2)} + \frac{n(1-v_r^2)\sqrt{(n-1)\rho^* + 1}}{E_r\{(1+v_r)n-2\} + 2/\rho^*}} = q^* \quad (10)$$

1.6 混凝土保护层开裂时钢筋锈蚀率的解析表达式 为了求出混凝土保护层开裂时的钢筋锈蚀率 ρ^* ，设 $x = \sqrt{(n-1)\rho^* + 1}$ ， x 的物理含义为钢筋锈蚀铁锈自然膨胀后的直径扩大率，即 $x = d_1/d$ 。将 x 代入式(10)中代换 ρ^* ，并经过初等数学变换，可以得到关于 x 的一元三次方程

$$a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4 = 0 \quad (11)$$

式中： a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 为系数。

$$\text{设 } M_1 = \frac{(1+v_c)(R+c)^2 + (1-v_c)R^2}{E_c(2Rc+c^2)}, M_2 = \frac{n(1-v_r^2)}{E_r}, M_3 = (1+v_r)n-2, t_1 = \frac{M_3}{q^*}, t_2 = \frac{2(n-1)}{q^*},$$

则： $a_1 = M_2 - t_1$ ， $a_2 = t_1 + M_1M_3$ ， $a_3 = t_1 - M_2 - t_2$ ， $a_4 = 2M_1(n-1) + t_2 - M_1M_3 - t_1$ 。

式(11)有解析解介绍如下。

$$\text{设 } N_1 = \frac{a_3}{a_1} - \frac{1}{3}\left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2, N_2 = \frac{2}{27}\left(\frac{a_2}{a_1}\right)^3 - \frac{1}{3}\left(\frac{a_2}{a_1}\right)\left(\frac{a_3}{a_1}\right) + \frac{a_4}{a_1}, \text{ 该方程有3个根, 经过实例计算分析,}$$

去掉不符合实际情况的两个根，得到 x 的解析表达式为

$$x = \sqrt[3]{-N_2/2 + \sqrt{(N_2/2)^2 + (N_1/3)^3}} + \sqrt[3]{-N_2/2 + \sqrt{(N_2/2)^2 + (N_1/3)^3}} - a_2/3a_1 \quad (12)$$

相应的混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率表达式为

$$\rho^* = (x^2 - 1)/(n-1) \quad (13)$$

或

$$\rho^* = \left\{ \left[\sqrt[3]{-\frac{N_2}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{N_1}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{N_2}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{N_1}{3}\right)^3}} - \frac{a_2}{3a_1} \right]^2 - 1 \right\} / (n-1) \quad (14)$$

混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀深度为

$$d^* = (d - d^*)/2 \quad (15)$$

式中： d^* 为混凝土保护层胀裂时的钢筋净直径， $d^* = \sqrt{1 - \rho^*} d$ 。

应该指出的是，由于实际上混凝土与钢筋交界面上混凝土表面的空隙率，以及混凝土内部存在微小孔隙，有部分铁锈在对外围混凝土产生应力之前会渗入到混凝土的孔隙中去，而使得混凝土保护层胀裂时的

钢筋锈蚀率理论计算结果偏于保守。

2 影响因素

混凝土保护层开裂时的钢筋锈蚀率受到混凝土等级、混凝土保护层厚度、钢筋直径和铁锈膨胀率等因素的影响。下面将应用式(13)、式(14)通过算例讨论各影响因素对 r 的作用。

2.1 混凝土保护层厚度 C40混凝土,铁锈膨胀率 n 为2,钢筋直径为20mm的混凝土构件的混凝土保护层厚度与钢筋锈蚀率的关系曲线见图1。从图1可以看出,随着混凝土保护层厚度的增厚,混凝土保护层开裂时的钢筋锈蚀率呈线性上升。可见,增加混凝土保护层厚度,对于防止混凝土构件出现钢筋锈蚀胀裂裂缝是非常有效的。

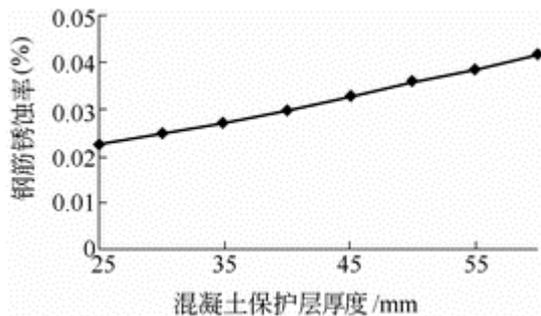


图1 混凝土保护层厚度对钢筋锈蚀率的影响

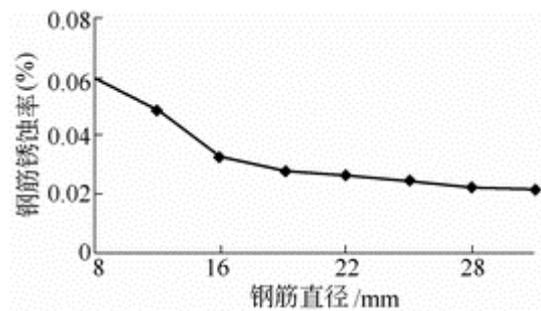


图2 钢筋直径对钢筋锈蚀率的影响

2.2 钢筋直径的影响 C40混凝土,铁锈膨胀率 n 为2,混凝土保护层厚度为35mm的混凝土构件的钢筋直径与钢筋锈蚀率的关系曲线见图2。从图2可以看出,随着钢筋直径的增大,混凝土保护层开裂时刻的钢筋锈蚀率减小。

2.3 铁锈膨胀率的影响 C40混凝土,钢筋直径为20mm,混凝土保护层厚度为35mm的混凝土构件的铁锈膨胀率与钢筋锈蚀率的关系曲线见图3。从图3可以看出,随着铁锈膨胀率的增大,混凝土保护层开裂时的钢筋锈蚀率减小。这是因为同样的钢筋锈蚀率,较大的铁锈膨胀率值将导致更大的钢筋锈胀力。

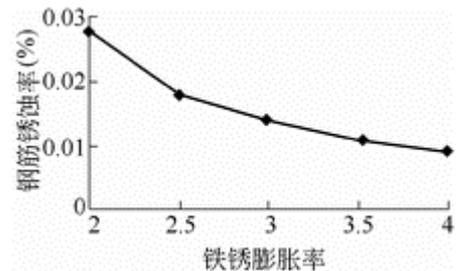


图3 铁锈膨胀率对钢筋锈蚀率的影响

2.4 混凝土等级的影响 混凝土保护层厚度为35mm,钢筋直径为20mm,铁锈膨胀率 n 为2的混凝土构件的混凝土等级与钢筋锈蚀率的关系曲线见图4。从图4可以看出,随着混凝土等级

的提高,混凝土抗拉强度增大,混凝土保护层开裂时的钢筋锈蚀率增大。

2.5 铁锈性质的影响 C40混凝土,铁锈膨胀率 n 为2,钢筋直径为20mm的混凝土构件的铁锈名义泊松比与钢筋锈蚀率的关系曲线见图5。从图5可以看出,铁锈名义泊松比 ν_r 的不同取值对计算结果的影响很小,即铁锈性质对混凝土开裂时的钢筋锈蚀率影响很小。

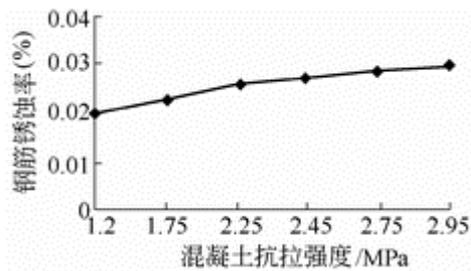


图4 混凝土等级对钢筋锈蚀率的影响

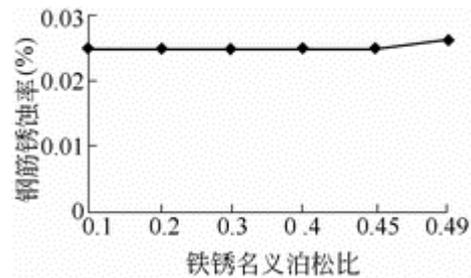


图5 铁锈性质对钢筋锈蚀率的影响

3 结论

本文建立了由于钢筋锈蚀导致的混凝土保护层胀裂时的钢筋混凝土构件的力学模型,应用弹性力学理论分析得到了混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率的解析表达式。文中还通过算例讨论了各相关因素对钢筋锈蚀率的影响,得出如下结论:(1)随混凝土保护层厚度的增加,混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率增大;(2)钢筋直径减小,混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率增大;(3)随混凝土等级的提高,混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率增大;(4)铁锈膨胀率减小,混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率增大,因此,确定某环境下的钢筋铁锈膨胀率,对确定该环境下混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率有重要的意义;(5)铁锈性质对混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率影响很少。

参考文献:

- [1] 韩继云,蔡鲁生. 钢筋混凝土构件中钢筋锈蚀实验研究[R]. 北京:中国建筑科学研究院,1991.
- [2] 金伟良,赵羽习,鄢飞. 钢筋混凝土构件的均匀锈胀力的机理研究[J]. 水利学报,2001,(7):57-62.
- [3] Andrade C,Alonso C,Molina F J. Cover cracking as a function of bar corrosion: part 1-Experimental test[J]. Materials and Structures,1993,26(162):453-464.
- [4] Molina F J,Alonso C,Andrade C. Cover cracking as a function of bar corrosion: part 2-Numerical model [J]. Materials and Structures,1993,26(163):535-548.
- [5] Alonso C,Andrade C,Rodriguez J,Diez J M. Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion[J]. Materials and Structures,1998,31:435-441.
- [6] 屈文俊,张誉,张伟平. 混凝土胀裂时钢筋锈蚀量的确定[J]. 工程力学,1997,(增刊):12-16.
- [7] 张伟平. 混凝土结构的钢筋锈蚀率损伤预测及其耐久性评估[D]. 上海:同济大学,1999.
- [8] 鄢飞. 大气环境下混凝土构件耐久性的若干问题研究[D]. 杭州:浙江大学,1999.
- [9] Liu Y P, Weyers R E. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures[J]. ACI Materials Journal,1998,95(6):675-681.
- [10] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京:高等教育出版社,1983.
- [11] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京:科学出版社,2002.

Corrosion ratio of reinforcement bar in reinforced concrete construction at the moment of cracking due to corrosion expansion

ZHAO Yu-xi, JIN Wei-liang

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The mechanical model of the cover layer cracking in reinforced concrete structure due to corrosion expansion of reinforcement is established. The theory of elasticity is applied to deduce the analytical solution expressing the corrosion ratio of the reinforcement at the moment of cracking. The factors affecting the corrosion ratio are analyzed. It is found that the corrosion ratio at the moment of cracking increases with the increase of the cover thickness and concrete strength, and increases with the decrease of reinforcement bar diameter. The property of rust has little effect on the corrosion ratio.

Key words: reinforcement bar; corrosion; expansion; corrosion ratio