

# 钢筋不均匀锈蚀引起的混凝土保护层 开裂有限元分析

韦俊<sup>1</sup>, 孟浩<sup>2</sup>, 薛圣广<sup>3</sup>

(1. 苏州科技学院, 江苏 苏州 215011; 2. 苏州二建集团, 江苏 苏州 215004; 3. 温州建筑设计研究院, 浙江 温州 325000)

**摘要:** 钢筋发生锈蚀, 将导致混凝土保护层受拉而开裂, 严重影响混凝土结构的耐久性. 针对自然环境下混凝土构件中的钢筋往往是非均匀锈蚀, 利用 ABAQUS 有限元软件, 采用对钢筋周围混凝土施加不均匀锈胀位移的方法模拟钢筋非均匀锈蚀情况下保护层的开裂过程, 基于有限元分析结果, 得到保护层胀裂破坏时临界径向位移计算公式; 以此为基础, 推导了钢筋非均匀锈蚀时保护层开裂时钢筋锈蚀率的计算公式. 最后, 通过试验验证了本文提出的锈蚀率计算公式的合理性.

**关键词:** 混凝土; 保护层; 钢筋非均匀锈蚀; 钢筋锈蚀率; 径向位移

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)05-0747-08

## 1 引言

钢筋发生锈蚀, 其锈蚀产物的体积往往是原来的 2—4 倍, 使周围混凝土受到挤压, 随着锈蚀程度的加剧, 将导致混凝土保护层受拉而开裂. 钢筋混凝土构件一旦开裂, 就会加剧钢筋的锈蚀, 从而进一步加剧裂缝的扩展甚至保护层剥落, 最终导致结构的破坏, 严重影响混凝土结构的耐久性, 因此研究钢筋锈蚀引起的混凝土保护层开裂过程具有重要的研究意义.

目前国内外学者对混凝土锈胀开裂的研究包括确立混凝土开裂前的钢筋锈蚀量模型<sup>[1]</sup>, 开裂时的钢筋锈蚀量模型<sup>[2-4]</sup>以及混凝土保护层裂缝宽度与锈蚀率的定量关系<sup>[5]</sup>等, 但对于钢筋锈蚀引起的混凝土保护层胀裂应力研究还不多, 且大多以均匀锈蚀<sup>[6]</sup>为主. 本文通过有限元软件 ABAQUS 采用有限分析方法对钢筋非均匀锈蚀膨胀情况下引起的混凝土保护层开裂过程及其影响因素进行研究.

## 2 有限元分析方法

### 2.1 混凝土本构关系和破坏准则

混凝土本构关系主要是表达混凝土在单轴和多轴应力作用下的应力应变关系. ABAQUS 材料库中提供了三种混凝土材料模型, 其中混凝土弥散开裂 (concrete smeared cracking) 模型为最常用的分析模型. 受压屈服面和裂纹探测 (受拉破坏) 面函数在  $p-q$  平面上的示意图如图 1. 双轴应力作用下的裂纹探测 (受拉破坏) 面和受压屈服面如图 2 示.

对于混凝土单轴受压应力-应变关系, 可以通过 \*concrete 选项来定义. 本文采用《混凝土结构设计规范》GB50010—2002 附录 C 规定的混凝土单轴受压应力-应变关系:

$$\alpha_c = f_c \cdot \left[ \alpha_a \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \right) + (3 - 2\alpha_a) \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \right)^2 + (\alpha_a - 2) \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \right)^3 \right] \quad (1)$$

式中:  $f_c$  为单轴最大抗压应力, 按规范取混凝土强度标准值;  $\epsilon_c$  为单轴最大抗压应力  $f_c$  时所对应的应变, 按规范附录 C 表 C.2.1 采用;  $\alpha_a$  为单轴受压应力-应变关系曲线参数, 按规范附录 C 表 C.2.1 采用.

收稿日期: 2010-09-29 修改稿日期: 2011-07-28

基金项目: 建设部研究开发项目 (2008-K2-35)

作者简介: 韦俊 (1977-), 男, 安徽全椒人, 硕士, 讲师, 一级注册结构工程师, 一级注册建造师, 主要研究方向为建筑结构设计、工程图学.

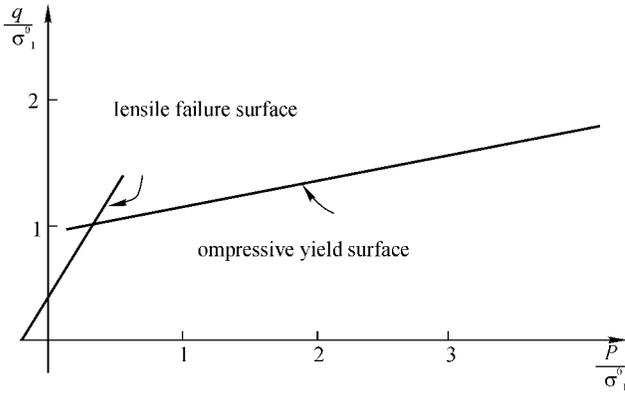


图 1 p-q 平面上的受压屈服和破坏面

Fig. 1 Compression yield and failure surface on p-q plane

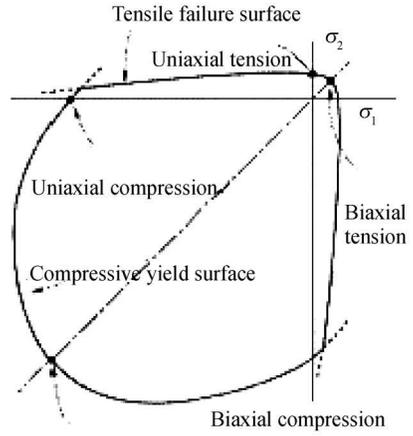


图 2 双轴应力作用下的屈服和破坏面

Fig. 2 Yield and failure surface under biaxial stress

开裂是混凝土材料最重要的力学行为之一, 裂纹的表示和开裂后的性状模拟是模型的关键部分. 在进行钢筋混凝土有限元分析时, 如何模拟混凝土裂缝是非线性有限元计算的关键问题. 弥散开裂模型采用独立的裂纹探测面(crack detection surface), 当应力达到被称作“裂纹探测面”时, 裂纹就会发生. 当搜索到裂纹时, 开裂方向被保存并用于后继分析计算, 同一点的后继裂纹只能在与先期开裂面垂直的方向上发生. 由于是使用了损伤弹性理论, 裂纹一旦产生就会对后继计算产生影响(裂纹可能张开或闭合). 裂纹区后继破坏行为通过“拉伸硬化”来模拟, 在混凝土弥散开裂模型中需要定义 \*TENSION STIFFENING 来实现, 包括两种拉伸方式: 后继破坏应力应变关系(post-failure stress-strain relation)和断裂能开裂准则(fracture energy crack criterion). 如果混凝土模型的重要部位没有钢筋, 采用基于应力应变关系的拉伸硬化方式, 其计算结果具有网格敏感性. 而采用断裂开裂准则的方法可以很好地解决这个问题. 因此, 素混凝土结构应采用基于断裂能开裂准则的方法来定义拉伸硬化, 这种方法需要给出对应的应力为零时裂纹面的张开位移  $u_0$ , 对于一般混凝土,  $u_0 = 0.05 \text{ mm}$ . 该方法通过在 \*TENSION STIFFENING 中设置 TYPE=DISPLACEMENT 实现.

### 2.2 有限元模型以及网格的划分

有限元分析模型为一个截面尺寸  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  的钢筋混凝土构件, 钢筋位置用等直径的孔洞来代替, 假设钢筋锈蚀沿轴向是均匀的, 钢筋锈蚀膨胀可以按平面应变问题处理. 图 3 和图 4 分别为划分了网格的中部单孔、角部单孔.

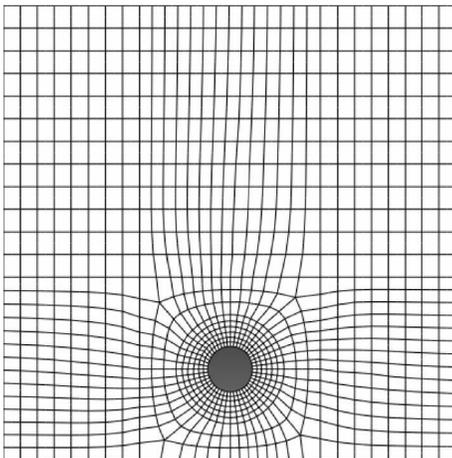


图 3 中部单孔模型网格划分

Fig. 3 Central single-hole model mesh

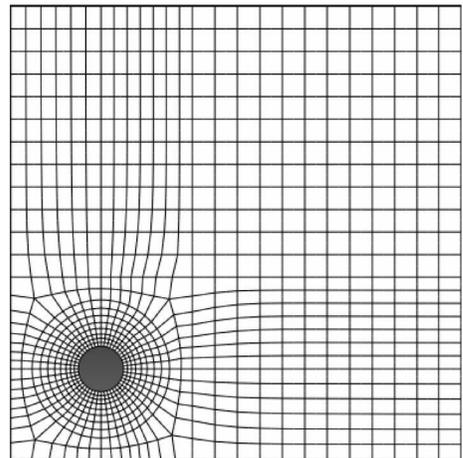


图 4 角部单孔模型网格划分

Fig. 4 Corner single-hole model mesh

2.3 模型参数

一般认为, 保护层开裂条件的主要影响因素为: 混凝土保护层厚度、钢筋直径、混凝土强度等级、实际钢筋位置(角区、非角区)、钢筋种类(光圆钢筋、变形钢筋)等。因此, 本文采用的模型考虑了钢筋位置(角区、非角区)、混凝土保护层厚度、钢筋直径、混凝土强度等级等因素。混凝土保护层厚度、钢筋直径、混凝土强度等级取值如表 1。

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

Concrete tensile strength/ MPa	Protection layer thickness C/mm	Bar diameter d/ mm
1. 54	25	18
1. 78	30	20
2. 01	35	25

按照以上各影响因素的组合, 共模拟 54 种情况。

2.3 加载方法

采用施加径向位移的方法来模拟钢筋的不均匀锈蚀膨胀, 径向位移场采用文献[ 7] 分析出来的位移场, 如图 5, 图 6 所示。

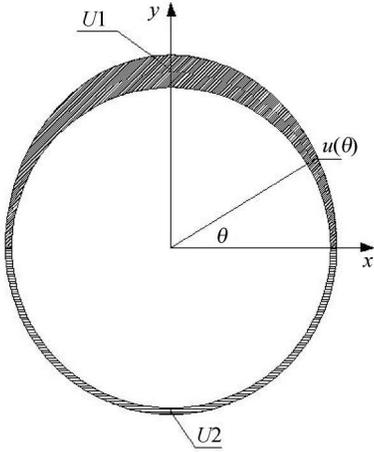


图 5 角区钢筋表面混凝土的径向位移分布

Fig. 5 Radial displacement distribution of corner bar surface concrete

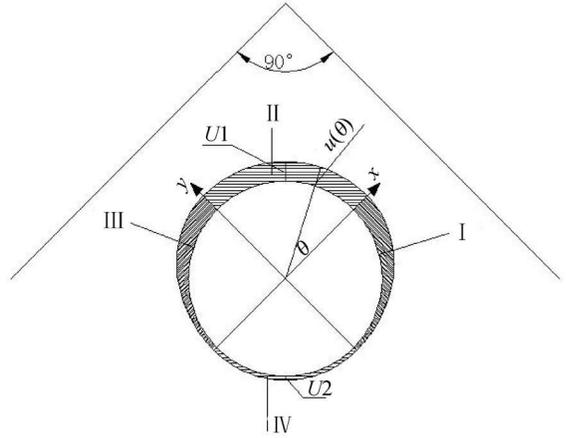


图 6 非角区钢筋周围混凝土径向位移分布

Fig. 6 Radial displacement distribution of non-corner bar surrounding concrete

非角区钢筋表面的混凝土径向位移表达式为:

$$u(\theta) = \begin{cases} 0 \leq \theta \leq \pi & \frac{(r+u_1) \cdot (r+u_2)}{\sqrt{(r+u_1)^2 \cos^2 \theta + (r+u_2)^2 \sin^2 \theta}} - r \\ \pi \leq \theta \leq 2\pi & u_2 \end{cases} \quad (2)$$

可以看出径向位移场与  $u_1, u_2, \theta$  有关。

角区钢筋表面的混凝土径向位移表达式如下:

$$u(\theta) = \begin{cases} -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq 0 & \frac{(r+u_1) \cdot (r+u_2)}{\sqrt{(r+u_2)^2 \cos^2 \theta + (r+u_1)^2 \sin^2 \theta}} - r \\ 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} & u_1 \\ \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi & \frac{(r+u_1) \cdot (r+u_2)}{\sqrt{(r+u_1)^2 \cos^2 \theta + (r+u_2)^2 \sin^2 \theta}} - r \\ \pi \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2} & u_2 \end{cases} \quad (3)$$

可以看出径向位移与  $u_1, u_2, \theta$  有关。

分析模型的边界条件为上端边界铰支, 即双向约束。同时, 为了便于分析, 不考虑混凝土结构初始缺陷和微裂缝的影响以及忽略锈蚀产物向周边混凝土空隙的自由扩散。

## 3 角区钢筋的保护层开裂时径向位移及其回归分析

表 2 角区钢筋不均匀锈蚀引起的保护层开裂时有限元分析结果

Tab. 2 The finite element analysis results of protective layer cracking caused by corner bar non-uniform corrosion

Tensile strength / MPa	Bar diameter / mm	Protection layer thickness / mm	Critical radial displacement / $\mu\text{m}$	Tensile strength / MPa	Bar diameter / mm	Protection layer thickness / mm	Critical radial displacement $u_1 / \mu\text{m}$
1.54	18	25	4.6	1.78	20	35	7.7
1.54	18	30	5.8	1.78	25	25	5.1
1.54	18	35	7.0	1.78	25	30	6.2
1.54	20	25	4.6	1.78	25	35	7.4
1.54	20	30	5.7	2.01	18	25	5.9
1.54	20	35	6.8	2.01	18	30	7.4
1.54	25	25	4.4	2.01	18	35	8.9
1.54	25	30	5.4	2.01	20	25	5.8
1.54	25	35	5.9	2.01	20	30	7.2
1.78	18	25	5.3	2.01	20	35	8.6
1.78	18	30	6.6	2.01	25	25	5.6
1.78	18	35	8.0	2.01	25	30	6.9
1.78	20	25	5.2	2.01	25	35	8.3
1.78	20	30	6.4				

根据因素分析结果, 利用统计回归分析的方法, 可以得到混凝土保护层胀裂时的临界径向位移与混凝土强度等级, 保护层厚度, 钢筋直径之间的回归公式. 但要进行回归分析, 首先要确定独立变量和拟合函数. 前面三种因素是否相互独立, 目前还没有形成一致认识.

根据已有的文献资料,  $(c+d)/d$  是影响混凝土开裂锈蚀量的重要参数, 保护层胀裂时的钢筋锈蚀率随  $(c+d)/d$  变化为递增关系. 因此, 本文把  $(c+d)/d$ 、 $d$ 、 $f_t$  三者作为影响保护层开裂临界径向位移的独立因素, 拟合方程选取如下:

$$u_1 = \alpha_0 \cdot f_t^{\alpha_1} \cdot (1+c/d)^{\alpha_2} \cdot d^{\alpha_3} \quad (4)$$

通过回归分析, 建立了角区钢筋保护层开裂的临界径向位移与混凝土抗拉强度、相对保护层厚度、钢筋直径之间的回归公式为:

$$u_1 = 0.0338 \cdot f_t^{0.9177} \cdot (1+c/d)^{1.9871} \cdot d^{0.9666} \quad (5)$$

式中:  $u_1$  为开裂临界径向位移 (mm);  $f_t$  为混凝土抗拉强度标准值 (MPa);  $c$  为混凝土保护层厚度 (mm);  $d$  为钢筋直径 (mm).

将有限元分析值与回归方程计算值进行比较, 如图 7, 结果表明回归效果非常理想.

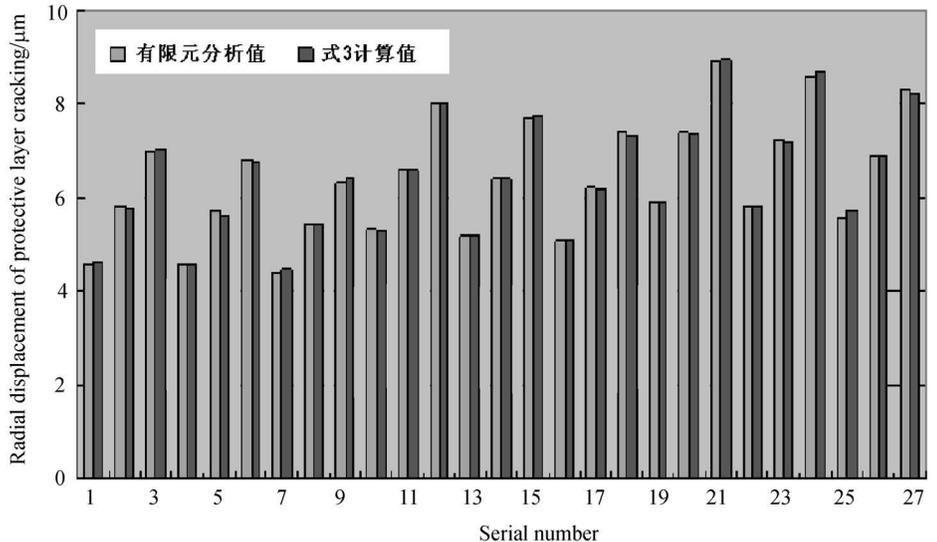


图 7 有限元分析值与式 3 计算值的比较

Fig. 7 Comparison between finite element analysis values and formula 3 calculated values

### 4 非角区钢筋的保护层开裂时径向位移及其回归分析

表 3 非角区钢筋不均匀锈蚀引起的保护层开裂时有限元分析结果

Tab. 3 The finite element analysis results of protective layer cracking caused by non-corner bar non-uniform corrosion

Tensile strength / MPa	Bar diameter / mm	Protection layer thickness / mm	Critical radial displacement / μm	Tensile strength / MPa	Bar diameter / mm	Protection layer thickness / mm	Critical radial displacement $u_1$ / μm
1.54	18	25	7.8	1.78	20	35	12.6
1.54	18	30	9.6	1.78	25	25	8.8
1.54	18	35	11.4	1.78	25	30	10.6
1.54	20	25	7.7	1.78	25	35	12.3
1.54	20	30	9.4	2.01	18	25	9.9
1.54	20	35	11.1	2.01	18	30	12.0
1.54	25	25	7.8	2.01	18	35	14.2
1.54	25	30	9.3	2.01	20	25	9.8
1.54	25	35	10.8	2.01	20	30	11.9
1.78	18	25	8.9	2.01	20	35	13.9
1.78	18	30	10.9	2.01	25	25	9.9
1.78	18	35	12.9	2.01	25	30	11.8
1.78	20	25	8.8	2.01	25	35	13.7
1.78	20	30	10.6				

表 4 非角区和角区保护层开裂时临界径向位移有限元分析结果比较

Tab. 4 The finite element analysis results comparison of critical radial displacement between non-corner and corner protective layer cracking

Num	Non-corner radial displacement $u_1$ / μm	Corner radial displacement $u_1$ / μm	Ratio of non-corner and corner	Num	Non-corner radial displacement $u_1$ / μm	Corner radial displacement $u_1$ / μm	Ratio of non-corner and corner
1	7.8	4.6	1.70	15	12.6	7.7	1.64
2	9.6	5.8	1.66	16	8.8	5.1	1.73
3	11.4	7.0	1.63	17	10.6	6.2	1.71
4	7.7	4.6	1.67	18	12.3	7.4	1.66
5	9.4	5.7	1.65	19	9.9	5.9	1.68
6	11.1	6.8	1.63	20	12.0	7.4	1.62
7	7.8	4.4	1.77	21	14.2	8.9	1.60
8	9.3	5.4	1.72	22	9.8	5.8	1.69
9	10.8	5.9	1.83	23	11.9	7.2	1.65
10	8.9	5.3	1.68	24	13.9	8.6	1.62
11	10.9	6.6	1.65	25	9.9	5.6	1.77
12	12.9	8.0	1.61	26	11.8	6.9	1.71
13	8.8	5.2	1.69	27	13.7	8.3	1.65
14	10.6	6.4	1.66				

由表 4 可以知道, 非角区钢筋不均匀锈蚀引起的保护层开裂时临界径向位移  $u_1$  较角区的大, 约为 1.68 倍, 因此, 本文通过修正角区钢筋保护层开裂时径向位移公式(5)来考虑非角区位置的影响, 修正后非角区钢筋非均匀锈蚀引起的保护层开裂临界径向位移  $u_1$  的计算公式可以表示为:

$$u_1 = 0.0568 \cdot f_t^{0.9177} \cdot (1+c/d)^{1.9871} \cdot d^{0.9666} \quad (6)$$

## 5 保护层开裂时钢筋锈蚀率的计算公式

将式(5)与式(6)分别代入文献[7]中的保护层径向位移和保护层开裂时钢筋锈蚀率的关系表达式,角区:

$$\eta = \frac{2\delta + u_1 + u_2}{(\rho - 1) \cdot r} \quad (7)$$

非角区:

$$\eta = \frac{4\delta + u_1 + 3u_2}{2(\rho - 1) \cdot r} \quad (8)$$

就可以得到保护层开裂时钢筋锈蚀率的数学表达式为:

角区钢筋:

$$\eta = \frac{4\delta + 0.0696 \cdot f_t^{0.9177} \cdot (1 + c/d)^{1.9871} \cdot d^{0.9666}}{(\rho - 1) \cdot d} \quad (9)$$

非角区钢筋:

$$\eta = \frac{4\delta + 0.0624 \cdot f_t^{0.9177} \cdot (1 + c/d)^{1.9871} \cdot d^{0.9666}}{(\rho - 1) \cdot d} \quad (10)$$

其中:  $\delta$  为钢筋和周围混凝土之间的空隙过渡区厚度,一般取为  $12.5 \mu\text{m}$ ;  $\rho$  为钢筋锈蚀产物膨胀率,在  $2 \sim 4$  之间,一般取为  $2$ ;

将式(9)与式(10)合并,并代入  $\delta = 12.5 \mu\text{m}$ ,  $\rho = 2$ , 得到角区和非角区钢筋非均匀锈蚀引起的混凝土保护层开裂时钢筋锈蚀率的统一数学表达式为:

$$\eta = 0.05 \cdot d^{-1} + k \cdot 0.0696 \cdot f_t^{0.9177} \cdot (1 + c/d)^{1.9871} \cdot d^{-0.0334} \quad (11)$$

式中:  $k$  为钢筋位置修正系数,对于角区钢筋  $k$  取  $1$ , 对于非角区钢筋  $k$  取  $0.9$ , 可以发现保护层开裂时的角区钢筋锈蚀率比非角区的偏大一些,这与均匀锈蚀情况不同,主要是因为非均匀锈蚀的情况下,角区钢筋的锈蚀范围较非角区的大。

## 6 试验验证

为了验证本文公式的有效性,选择文献[8]的实验结果进行比较.在该实验中,钢筋混凝土桥面板的几何尺寸为  $1180 \text{ mm} \times 1180 \text{ mm} \times 216 \text{ mm}$ ,混凝土配合比:水泥  $381 \text{ kg/m}^3$ ,水  $171 \text{ kg/m}^3$ ,粗骨料  $1068 \text{ kg/m}^3$ ,细骨料  $718 \text{ kg/m}^3$ ,相应的水灰比为  $0.45$ .混凝土桥面板成型后,按标准条件在养护室中养护  $28 \text{ d}$  后测的抗压强度  $f_c = 31.5 \text{ mpa}$ ,抗拉强度  $f_t = 3.3 \text{ MPa}$ ,弹性模量  $E_c = 27 \text{ GPa}$ .假定空隙过渡区的厚度为  $12.5 \mu\text{m}$ .该试验的试件编号和材料参数如表:

表5 文献[7]试件材料参数表

Tab. 5 Doc [7] test-piece material parameters table

Test-piece num	Bar diameter / mm	Protection layer thickness/ mm	Corrosion rate / mA · ft <sup>-2</sup>	Concrete tensile strength/ MPa	Rust density / mg · mm <sup>-3</sup>
OE(F)18512.0	16	27	3.50	3.3	3.6
OA2859.6	16	48	2.18	3.3	3.6
OB3859.6	16	70	1.67	3.3	3.6

将表5试件材料参数代入式(10),计算得到混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率  $\eta$ ,并取钢筋锈蚀产物膨胀率  $\rho$  为  $2$ ,从而可以进一步求出锈蚀产物的质量  $W_r$  为:

$$W_r = 2 \cdot \eta \cdot \pi r^2 \cdot \rho_r \quad (12)$$

式中:  $\rho_r$  为铁锈密度  $\text{mg/mm}^3$ .

文献[7]提出根据锈蚀产物质量计算从钢筋开始锈蚀到保护层开裂时间的计算公式,如下式:

$$t = \frac{\alpha_r W_r^2}{0.196\pi D I_{corr}} \quad (13)$$

式中:  $W_r$  为单位长度上锈蚀物重量  $\text{mg}/\text{mm}$ ;  $\alpha_r$  是与铁锈成分有关的系数, 一般在  $0.523 \sim 0.622$  之间, 当铁锈成分为  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , 其值为  $0.622$ , 当铁锈成分为  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  时, 其值为  $0.523$ ;  $D$  为钢筋直径 ( $\text{mm}$ );  $t$  为开裂时间 (年);  $I_{corr}$  为锈蚀电流密度 ( $\text{mA}/\text{ft}^2$ ).

将式 (10) 计算得到的  $W_r$  代入式 (11), 可以算得保护层开裂时间  $t$ , 将计算结果与试验结果比较见表 6.

表 6 文献 [8] 试验结果和计算结果比较

Tab. 6 Doc [8] comparison between test results and calculated results

Test-piece num	Steel corrosion rate/%	Crack time / a		
		Calculated value $\alpha_r = 0.523$	Calculated value $\alpha_r = 0.622$	Test value
OE(F) 18512.0	0.42	0.56	0.67	0.72
OA2859.6	0.52	1.38	1.64	1.84
OB3859.6	0.67	2.91	3.46	3.54

从上表可以知道, 本文的计算结果与实验结果具有较好的吻合度, 但是相对偏小, 计算值与试验的比值介于  $80\% \sim 90\%$  之间, 其中主要原因可能是: (1) 未考虑填入裂缝空隙的锈蚀产物的体积; (2) 未考虑混凝土的徐变影响; (3) 在有限元分析中, 单元网格划分的过小, 应力集中越明显, 从而导致计算结果偏小.

## 7 结 论

(1) 钢筋锈蚀严重影响混凝土结构的耐久性, 无论路桥结构、工业与民用建筑、还是水利工程、海港工程, 国内外混凝土中钢筋锈蚀现象均非常严重<sup>[9]</sup>, 因此, 研究混凝土中钢筋锈蚀具有重大的实际意义, 并且可带来可观的社会经济效益.

(2) 钢筋混凝土构件钢筋锈蚀严重往往会出现沿筋锈胀裂缝甚至保护层剥落的现象, 本文详细介绍了国内外学者在钢筋锈蚀方面所做的研究成果, 针对钢筋非均匀锈蚀情况, 利用 ABAQUS 有限元软件, 采用对钢筋周围的混凝土施加不均匀锈胀位移的方法模拟钢筋非均匀锈蚀情况下混凝土保护层的开裂过程, 基于有限元分析结果, 结合有限元分析结果回归分析得到了角区保护层开裂时临界径向位移的计算公式, 在此基础上, 通过修正角区钢筋保护层开裂时径向位移计算公式得到了非角区钢筋保护层开裂时径向位移计算公式, 并且对各影响因素进行了分析.

(3) 利用径向位移和钢筋锈蚀率之间的关系得到了保护层开裂时钢筋锈蚀率的计算公式, 再应用目前已有的时间预测模型推算保护层开裂的时间, 通过分析结果与以往的试验结果的对比, 验证了本文的非均匀锈蚀计算公式的妥当性.

## 参考文献 References

[ 1 ] 牛荻涛, 王庆霖, 王林科. 锈蚀开裂前混凝土中钢筋锈蚀量的预测模型 [ J ]. 工业建筑, 1996(4): 8-10.  
 NIU Di-tao, WANG Qing-lin, WANG Lin-ke. Prediction model of steel corrosion extent in reinforced concrete structures before corrosion cracking [ J ]. Industrial Construction, 1996(4): 8-10.

[ 2 ] 潘振华, 牛荻涛, 王庆霖. 钢筋锈蚀开裂条件的试验研究 [ J ]. 工业建筑, 1999, 29(5): 46-49.  
 PAN Zhen-hua, NIU Di-tao, WANG Qing-lin. Experimental research of concrete cover cracking criterion due to reinforcement corrosion [ J ]. Industrial Construction, 1999, 29(5): 46-49.

[ 3 ] 赵羽习, 金伟良. 混凝土构件锈蚀胀裂时的钢筋锈蚀率 [ J ]. 水利学报, 2004(11): 97-101.  
 ZHAO Yu-xi, JIN Wei-liang. Corrosion ratio of reinforcement bar in reinforced concrete construction at the moment

of cracking due to corrosion expansion [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(11): 97-101.

- [ 4 ] Dong Chen , Sankaran Mahadevan. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation[ R]. Cement and Concrete Composites. In Press, Accepted Manuscript. Available online 29 April 2007.
- [ 5 ] 王 深. 钢筋混凝土锈胀裂缝的研究及耐久性评估[ D]. 上海: 同济大学, 2001.  
WANG Shen. Durability assessment of reinforced concrete crack research and evaluation of durability [ D]. Shanghai: Tongji University, 2001.
- [ 6 ] 王巧平. 钢筋混凝土锈胀损伤规律试验研究及理论分析[ D]. 南京: 河海大学, 2004.  
WANG Qiao-ping. Experimental study and theoretic analysis on damage rule of corroded and cracked reinforced concrete[ D]. Nanjing: Hohai University, 2004.
- [ 7 ] 薛圣广. 钢筋非均匀锈蚀引起的保护层开裂有限元分析[ D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.  
XUE Sheng-guang. FEM Analysis on the crack process of concrete cover induced by non-uniform corrosion of re-bar [ D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.
- [ 8 ] LIU Y, WEYERS R. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures[ J]. ACI Mater, 1998 (6): 675-681.
- [ 9 ] 刘 海, 姚继涛, 牛荻涛. 钢筋混凝土结构基于锈胀开裂寿命准则的耐久性设计方法[ J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(1): 25-31.  
LIU Hai, YAO Ji-tao, NIU Di-tao. Durability design of RC structures based on the life criterion of cover cracking [ J]. J. Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2009, 41(1): 25-31.

## FEM analysis on the crack process of concrete cover induced by non-uniform corrosion of re-bar

WEI Jun<sup>1</sup>, MENG Hao<sup>2</sup>, XUE Sheng-guang<sup>3</sup>

(1. University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215011, China;

2. Suzhou Erjian Construction Group Co., Ltd, Suzhou 215004, China;

3. Wenzhou Architectural Design Research Institute, Wenzhou 325000, China)

**Abstract** Occurrence of re-bar corrosion will lead to the concrete cover cracking, which seriously affect the durability of concrete structures. In dealing with the non-uniform corrosion of re-bar in concrete components under natural environment, the paper simulates the cracking process of concrete cover using a finite-element based method with ABAQUS software. Based on the FEM analysis results, the formula of the critical radial displacement at the cracking time is used to predict the corrosion ratio at the cracking time of cover concrete. Finally, the analytical corrosion ratio formula presented herein is verified with the laboratory test.

**Key words:** concrete; cover; non-uniform corrosion of re-bar; corrosion ratio of re-bar; radial displacement