

# 基于钢筋加速非均匀锈蚀的混凝土保护层胀裂预测

董 征, 付传清, 陆晨涛, 李思瑶, 周建波

(浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州)

**摘要:** 自然侵蚀条件下混凝土中钢筋的腐蚀形态为非均匀锈蚀。通过有限元模拟通电加速非均匀锈蚀试验, 得到钢筋表面的电流密度分布, 进而推导了锈蚀过程中钢筋锈层厚度非均匀分布及其对应的钢筋表面径向位移表达式。基于锈蚀产物的非均匀锈胀位移, 建立混凝土保护层胀裂模型并通过锈蚀试验验证了模型准确性。基于保护层胀裂模型, 探明了锈蚀方法(均匀或非均匀锈蚀)、钢筋位置、钢筋直径和保护层厚度等关键参数对混凝土胀裂全过程的应变场以及开裂模式的影响规律。结果表明: 混凝土开裂前应变场的分布规律与开裂后裂缝的位置和发展规律具有一定相关性; 均匀与非均匀锈蚀条件下, 混凝土应变场分布和开裂模式存在显著差异; 非均匀锈蚀下, 钢筋位于角部位置、钢筋直径增大、保护层厚度减小均对裂缝的发展有加剧作用。

**关键词:** 钢筋混凝土; 非均匀锈蚀; 锈胀开裂; 开裂模式

**中图分类号:** TU375; TU528

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2023)04-0598-09

## Prediction of concrete cover cracking based on accelerated non-uniform corrosion of reinforcing steel bars

DONG Zheng, FU Chuanqing, LU Chentao, LI Siyao, ZHOU Jianbo

(College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** The corrosion pattern of steel bars in concrete under natural corrosive environment is non-uniform corrosion. In this study, the current density distribution on the surface of the steel bar was obtained by finite element simulation of the accelerated non-uniform corrosion test, and then the non-uniform distribution of the thickness of the steel bar rust layer during the corrosion process and the corresponding radial displacement expression of the steel bar surface were derived. On the basis of the non-uniform rust expansion displacement of the corrosion products, a model of concrete cover cracking was established. The effects of corrosion method (uniform or non-uniform corrosion), position of steel bar, diameter of steel bar, and thickness of concrete cover on the strain field and cracking mode of the concrete during rust expansion were investigated. The results show that the location and development of cracks is related to the distribution law of the strain field before the cracking of concrete. There are significant differences in the strain field distribution and cracking mode of concrete under uniform and non-uniform corrosion conditions. Under non-uniform corrosion, the position of steel bar at the corner, the increase of steel bar diameter and the decrease of protective layer thickness all aggravate the development of cracks.

**Key words:** reinforced concrete; non-uniform corrosion; corrosion-induced cracking; cracking mode

钢筋锈蚀导致混凝土开裂是影响混凝土结构耐久性的主要原因之一, 非均匀锈蚀是钢筋自然锈蚀中的主要形式。由于有害物质的侵蚀和氧气、水的传输在自然环境下都是由外到内的过程, 因此钢筋会在靠近保护层一侧率先脱钝锈蚀。相比于均匀锈蚀, 非均匀锈蚀一方面形成宏电池可加速钢筋锈蚀, 另一方面则会导致保护层的开裂更

为迅速和严重<sup>[1-3]</sup>。因此, 研究非均匀锈蚀下混凝土的开裂模式对混凝土结构寿命的预测具有重要意义。

研究混凝土结构锈胀开裂的主要方法有理论分析、试验研究、数值模拟<sup>[2-5]</sup>。其中, 试验研究中诱导钢筋锈蚀的方法主要包括自然环境锈蚀<sup>[6]</sup>、人工环境加速锈蚀<sup>[7]</sup>、通电加速锈蚀<sup>[8-12]</sup>。针对混凝土

收稿日期: 2022-11-11

修改稿日期: 2023-07-16

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LZ20E080003, LR21E080002, LQ22E080017), 国家自然科学基金资助项目(51978620, 52208294)

第一作者: 董 征(1994—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为混凝土结构耐久性、腐蚀与防护。E-mail: zdong@zjut.edu.cn

通信作者: 付传清(1982—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为混凝土结构耐久性。E-mail: chqfu@zjut.edu.cn

结构中钢筋锈层分布以及锈胀开裂的预测,人工环境加速锈蚀下的钢筋呈现非均匀锈蚀,其锈层分布可用高斯函数描述,与自然环境锈蚀吻合。然而,自然环境锈蚀与人工环境加速锈蚀所需的试验周期均较长,通电加速锈蚀成为研究混凝土结构锈胀开裂的主要方法之一。Fu等<sup>[13]</sup>利用一种基于内置电极法的加速非均匀锈蚀方法对混凝土试块进行试验,可得到与自然环境下高斯型锈层分布相符合的钢筋锈层分布,同时大大缩短了试验周期。针对锈胀开裂的数值计算,现有的非均匀锈蚀有限元模型模拟膨胀力的方法包括热模拟、荷载模拟、径向位移模拟<sup>[14-15]</sup>。然而,大多数的模型都是采用半椭圆形模型模拟锈层的非均匀分布<sup>[16-17]</sup>,与实际非均匀锈蚀钢筋的锈层分布有一定差别。

由此,本文以高斯分布的径向位移模拟锈层的非均匀分布。以此模型探究锈蚀方式、钢筋位置、钢筋直径、保护层厚度对应变场分布、开裂模式的影响。另外,采用内置电极法的通电加速锈蚀试验,利用应变仪采集锈蚀过程中的应变变化,以试验数据验证模型的准确性。

## 1 非均匀锈蚀钢筋圆周方向锈层厚度分布模型

### 1.1 COMSOL 模型参数设置

在基于内置电极法的钢筋非均匀锈蚀通电试验中,导致钢筋非均匀锈蚀的原因就是电流的非均匀分布,因此,锈层的分布应与电流密度的分布一致。为了得到电流在钢筋表面的分布,利用COMSOL对于钢筋非均匀锈蚀通电试验进行了模拟。本文主要针对基于钢筋横截面非均匀锈蚀的锈胀开裂开展研究,暂未考虑沿钢筋长度方向的纵向非均匀性,采用二维模型<sup>[5,18]</sup>。

如图1所示,设置混凝土尺寸为150 mm×150 mm×75 mm,保护层厚度为30 mm。钢筋和钢丝为两个电极,钢筋的平均电流密度设置为 $3 \times 10^{-6}$  A/mm<sup>2</sup>。模型中混凝土电导率数值由试验实测得到,为0.014 39 S/m,本文暂未考虑混凝土材料的非均质性。在通电锈蚀的过程中,主要控制锈层分布的因素是不锈钢丝与钢筋的截面积之比、不锈钢丝和钢筋的净距。当不锈钢丝与钢筋的相对位置不同时,钢筋锈层仍符合高斯分布,但锈层分布具体数值发生改变<sup>[13]</sup>。基于作者已有研究,不锈钢丝与钢筋截面积之比及净距愈小,钢筋通电锈层分布与自然锈蚀下锈层分布愈相近,且不锈钢丝本身对开裂的影响可忽略不计<sup>[13]</sup>。根

据已有试验及模拟结果<sup>[13]</sup>,在本文中钢丝和钢筋净距设定为8 mm,钢丝的直径固定为0.8 mm,因此在模拟过程中,主要考虑钢筋直径对于电流分布的影响,设置钢筋直径 $d$ 为8 mm、12 mm、16 mm、24 mm、32 mm。

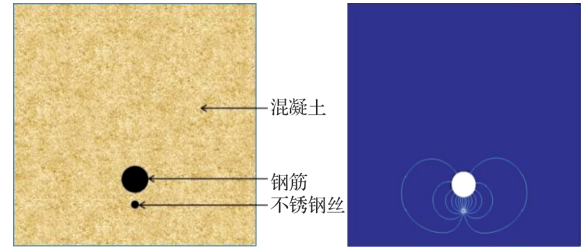


图1 有限模拟几何模型及混凝土中电流密度计算图示

Fig. 1 Geometric model of finite element simulation and calculation diagram of current density in concrete

### 1.2 电流密度分布函数

以 $d=16$  mm的计算结果为例,如图1所示,流线越密集,表示电流密度越大。钢筋表面最靠近钢丝的位置电流密度最大,随着钢筋表面各点与钢丝距离增加,电流密度逐渐降低。将各种情况的钢筋表面的电流密度分布导出,并用高斯函数拟合,具有很好的拟合度,见式(1)。

$$i(\theta) = y_0 + \frac{a_1}{\sqrt{2\pi} \cdot a_2} e^{-\left(\frac{\theta - \theta_0}{\sqrt{2} \cdot a_2}\right)^2} \quad (1)$$

式中: $y_0$ 为均匀系数,反映圆周方向上均匀分布的电流密度; $a_1$ 为非均匀系数,反映非均匀分布的电流密度的总和; $a_2$ 为扩展系数,反映高斯分布图像的缓陡程度; $\theta_0$ 表示函数的对称轴位置, $\theta_0=0$ 。钢筋圆心与钢丝圆心连线的角度 $\theta$ 定义为 $\theta=0$ 轴,顺时针旋转为负值,逆时针旋转为正值,因此 $\theta$ 的取值范围为 $[-\pi, \pi]$ 。最终得到电流密度分布拟合曲线(图2),并得到参数与钢筋直径的关系图(图3)。其关系式可由幂函数较好地拟合,拟合函数如表1所示。

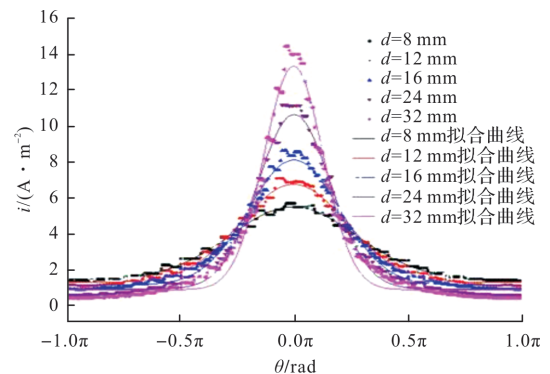


图2 钢筋不同角度位置电流密度分布拟合图

Fig. 2 Fitting diagram of current density distribution at different angles of steel bar

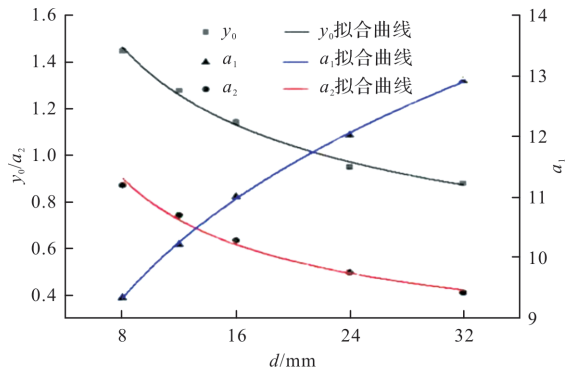


图3 钢筋直径和高斯拟合参数的关系图

Fig. 3 Relationship between steel bar diameter and Gaussian fitting parameters

表1 基于钢筋直径的参数拟合函数

Tab. 1 Parameter fitting function based on steel bar diameter

参数	函数表达式
$y_0$	$y_0(d) = 3.16 \cdot d^{-0.37}$ , $R^2 = 0.99$
$a_1$	$a_1(d) = 5.73 \cdot d^{0.23}$ , $R^2 = 0.98$
$a_2$	$a_2(d) = 2.65 \cdot d^{-0.52}$ , $R^2 = 0.99$

如图3与表1所示,  $y_0$  和  $a_2$  随着钢筋直径的增大而减小,  $a_1$  随着钢筋直径的增大而增大。通电锈蚀过程中, 锈层厚度分布与电流密度分布一致。因此在相同的锈蚀率下, 随着钢筋直径的增加, 锈层厚度分布越陡峭, 均匀部分减小, 非均匀部分增大, 最大锈层厚度增大。

### 1.3 锈层厚度分布函数

锈层厚度分布与电流密度分布一致呈现高斯分

布, 根据 Faraday 定律公式和锈蚀产物几何关系公式可得

$$\frac{nM_{Fe}t}{Z_{Fe}F\gamma_s} \cdot \frac{d}{2} L \int_{-\pi}^{\pi} i(\theta, d) d\theta = \frac{d}{2} L \int_{-\pi}^{\pi} T(\theta, d) d\theta \quad (2)$$

最终可得到锈层厚度分布函数为公式(3)所示, 也符合高斯分布, 与锈蚀试验得到的锈层厚度分布规律一致<sup>[19]</sup>:

$$T(\theta, d) = \frac{nM_{Fe}t}{Z_{Fe}F\gamma_s} i(\theta, d) = \frac{nd \cdot \rho}{4i_{ave}} i(\theta, d) \quad (3)$$

式中:  $n$  为铁锈体积膨胀系数, 取 2;  $M_{Fe}$  为铁的摩尔质量, 取 56 g/mol;  $t$  为通电时间(s);  $Z_{Fe}$  为铁的化合价, 取 2;  $F$  为法拉第常数, 取 96 485 C/mol;  $\gamma_s$  为钢筋密度, 取  $7.85 \times 10^6$  g/m<sup>3</sup>;  $i_{ave}$  为钢筋表面平均电流密度;  $d$  为钢筋初始直径;  $\rho$  为钢筋的锈蚀率。

## 2 通电试验中钢筋混凝土锈胀开裂模型

### 2.1 ABAQUS 模型参数设置

为了探究钢筋混凝土在锈蚀过程中开裂模式, 利用 ABAQUS 模拟锈胀开裂过程。模型采用塑性损伤模型来模拟混凝土锈胀开裂, 单元类型为 CPS4R, 用等直径的空洞来代替钢筋位置, 由于钢筋周围的应力应变较为集中, 所以, 对钢筋周围的网格划分适当加密, 采用钢筋的径向扩张位移来模拟锈蚀产物的堆积。模型中的混凝土材料参数见表 2<sup>[20]</sup>。

表2 混凝土材料参数

Tab. 2 Parameters of concrete materials

$\psi$	$\epsilon$	$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	$K$	$\mu$	$E_c/\text{MPa}$	$\nu$	$f_{t,r}$	$\epsilon_{t,r}$
30°	0.1	1.16	2/3	0.000 5	30 000	0.2	2.01	$9.524 \times 10^{-5}$

表中:  $\psi$  为膨胀角,  $\epsilon$  为势函数的偏心率,  $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$  为混凝土双轴抗压和单轴抗压之比,  $K$  为拉伸子午面上与压缩子午面上的第二应力常量之比,  $\mu$  为黏性系数。

### 2.2 混凝土开裂准则

图4为本文试验测得混凝土受拉本构模型, 受拉时应变发展很快, 极限拉应力为 2.01 MPa。如图5所示, 当混凝土达到极限拉应力时, 混凝土开始产生应变, 但是应力没有马上急剧减少, 应变没有急剧增加, 当塑性拉应变达到 150 微应变时, 开始急剧增加, 应力急剧减少。因此本模型开裂的判定准则为极限拉应变准则, 极限拉应变为 150 微应变。

### 2.3 径向位移加载边界条件

根据锈层厚度的分布函数, 可得到钢筋圆周方向的径向位移函数为:

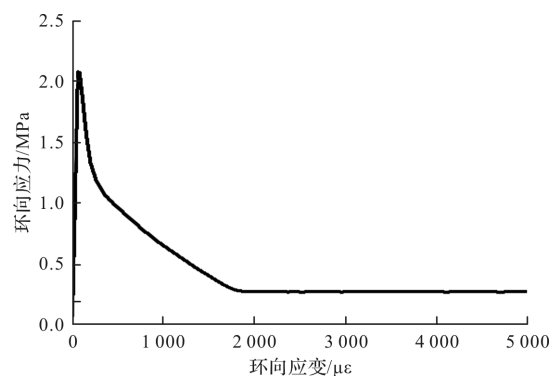


图4 混凝土受拉本构模型

Fig. 4 Stress-strain curve of concrete under uniaxial tension

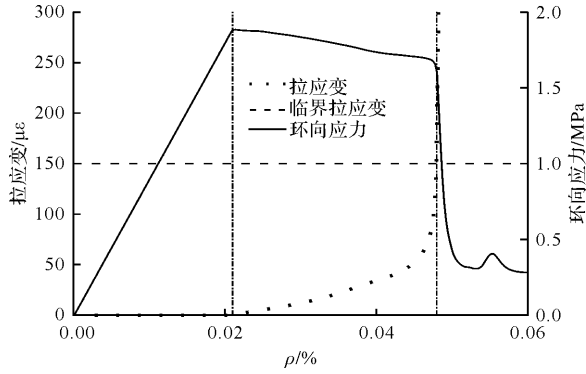


图5 通电过程中拉应变与拉应力的变化曲线

Fig. 5 Values of stress and strain with respect to different corrosion degrees during accelerated corrosion test

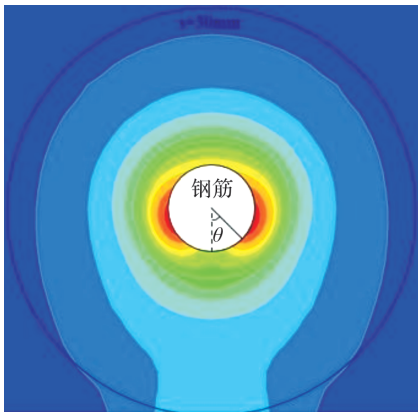
$$L(\theta, d) = \frac{n-1}{n} T(\theta, d) = \frac{(n-1)d\rho}{4i_{ave}} i(\theta, d) \quad (4)$$

$$L(\theta, d) = \frac{(n-1)d\rho}{4i_{ave}} \left[ i(\theta, d) + i\left(\theta - \frac{\pi}{2}, d\right) \right] \quad (5)$$

式(4)为钢筋位于中部位置锈层厚度的分布曲线、式(5)为钢筋位于角部位置锈层厚度的分布曲线。式中,  $i(\theta)$  为电流密度的分布函数。

## 2.4 模型结果

模型中混凝土尺寸为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。钢筋位于试件中轴位置, 钢筋直径  $16 \text{ mm}$ , 混凝土保护层厚度  $30 \text{ mm}$ 。根据试验数值, 钢筋表面平均电流密度取为  $300 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , 该通电电流密度能在不显著影响钢筋混凝土锈胀行为的情况下大大缩短试验所需时间<sup>[21]</sup>。根据公式(4)设置径向位移, 最终锈蚀率为  $0.270\%$ 。在混凝土未开裂前, 随着钢筋锈蚀率的增加, 其应变分布数值增大, 但是规律一致, 因此以钢锈蚀率为  $\rho=0.014\%$  时为例, 混凝土的环向应变云图如图6所示。分别提取距离钢筋表面的径向位移  $s$  在  $30 \text{ mm}$  内的混凝土环向应变在圆周方向上的分布, 绘于图7。

图6 开裂前( $\rho=0.014\%$ )混凝土环向应变云图Fig. 6 Strain of concrete in the case of  $\rho=0.014\%$ 

由图中可以看出, 随着  $s$  增大, 应变值总体呈减小趋势, 但在  $\theta=0$  附近即靠近保护层一侧, 混凝土应变随着  $s$  的增大先减小后在混凝土表面附近又增大, 在  $s=30 \text{ mm}$  处达到最大。在靠近钢筋表面附近, 相同  $s$  的圆周上应变的极大值点位于  $\theta=\pm 5\pi/12$  以及  $\theta=-\pi$  处; 在靠近混凝土表面附近, 相同  $s$  的圆周上应变的极大值点位于  $\theta=0$  处。图中的曲线分别是不同  $s$  下应变极大值点的连线。

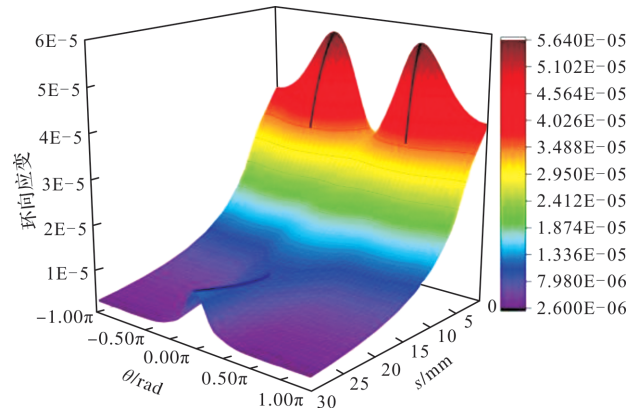
图7 开裂前( $\rho=0.014\%$ )距离钢筋表面  $30 \text{ mm}$  内的混凝土环向应变分布图Fig. 7 Circumferential strain distribution of concrete within  $30 \text{ mm}$  from the surface of steel bar in the case of  $\rho=0.014\%$ 

图8为当  $\rho=0.270\%$  时, 大于  $150$  微应变的应变云图, 根据极限拉应变准则判定开裂, 图8所示的应变位置即裂缝位置。可见, 混凝土的主要裂缝有3种: 竖直方向靠近保护层一侧的 L1 裂缝, 远离保护层的 L3 裂缝, 水平方向的 L2 裂缝, L1, L2, L3 裂缝所在角度分别为  $0, \pm 5\pi/12, -\pi$ 。图7中应变极大值点的连线位置与图8所示裂缝的位置相吻合。

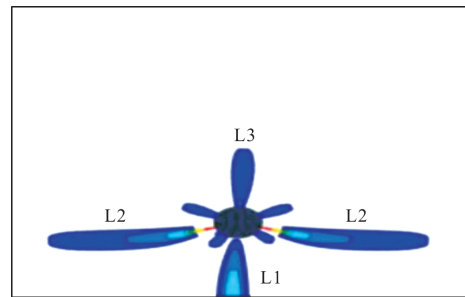


图8 混凝土裂缝开展图

Fig. 8 Propagation of corrosion-induced cracks of concrete

将不同锈蚀率下混凝土的应变云图绘于图9, 可见, 当  $\rho=0.027\%$  时, L2 裂缝从钢筋表面周围出现; 当  $\rho=0.051\%$  时, L2 裂缝从内向外延伸, L1 裂缝从保护层表面出现; 当  $\rho=0.065\%$  时, L1 裂缝已经贯穿保护层, L3 裂缝从钢筋表面周围出



现. 可以看出 L1 裂缝是由保护层表面开始开裂, 然后向混凝土内部扩展(裂缝开展方向记为表 3 中的外部-内部); L2 裂缝和 L3 裂缝则相反, 裂缝由钢筋表面向外侧扩展(裂缝开展方向记为表 3 中的内部-外部). 根据裂缝开展过程, 提取裂缝起裂和终裂位置单元的应变变化数据, 并根据极限拉应变准则, 得到裂缝的开裂临界锈蚀率, 总结其开裂模式如表 3 所示.

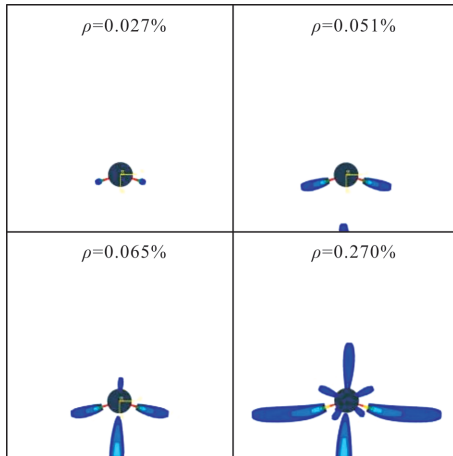


图 9 不同锈蚀率下的裂缝开展过程

Fig. 9 Propagation of corrosion-induced cracks of concrete under different corrosion rates

表 3 试件开裂模式

Tab. 3 Cracking mode of concrete

裂缝类型	裂缝位置/rad	裂缝开展方向	起裂锈蚀率/%	终裂锈蚀率/%
L1	0	外部-内部	0.051	0.054
L2	$\pm 5\pi/12$	内部-外部	0.017	/
L3	$-\pi$	内部-外部	0.062	/

## 2.5 试验验证

为了验证有限元模型, 采用了内置电极法通电加速试验模拟钢筋的非均匀锈蚀, 在靠近钢筋位置预置不锈钢丝, 在通电过程中, 电源的正极连接钢筋, 电源负极连接不锈钢丝, 可以通过改变钢丝和钢筋的间距改变钢筋锈层的分布, 该方法的通电效率更高.

混凝土试件的配比如表 4 所示. 水泥采用 P · O 42.5 水泥; 细骨料为河砂, 细度模数为 3.0; 粗骨料为破碎石灰岩, 5~16 mm 连续级配. 钢筋采用 HPB300、直径为 16 mm 的光圆钢筋, 不锈钢丝直径为 0.8 mm. 混凝土试件的尺寸为 150 mm × 150 mm × 75 mm, 混凝土试件的中部布置 1 根钢筋, 保护层厚度为 30 mm, 非均匀锈蚀的试块在钢筋正对保护层方向距离钢筋表面 8 mm 处预置不锈钢丝(图 10), 与有限元模拟中模型尺寸一致.

标准混凝土试块养护 28 d 后的抗压强度为 17.9 MPa. 试验装置由通电加速锈蚀系统和应变自动采集系统组成, 试件放置于室内(温度约为 20℃), 应变片位于试件底面, 如图 10 所示.

表 4 混凝土配合比(kg/m<sup>3</sup>)

Tab. 4 Mix proportion of concrete (kg/m<sup>3</sup>)

P · O 42.5 水泥	细骨料	粗骨料	水
375	750	1 125	200

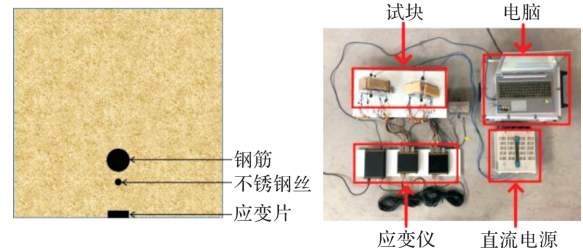


图 10 混凝土试件及试验装置图示

Fig. 10 Details of concrete specimen and test device

图 11 是应变片处混凝土应变值和有限元相应单元的预测曲线. 可见, 随着锈蚀率的增加, 应变值不断增加, 混凝土应变试验值与有限元理论值吻合良好. 基于本文所提出模型计算得到的混凝土保护层表面开裂临界锈蚀率为 0.051%, 试验值为 0.054%, 误差率为 6.9%, 吻合良好. 由此, 本文所提出的混凝土锈裂模型能够较好地计算在非均匀锈蚀过程中混凝土的应变及锈胀开裂时间.

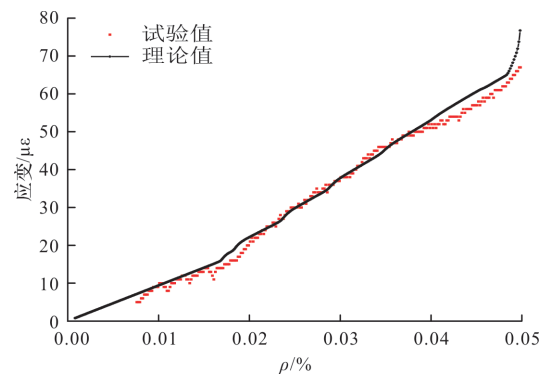


图 11 应变片测点试验值与有限元理论值比较

Fig. 11 Comparison of concrete strain between experiment results and numerical simulation

## 3 混凝土锈胀开裂模型影响因素分析

### 3.1 锈蚀方式的影响

为了探究锈蚀类型、钢筋直径、钢筋位置、保护层厚度对于混凝土开裂模式的影响, 将混凝土试件编号为: Z/D-U/N-d8-c20. 其中 Z/D 中的 Z 钢筋位于试件中轴位置、D 位于角部位置; U/

N: U 为均匀锈蚀、N 为非均匀锈蚀; d8: 钢筋直径 (8 mm, 12 mm, 16 mm, 24 mm, 32 mm); c20: 保护层厚度 (20 mm, 30mm, 40 mm, 50 mm).

针对锈蚀方式对于开裂模式的影响, 设置径向位移公式中的  $i(\theta, d) = i_{ave}$ , 最终锈蚀率为 0.270%, 得到 Z-U-d16-c30 试件的结果,  $\rho = 0.014\%$  时距离钢筋表面 30 mm 内混凝土环的应变分布如图 12 所示, 裂缝形态如图 13 所示, 开裂模式如表 5 所示.

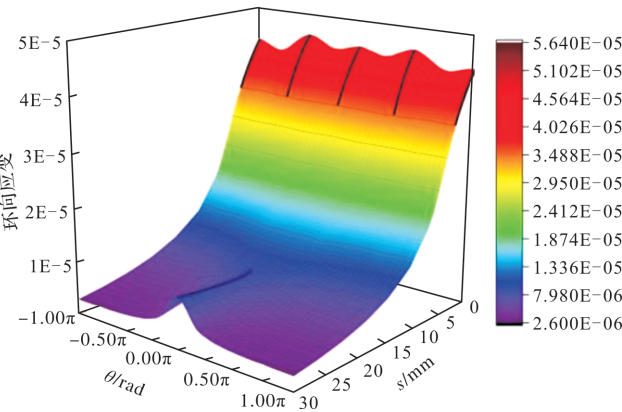


图 12 开裂前 ( $\rho=0.014\%$ ) 距离钢筋表面距离 30 mm 内的混凝土环向应变分布图

Fig. 12 Strain of concrete within 30 mm from the surface of steel bar in the case of  $\rho=0.014\%$

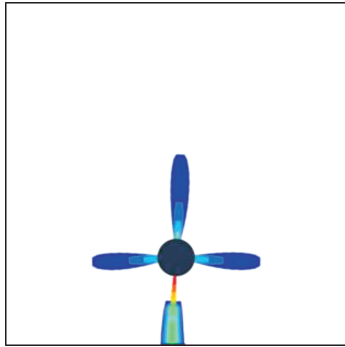


图 13 Z-U-d16-c30 试件的裂缝形态

Fig. 13 Corrosion-induced cracks of specimen Z-U-d16-c30

表 5 Z-U-d16-c30 试件的开裂模式

Tab. 5 Cracking mode of specimen Z-U-d16-c30

裂缝类型	裂缝位置/rad	裂缝开展方向	起裂锈蚀率/%	终裂锈蚀率/%
L1	0	内部-外部	0.036	0.051
L2	$-\pi/2$	内部-外部	0.026	/
L3	$-\pi$	内部-外部	0.034	/

如图 12 所示, 当  $s$  增大时, 应变的变化规律与非均匀锈蚀时一致, 在靠近钢筋表面附近, 应

变的极大值点连线位于  $\theta = \pm\pi/2$ 、 $\theta = -\pi$  以及  $\theta = 0$  处, 在靠近混凝土表面附近, 应变的极大值点连线位于  $\theta = 0$  处, 曲线与图 13 所示的裂缝位置相吻合.

如表 5 所示, 均匀锈蚀下 L1 裂缝是从钢筋表面先开裂, 延伸到保护层表面, 与非均匀锈蚀下相反. L1 裂缝的位置相同, 贯穿保护层的临界锈蚀率相差不大, 均匀锈蚀下裂缝延伸较慢, 非均匀锈蚀下裂缝从开始出现到贯穿保护层发展极快. 均匀锈蚀下 L2 裂缝所在角度为  $\pm\pi/2$ , 裂缝开展过程与非均匀锈蚀下一致, 但是非均匀锈蚀下 L2 裂缝开裂的更早. 均匀锈蚀下 L3 裂缝位置与开展过程与非均匀锈蚀下一致, 但是均匀锈蚀下 L3 裂缝开裂的更早.

### 3.2 钢筋位置的影响

为了探究锈蚀方式对于开裂模式的影响, 根据公式(5)设置径向位移, 最终锈蚀率为 0.540%, 得到 D-N-d16-c30 试件的结果,  $\rho=0.014\%$  时距离钢筋表面 30 mm 内混凝土环的应变分布如图 14 所示, 裂缝形态如图 15 所示, 开裂模式如表 6 所示.

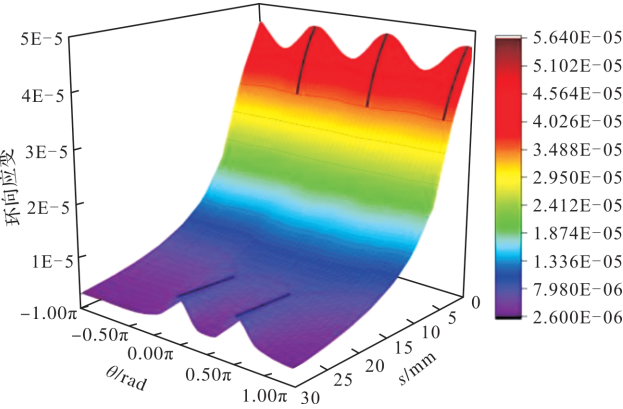


图 14 开裂前 ( $\rho=0.014\%$ ) 距离钢筋表面距离 30 mm 内的混凝土环向应变分布图

Fig. 14 Strain of concrete within 30 mm from the surface of steel bar in the case of  $\rho=0.014\%$

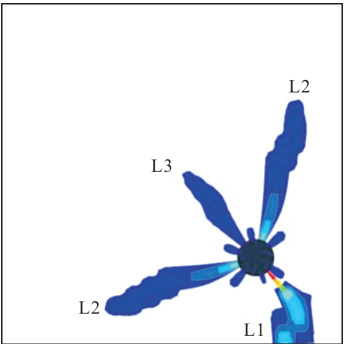


图 15 D-N-d16-c30 试件的裂缝形态

Fig. 15 Corrosion-induced cracks of specimen D-N-d16-c30

表 6 D-N-d16-c30 试件的开裂模式

Tab. 6 Cracking mode of specimen D-N-d16-c30

裂缝类型	裂缝位置/rad	裂缝开展方向	起裂锈蚀率/%	终裂锈蚀率/%
L1	$\pi/4$	内部-外部	0.023	0.060
L2	$-5\pi/12, 11\pi/12$	内部-外部	0.025	/
L3	$3\pi/4$	内部-外部	0.130	/

如图 14 所示, 当  $s$  增大时, 应变的变化规律与钢筋位于中部位置非均匀锈蚀时一致, 在靠近钢筋表面附近, 应变的极大值点连线位于  $\theta = -5\pi/12$ 、 $\theta = \pi/4$  以及  $\theta = 11\pi/12$  处, 在靠近混凝土表面附近, 应变的极大值点连线位于  $\theta = 0$  以及  $\theta = \pi/2$  处, 曲线位置与图 15 所示的裂缝位置相吻合。

对比图 7、图 12、图 14 的环向应变分布图, 发现不同试块下钢筋周围混凝土的应变在径向上的分布规律是一致的, 即随着跟钢筋表面径向距离的增大, 环向应变大体呈现减小趋势, 但是靠近保护层一侧的环向应变在减少到一定程度后在混凝土表面附近又逐渐增大。然而, 其在圆周方向上的分布规律是不完一致的, 在靠近钢筋表面的圆周上, 应变极大值点的连线位置各不相同; 但在靠近混凝土表面的圆周上, 应变极大值点的连线位置均位于钢筋和混凝土表面最小距离的路径上。这些极大值点的径向连线的位置就是混凝土开裂后裂缝出现的位置, 因此也说明了不同试块下其裂缝位置也是不同的。

如图 14 和表 6 所示, 钢筋位于角部位置时, 3 条主裂缝关于  $\theta = \pi/4$  轴对称, 且起锈时间提前了, 这是因为位于角部时, 径向位移是两个高斯函数的叠加, 最大径向位移位于  $\theta = \pi/4$  处。钢筋位于角部位置时 L1 裂缝贯穿保护层的临界锈蚀率大于中部位置, 但是在通电锈蚀过程中, 钢筋位于角部位置时锈蚀率增加速度是中部位置的 2 倍, 钢筋位于中部位置时裂缝的开裂时间是远远早于角部位置。

### 3.3 钢筋直径的影响

为了探究锈蚀方式对于开裂模式的影响, 根据公式(5)设置径向位移, 最终锈蚀率为 0.27%, 最终得到 Z-N-d(8、12、16、24、32)-c30 试件的结果, 开裂模式列于表 7, 裂缝开裂临界锈蚀率与直径的关系如图 16 所示。

如表 7 所示, 钢筋直径的增加, L1 裂缝都是位于  $\theta = 0$  处, 裂缝都是从钢筋表面开裂延伸到保护层表面(除  $d = 8$  时, 钢筋表面先开裂, 保护层

表面再开裂, 然后两个方向延伸贯穿保护层)。L2 裂缝的位置所在角度随着直径的增加而越靠近  $\theta = 0$  轴, 裂缝开展都是由内部向外部开展。L3 裂缝都是位于  $\theta = -\pi$  处, 裂缝开展都是由内部向外部开展。如图 16 所示, L1 裂缝、L2 裂缝的开裂临界锈蚀率随着直径的增加而降低, L3 裂缝的开裂临界锈蚀率随着直径的增加而增加。这是由于根据径向位移公式  $L(\theta, d)$  显示, 钢筋直径越大, 位移非均匀部分越大, 均匀部分越小, 最大径向位移越大, 分布越集中。

表 7 Z-N-d(8、12、16、24、32)-c30 试件的开裂模式

Tab. 7 Cracking mode of specimens Z-N-d(8、12、16、24、32)-c30

裂缝类型	$d/\text{mm}$	裂缝位置/rad	裂缝开展方向	起裂锈蚀率/%	终裂锈蚀率/%
L1	8	0	内部-外部-贯穿	外: 0.150 内: 0.092	0.151
	12		外部-内部	0.086	0.088
	16			0.051	0.054
	24			0.027	0.035
	32			0.016	0.034
L2	8	$\pm 17\pi/36$	内部-外部	0.029	/
	12	$\pm 11\pi/24$		0.022	/
	16	$\pm 5\pi/12$		0.017	/
	24	$\pm \pi/3$		0.013	/
	32	$\pm \pi/4$		0.009	/
L3	8	$-\pi$	内部-外部	0.057	/
	12			0.059	/
	16			0.062	/
	24			0.070	/
	32			0.084	/

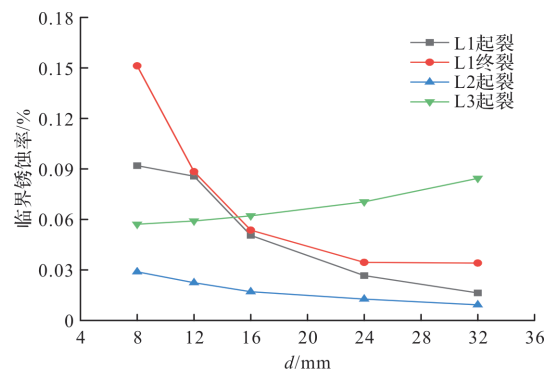


图 16 临界锈蚀率与钢筋直径的关系图

Fig. 16 Relationship between critical corrosion rate and steel diameter

### 3.4 保护层厚度的影响

为了探究锈蚀方式对于开裂模式的影响, 根据公式(5)设置径向位移, 最终锈蚀率为 0.27%, 最后得到 Z-N-d16-c(20、30、40、50)试件的结果,

开裂模式如表 8 所示, 裂缝开裂临界锈蚀率与直径的关系如图 17 所示。

表 8 Z-N-d16-c(20、30、40、50)试件的开裂模式

Tab. 8 Cracking mode of specimens  
Z-N-d16-c(20、30、40、50)

裂缝类型	c/mm	裂缝位置/rad	裂缝开展方向	起裂锈蚀率/%	终裂锈蚀率/%
L1	20	0	外部-内部	0.035	0.036
	30			0.051	0.054
	40			0.067	0.072
	50			0.092	0.098
	60			/	/
L2	20	$\pm 5\pi/12$	内部-外部	0.017	/
	30			0.017	/
	40			0.017	/
	50			0.017	/
	60			0.018	0.096
L3	20	$-\pi$	内部-外部	0.058	/
	30			0.062	/
	40			0.068	/
	50			0.080	/
	60			0.093	/

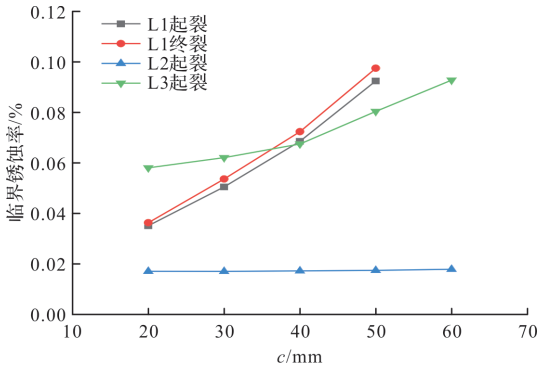


图 17 临界锈蚀率与保护层厚度的关系图

Fig. 17 Relationship between critical corrosion rate and thickness of concrete cover

如表 8 所示, 保护层厚度的增加对于裂缝位置、裂缝开展过程没有影响, 当保护层厚度大于 60 mm 时, L1 裂缝将不再开裂(在表中由“/”表示), L2 裂缝贯穿了混凝土水平方向。由图 17 可见, 随着保护层厚度的增加, L1 裂缝、L3 裂缝的开裂临界锈蚀率增加, 保护层厚度对于 L2 裂缝的开裂临界锈蚀率影响不大。这是因为钢筋直径一定时, 钢筋径向位移相同, 保护层厚度越大, 对 L1 裂缝的发展抑制越强, 而 L2 裂缝方向的混凝土厚度不变。

4 结论

本文提出了一个模拟内置电极法加速非均匀

锈蚀过程中钢筋表面电流分布的有限元模型以及钢筋混凝土锈胀开裂的有限元模型, 并通过锈蚀试验进行了验证。基于本研究, 可以得到以下结论:

(1)钢筋锈蚀产物的锈层分布与电流密度分布一致。随着钢筋直径的增加, 钢筋锈蚀产物的锈层在钢筋表面的分布越集中, 非均匀部分增加, 均匀部分减少, 最大锈层厚度增加。基于钢筋非均匀加速锈蚀模型的保护层胀裂临界锈蚀率计算值与试验值误差小于 10%, 表明根据钢筋表面电流分布的有限元模型能对非均匀加速锈蚀下钢筋混凝土锈胀开裂行为进行较为准确的预测;

(2)在钢筋锈蚀过程中, 混凝土未开裂时, 不同试块中钢筋周围混凝土的应变场在径向上的分布规律一致; 在圆周方向上的分布规律不一致。混凝土开裂前应变场的分布规律与开裂后裂缝的位置和发展规律具有相关性;

(3)均匀与非均匀锈蚀, 保护层裂缝开展方向相反; 钢筋位于试块中部位置保护层一侧裂缝的开裂临界锈蚀率大于角部位置;

(4)非均匀锈蚀时, 保护层一侧裂缝的开裂临界锈蚀率随着钢筋直径的增大而减小, 随着保护层厚度的增大而增大; 水平方向裂缝的开裂临界锈蚀率随着钢筋直径的增大而减小; 保护层厚度的变化并不影响所有裂缝的位置、开展方向以及水平方向裂缝的开裂临界锈蚀率。

参考文献 References

[1] DONG Zheng, GU Xianglin, JIN Zhihao, et al. Experimental and numerical investigations on the rate-limiting step for microcell corrosion of reinforcing steel in concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(1): 04021407.

[2] 董征, 顾祥林, 张伟平, 等. 交叉钢筋的宏观锈蚀及其对钢筋混凝土构件抗力的影响[J]. 建筑结构学报, 2022, 40(1), 105-112.

DONG Zheng, GU Xianglin, ZHANG Weiping, et al. Macro-cell corrosion between crossed steel bars and its influence on capacities of reinforced concrete structural members[J]. Journal of Building Structures, 2022, 40(1), 105-112.

[3] 王治, 金贤玉, 付传清, 等. 基于损伤的钢筋混凝土锈胀开裂模型[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(9): 115-122.

WANG Zhi, JIN Xianyu, FU Chuanqing, et al. Concrete cracking model for rust expansion based on damage[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(9):



- 115-122.
- [4] 杜修力,张仁波,金浏. 钢筋非均匀锈蚀引发的混凝土保护层开裂细观数值研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(1): 73-80.
- DU Xiuli, ZHANG Renbo, JIN Liu. Meso-scale numerical investigation on the crack process of concrete cover induced by rebar non-uniform corrosion [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(1): 73-80.
- [5] CHEN Junyu, ZHANG Weiping, Gu Xianglin. Modeling time-dependent circumferential non-uniform corrosion of steel bars in concrete considering corrosion-induced cracking effects[J]. Engineering Structures, 2019, 201: 109766.
- [6] FU Chuanqing, JIN Nanguo, YE Hailong, et al. Corrosion characteristics of a 4-year naturally corroded reinforced concrete beam with load-induced transverse cracks[J]. Corrosion Science, 2017, 117: 11-13.
- [7] ZHAO Yuxi, ZHANG Xiaowen, DING Hangjie, et al. Non-uniform distribution of a corrosion layer at a steel/concrete interface described by a Gaussian model [J]. Corrosion Science, 2016, 112: 1-12.
- [8] YE Hailong, FU Chuanqing, JIN Nanguo, et al. Performance of reinforced concrete beams corroded under sustained service loads: A comparative study of two accelerated corrosion techniques[J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 286-297.
- [9] QIAO Di, NAKAMURA Hikaru, YAMAMOTO, Yoshihito et al. Crack patterns of concrete with a single rebar subjected to non-uniform and localized corrosion [J]. Construction and Building Materials, 2016, 116: 366-377.
- [10] 赵凯龙,金贤玉,金南国,等. 箍筋对主筋保护层锈胀开裂的影响-模型与试验[J]. 混凝土, 2017(11): 5-9.
- ZHAO Kailong, JIN Xianyu, JIN Nanguo, et al. Influence of stirrups on corrosion expansion of main reinforcement protection layer-model and experiment [J]. Concrete, 2017(11): 5-9.
- [11] 付传清,何家豪,金贤玉,等. 带横向荷载裂缝钢筋混凝土梁的钢筋锈蚀形态研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 123-131.
- FU Chuanqing, HE Jiahao, JIN Xianyu, et al. Corrosion pattern of rebar in RC beam with loading transverse cracks[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1): 123-131.
- [12] CHEN Jinwei, FU, Chuanqing YE Hailong, et al. Corrosion of steel embedded in mortar and concrete under different electrolytic accelerated corrosion methods [J]. Construction and Building Materials, 2020, 241: 1-17.
- [13] FU Chuanqing, JIN Nanguo, YE Hailong, et al. Non-uniform corrosion of steel in mortar induced by impressed current method: An experimental and numerical investigation[J]. Construction and Building Materials, 2018, 183: 429-438.
- [14] CUI Zhen, Alice Alipour. Concrete cover cracking and service life prediction of reinforced concrete structures in corrosive environments[J]. Construction and Building Materials, 2018, 159: 652-671.
- [15] Santiago Guzmán, Jaime C. Gálvez. Modelling of concrete cover cracking due to non-uniform corrosion of reinforcing steel[J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 1063-1071.
- [16] YANG Shangtong, LI Kefei, LI Chunqing. Analytical model for non-uniform corrosion-induced concrete cracking[J]. Magazine of Concrete Research. 2018, 70(1): 1-10.
- [17] XI Xun, YANG Shangtong. Time to surface cracking and crack width of reinforced concrete structures under corrosion of multiple rebars [J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 114-125.
- [18] CAO Chong, Moe M S Cheung. Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC structures[J]. Construction and Building Materials, 2014, 51: 75-81.
- [19] YE Hailong, JIN Nanguo, FU Chuanqing, et al. Rust distribution and corrosion-induced cracking patterns of corner-located rebar in concrete cover[J]. Construction and Building Materials, 2017, 156: 684-691.
- [20] 唐国斌,项贻强. 钢筋混凝土梁开裂面的力学性能和数值模拟[J]. 水利学报, 2015, 46(1): 42-50.
- TANG Guobin, XIANG Yiqiang. Mechanical properties and numerical simulation of crack interface in reinforced concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(1): 42-50.
- [21] ZHANG Weiping, CHEN Junyu, LUO Xujiang. Effects of impressed current density on corrosion induced cracking of concrete cover[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 213-223.

(编辑 郑晓龙 沈 波)