

角区钢筋非均匀锈蚀引发混凝土保护层开裂全过程研究

张菊辉, 熊 杰

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 综合考虑氯离子的扩散过程、钢筋锈蚀的质量守恒以及钢筋锈蚀引起的混凝土保护层开裂力学过程, 以角区钢筋为研究对象, 在钢筋周围施加随时间变化的非均匀径向位移, 对氯离子侵蚀引起的混凝土保护层开裂全过程进行数值分析, 得出了裂缝发展的分布规律、裂缝出现以及裂缝贯穿保护层所需的时间。并与实验结果进行对比, 验证了模型的准确性。探讨了钢筋直径、混凝土保护层厚度以及混凝土强度的变化对混凝土保护层开裂行为及开裂时间的影响。结果表明, 混凝土保护层厚度对开裂全过程影响最大, 其次是钢筋直径, 混凝土强度对其影响较小。

关键词: 角区钢筋; 非均匀锈蚀; 混凝土保护层; 裂缝发展; 时间

中图分类号: TU 375 **文献标志码:** A

Concrete cover cracking behaviors induced by the non-uniform corrosion of corner-located rebars

ZHANG Juhui, XIONG Jie

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Considering the diffusion process of chloride ion, the mass conservation of steel corrosion and the concrete cover cracking mechanics, taking the corner-located rebar as a research object, the whole process of concrete cover cracking caused by chloride attack was numerically analyzed, by imposing a time-variant non-uniform radial displacement around concrete/steel interface. The distribution of crack development, and the time required for crack occurrence and for cracks to penetrate the concrete cover were obtained. The simulation results are in good agreement with the experimental results in an existing literature, and the rationality of the method was verified. The influences of rebar diameter, concrete cover depth and concrete strength on the concrete cover cracking behaviors and cracking time were discussed. The results show that the concrete cover depth has the greatest influence on the whole cracking process, followed by the rebar diameter. The concrete strength has little effect on the whole cracking process.

Keywords: corner-located rebar; non-uniform corrosion; concrete cover; cracking development; time

钢筋锈蚀是影响钢筋混凝土结构耐久性的一个重要因素。钢筋发生锈蚀后的锈蚀产物体积是其所消耗铁体积的 2~4 倍^[1], 锈蚀产物会削弱钢筋与混凝土之间的粘结性能, 并减小钢筋截面面积, 引起混凝土保护层开裂, 从而严重影响混凝土结构的耐久性。

为了研究钢筋锈蚀产物对钢筋混凝土保护层的影响, 早期研究者^[2-3]多采用通恒定直流电的方法加速混凝土内钢筋锈蚀, 其实验方法的基本理论依据来自于钢筋表面均匀锈蚀分布的基本假定。但是, 在自然环境下, 氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀更倾向于点蚀。袁迎曙等^[4]和 Zhao 等^[5]基于对锈蚀层细观构造的实验研究, 分别提出了腐蚀产物呈半椭圆形分布和高斯分布的非均匀分布模型。同时, 众多学者^[6-11]探讨了钢筋的非均匀锈蚀对保护层开裂行为的影响, 结果显示, 非均匀腐蚀下钢筋与混凝土边界会产生更高更集中的膨胀应力, 进而加速混凝土保护层的开裂进程。

然而上述研究均针对中部钢筋开展, 处于中部的钢筋其氯离子的渗透通常以一维扩散进行。而角区钢筋不仅在受力上容易应力集中, 而且外界有害物质到达钢筋表面的途径往往有 2 个方向。Ye 等^[12]基于实验方法, 探讨了角区钢筋两侧不同保护层厚度对钢筋表面的腐蚀产物分布形态及保护层开裂发展的影响。Du 等^[13]通过建立混凝土细观随机骨料模型, 对中部和角区的钢筋非均匀锈蚀引发的混凝土保护层开裂行为进行了数值模拟, 结果显示, 角区钢筋相比中部钢筋引起混凝土保护层开裂要早。但该模型没有建立保护层开裂状态与锈蚀时间的对应关系。本文综合考虑了氯离子的扩散过程、钢筋锈蚀的质量守恒以及钢筋锈蚀引起的混凝土保护层开裂力学过程, 以角区钢筋为研究对象, 对氯离子侵蚀引起的钢筋保护层开裂全过程进行了分析, 得出了裂缝发展的分布规律、裂缝出现以及裂缝贯穿保护层所需的时间, 并探讨了钢筋直径、混凝土保护层厚度和混凝土强度等参数对混凝土保护层开裂行为及开裂时间的影响。

1 模型概述

1.1 几何模型

本文将钢筋锈蚀导致混凝土保护层开裂的力学问题视为平面应变问题, 其力学分析过程利用

有限元软件 ABAQUS^[14]实现。采用沿混凝土/钢筋边界施加径向位移的方式来模拟钢筋锈胀, 角区钢筋用一个虚拟的圆来表示, 如图 1 所示, 其中, c_1 , c_2 分别为左侧和上侧的保护层厚度, D 为钢筋直径。Zhou 等^[15]的研究表明, 当 $a \geq 3\max(c_1, c_2)$ 时, 可忽略边界位置对于计算结果的影响, 本文中宽度 L 的取值依此确定。 a 为钢筋中心距底边界的距离。由于模型右边界和底边界与实际结构相连, 因此, 对模型右边界和底边界的水平和竖向位移进行约束。采用四节点等参单元进行模拟。

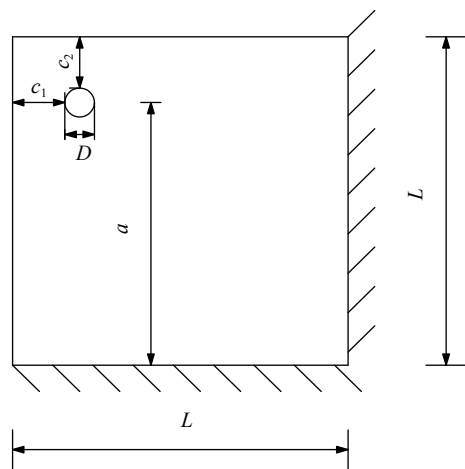


图 1 模型结构尺寸

Fig.1 Physical model

1.2 材料模型

利用塑性损伤模型模拟混凝土材料的拉伸开裂和受压破碎等力学现象。该模型采用变量 ε_t^{pl} (拉伸等效塑性应变) 和 ε_c^{pl} (压缩等效塑性应变) 来控制屈服面或破坏面的演化, 采用变量 ε_t^{ck} (开裂应变) 和 ε_c^{in} (非弹性应变) 来控制钢筋与混凝土的界面效应 (如钢筋锁固和粘结滑移行为)。以 C30 混凝土为例, 给出了混凝土的压缩 (拉伸) 应力与非弹性 (开裂) 应变的关系, 以及受压 (受拉) 损伤因子与非弹性 (开裂) 应变的关系, 如图 2 所示。

1.3 锈蚀模型

1.3.1 腐蚀开始阶段

腐蚀开始阶段指的是氯离子不断侵蚀累积, 直至达到引发钢筋脱钝临界浓度的过程 (当其含量达到某阈值后钢筋开始产生锈蚀^[16])。氯离子扩散过程可以由菲克第二定律描述:

$$\frac{\partial C_{Cl}}{\partial t} = \frac{\partial C_{Cl}}{\partial S} \left(D_{Cl} \frac{\partial C_{Cl}}{\partial S} \right) \quad (1)$$

式中: C_{Cl} 为氯离子质量浓度; D_{Cl} 为氯离子扩散系数; t 表示扩散时间; S 为钢筋表面任意一点到保护层的距离。

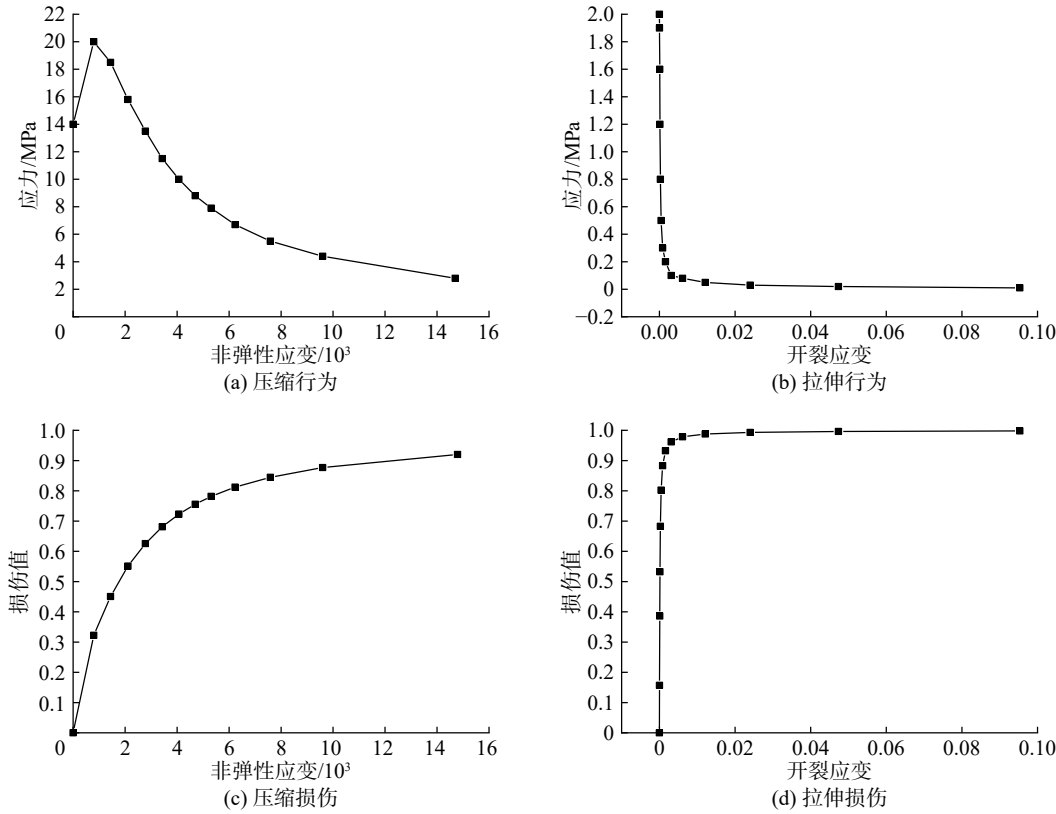


图2 C30混凝土的塑性损伤本构

Fig.2 Plastic damage constitutive relationship of C30 concrete

氯离子的扩散系数 D_{Cl} 随着外界环境(如温度、湿度、水灰比等)变化而变化,为了简化计算,采用 Stewart 等^[17]提出的公式:

$$D_{Cl} = 10^{-14+4.66w/c} \tag{2}$$

式中, w/c 为水灰比。

1.3.2 腐蚀扩展阶段

腐蚀扩展阶段是指腐蚀物开始生成并不断累积形成锈胀效应,导致混凝土保护层开裂剥落、钢筋有效面积削减以及混凝土与钢筋界面粘结失效等性能退化过程。在本研究中,基于法拉第定律,考虑钢筋锈蚀,铁质量的消耗随时间的关系与电流密度有关,因此,锈层径向锈蚀量^[18] x_p (mm) 可表示为

$$x_p(\theta, t) = \frac{\int_{t_i}^t i_{corr}(\theta, t) dt \cdot A}{Z_{Fe} F \rho_s} \tag{3}$$

式中: θ 为圆周角; $A=55.85$ g/mol 为铁原子的原子量; Z_{Fe} 为阳极反应铁的化合价变化, $Z_{Fe}=2$; i_{corr} 为电流密度; t_i 为腐蚀开始时间; F 为法拉第常数,取值为 96.485 C/mol; ρ_s 为铁的密度,取值为 7 800 kg/m³。

电流密度 i_{corr} 的表达参考 Weyers^[19]提出的建议公式:

$$i_{corr} = 0.926 \exp \left[7.98 + 0.7771 \ln(1.69C_t) - \frac{3006}{T} - 0.000116R_c + 2.24t^{-0.215} \right] \tag{4}$$

式中: $R_c = \exp[8.03 - 0.549 \ln(1 + 1.69C_t)]$; C_t 为某一时刻的氯离子浓度; T 为温度, K; t 为腐蚀时间, a。

忽略腐蚀产物和铁的压缩变形,可以得到任意位置的径向腐蚀位移(如图 3(a)所示)。

$$u_r = (r_v - 1)x_p(\theta, t) \tag{5}$$

式中: r_v 为铁锈膨胀系数,取为 2.96^[16]。

由于钢筋与混凝土之间存在孔隙层^[19], 孔隙层厚度 $d_0=12.5$ μ m, 因此,最终锈胀位移

$$d_s = u_r - d_0 \tag{6}$$

图 3(d) 给出了角区钢筋的锈胀位移分布图。对于角区钢筋,氯离子通常呈二维扩散状态。为了说明角区钢筋锈胀位移的施加,可以将图 3(d) 的角区钢筋的实际锈胀位移,理解为角区 2 个方向(图(3b)与图(3c))的锈胀位移的线性叠加。

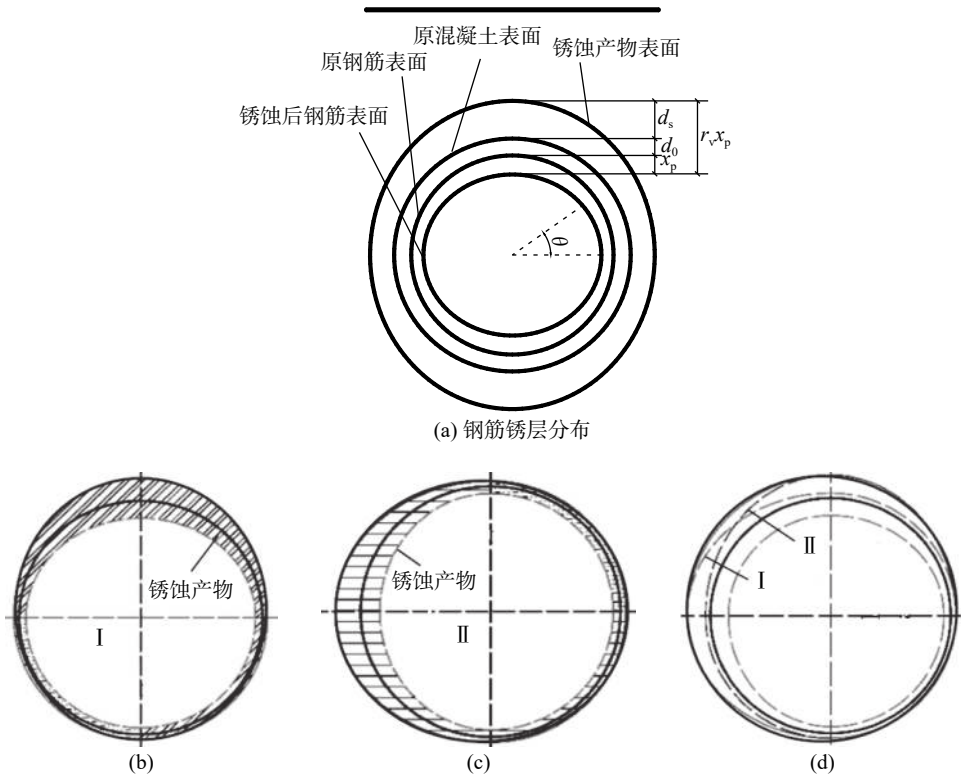


图 3 锈胀位移

Fig.3 Rust expansion displacement

2 模型验证

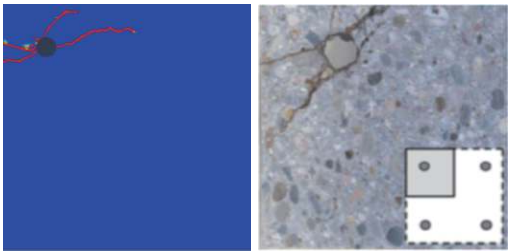
2.1 开裂模式验证

采用 Fisher 实验^[20]对开裂模式进行验证。该实验通过控制电位极化对钢筋施加电流来模拟自然腐蚀电流，通过向保护层表面喷洒氯化物溶液来模拟氯离子的渗透过程。图 4(a)给出了混凝土保护层开裂模式与该实验所观察的破坏模式对比，从图 4 可见，模拟结果与实验结果大致吻合。并将本文基于塑性损伤模型得到的模拟结果与金浏等^[21]基于混凝土细观模型得到的数值结果进行对比，如图 4(b)所示，可以看出，两种方法下的数值结果基本吻合，这证明了本文数值模拟方法的可靠性与合理性。

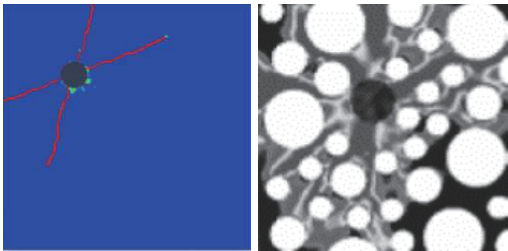
2.2 开裂时间对比

为了确认该模型在预测保护层开裂时间上的可信度，利用文献^[22]中的实验进行验证。该实验将试件浸泡在一定浓度的氯化钠溶液中，并对角区钢筋通直流电加速钢筋锈蚀来缩短实验周期。本文选取中间截面进行对比，其原因是数值模型为二维模型(即忽略沿钢筋长度方向的影响)。图 5(a)为数值模型得到的裂缝发展模式，与图 5(b)

的实验试件裂缝发展模式基本相同。VC，LC，IC 分别为裂缝。模拟结果显示，钢筋上表面首先出现竖直裂缝 VC，大概 9 d 裂缝到达保护层顶部(实验观测结果为 11 d)；7 d 开始出现左侧水平裂缝 LC，并且其发展非常缓慢，这与实验观测裂缝发展规律类似。



(a) $c_1=c_2=20\text{ mm}$, $d=12\text{ mm}$



(b) $c_1=c_2=35\text{ mm}$, $d=16\text{ mm}$

图 4 开裂模式对比

Fig. 4 Comparison of cracking modes

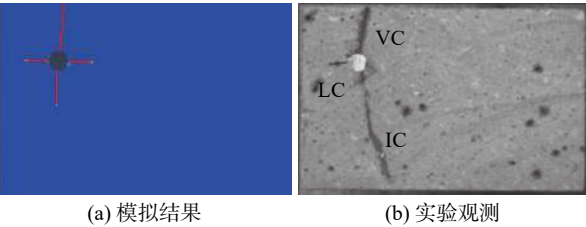


图 5 开裂时间对比

Fig. 5 Comparison of cracking time

3 算 例

以保护层厚度 $c_1=c_2=35\text{ mm}$ ，钢筋直径 $D=20\text{ mm}$ 的 C30 混凝土模型(即参考模型 L_0)为例，对角区钢筋在氯盐侵蚀引起的钢筋非均匀锈蚀下的混凝土保护层开裂全过程进行分析。表 1 给出了相关设计参数。图 6 给出了不同时间下的角区钢筋锈胀位移分布。从图 6 可以看出，由于角区钢筋的二维扩散，角度为 135° 方向的锈胀位移最大。图 7 给出了角区钢筋圆周上不同点的腐蚀开始时间，其中， 135° 方向的腐蚀开始时间最短，仅为 1.413 a ， 315° 方向腐蚀开始时间最长，为 2.66 a 。

表 1 模型设计参数

Tab.1 Model parameters

参 数	数 值
保护层厚度 $c_1/\text{mm}, c_2/\text{mm}$	35, 35
钢筋直径 D/mm	20
L/mm	150 ^[21]
临界氯离子质量浓度 $C_c/(\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	1.57 ^[16]
保护层表面氯离子质量浓度 $C_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	5.76 ^[16]
水灰比 w/c	0.5

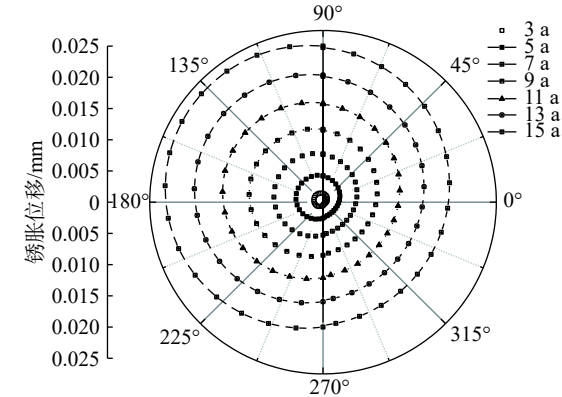


图 6 锈胀位移

Fig.6 Rust expansion displacements

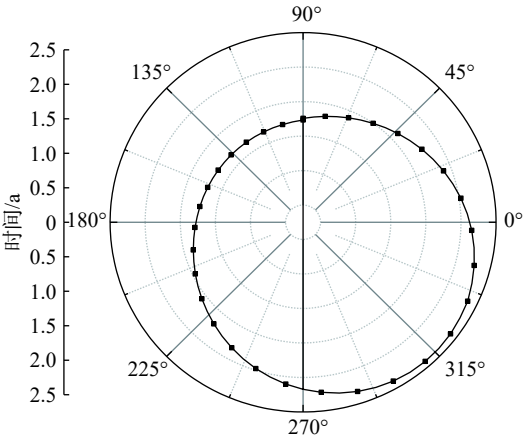


图 7 腐蚀开始时间

Fig. 7 Corrosion initiation time

图 8 以拉伸损伤作为开裂指标给出了角区钢筋因非均匀锈蚀引发的混凝土保护层开裂全过程。可以看出，当 $t_{1s}=t_{2s}=4.3\text{ a}$ 时，在钢筋/混凝土边界，几乎同时产生 1, 2 号内部裂纹(图 8(a)所示)；随着锈蚀产物的不断增加，1, 2 号裂纹向保护层方向扩展；当 $t_{3s}=6.1\text{ a}$ 时，在钢筋/混凝土边界 2 号裂纹右侧开始出现 3 号裂纹(图 8(b)所示)；当 $t_{4s}=8.4\text{ a}$ 时，在钢筋下侧开始出现 4 号裂纹(如图 8(c)所示)；随着 1, 2 号裂纹从内向外不断扩展，最终当时间 $t_{2f}=9.6\text{ a}$ 与 $t_{1f}=11.2\text{ a}$ 时，2 号裂纹和 1 号裂纹分别到达混凝土保护层表面(如图 8(d)和 8(e)所示)。且从最终的开裂模式来看，由于氯离子的二维扩散导致的膨胀位移沿对角线方向(图 7 所示的 135°)对称分布，开裂模式也形成类似的沿对角线方向对称趋势。时间参数如表 2 所示。

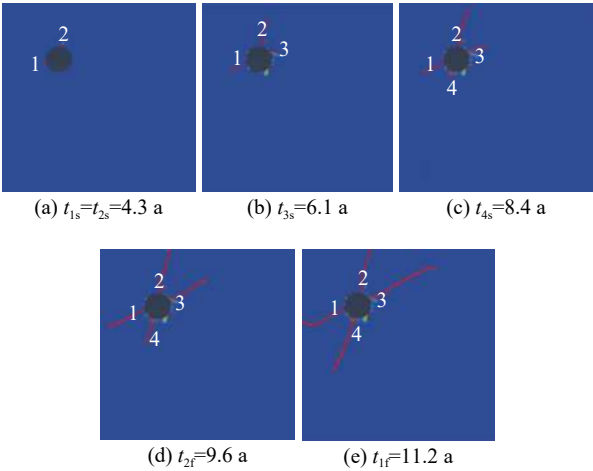


图 8 混凝土开裂全过程

Fig.8 Concrete cover cracking process

图 9(a)描述了 1 号裂纹的最大主应力随时间的变化图。1 号裂纹由 58 个单元组成，从钢筋/混

表 2 时间参数定义
Tab.2 Time parameters

参数	含义	时间/a
t_{1s}	1 号裂纹在钢筋/混凝土边界出现时刻	4.30
t_{1r}	1 号裂纹到达混凝土表面时刻	11.20
t_{2s}	2 号裂纹在钢筋/混凝土边界出现时刻	4.30
t_{2r}	2 号裂纹到达混凝土表面时刻	9.60
t_{3s}	3 号裂纹在钢筋/混凝土边界出现时刻	6.10
t_{4s}	4 号裂纹在钢筋/混凝土边界出现时刻	8.40

凝土边界开始向外逐渐编号(1~58 编号), 从图中可以看出, t_{1s} =4.3 a 时, 1 号单元的主应力最大,

达到 2.01 MPa(即 C30 混凝土抗拉强度), 随着裂缝的发展, 最大主应力出现的位置逐步向外推进。当 t_{1r} =11.2 a 时, 58 号单元的主应力最大, 裂缝到达混凝土表面。图 9(b)描述的是 2 号竖向裂纹单元的主应力随时间的变化图, 裂缝由 57 个单元构成(1~57 编号)。当 t_{2s} =4.3 a 时, 1 号单元主应力达到极限抗拉强度, 预示着正处在开裂状态, 当 t_{2r} =9.6 a 时, 57 号单元也类似。从图 9(b)还可以看出, 在 t =4.3~9.6 a 之间, 最大主应力位置随着时间的增加从 1 号单元位置移到了 57 号单元位置, 这也进一步证明了裂缝开展方向是从内部向外部扩展的, 并且与图 8(a)~8(d)用拉伸损伤指标判断看到的结果一致。

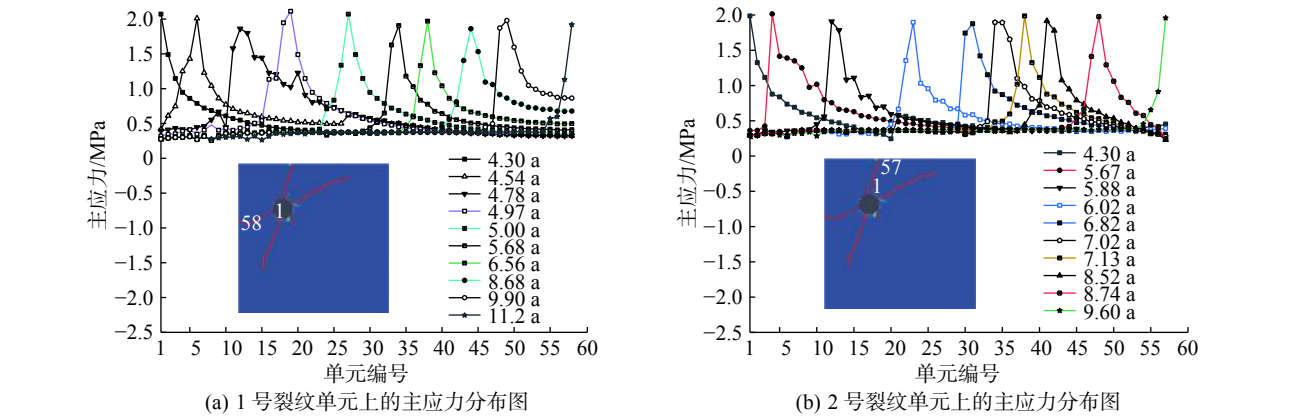


图 9 主应力分布图
Fig.9 Principal stress distribution

4 影响因素分析

由于混凝土锈胀开裂受到几何参数和材料参数的影响, 本文以参考模型 L_0 为基础, 建立了

4 组对比模型(如表 3 所示), 分别对两侧保护层厚度 c_1 与 c_2 , 钢筋直径 D 以及混凝土立方体抗压强度 $f_{cu,k}$ 进行参数分析。其中, C 组主要研究两侧保护层厚度的不同对角区钢筋开裂锈蚀的影响。

表 3 模型分组信息
Tab.3 Model group information

组别 A	c_1 - c_2 - D - L /mm	组别 B	c_1 - c_2 - D - L /mm	组别 C	c_1 - c_2 - D - L /mm	组别 D	$f_{cu,k}(c_1$ - c_2 - D - $L)/(N\cdot mm^{-2})(mm)$
A1	35-35-16-150	B1	20-20-20-150	C1	10-10-10-150	L_0	30(35-35-20-150)
A2	35-35-18-150	L_0	35-35-20-150	C2	10-15-10-150	D1	35(35-35-20-150)
L_0	35-35-20-150	B2	40-40-20-250	C3	10-20-10-150	D2	45(35-35-20-150)
A3	35-35-22-150	B3	50-50-20-250	C4	10-25-10-150	D3	50(35-35-20-150)

4.1 钢筋直径的影响

图 10 给出了不同钢筋直径下, 各模型在 15 a 时的混凝土保护层开裂图。可以看出, 在保护层厚度不变的情况下, 裂缝路径主要沿距混凝土保护层最近的两侧扩展, 钢筋直径越大, 裂缝出现和到达

混凝土表面的时间越早。图 11(a)的开裂时间对比结果印证了这点, 从图中可以看出, 随着钢筋直径的增加, 两侧裂纹出现以及裂纹到达混凝土表面的时间呈线性递减。因此, 从耐久性角度来看, 在其他条件相同的情况下, 最好选取直径较小的钢筋。

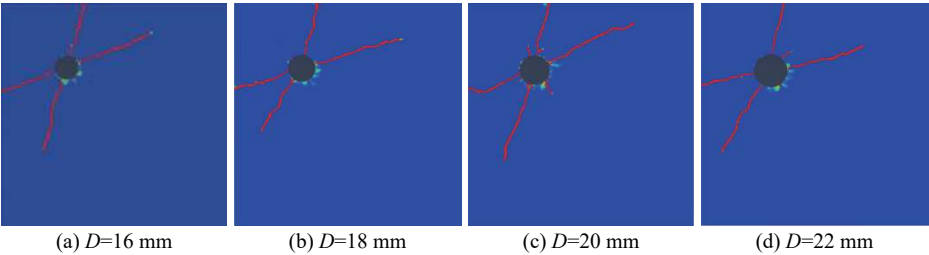


图 10 不同钢筋直径下的裂缝分布图($t=15\text{ a}$)

Fig.10 Cracking distribution under different rebar diameters at 15 years

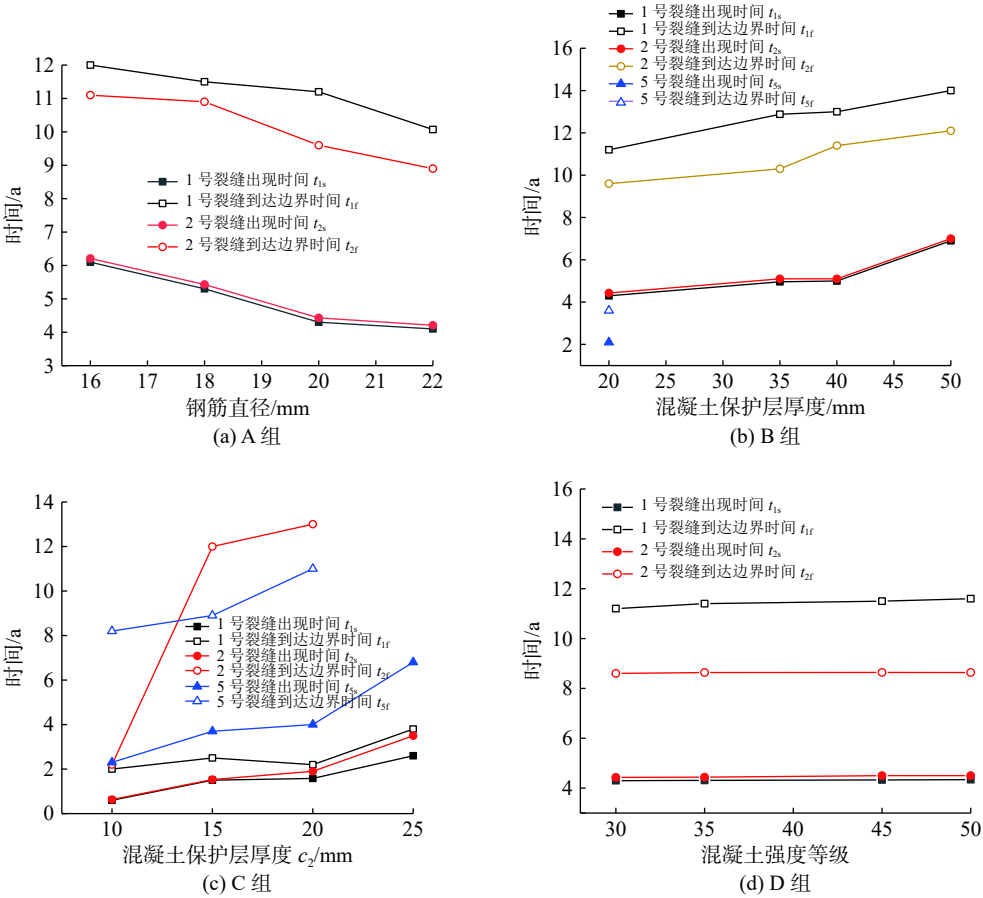


图 11 关键开裂时间

Fig.11 Key cracking time

4.2 混凝土保护层的影响

图 12 和图 13 研究了 15 a 时，混凝土保护层厚度的变化对保护层开裂的影响。图 12 的两侧混凝土保护层厚度一致，即 $c_2/c_1=1$ 。图 12 的结果显示，当两侧混凝土保护层厚度一致时，裂缝主要沿 1, 2 方向扩展。且混凝土保护层越厚，裂缝越不容易到达混凝土表面。值得注意的是，图 12(a) 中除出现 1, 2 号裂纹外，还出现了沿对角方向的斜裂纹(5 号)。这可能与 c/D 的比值较小有关。而图 13 的结果则表明，当两侧混凝土保护层厚度不

一致时，尤其是 c_2/c_1 与 c_2/D 的比值均小于 1.5 时，除 1, 2 号裂纹外，也同样出现了沿对角线方向的斜裂纹(5 号)。随着 c_2/c_1 与 c_2/D 的比值的增大，斜裂纹(5 号)不易形成，且 2 号裂纹愈来愈倾斜。因此，可以看出：当 c_2/c_1 与 c_2/D 的比值均在 1.5 以下时，对裂缝分布影响比较大；而 c_2/c_1 的比值在 2 以上时，对裂缝分布影响较小，这与 Ye 等^[12]基于实验得出的 c_2/c_1 大于 1.5 时其锈蚀产物分布相似的结论是一致的。

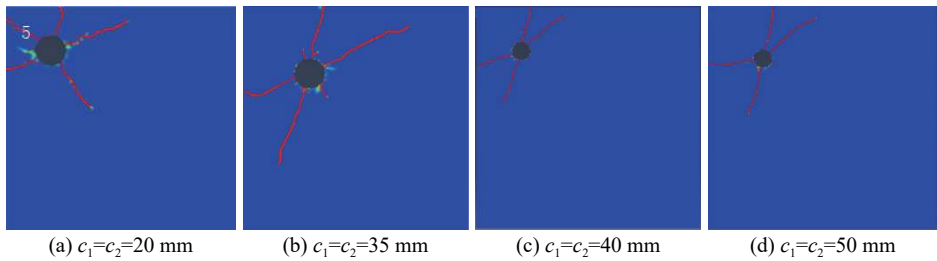


图 12 两侧保护层厚度相同情况下的裂缝分布图 ($t=15\text{ a}$)

Fig.12 Cracking distribution under the same cover depths at both sides at 15 years

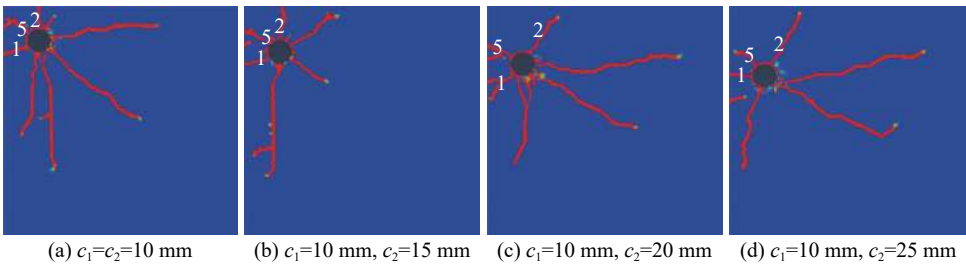


图 13 两侧混凝土保护层厚度不同时的裂缝分布图 ($t=15\text{ a}$)

Fig.13 Cracking distribution under different cover depths at both sides at 15 years

从开裂时间上看, B 组的结果(图 11(b))清晰表明, 1, 2 号裂纹出现和到达混凝土表面的时间均随着混凝土保护层厚度的增加而线性递增。C 组的结果(图 11(c))则表明, 当仅有一侧保护层厚度 c_1 及钢筋直径相同的情况下, 1, 2 号裂纹出现的时间比较接近, 但裂纹到达混凝土表面的时间基本上均随着另一侧混凝土保护层厚度的增加呈现出延长的趋势。3 种裂纹的发展中, 1 号裂纹

是最早出现并最先到达混凝土表面的。

4.3 混凝土强度的影响

图 14 研究了混凝土强度的变化对钢筋锈蚀开裂的影响($t=15\text{ a}$)。从图中可以看出, 混凝土强度的变化对保护层裂缝的发展基本没有影响。从开裂时间上看(如图 11(d)), 也得到相同的规律。这主要是因为混凝土开裂取决于混凝土的抗拉强度, 而随着混凝土等级的提高, 其抗拉强度增加并不显著。

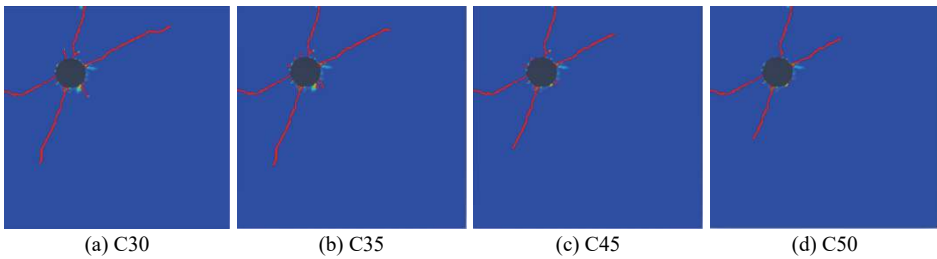


图 14 不同混凝土强度下的裂缝分布图 ($t=15\text{ a}$)

Fig.14 Cracking distribution under different concrete strength at 15 years

5 结 论

基于有限元对角区钢筋因氯盐侵蚀导致的混凝土保护层开裂全过程进行了分析, 并与实验结果进行对比, 验证了数值模型的可靠性。通过参数分析, 研究了钢筋直径、保护层厚度以及混凝土强度的变化对混凝土保护层的裂缝发展及开裂时间的影响, 得到以下结论:

- a. 由于角区钢筋的二维扩散, 135° 方向的膨胀位移最大。
- b. 钢筋直径越小, 混凝土越不易开裂, 并且钢筋直径几乎不影响裂缝的开展模式。
- c. 当两侧混凝土保护层厚度一致时, 裂纹主要沿 1, 2 方向发展。且混凝土保护层越厚, 裂纹越不容易到达混凝土表面。当两侧混凝土保护层厚度不一致时, 尤其是 c_2/c_1 与 c_2/D 的比值均小于

1.5 时,除 1,2 号裂纹外,还出现了沿对角线方向的斜裂纹,且裂缝贯穿混凝土保护层的时间会随着另一侧混凝土保护层厚度的增加呈现出延长的趋势。

d. 混凝土强度的变化对混凝土保护层裂缝的发展及开裂时间基本没有影响。

参考文献:

- [1] 耿欧. 混凝土构件的钢筋锈蚀与退化速率[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010: 65–76.
- [2] ANDRADE C, ALONSO C, MOLINA F J. Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I-experimental test[J]. *Materials and Structures*, 1993, 26(8): 453–464.
- [3] ALONSO C, ANDRADE C, RODRIGUEZ J, et al. Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion[J]. *Materials and Structures*, 1998, 31(7): 435–441.
- [4] 袁迎曙, 姬永生, 牟艳君. 混凝土内钢筋锈蚀层发展和锈蚀量分布模型研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(7): 5–10.
- [5] ZHAO Y X, HU B Y, YU J, et al. Non-uniform distribution of rust layer around steel bar in concrete[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(12): 4300–4308.
- [6] JANG B S, OH B H. Effects of non-uniform corrosion on the cracking and service life of reinforced concrete structures[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(9): 1441–1450.
- [7] ZHAO Y X, KARIMI A R, WONG H S, et al. Comparison of uniform and non-uniform corrosion induced damage in reinforced concrete based on a Gaussian description of the corrosion layer[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(9): 2803–2814.
- [8] MALUMBELA G, ALEXANDER M, MOYO P. Model for cover cracking of RC beams due to partial surface steel corrosion[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25: 987–991.
- [9] XIA N, REN Q W, LIANG R Y, et al. Nonuniform corrosion-induced stresses in steel-reinforced concrete[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2012, 138(4): 338–346.
- [10] CAO C, CHEUNG M M S. Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC structures[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 51: 75–81.
- [11] ZHANG J H, LING X Z, GUAN Z G. Finite element modeling of concrete cover crack propagation due to non-uniform corrosion of reinforcement[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 132: 487–499.
- [12] YE H L, JIN N G, FU C Q, 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.
- [13] DU X L, LIU J, ZHANG R B. Modeling the cracking of cover concrete due to non-uniform corrosion of reinforcement[J]. *Corrosion Science*, 2014, 89: 189–202.
- [14] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1989, 25(3): 299–326.
- [15] ZHOU K, MARTIN-PEREZ B, LOUNIS Z. Finite element analysis of corrosion-induced cracking, spalling and delamination of RC bridge decks[C]//1st Canadian Conference on Effective Design of Structures. Hamilton: McMaster University Hamilton, 2005: 187–196.
- [16] DU X L, LIU J, MA G W. A meso-scale numerical method for the simulation of chloride diffusivity in concrete[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2014, 85: 87–100.
- [17] STEWART M G, ROSOWSKY D V. Structural safety and serviceability of concrete bridges subject to corrosion[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 1998, 4(4): 146–155.
- [18] 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.
- [19] WEYERS R E. Service life model for concrete structures in chloride laden environments[J]. *ACI Materials Journal*, 1998, 95(4): 445–453.
- [20] FISCHER C. Auswirkungen der Bewehrungskorrosion auf den Verbund zwischen Stahl und Beton[D]. Stuttgart: Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2012.
- [21] 金浏, 张仁波, 杜修力, 等. 角部钢筋锈蚀引发混凝土保护层开裂行为研究[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(2): 255–261.
- [22] CARÉ S, NGUYEN Q T, BEDDIAR K, et al. Times to cracking in reinforced mortar beams subjected to accelerated corrosion tests[J]. *Materials and Structures*, 2010, 43(1/2): 107–124.

(编辑: 石 瑛)