

基于初始缺陷形状的混凝土结构锈胀开裂理论模型

伦培元^{1,2}, 张小刚^{1,3}, 张强², 赵然¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022;
3. 深圳大学 土木与交通工程学院, 深圳 518060)

摘 要: 为考虑材料初始缺陷形状的影响, 将其假定为三维半椭球形。基于断裂力学理论将锈胀裂缝扩展过程划分为两个临界阶段: 初始开裂阶段和完全开裂阶段, 并分别对两组临界阶段进行了分析, 建立了混凝土构件保护层胀裂时的锈胀力及开裂时间预测模型。为了验证所提出预测模型的正确性, 分别采用已有的室内锈蚀实验、现场测试数据进行验证, 计算结果吻合较好, 说明本文预测模型具有一定合理性。在此基础上, 对初始缺陷长度、混凝土保护层厚度、钢筋半径、相对保护层厚度等参数进行敏感性分析, 结果表明增加混凝土保护层厚度和相对保护层厚度, 有利于提高钢筋混凝土结构的服役性能。

关 键 词: 钢筋锈蚀; 初始缺陷形状; 临界锈胀力; 开裂时间; 耐久性

中图分类号: TU 375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)07-1020-07

Theoretical Model of Rust Expansion Cracking of Concrete Structure Based on the Initial Defect Shape

LUN Pei-yuan^{1,2}, ZHANG Xiao-gang^{1,3}, ZHANG Qiang², ZHAO Ran¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 3. School of Civil and Traffic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China. Corresponding author: ZHANG Qiang, E-mail: 1319982586@qq.com)

Abstract: In order to consider the influence of the initial defect shape of materials, it was assumed to be a three-dimensional semi-ellipse. Based on the theory of fracture mechanics, the expansion process of the rust expansion cracking can be divided as two critical stages: the initial cracking stage and the complete cracking stage, which were both analyzed. A prediction model of rust expansion force and cracking time was established when concrete cover cracks. The proposed model was verified using the pre-existing indoor corrosion test and field test data, and the results showed that the prediction model is reasonable. On this basis, parameter sensitivity analyses, such as the length of the initial defect, the concrete cover thickness, the reinforcing bar radius, the relative cover thickness were analyzed, the results showed that the service performance of RC structures can be improved by increasing the concrete cover thickness and the relative cover thickness.

Key words: corrosion of reinforcing bar; the initial defect shape; critical rust expansion force; cracking time; durability.

钢筋混凝土结构作为 21 世纪最主要的工程结构形式之一, 被广泛应用于桥梁、铁路、房建等的建设工程中。钢筋混凝土构件一旦投入使用, 其

服役时间将长达数十年, 故而提高混凝土结构的耐久性能显得尤为重要。自然环境下的氯盐侵蚀是导致钢筋锈蚀的主要原因之一, 钢筋锈蚀产生

大量锈蚀产物,因其膨胀形成构件内部的膨胀应力,引起混凝土保护层开裂,从而造成结构性能劣化^[1-2]. 因此,为了更准确地预测混凝土构件的服役寿命,提高钢筋混凝土结构的服役性能,非常有必要对混凝土构件锈胀开裂问题展开研究.

目前的研究将钢筋锈蚀导致构件锈胀开裂分为 3 个阶段,即氯离子扩散阶段、应力产生阶段和保护层开裂阶段^[3]. Yuan 等^[4]对钢筋混凝土构件进行锈蚀开裂试验研究,结果表明试件内钢筋锈层厚度呈椭圆形分布. Bazant^[5-6]基于电化学理论建立钢筋锈蚀的理论物理模型,并提出三种混凝土保护层开裂破坏形式下的钢筋锈胀力理论方法. Liu 等^[7]考虑了钢筋与混凝土交界面中孔隙过渡区的影响,提出保护层锈胀开裂过程简化理论. 金伟良等^[8]基于弹性力学理论,考虑混凝土与锈蚀产物间的变形协调关系,提出了保护层开裂时刻的锈胀力理论模型. 王海龙等^[9]考虑了钢筋对构件内部混凝土变形的影响,基于断裂力学理论建立了混凝土中钢筋锈蚀胀裂的理论模型. Morinaga^[10]通过试验得到了空心圆柱体试件的锈蚀率. Zhang 等^[11]考虑混凝土中大量初始裂缝缺陷,基于断裂力学和双 K 理论提出了动态锈胀力理论.

以上研究成果较好地描述了钢筋混凝土锈胀理论研究的特点,但是忽略了初始缺陷形状对锈胀开裂过程及钢筋锈蚀率的影响. 现代制造工业的产能不足导致材料不可避免地存在大量微观初始缺陷,材料初始缺陷附近区域内会出现应力重分布现象,如仅考虑混凝土初始缺陷,将其假定为细微平面裂缝进行考虑,与真实情况不符且对锈胀力扩展推导带来误差. 基于此,本文对初始缺陷形状影响下钢筋锈蚀导致混凝土构件开裂进行详细研究,分析初始缺陷形状与混凝土受力状态之间的关系,并对钢筋锈蚀率与构件混凝土保护层开裂时间进行研究,以期对锈胀钢筋混凝土结构的性能评估奠定理论基础.

1 理论模型建立

1.1 初始缺陷形状的确定

初始缺陷形状在钢筋混凝土构件中的锈胀过程是比较复杂的,需要对问题进行简化,提出以下假定:

1) 基于文献[4,7]研究成果,假定水化沉降产生的位于钢筋和混凝土交界面处的初始缺陷形状为三维半椭球形.

2) 锈蚀产物在生成扩散过程中与混凝土骨料无物理变化或化学反应.

3) 当存在多处初始缺陷时,缺陷之间相互独立,且均匀分布于钢筋混凝土构件中.

在平面中,将初始缺陷简化为半椭圆形,见图 1. 其中, a 表示初始缺陷沿着保护层方向的径向长度, c 表示初始缺陷沿着钢筋长度方向的径向长度. β 用来描述半椭圆形初始缺陷的位置,其变化范围为 $0 \leq \beta \leq \pi$,当 $\beta = 0$ 时,对应的是长轴 B 点所在位置,当 $\beta = 90^\circ$ 时,对应的是短轴 A 点所在位置;点 A, B 代表裂缝尖端,其中点 A 是沿保护层方向扩展的裂缝,点 B 是沿钢筋长度方向扩展的裂缝. 基于文献[7,12]提出的开裂三阶段模型,将混凝土构件内初始缺陷裂缝尖端点 A, B 的应力强度因子可以分别表示为

$$K_A = pF_A \sqrt{\pi a/Q}, \tag{1}$$

$$K_B = pF_B \sqrt{\pi a/Q}. \tag{2}$$

其中: p 是锈蚀产物膨胀产生的内部压力; F_A, F_B 为形状系数,其表达式为

$$F_A = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} (G_0 M_{1A} + G_1 M_{2A} + G_2 M_{3A} + G_3), \tag{3}$$

$$F_B = \frac{2\sqrt{Q}}{\pi} (G_0 M_{1B} + G_4 M_{2B} + G_5 M_{3B} + G_6). \tag{4}$$

其中: $Q = 1 + 1.464 (a/c)^{1.65}$,为椭圆形状系数;系数 G_i, M_{iA}, M_{iB} 主要由裂缝以及钢筋混凝土的几何尺寸决定.

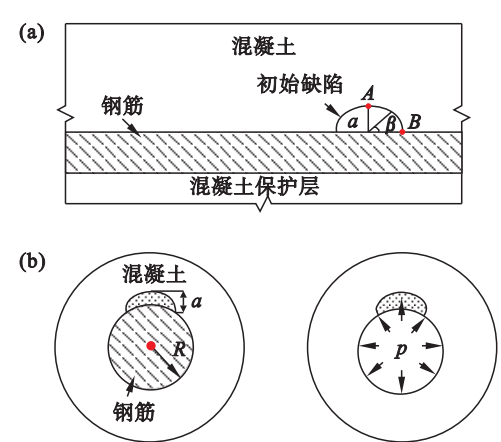


图 1 材料初始缺陷示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the initial defect of material (a)—初始缺陷的正视图;(b)—初始缺陷的剖面图.

1.2 双参数断裂准则

根据大量研究成果表明,双 K 断裂参数是材料断裂的重要参数^[13-16]. 本文采用其作为混凝土中裂缝扩展过程的判断标准,对混凝土锈胀开裂动态过程进行描述,其原理如下:

$$\left. \begin{aligned} K_I < K_{Ic}^{ini}, & \quad \text{无裂缝扩展;} \\ K_{Ic}^{ini} \leq K_I < K_{Ic}^{un}, & \quad \text{裂缝稳态扩展;} \\ K_{Ic}^{un} \leq K_I, & \quad \text{裂缝失稳扩展.} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中: K_{Ic}^{ini} 表示初始断裂韧度; K_{Ic}^{un} 表示失稳断裂韧度; K_I 表示断裂韧度。

由于双 K 断裂参数均由试验测得, 同时因为钢筋锈蚀引起混凝土保护层开裂问题的特殊性, 不能直接应用已有的研究成果. 本文基于文献[17]的研究成果, 对应力强度因子进行修正为

$$K_{Ics} = K_{Ic} \sqrt{\frac{C}{h}} \left(\frac{V}{2R \cdot C} \right)^{1/\alpha'} \quad (h \leq 2 \text{ m}). \quad (6)$$

式中: h, V, K_{Ic} 分别表示标准模型的高、体积和断裂韧度, 每个参数的取值见文献[17]; C 表示混凝土保护层厚度; R 表示钢筋半径; α' 表示威布尔参数, 其与失稳断裂韧度实验值的变异系数 (C_V) 相关, 可以如下表示:

$$\alpha' = \frac{\pi}{\sqrt{6.5 C_V}} (0.013 \leq C_V \leq 0.230). \quad (7)$$

1.3 临界锈胀力的定义

基于断裂力学理论, 钢筋锈蚀产生的锈胀力与材料初始缺陷的应力强度因子存在理论关系. 当锈胀力大于混凝土材料的初始断裂韧度时, 根据双 K 断裂准则, 初始缺陷首先会在混凝土保护层中形成裂缝. 裂缝产生后, 锈胀力不断增长, 初始缺陷产生的裂缝进入稳态扩展过程. 应力强度因子方面, 当其等于裂缝的失稳断裂韧度时, 裂缝将由稳态扩展状态变为失稳扩展状态. 此时, 即可认为裂缝已经贯穿整个保护层, 将此状态视为钢筋锈蚀引起的混凝土保护层完全开裂的判断标准. 基于以上论述, 为计算混凝土初始缺陷锈胀裂缝扩展中的两个重要临界点(初始阶段和失稳扩展阶段), 假定这两个临界点的裂缝应力强度因子与双 K 断裂参数相等, 将其代入式(1)、式(2)中, 即可以得到初始缺陷点 A、B 的初始开裂锈胀力和保护层完全开裂时的锈胀力. 同时, 假定初始缺陷点 B 的开裂不影响点 A 在厚壁圆筒模型横截面中的开裂进程, 将初始缺陷点 A 的开裂状态作为混凝土保护层开裂贯穿的判断标准, 得到的公式如下:

初始缺陷开始开裂时的锈胀力为

$$P^{ini} = \frac{K_{Ics}^{ini}}{F_A \sqrt{\pi a/Q}}. \quad (8)$$

混凝土保护层完全开裂时的锈胀力为

$$P^{un} = \frac{K_{Ics}^{un}}{F_A \cdot \sqrt{\pi(a + \Delta a^*)/Q}}. \quad (9)$$

式中, $\Delta a^* = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{Ics}^{un}}{f_t} \right)^2$ 表示裂缝扩散区域长度, f_t 为混凝土抗拉强度.

1.4 钢筋锈蚀率及保护层开裂时间

对于考虑锈胀开裂的钢筋混凝土构件, 采用薄壁圆筒模型进行简化处理, 见图 2. 设钢筋原始半径为 R , 因锈蚀作用后的钢筋半径为 $R - a_1$, 未受锈蚀影响的钢筋与自由膨胀锈蚀产物厚度表示为 a_2 . 基于文献[18]提出的锈蚀量分布模型, 将钢筋锈蚀引起混凝土发生的微小位移 σ_{con} 表示为

$$\sigma_{con} = \frac{p}{E_{ef}} \cdot \frac{R(R+C)^2(1+\nu_c) + R^3(1-\nu_c)}{2RC + C^2}. \quad (10)$$

式中: ν_c 为混凝土的泊松比; E_{ef} 为混凝土保护层的有效弹性模量, 可以表示为

$$E_{ef} = \frac{E_c}{1.0 + \varphi}. \quad (11)$$

式中, E_c 和 φ 分别表示混凝土的弹性模量和蠕变系数, 此外 φ 根据文献参考取值为 2.

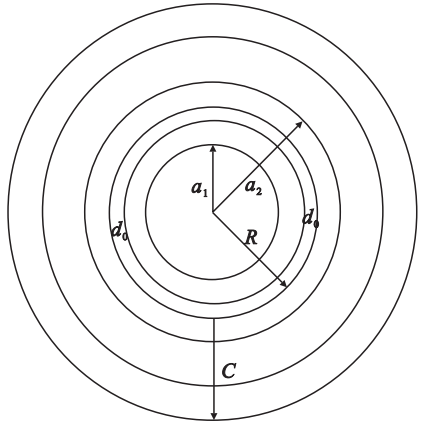


图 2 锈胀率计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the rust rate calculation model

由图 2 可知, 钢筋周围初始缺陷等孔隙体积可以表示为

$$\Delta V_p = 2\pi R d_0, \quad (12)$$

钢筋锈蚀的体积为

$$\Delta V_{steel} = \pi(R^2 - a_1^2), \quad (13)$$

那么钢筋锈蚀率可以表示为

$$\rho = \frac{\Delta V_{steel}}{V_{steel}}. \quad (14)$$

钢筋周围混凝土受锈胀力影响扩张体积为

$$\Delta V_{con} = 2\pi(R + d_0)\sigma_{con}. \quad (15)$$

混凝土开裂后, 周围裂缝体积为

$$\Delta V_{crack} = \frac{1}{3} \sum \omega_i a c,$$

$$\sum \omega_i = 2\pi R(\eta - 1)(1 - \sqrt{1 - \rho}). \quad (16)$$
式中, $\eta = \Delta V_{\text{rust}} / \Delta V_{\text{steel}}$ 为锈蚀产物体积膨胀率(一般取值为 2~4), 即单位长度的钢筋锈蚀生成的锈蚀产物体积与钢筋体积的比值。

假设锈蚀产物在保护层开裂时刻充满孔隙和裂缝, 那么总的锈蚀产物体积可表示为

$$\Delta V_{\text{rust}} = \Delta V_p + \Delta V_{\text{con}} + \Delta V_{\text{crack}} + \Delta V_{\text{steel}}. \quad (17)$$

联立式(13)和式(19), 建立关于锈蚀率 ρ 的一元二次方程:

$$\pi \eta \rho R^2 = \frac{2}{3} \pi (\eta - 1) a c R (1 - \sqrt{1 - \rho}) + 2\pi R d_0 + 2\pi (R + d_0) \sigma_{\text{con}} + \pi \rho R^2. \quad (18)$$

由上述分析过程可以得到钢筋的锈蚀率, 式中的参数与初始缺陷的形状有关。

得到钢筋锈蚀率后, 就可以利用现有的计算保护层开裂时间的公式得到钢筋混凝土构件保护层开裂时间, 本文根据文献[19]研究结果进行计算. 钢筋混凝土构件保护层开裂时间计算公式为

$$t_{\text{cr}} = [0.086 n R C F (1 - w)^{1.64} m^{-1} \rho_{\text{cr}}]^{1.41}. \quad (19)$$

式中: w 为混凝土水灰质量比; F 为法拉第相关系数; m 为钢筋锈蚀产物的分子量; n 为离子价; ρ_{cr} 为钢筋锈蚀率。

由上述计算过程可知, 初始缺陷形状对裂缝扩展过程中的锈胀力、钢筋锈蚀率、混凝土蠕变以及软化特性等参数的影响均已考虑到混凝土保护层锈胀开裂时间计算模型中。

2 模型验证

2.1 实验及实际工程验证

为了验证本文提出理论模型的准确性, 分别采用实验对比、实际现场测试对比的方法进行对照验证. 首先实验方面, 引用文献[10]的实验参数与预测结果进行对比. 计算参数取值为: 混凝土泊松比为 0.18, 混凝土蠕变系数为 2.0, 锈蚀产物全为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, 钢筋锈蚀后体积膨胀比为 2.0, 混凝土与钢筋界面处孔隙厚度为 $12.5 \mu\text{m}$, 结果对比参照图 3a. 实际现场测试方面, 选用文献[20]中某海港西大堤钢筋混凝土护栏测试数据进行对比, 计算结果对比见图 3b.

由图 3a 的实验对比结果可知, 预测结果与实验结果吻合较好, 说明提出的理论模型具有合理性. 由图 3b 的工程实测对比结果可知, 预测锈胀开裂时间稍长于实测开裂时间, 说明应用在实际工程服役环境中, 需考虑环境放大系数的影响. 总

体而言, 本文模型在实验与实际工程实测对比中, 预测趋势与实际数据基本一致, 进一步说明本文模型在实际应用中的正确性。

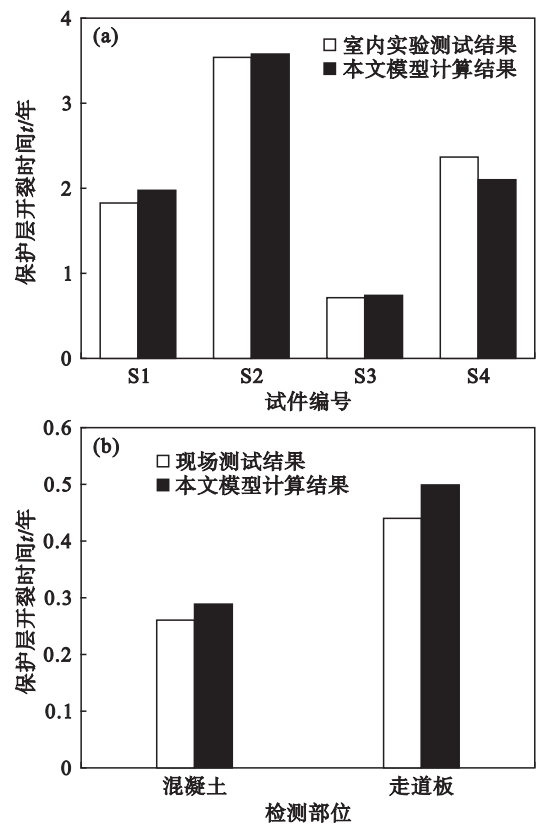


图 3 模型验证对比
Fig. 3 Model validation comparison
(a)—实验对比图; (b)—现场对比图.

2.2 已有模型对比验证

为了进一步说明本文提出的基于初始缺陷形状的混凝土结构锈胀开裂理论模型的正确性, 选择已报道的锈胀模型进行对比验证^[2,7,10]. 采用文献[2,10]完成的锈胀开裂实验进行计算, 对比结果参见图 4.

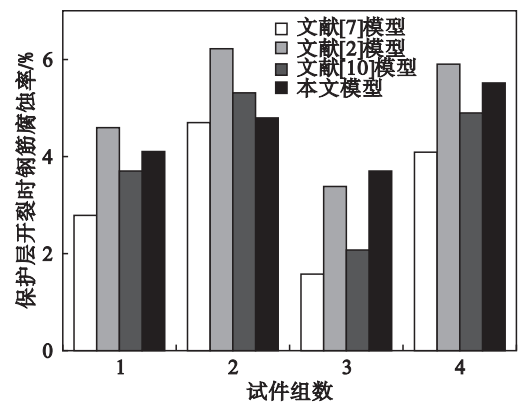


图 4 理论计算对比
Fig. 4 Comparison on theoretical calculation results

由图 4 可知, 已有的锈胀模型均能把握混凝土

土结构锈胀开裂趋势. 其中,文献[7]模型为实验统计模型,其应用范围对实验室环境及条件有较高要求;文献[2]模型和文献[10]模型为经验模型,适用范围较广且准确,本文计算值与这两个模型计算结果基本吻合.

3 参数化分析

由理论模型可知,混凝土保护层开裂时的主要影响因素有材料初始缺陷形状、混凝土保护层厚度、钢筋半径和相对保护层厚度(保护层厚度与钢筋半径的比值)等. 本文通过对以上因素的变化加以分析,以求得到各种因素对临界锈胀力、开裂时间的影响规律. 模型中各参数的基本取值如下:钢筋半径为 8 mm,混凝土保护层厚度为 40 mm,混凝土水灰质量比为 0.45,混凝土材料的弹性模量 E_c 为 2.7×10^4 MPa,混凝土抗拉强度为 3.3 MPa,混凝土泊松比为 0.18,混凝土与钢筋交界面处的孔隙厚度为 12.5 μm ,半椭圆形初始缺陷尺寸 a/c 为 0.2,混凝土蠕变系数为 2.0,锈蚀产物体积膨胀比为 2.0.

3.1 初始缺陷形状的影响

基于文献[11]的计算参数,半椭圆形初始缺陷长度 a 为 2,3,4,5,6 mm,半椭圆形初始缺陷尺寸 a/c 为 0.10,0.15,0.20,0.25,0.30,初始缺陷裂缝扩展增长极限值 a/c 为 0.64,0.72,0.80. 图 5 给出了初始缺陷形状对初始缺陷开始开裂时和保护层完全开裂时锈胀力的关系曲线以及保护层开裂时间的关系曲线.

由图 5a 可知,随着初始缺陷长度 a 增大,初始缺陷开始开裂时的锈胀力逐渐减小,但随着初始缺陷尺寸 a/c 增大,初始缺陷开始开裂时的锈胀力随之增大,但耐久性并没有得到提高;结合图 5b 对比可知,初始缺陷开始开裂时的锈胀力可能影响保护层完全开裂时的锈胀力,所以初始缺陷尺寸 a/c 在计算过程中应该合理取值;由图 5c 可知,初始缺陷长度 a 增大,保护层完全开裂时间相应缩短,说明良好的混凝土施工工艺有利于混凝土结构耐久性的提升. 从以上分析结论可知,初始缺陷的形状、尺寸将导致实际的锈胀开裂行为和防护层的失效力学模式发生明显改变,并最终影响保护层对应的锈胀破坏形态下的开裂时间等临界指标. 尽管目前尚未有关于保护层中初始缺陷形状对锈胀破坏过程的相关实验和理论研究,但在往后的钢筋混凝土构件保护层锈胀开裂过程研究中,初始缺陷的形状和尺寸应作为重点研究对象.

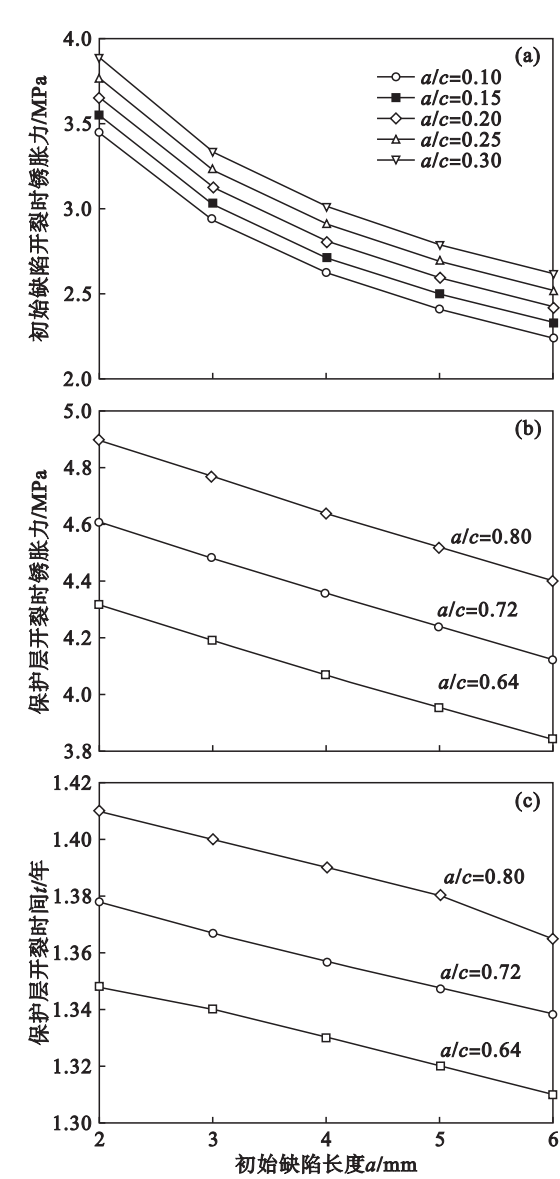


图 5 初始缺陷形状对锈胀力、开裂时间的影响
Fig. 5 Effect of initial defect shape on rust expansion force and cracking time

- (a) — 初始缺陷形状对初始缺陷开裂时锈胀力的影响;
- (b) — 初始缺陷形状对保护层开裂时锈胀力的影响;
- (c) — 初始缺陷形状对保护层开裂时间的影响.

3.2 混凝土保护层厚度的影响

图 6 给出了混凝土保护层厚度对构件锈胀力的关系曲线和开裂时间的关系曲线. 由图 6a 可知,随着保护层厚度的增加,初始缺陷开始开裂时和保护层完全开裂时的锈胀力均随之增大;由图 6b 可知,随着保护层厚度的增加,保护层完全开裂时间随之急剧增大,可见保护层厚度对保护层锈胀开裂时间的影响十分明显,与已有的实验结果保持一致. 因此,增加混凝土保护层的厚度可以有效地延缓混凝土构件开裂,提高混凝土服役时间.

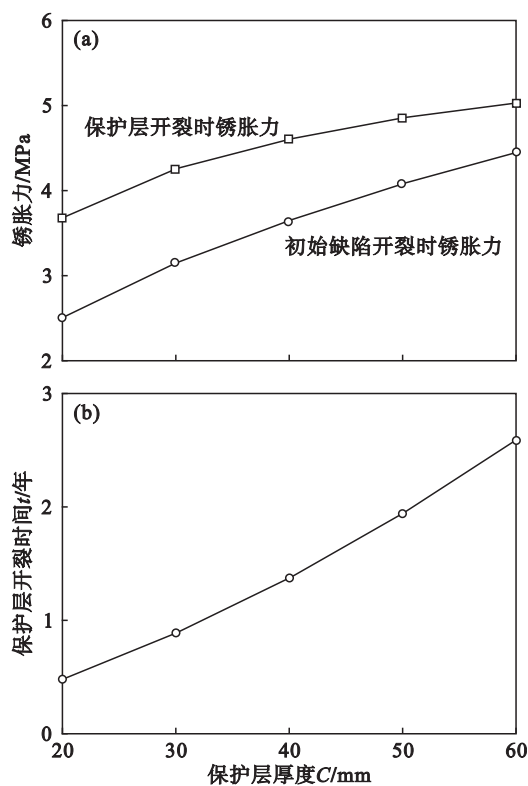


图 6 保护层厚度对锈胀力、开裂时间的影响
Fig. 6 Effect of cover thickness on rust expansion force and cracking time

(a)—保护层厚度对锈胀力的影响；
(b)—保护层厚度对保护层开裂时间的影响。

3.3 钢筋半径的影响

图 7 给出了钢筋半径对锈胀力的关系曲线以及保护层完全开裂时间的关系曲线。

由图 7a 可知,随着钢筋半径的增加,锈胀力均呈现减小趋势;由图 7b 可以看出,随着钢筋半径的增加,保护层完全开裂时间逐渐增大,但其影响较小,预测结果与已有的实验结果是一致的。因此,增加混凝土钢筋半径可以延缓混凝土构件开裂,提高混凝土服役时间,但比较而言,增加保护层厚度对延缓混凝土构件开裂时间更有效。

3.4 相对保护层厚度的影响

图 8 给出了相对保护层厚度对锈胀力的关系曲线以及对保护层完全开裂时间的关系曲线,相对保护层厚度是混凝土保护层厚度与钢筋半径的比值。

由图 8a 可知,随着相对保护层厚度的增加,锈胀力随之增大,且增幅较为明显;但是当相对保护层厚度为 8 的时候,保护层开始开裂时和初始缺陷开裂时的锈胀力差距明显缩小。由图 8b 可以看出,随着相对保护层厚度的增加,保护层完全开裂时间逐渐增大。因此,相比采用单调增加混凝土保护层的厚度或者钢筋半径等措施,增加相对保护层厚度可能达到更为有效地延缓混凝土构件开

裂的作用,提高混凝土服役性能。

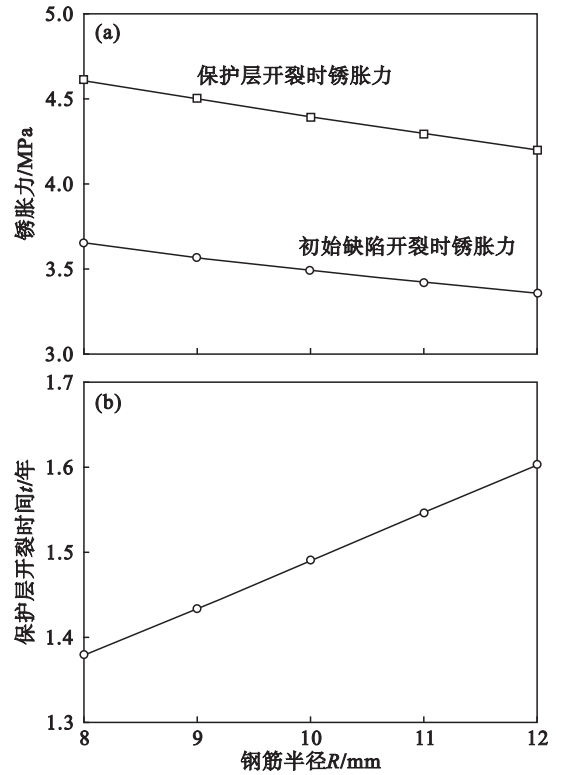


图 7 钢筋半径对锈胀力、开裂时间的影响
Fig. 7 Effect of reinforcing bar radius on rust expansion force and cracking time

(a)—钢筋半径对锈胀力的影响；
(b)—钢筋半径对保护层开裂时间的影响。

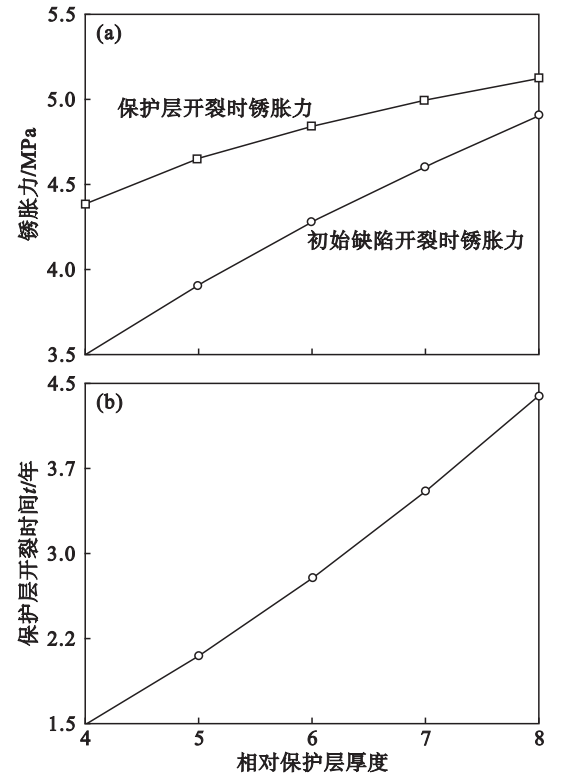


图 8 相对保护层厚度对锈胀力、开裂时间的影响
Fig. 8 Effect of relative cover thickness on rust expansion force and cracking time

(a)—相对保护层厚度对锈胀力的影响；
(b)—相对保护层厚度对保护层开裂时间的影响。

4 结 论

1) 随着初始缺陷尺寸的增大,混凝土保护层初始开裂时锈胀力随之增大,在后续的研究中应对尺寸问题进行重点研究。

2) 当钢筋半径不断增大时,半径较小的钢筋对应的临界锈胀力更大。

3) 随着混凝土保护层厚度及相对保护层厚度的增加,保护层开裂时锈胀力和开裂时间均出现较大幅度的增加,这有利于钢筋混凝土结构服役性能和耐久性能的提高。

参考文献:

- [1] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
(Niu Di-tao. Durability and life prediction of concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2003.)
- [2] Zhao Y X, Jin W L. Steel corrosion-induced concrete cracking[M]. Oxford: Elsevier Inc, 2017.
- [3] Chen D, Mahadeyan S. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30: 227 – 238.
- [4] Yuan Y S, Ji Y S. Modeling corroded section configuration of steel bar in concrete structure[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(6): 2461 – 2466.
- [5] Bazant Z P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures—theory[J]. *Journal Structural Division, ASCE*, 1977, 105(6): 1137 – 1153.
- [6] Bazant Z P. Physical model for steel corrosion in sea structures—applications[J]. *Journal Structural Division, ASCE*, 1979, 105(6): 1155 – 1166.
- [7] 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.
- [8] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2014.
(Jin Wei-liang, Zhao Yu-xi. Durability of concrete structures[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2014.)
- [9] 王海龙, 金伟良, 孙晓燕. 基于断裂力学的钢筋混凝土保护层锈胀开裂模型[J]. 水利学报, 2008, 39(7): 863 – 869.
(Wang Hai-long, Jin Wei-liang, Sun Xiao-yan. Fracture model for protective layer cracking of reinforced concrete structure due to rebar corrosion[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(7): 863 – 869.)
- [10] Morinaga S. Prediction of service life of reinforced concrete buildings based on the corrosion rate of reinforcing steel [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Durability of Building Materials and Components. Brighton, 1990: 27 – 52.
- [11] Zhang X G, Li M, Tang L, et al. Corrosion induced stress field and cracking time of reinforced concrete with initial defects: analytical modeling and experimental investigation[J]. *Corrosion Science*, 2017, 120: 158 – 170.
- [12] Alyisif O M, Nishimura R. The stress corrosion cracking behavior of austenitic stainless steels in boiling magnesium chloride solutions[J]. *Corrosion Science*, 2007, 49(7): 3040 – 3051.
- [13] 赵然. 考虑初始缺陷形状的混凝土构件锈胀开裂可靠度研究[D]. 长沙: 中南大学, 2018.
(Zhao Ran. Reliability analysis of cover cracking of concrete structure considering the shape of initial defect[D]. Changsha: Central South University, 2018.)
- [14] Xu S, Reinhardt H W. Crack extension resistance and fracture properties of quasi-brittle softening materials like concrete based on the complete process of fracture[J]. *International Journal of Fracture*, 1998, 92: 71 – 99.
- [15] Xu S, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture: part III. compact tension specimens and wedge splitting specimens[J]. *International Journal of Fracture*, 1999, 98: 179 – 193.
- [16] Xu S, Reinhardt H W. Determination of double-determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture: part I. experimental investigation of crack propagation[J]. *International Journal of Fracture*, 1999, 98: 111 – 149.
- [17] Zhang X G, Song Y P, Wu Z M. Calculation model of equivalent strength for induced crack based on double-K fracture theory and its optimizing setting in RCC arch dam [J]. *Transaction of Tianjin University*, 2005, 11(1): 59 – 65.
- [18] 姬永生, 张博雅, 张领雷, 等. 钢筋锈蚀层发展和锈蚀量分布模型比较研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3): 355 – 360.
(Ji Yong-sheng, Zhang Bo-ya, Zhang Ling-lei, et al. Propagation of the corrosion layer and model of corrosion distribution on steel re-enforcing bar in concrete[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 41(3): 355 – 360.)
- [19] 吴相豪. 海洋环境中钢筋混凝土构件锈胀开裂时间的解析解[J]. 上海海事大学学报, 2006, 27(3): 22 – 26.
(Wu Xiang-hao. Analytical solution for cracking time of reinforced concrete structure due to corrosion expansion in marine environment[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2006, 27(3): 22 – 26.)
- [20] 史波. 氯盐环境下基于概率和性能的混凝土结构耐久性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
(Shi Bo. Probability and performance based durability study for reinforced concrete structures in chloride environment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.)