

钢筋组合方式对混凝土保护层锈胀开裂影响

程旭东, 苏巧芝, 向恩泽, 梁晓岑, 王子栋, 张如林, 黄思凝

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580)

摘要: 钢筋锈蚀是引发混凝土结构劣化的主要原因之一。给出一个二维的扩散-力学模型, 通过有限元软件将氯离子侵蚀引起的非均匀腐蚀膨胀层作为位移荷载, 模拟钢筋锈胀对周围混凝土的力学作用。基于该模型, 分析不同钢筋组合对保护层锈胀开裂的影响。结果表明: 不同钢筋组合会造成不同的裂缝扩展路径; 根数少且直径大的钢筋组合不仅能延缓裂缝出现和贯通时间, 而且有利于减小表面最大裂缝宽度和钢筋截面损失率。

关键词: 钢筋组合; 钢筋锈蚀; 开裂路径; 裂缝宽度; 钢筋截面损失率

中图分类号: TU 375 **文献标志码:** A

引用格式: 程旭东, 苏巧芝, 向恩泽, 等. 钢筋组合方式对混凝土保护层锈胀开裂影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(4):137-142.

CHENG Xudong, SU Qiaozhi, XIANG Enze, et al. Influence of reinforcement arrangements on concrete cover cracking due to corrosion[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(4):137-142.

Influence of reinforcement arrangements on concrete cover cracking due to corrosion

CHENG Xudong, SU Qiaozhi, XIANG Enze, LIANG Xiaocen,
WANG Zidong, ZHANG Rulin, HUANG Sining

(College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Steel corrosion is one of the main causes for the deterioration of concrete structures. A 2D diffusion-mechanical model was established. The non-uniform corrosion expansion induced by chloride ingress was regarded as the displacement load through the finite element software, to simulate the mechanical effect of corrosion expansion on surrounding concretes. Based on this model, the influence of different reinforcement arrangements on the corrosion-induced cover cracking was investigated. The results show that different reinforcement arrangements will cause different cracking paths, and the reinforcement arrangements with fewer quantities and larger diameters can not only delay the crack initiation and through time, but also reduce the maximum crack width and section area loss ratio on the surface of the steel bar.

Keywords: reinforcement arrangement; steel corrosion; cracking paths; crack width; section area loss ratio of steel bar

对于跨海大桥、LNG 储罐和海洋平台等氯盐环境中的在役钢筋混凝土结构, 氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀是影响其耐久性的重要因素^[1-3]。目前, 关于钢筋锈蚀造成的混凝土开裂问题已经做了大量研究工作, 但大多为针对单根钢筋的腐蚀膨胀行为进行分析^[4-6]。实际上, 混凝土构件中往往含有多根钢筋, 并

按照强度和构造要求对钢筋进行组合和分布, 目前极少有实验和有限元模型分析不同钢筋组合对混凝土耐久性的影响规律。因此, 笔者通过一个综合的扩散-力学模型研究多根钢筋非均匀锈蚀引起的保护层破坏行为, 探讨分析不同钢筋组合对同一混凝土梁开裂路径、开裂时间、裂缝宽度和总截面损失率的影响。

收稿日期: 2018-10-28

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1504404, 2018YFC1504406); 山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE099)

作者简介: 程旭东(1971-), 男, 教授, 博士, 研究方向为油田地面工程结构和混凝土耐久性等。E-mail: chengxd@upc.edu.cn。

1 数值模型

1.1 钢筋非均匀腐蚀模型

混凝土的氯离子侵蚀是一个复杂的物理化学过程。根据程旭东、Muthulingam 等的研究^[1,3],将温度传递、水分运输和氯离子扩散等过程进行耦合,各控制方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (D_T \nabla T) = 0. \quad (1)$$

$$\frac{\partial w_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (D_h \nabla h) = 0. \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} - \nabla \cdot (D_c^a \nabla C_{fc}) - \nabla \cdot (C_{fc} \cdot D_h \nabla h) = 0. \quad (3)$$

式中, ρ 为混凝土密度, kg/m^3 ; c_p 为混凝土比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; w_e 为孔隙水体积分数; D_T 为混凝土导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; D_h 为相对水分扩散系数, m^2/s ; h 为孔隙相对湿度; C_{fc} 为自由氯离子质量浓度, kg/m^3 ; D_c^a 为氯离子表观扩散系数, m^2/s 。

距离混凝土保护层最近的钢筋表面首先脱钝变为活化区,其余表面为钝化区。在活化区发生阳极铁氧化与阴极氧还原现象,相邻的阳极和阴极之间形成微电池。钝化区可以忽略阳极铁氧化,而阴极氧还原起主要作用。此外,在活化区和钝化区之间会形成腐蚀宏电池,这两种电化学腐蚀电池加速了钢筋的溶解。

在动态腐蚀演化过程中,活化区钢筋总体腐蚀电流密度为

$$i_{\text{total}} = i_{\text{mic}} + i_{\text{mac}}. \quad (4)$$

式中, i_{mic} 和 i_{mac} 分别为微电池和宏电池电流密度, A/m^2 。

腐蚀电流密度的计算过程详见参考文献[7]—[9]。

由法拉第定律可得沿钢筋周向的钢筋半径减小值 $r_1(\theta, t)$,表达式^[7]为

$$r_1(\theta, t) = \frac{A_{\text{Fe}} \int_{t_1}^t i_{\text{total}}(\theta, t) dt}{Z_{\text{Fe}} F_1 \rho_s}. \quad (5)$$

式中, θ 为沿钢筋周向的角度, $(^\circ)$; A_{Fe} 为铁相对原子质量; t_1 为钢筋腐蚀开始的时间, s ; Z_{Fe} 为阳极反应化合价; ρ_s 为钢筋密度, kg/m^3 ; F_1 为法拉第常数。

锈蚀产物的体积膨胀率 n 取值为2~6,与文献[10]中取相同的值 $n=3$,铁锈膨胀层厚度 $u_r(\theta, t)$ 表达式为

$$u_r(\theta, t) = (n-1)r_1. \quad (6)$$

钢筋锈蚀率为

$$\eta(\theta, t) = \frac{2 \int_0^\pi r_1(\theta, t) \cdot r d\theta}{\pi R^2}. \quad (7)$$

式中, R 和 r 分别为钢筋半径和锈蚀后钢筋半径, m 。

1.2 保护层开裂模型

基于损伤塑性模型描述混凝土的力学特性,该模型考虑了塑性应变引起的弹性刚度退化。混凝土采用CPE4R单元,将钢筋膨胀行为视为平面应变问题。各向同性损伤的混凝土本构方程为

$$\sigma = (1-G)D_0(\varepsilon_t - \varepsilon^p) = D'(\varepsilon_t - \varepsilon^p). \quad (8)$$

式中, G 为弹性刚度损伤变量, MPa ; D_0 为混凝土初始弹性刚度, MPa ; ε_t 为总应变; ε^p 为塑性应变; D' 为退化后的弹性刚度, MPa 。

裂缝宽度计算为

$$w = \left(\varepsilon_t - \frac{\sigma}{E_0} \right) l. \quad (9)$$

式中, E_0 为混凝土的弹性模量, MPa ; l 为开裂单元尺寸, m 。

氯离子扩散和钢筋非均匀锈蚀过程通过COMSOL有限元软件数值计算,采用ABAQUS自带的混凝土损伤塑性模型模拟保护层开裂,具体计算步骤为:①由式(1)、(2)和(3)可以得到氯离子浓度和钢筋周向各点的去钝化时间;②由式(5)计算钢筋半径损失量;③将由式(6)计算得到的锈胀层厚度作为位移荷载施加到钢筋周向节点上;④通过混凝土损伤塑性模型可得到保护层破坏行为。

2 模型验证及结果分析

2.1 模型验证

准确地预测腐蚀分布和膨胀层厚度是模拟混凝土开裂过程的关键,为了验证模型的合理性,该模型基于姬永生等^[11]的实验参数,得到了沿钢筋周向分布的膨胀层厚度。如图1所示,模拟结果与实验结

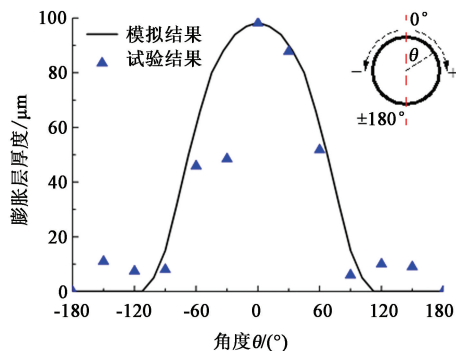


图1 膨胀层厚度对比试验结果

Fig. 1 Comparison of expansion thickness with experiment data

果吻合较好。按式(9)得到的裂缝宽度与 Pedrosa 等^[12]的加速试验结果进行对比(图 2),从图 2 中可以看出两者结果近似一致。但是当锈蚀深度比较大时,数值模拟结果要大于实验结果,原因在于实验中部分锈蚀产物会进入到孔隙和裂缝中去,使锈胀压力减小,从而延缓裂缝宽度增加。

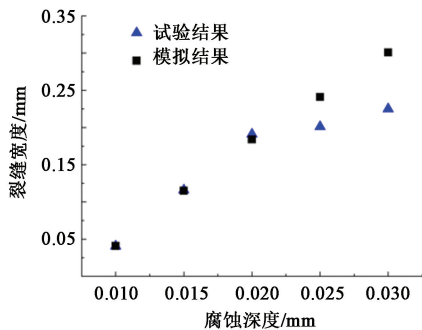


图 2 裂缝宽度对比试验结果

Fig. 2 Comparison of crack width with experiment data

2.2 结果分析

选一截面尺寸为 200 mm×500 mm(宽×高)混凝土梁,取对称结构一半,如图 3(以 3 根钢筋的模型为例)所示。模型上表面和两侧面均暴露在侵蚀环境中且边界自由,下表面限制竖向位移,图中, c 为保护层厚度, d 为钢筋直径, s 为钢筋间距。混凝土

弹性模量取 28 GPa,混凝土抗拉强度取为 1.78 MPa,泊松比为 0.18。按照强度要求假定该混凝土梁的计算配筋率约为 1%,在满足构造要求的情况下根据钢筋截面面积选取合适的钢筋根数和直径,保护层厚度为 30 mm 时,对应的钢筋组合(钢筋总截面面积 A_s/mm^2)为 $2\Phi 25$ ($A_s=982$), $3\Phi 22$ ($A_s=1140$), $4\Phi 18$ ($A_s=1018$);保护层厚度为 40 mm 时,对应的钢筋组合为 $2\Phi 25$ ($A_s=982$), $3\Phi 20$ ($A_s=942$), $4\Phi 16$ ($A_s=804$)。

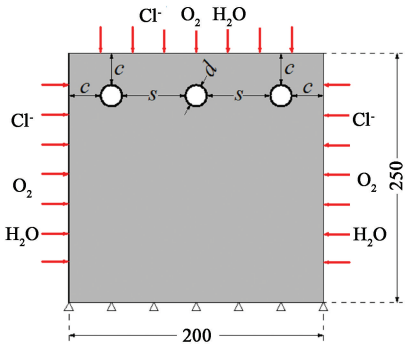


图 3 混凝土几何模型和边界条件

Fig. 3 Concrete geometric model and boundary condition

2.2.1 保护层开裂路径

以塑性应变的变化描述保护层的开裂路径,不同钢筋组合下的保护层开裂路径如图 4 所示。

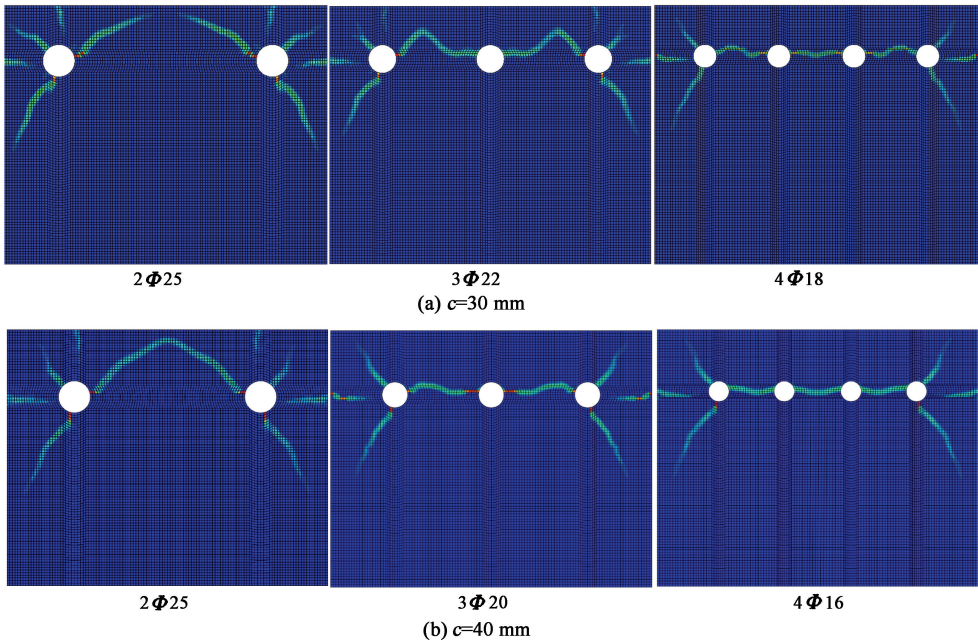


图 4 保护层的开裂路径

Fig. 4 Cracking paths of cover

从图 4 中可以看出,按照根数少且直径大的配筋方式时会形成 4 条表面裂缝,如果这些表面裂缝早早地贯穿整个保护层,很可能先出现保护层局部剥落的现象;相反,间距较小的两钢筋之间容易形成

水平贯通裂缝,且只有 2 条侧表面裂缝,所以根数多且直径小的钢筋组合易引发保护层大面积层状剥落,破坏结构整体性。造成这种开裂路径的原因主要在于钢筋间距的变化,钢筋锈蚀膨胀会使上部混

凝土变形,如果钢筋间距较小,膨胀应力会以压应力的形式作用在相邻钢筋周围的混凝土上,从而限制了保护层上表面裂缝的扩展(图 5);但是混凝土为了消耗腐蚀膨胀增加的应变能,侧面裂缝和内部裂缝将开裂的更严重。通过数值模拟发现钢筋直径对开裂路径影响并不大,这与文献[13]中结论相同。另外,保护层越厚,上部混凝土需消耗更多的应变能使其开裂,从而限制表面裂缝的形成,这也是在 3 Φ 20 情况下未出现上表面裂缝的部分原因。

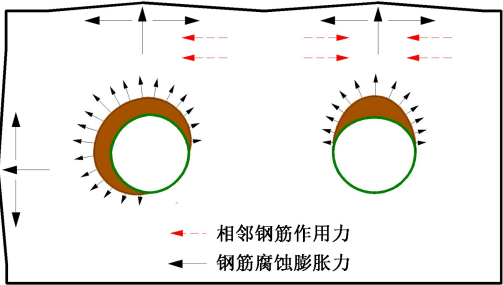
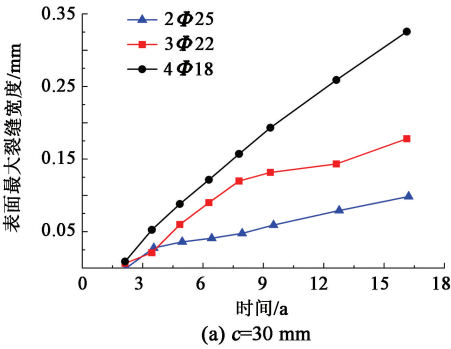


图 5 钢筋锈胀对保护层表面开裂影响示意图

Fig. 5 Schematic diagram of influence of corrosion expansion on cover surface cracking

2. 2. 2 裂缝出现和贯通时间

裂缝出现和贯通时间是评估混凝土结构耐久性的关键。当混凝土的塑性应变大于 0 时,表示裂缝出现;当保护层表面的塑性应变向内扩展到钢筋或内部水平方向的塑性应变相互连通时,表示裂缝贯通。表 1、2 为不同保护层厚度时不同钢筋组合下裂缝出现和贯通时间,其中 t_{in1} 、 t_{si1} 、 t_{th1} 、 t_{to1} 、 t_{in2} 、 t_{th2} 分别为角部钢筋周边内部裂缝出现时间、保护层侧表面裂缝出现时间、保护层侧表面裂缝贯通时间、保护层上表面裂缝出现时间、中部钢筋两侧水平裂缝出现时间和内部水平裂缝贯通时间。



从表 1、2 中可以看出,保护层从 30 mm 增大到 40 mm 时,裂缝出现和贯通时间延长了 0.8 ~ 2 a;当保护层厚度一定时,根数少且直径大的钢筋组合也可以延缓水平裂缝和侧面裂缝的出现和贯通时间,如果间距足够大,表面裂缝很可能在内部裂缝相互贯通之前贯穿整个保护层。因此为了延长实际钢筋混凝土梁的开裂时间,建议适当提高保护层厚度并选择根数少且直径大的钢筋组合。

表 1 不同钢筋组合下裂缝出现和贯通时间($c=30$ mm)

Table 1 Crack initiation and through time for different reinforcement arrangements($c=30$ mm)

时间	贯通时间/a		
	2 Φ 25	3 Φ 22	4 Φ 18
t_{in1}	1. 61	1. 45	1. 41
t_{si1}	2. 18	1. 65	1. 73
t_{th1}	3. 48	2. 87	2. 65
t_{to1}	2. 45	2. 08	—
t_{in2}	—	1. 89	1. 49
t_{th2}	13. 87	2. 17	1. 65

表 2 不同钢筋组合下裂缝出现和贯通时间($c=40$ mm)

Table 2 Crack initiation and through time for different reinforcement arrangements($c=40$ mm)

时间	贯通时间/a		
	2 Φ 25	3 Φ 20	4 Φ 16
t_{in1}	2. 40	2. 30	2. 45
t_{si1}	3. 25	2. 75	3. 04
t_{th1}	5. 10	4. 25	3. 97
t_{to1}	3. 65	—	—
t_{in2}	—	3. 63	3. 79
t_{th2}	5. 44	3. 78	3. 68

2. 2. 3 表面最大裂缝宽度

保护层表面裂缝宽度可以直观地反映混凝土破坏程度和锈裂情况。图 6 给出了不同钢筋组合下表面最大裂缝宽度随侵蚀时间的变化规律。

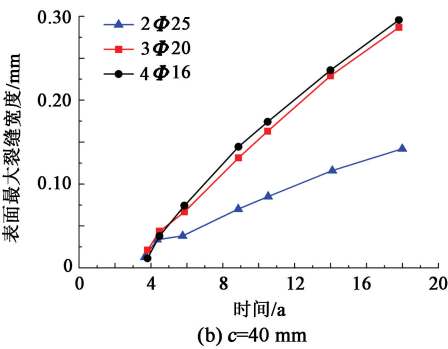


图 6 不同钢筋组合下表面最大裂缝宽度

Fig. 6 Surface maximum crack width for different reinforcement arrangements

从图 6 中可以看出,侵蚀时间在 18 a 内,不同钢筋组合下的表面最大裂缝宽度均不会超过 0.35 mm,而且裂缝宽度在 2Φ25 的情况下最小,在 4Φ18 和 4Φ16 的情况下较大,主要是因为较小的钢筋间距限制了上表面裂缝扩展,反而使侧面裂缝(表面最大裂缝)开裂更严重。因此根数少且直径大的钢筋组合对减小表面裂缝宽度更有利。

2.2.4 钢筋截面损失率

钢筋锈蚀不仅会引起保护层开裂,更直接的

是造成钢筋有效截面面积的减少,从而降低结构的承载和变形能力。图 7 给出了不同钢筋组合下钢筋总截面损失率与侵蚀时间的关系,可以看出钢筋组合从 2 根钢筋变为 4 根钢筋时,截面损失率增大了约 2.5 倍,所以在保护层厚度和侵蚀时间一定的情况下,钢筋越少且直径越大的组合方式,其总截面损失率越小,说明对结构受力性能的影响也就越小。

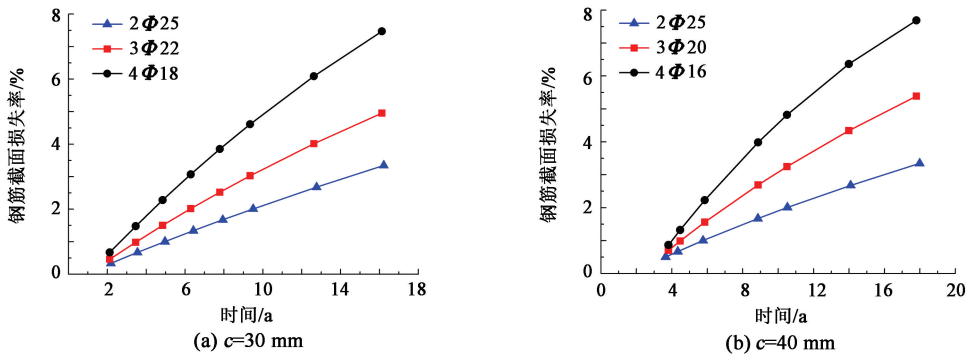


图 7 不同钢筋组合下钢筋截面损失率

Fig.7 Corrosion loss ratio of rebars for different reinforcement arrangements

3 结 论

(1)与已有文献中实验结果的对比验证了二维扩散-力学模型该模型的合理性。对于裂缝扩展路径,根数少且直径大的钢筋组合会造成较多的表面裂缝;根数多且直径小的钢筋组合表面裂缝较少,但更容易形成水平贯通裂缝。

(2)根数少且直径大的钢筋组合不仅可以延缓侧面裂缝和水平裂缝的出现和贯通时间,而且对减少表面最大裂缝宽度和钢筋截面损失率更有利。在钢筋混凝土结构或构件耐久性设计中可以对这种配筋方式加以考虑。

参考文献:

[1] 程旭东,孙连方,曹志烽,等. 沿海钢筋混凝土结构 Cl⁻ 侵蚀数值模拟方法研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015,35(2):144-150.
CHENG Xudong, SUN Lianfang, CAO Zhifeng, et al. Numerical simulation of chloride ion induced corrosion of reinforced concrete structures in marine environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015,35(2):144-150.

[2] 程旭东,孙连方,马红,等. LNG 储罐球形混凝土穹顶的热应力及裂缝分布[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015,39(5):130-136.

CHENG Xudong, SUN Lianfang, MA Hong, et al. Thermal stress and crack distribution of concrete dome of spherical LNG storage tank[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(5):130-136.

[3] MUTHULINGAM S, RAO B N. Non-uniform time-to-corrosion initiation in steel reinforced concrete under chloride environment [J]. Corrosion Science, 2014,82:304-315.

[4] 赵羽习,金伟良. 钢筋锈蚀导致混凝土构件保护层胀裂的全过程分析[J]. 水利学报, 2005,36(8):939-945.
ZHAO Yuxi, JIN Weiliang. Analysis of cover cracking process for concrete member due to steel bar corrosion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,36(8):939-945.

[5] CHEN E, LEUNG C K Y. A coupled diffusion-mechanical model with boundaryelement method to predict concrete cover cracking due to steel corrosion [J]. Corrosion Science, 2017,126:180-196.

[6] QIAO D, NAKAMURA H, YAMAMOTO Y, 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.

[7] CAO C, CHENUNG M M S. Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC structures [J]. Construction and Building Materials, 2014,51:75-

- 81.
- [8] OŽBOLT J, BALABANIC G, KUŠTER M. 3D Numerical modelling of steel corrosion in concrete structures [J]. Corrosion Science, 2011, 53(12): 4166-4177.
- [9] ZHU X, ZI G. A 2D mechano-chemical model for the simulation of reinforcement corrosion and concrete damage [J]. Construction and Building Materials, 2017, 137:330-344.
- [10] DU X, JIN L, ZHANG R. Modeling the cracking of cover concrete due to non-uniform corrosion of reinforcement [J]. Corrosion Science, 2014, 9:189-202.
- [11] 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 Yongsheng, ZHANG Boya, ZHANG Linglei, et al. Propagation of the corrosion layer and model of corrosion distribution on the steel re-enforcing bar in concrete [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(3): 355-360.
- [12] PEDROSA F, ANDRADE C. Corrosion-induced cracking: effect of different corrosion rates on crack width evolution [J]. Construction and Building Materials, 2017, 133:525-533.
- [13] 张仁波, 杜修力, 金浏. 相邻钢筋锈蚀引发混凝土保护层开裂的细观模拟: 第二届全国颗粒材料计算力学会议, CMGM, 2014 [C]. 兰州: 兰州大学出版社, 2014: 409-414.
- (编辑 沈玉英)