

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.03.008

钢筋非均匀锈蚀引起混凝土保护层内裂分析

汪奔^a, 王弘^{a,b}, 张志强^c, 周蒙蛟^{a,b}

(西南交通大学 a.力学与工程学院; b.应用力学与结构安全四川省重点实验室;
c.土木工程学院, 成都 610031)

摘要:根据自然环境下保护层锈胀开裂前的钢筋锈蚀形态,将锈蚀层简化为半椭圆状的非均匀分布,从而建立了钢筋非均匀锈蚀理论模型。经过求解得到了混凝土中锈胀应力理论解,并与有限元计算结果对比,验证了理论解的精确性。根据理论解可知最大周向应力在水平轴上,因此锈蚀层的发展会首先引起保护层内部水平裂纹的产生。增加钢筋直径可有效减低锈胀应力,提高结构抗锈裂的能力。与均匀锈蚀理论模型对比结果表明:均匀锈蚀要远小于非均匀锈蚀条件下的临界锈蚀层厚度,均匀锈蚀的计算结果偏于保守。因此,对锈胀问题进行理论分析时,应采用更接近真实锈蚀形态的非均匀锈蚀模型。

关键词:非均匀锈蚀;混凝土;开裂;理论模型

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2017)03-070-06

Analysis on the internal cracking of concrete cover caused by rebar non-uniform corrosion

WANG Ben^a, WANG Hong^{a,b}, ZHANG Zhiqiang^c, ZHOU Mengjiao^{a,b}

(a. Applied Mechanics and Structure Safety Key Laboratory of Sichuan Province; b. School of Mechanics and Engineering; c. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R.China)

Abstract: According to the corrosion development of rebar that occurred before concrete cover cracking under natural conditions, the corrosion layer was simplified as a non-uniform distribution with semi-elliptical shape to model the non-uniform corrosion of rebar. Formulas were obtained to calculate the corrosion expansion stress of the concrete cover by using theoretical analysis, and its accuracy was verified by compared with finite element results. According to the theoretical solution, the maximum circumferential stress is on the horizontal axis, so the development of the corrosion layer can induce the horizontal internal crack inside the cover. Increasing rebar diameter can effectively decrease the corrosion-expansion stress and improve the ability of anti-rust crack of reinforced concrete structure. Calculated results indicate that the critical thickness of corrosion layer in the uniform corrosion model is far less than

收稿日期: 2016-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478396, 51078318); 四川省青年科技创新团队基金资助项目(2013TD0004)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51478396, 51078318), the Sichuan Provincial Youth Science and Technology Innovation Team (2013TD0004).

作者简介: 汪奔(1986-), 男, 西南交大博士研究生, 主要从事钢筋混凝土结构耐久性研究, (E-mail) wang_ben520@163.com。

王弘(联系人), 男, 西南交大教授, 博士生导师, 主要从事材料的疲劳与断裂研究, (E-mail) 348345326@qq.com。

that in the non-uniform corrosion model and the result of uniform corrosion model is conservative. Therefore, the non-uniform corrosion model is validated to be much closer to the truth to analysis the corrosion problems.

Keywords: non-uniform corrosion; concrete; crack; theoretical model

钢筋锈蚀被认为是引起混凝土结构开裂,导致混凝土结构耐久性失效的最主要原因之一^[1]。随着时间的推移,环境中的有害介质通过混凝土中的微小孔隙侵入到内部,特别是在潮湿或者沿海环境中,混凝土中孔隙水丰富,大大增加了侵蚀介质(如氯离子)的传播速度,更容易引发钢筋锈蚀。锈蚀产物的体积是原有体积的 2~6 倍^[2],由于钢筋周围混凝土对锈蚀层的“围箍”作用,限制了锈蚀产物体积的膨胀,随着钢筋锈蚀量的增加,混凝土中的锈胀力将导致保护层受拉而开裂。当锈胀裂缝贯通混凝土保护层时,环境中的有害介质经锈胀裂缝直接侵入混凝土内部,进一步加剧混凝土锈胀裂缝的扩展,甚至导致混凝土保护层剥落,严重影响混凝土结构的耐久性。

目前,已经有多重模型来预测由于钢筋锈蚀引起的混凝土保护层开裂,大致可以分为 3 类:1)经验模型^[3];2)理论模型^[4-5];3)数值模型^[6];其中理论模型分析方面,学者们通常以钢筋和周围混凝土作为研究对象,假定钢筋锈蚀是均匀的,产生均匀的锈蚀膨胀应力,将混凝土结构简化为受均匀内压作用的单层或双层厚壁圆筒^[4-5]。钢筋锈蚀的相关试验则以室内通直流电的加速锈蚀试验为主,其锈蚀后的轮廓线与非均匀锈蚀有很大差别,更接近于均匀锈蚀^[7]。事实上,实际工程中钢筋均匀锈蚀的现象并不多见,具有普遍性的情况是侵蚀环境下导致的钢筋非均匀锈蚀^[8-11]。因此,文中根据钢筋在自然条件下形成的非均匀锈蚀形态,建立了混凝土非均匀锈胀开裂的理论模型,得到了非均匀锈胀形态下混凝土中锈胀应力场理论解,有助于对混凝土结构锈胀问题的可靠性分析和寿命预测模型的建立。

1 钢筋锈胀模型及其计算理论

1.1 模型描述

袁迎曙^[10]和姬永生^[11]揭示了自然锈蚀条件下钢筋锈蚀量分布规律:在混凝土锈胀开裂前,钢筋锈蚀量基本分布在面向混凝土保护层一侧的钢筋半圆周上,离混凝土保护层最近处锈蚀量最大,离保护层表面距离越远,锈蚀量越小。文献[10-11]将钢筋周边划分为多个测区,利用扫描电子显微镜采集各测区,然后将观测到的照片组合到一起,得到了完整的锈蚀层(见图 1)。将以上观测到的各测区锈蚀层平均厚度值放大一定倍数后得到锈蚀层厚度分布曲线(见图 2),该曲线近似认为钢筋靠近保护层表面一侧的锈蚀轮廓线为椭圆,背向保护层一侧不发生锈蚀。



图 1 CorCha-A1 试样微观观测图^[10]
Fig.1 Full corrosion distribution of specimen CorCha-A1

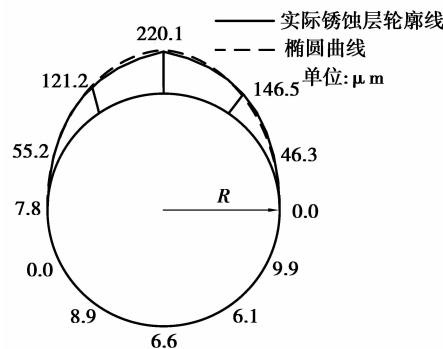


图 2 CorCha-A1 试样锈蚀层轮廓曲线^[10]
Fig.2 Distribution curve of corrosion layer(CorCha-A1)

根据锈蚀层轮廓曲线可建立保护层开裂前钢筋非均匀锈蚀理论模型(见图 3):以钢筋圆心为原点建立如图所示的直角坐标,X 轴和 Y 轴分别为钢筋竖轴和水平轴,钢筋半径为 b ,椭圆长轴为 $b + \Delta$, Δ 为最大锈蚀

层厚度,原点 O 距锈蚀层外边缘的距离为 ρ ,极轴 ρ 与 X 轴的夹角为 θ , u_r 为钢筋初始轮廓面上的径向锈胀位移。

1.2 非均匀锈胀应力分析

由图 3 可知径向锈胀位移 u_r 可以表示为

$$u_r = \rho - b = \frac{be^2(1 + \cos 2\theta)}{2\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \theta} \cdot (1 + \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \theta})}, \quad (1)$$

其中, e 为椭圆离心率。为了便于理论求解,可设 $u_r = A + B \cos 2\theta$, 根据 $u_r|_{\theta=0} = \Delta$, $u_r|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = 0$, 从而求得径向位移为

$$u_r = \frac{\Delta}{2} + \frac{\Delta}{2} \cos 2\theta. \quad (2)$$

从目前已有的试验数据^[8-11]看,最大锈蚀层厚度 Δ 与钢筋半径 b 的比值在 2.5% 以内,此时式(1)和式(2)的最大误差仅为 2.67%,由此可见用式(2)拟合的锈胀轮廓线满足精度要求。

由文献[12]中极坐标下弹性力学平面问题的位移型解答和式(2),可设位移函数的表达式为

$$\varphi = f(t)(\theta + \sin 2\theta). \quad (3)$$

将上式代入相容方程,经过推导和求解可得:

$$\varphi = (A + Bt)e^{-t}\theta + (Ce^{-t} + De^{-3t})\sin 2\theta, \quad (4)$$

其中, A, B, C, D 为待求未知数。

文献[8-11]表明锈蚀层厚度都是微米级,其尺寸相对于钢筋直径和保护层厚度来说是微小的。文中假设锈胀位移只沿径向发展,即 $\tau_{r\theta} = 0$, 同时利用位移条件式(2)可以求得位移函数的表达式为

$$\varphi = \frac{\Delta \cdot b}{4} e^{-t}\theta + \left[\frac{3\Delta \cdot b}{4(5 - \mu)} e^{-t} + \frac{\Delta \cdot b^3(1 + \mu)}{4(\mu - 5)(3 + \mu)} e^{-3t} \right] \sin 2\theta, \quad (5)$$

其中, μ 为材料的泊松比。

从而可求得如下位移和应力分量:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{b\Delta}{2r} + \frac{b\Delta}{2r^3(5 - \mu)} [6r^2 - b^2(1 + \mu)] \cos 2\theta \\ v &= \frac{b\Delta}{2r^3(5 - \mu)} [3r^2(\mu - 1) - b^2(1 + \mu)] \sin 2\theta \\ \sigma_r &= \frac{G}{r^2} \left[-b\Delta + \frac{3b\Delta(1 + \mu)}{r^2(\mu - 5)} (2r^2 - b^2) \cos 2\theta \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{G}{r^2} \left[b\Delta + \frac{3b^3\Delta(1 + \mu)}{r^2(\mu - 5)} \cos 2\theta \right] \\ \tau_{r\theta} &= \frac{G}{r^2} \cdot \frac{3b\Delta(1 + \mu)}{r^2(\mu - 5)} (r^2 - b^2) \sin 2\theta \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

其中, G 为材料的剪切模量。

2 理论解与有限元结果对比分析

根据图 1 和图 2 可知,在保护层锈胀开裂前,锈蚀产物基本分布在面向混凝土保护层一侧的钢筋半圆周上,而理论解计算的是无限大板中全椭圆位移下的解。为了与实际情形进行对比,采用 ABAQUS 对钢筋锈蚀进行仿真分析。模型尺寸为 200 mm × 400 mm,采用平面应变单元 CPE4,混凝土弹性模量为 28 GPa,泊松比为 0.2,钢筋弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3;钢筋圆周处施加椭圆锈胀位移,最大锈蚀层厚度 Δ 设为 0.002 mm;模型竖向对称轴上布置单根中部钢筋,并根据混凝土设计规范^[13]选取不同保护层厚(c)进行对比分析,约束条件为试件底端(远离钢筋一端)固定约束。钢筋周边混凝土中周向应力如图 4 所示。

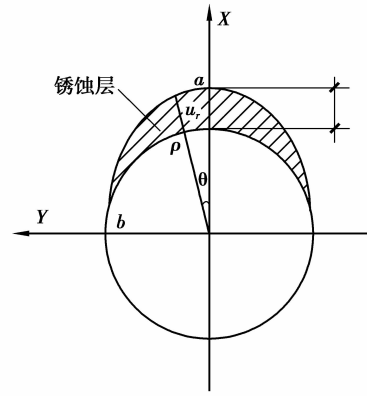


图 3 保护层开裂前钢筋非均匀锈胀理论模型

Fig.3 Mechanical model of non-uniform corrosion before cracking

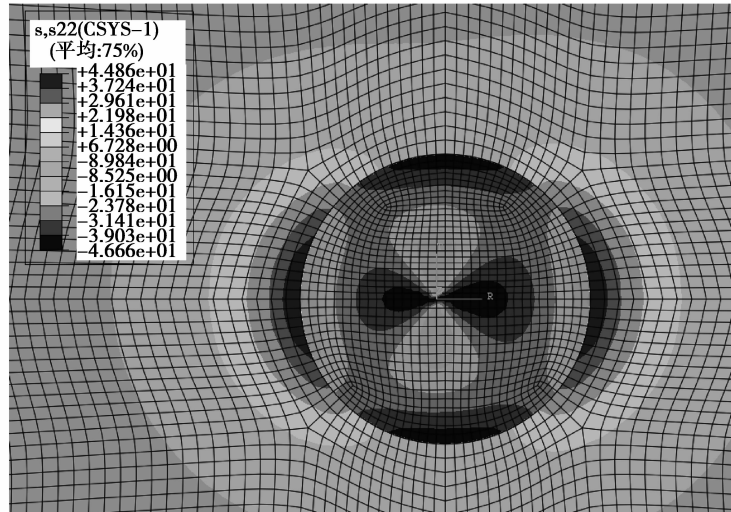


图 4 混凝土内周向应力分布

Fig.4 Circumferential stress distribution in concrete cover

图 5 为钢筋周边的混凝土中周向拉应力随角度变化的规律,从图中可知在±90°处(即 Y 轴上)周向拉应力最大,因此,锈胀裂纹首先会在此处展开,产生内部水平裂纹,这与文献[14]中的细观分析结果一致。与考虑了保护层厚度的有限元计算结果对比,理论解与有限元全的计算结果一致,且误差在 4% 以内。

图 6 为最大周向拉应力(即 Y 轴处的应力值)随钢筋直径变化的规律。考虑到实际锈蚀层为半椭圆分布,而理论解是基于全椭圆锈胀位移下的求解,文中将这 2 种情况进行了对比:图中上方曲线是在钢筋周边施加全椭圆位移的计算结果,下方曲线是只在钢筋上半圆施加半椭圆位移的计算结果。对比图 6 中的 2 条曲线,半椭圆加载时的最大周向拉应力小于全椭圆加载情形,前者约为后者的 0.64 倍。将理论解的计算结果乘以 0.64 后与考虑了保护层厚度的有限元计算结果对比,可知二者的计算结果基本一致,最大误差仅为 4.4%。因此,Y 轴上保护层水平内裂应力 σ_{crack} 以及临界最大锈蚀层厚 Δ_{max} 度可以表示为

$$\sigma_{crack} = 0.64 \frac{G}{b} \left[\Delta + \frac{3\Delta(1+\mu)}{5-\mu} \right], \tag{7}$$

$$\Delta_{max} = \frac{b(5-\mu)f_t}{1.28G(4+\mu)}, \tag{8}$$

其中, f_t 为混凝土的抗拉强度。

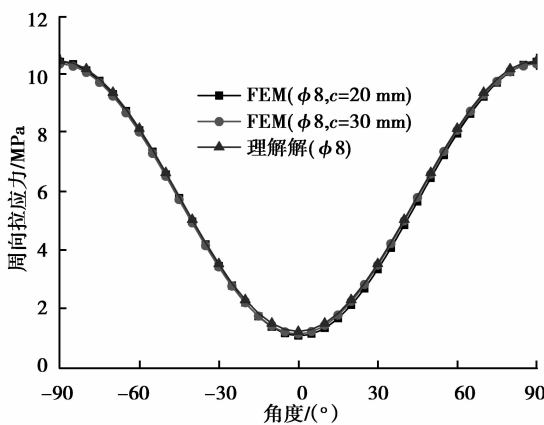


图 5 钢筋/混凝土界面周向拉应力的分布规律

Fig.5 Distribution of circumferential tensile stress on rebar-concrete interface

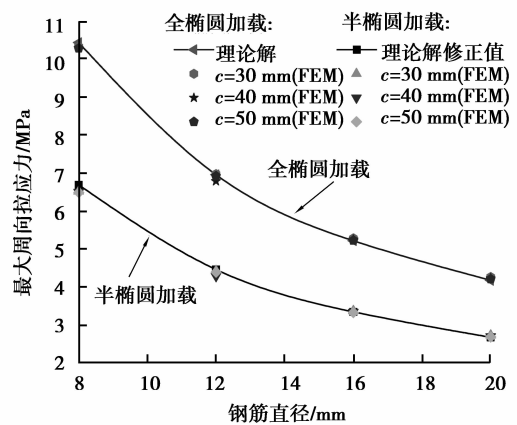


图 6 钢筋/混凝土界面最大周向拉应力随钢筋直径变化

Fig.6 Maximum circumferential tensile stress with the change of rebar diameter on rebar-concrete interface

锈胀裂纹不仅影响结构的耐久性,而且会成为腐蚀介质快速侵入的通道,保护层内部裂纹的产生会加快腐蚀进程。混凝土中钢筋锈蚀是一个非常缓慢的过程,限于试验条件,锈蚀过程中只有锈蚀层厚度、锈蚀率和腐蚀电流密度具有可测性,这样根据式(7)和式(8)以及试验观测结果即可综合判断结构是否发生开裂,对结构耐久性分析具有重要意义。

综合以上分析,在弹性范围内分析混凝土的锈胀应力时,结合目前结构设计规范^[13]对保护层厚度的取值规定,假设混凝土为均质无限大板对计算精度影响不大,此种假设是合理的。虽然理论推导得到的是无限大板中全椭圆位移下的解,但修正后与考虑了保护层厚度以及实际锈蚀层分布的有限元对比,二者计算结果一致。同时由图6可知,对相同锈蚀层厚度而言,随着钢筋直径的增大,混凝土中的锈胀应力逐渐减小,因此增加钢筋直径可有效减低锈胀应力,提高结构抗锈胀的能力。

3 计算结果对比分析

由于钢筋周边的混凝土对锈蚀层的“围箍”作用,限制了锈蚀层的发展,从而混凝土的破坏表现为周向受拉破坏,因此采用 $\sigma_0 = f_t$ 对结构进行内裂判断。表1为均匀锈蚀和非均匀锈蚀条件下混凝土保护层内裂临界锈蚀层厚度对比。从表中可知非均匀锈蚀条件下的理论解远大于均匀锈蚀条件下的理论解,且实际工程中钢筋均匀锈蚀的现象并不多见,具有普遍性的情况是侵蚀环境下导致的钢筋非均匀锈蚀。因此,对钢筋混凝土结构锈胀问题进行理论分析时,应采用更接近真实锈蚀形态的非均匀锈蚀模型。

表1 混凝土保护层内裂临界锈蚀层厚度对比

Table 1 Critical corrosion layer thickness of internal concrete cracking

数据来源	模型	开裂判断准则	f_{tk}/MPa	ϵ_{\max}	b/mm	$\Delta/\mu\text{m}$
胡秉偃 ^[15]	均匀锈蚀	最大主拉应力	2.64	—	8	0.805
			2.74	—	8	0.849
姜慧 ^[16]	均匀锈蚀	最大线应变	—	0.000 1	8	0.8
本文	非均匀锈蚀	最大主拉应力	2.64	—	8	2.83
			2.74	—	8	2.94
试验 ^[17]	非均匀锈蚀	—	2.2	—	8	2.5

注: f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值, ϵ_{\max} 为混凝土极限拉应变。

4 结论

根据自然环境下钢筋锈蚀的实验数据,建立了保护层开裂前钢筋非均匀锈蚀的理论模型,应用极坐标下弹性力学平面问题的位移法求解,得到了混凝土保护层锈胀应力场理论解。对比分析表明理论解与数值解的计算结果一致,表明该理论解真实可靠。通过获得的理论解可对钢筋非均匀锈蚀作用下的混凝土锈胀应力进行理论分析,对含钢筋锈蚀问题的混凝土结构的强度设计、结构耐久性分析和寿命预测具有重要意义。

对非均匀锈蚀形态下混凝土中锈胀应力分析表明,锈胀应力最大值发生在锈蚀层与混凝土接触的界面水平位置,锈胀裂纹会首先在水平方向形成并扩展。锈胀应力与钢筋直径有关,增加钢筋直径可有效减低锈胀应力,提高结构抗锈胀的能力。对比分析了均匀锈蚀条件下的理论解,均匀锈蚀条件下计算得到的保护层内裂时的临界锈蚀层厚度,要远小于非均匀锈蚀条件下的临界锈蚀层厚度,且实际工程中钢筋均匀锈蚀的现象并不多见,具有普遍性的情况是侵蚀环境下导致的钢筋非均匀锈蚀。因此,对钢筋混凝土结构锈胀问题进行理论分析时,应采用更接近真实锈蚀形态的非均匀锈蚀模型。

参考文献:

- [1] Mehta P K. Durability of concrete-fifty years of progress[J]. Special Publication, 1991, 126: 1-32.
- [2] Liu Y, Weyers R E. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(6): 675-681.
- [3] Lu C, Jin W, Liu R. Reinforcement corrosion-induced cover cracking and its time prediction for reinforced concrete structures[J]. Corrosion Science, 2011, 53(4): 1337-1347.
- [4] 张英姿,范颖芳,赵颖华.混凝土保护层胀裂时刻钢筋锈蚀深度的理论模型[J].工程力学,2010,27(9):122-127.
ZHANG Yingzi, FAN Yingfang, ZHAO Yinghua. Theoretical model to determine the depth of reinforcement corrosion at concrete cover cracking[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 122-127. (in Chinese)
- [5] Bhargava K, Ghosh A K, Mori Y. Analytical model for time to cover cracking in RC structures due to rebar corrosion[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(11):1123-1139.
- [6] Du Y G, Chan A H C, Clark L A. Finite element analysis of the effects of radial expansion of corroded reinforcement[J]. Computers & Structures, 2006, 84 (13/14): 917-929.
- [7] 姬永生.钢筋混凝土的全寿命过程与预计[M].北京:中国铁道出版社,2011.
JI Yongsheng. Performance and prediction of reinforced concrete in full service life due to corrosion damage[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011. (in Chinese)
- [8] Zhao Y X, Karimi A R, Wong H S. 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.
- [9] Zhao Y X, Hu B Y, Yu J. Non-uniform distribution of rust layer around steel bar in concrete[J]. Corrosion Science, 2011, 53(12): 4300-4308.
- [10] 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):510.
YUAN Yingshu, JI Yongsheng, MOU Yanjun. Propagation and model of distribution for corrosion of steel bars in concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(7): 5-10. (in Chinese)
- [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 steel re-enforcing bar in concrete[J]. Journal of China University Mining & Technology, 2012, 41(3): 355-360. (in Chinese)
- [12] 宋志远,曾又林.极坐标下弹性力学平面问题的位移型解答[J].西安冶金建筑学院学报,1987,51(3):105-110.
SONG Zhiyuan, ZENG Youlin. The displacement solution of plane problems of elasticity in polar coordinates[J]. Journal of Xian Institute of Metallurgy and Construction Engineering, 1987, 51(3): 105-110. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
Ministry of housing and urban-rural development the People's Republic of China. Code for design of concrete structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [14] Du X L, Jin L, Zhang R B. Modeling the cracking of cover concrete due to non-uniform corrosion of reinforcement[J]. Corrosion Science, 2014, 89: 189-202.
- [15] 胡秉假.锈蚀钢筋与混凝土界面行为研究[D].杭州:浙江大学,2011.
HU Bingyan. Study on the interface between the corroded reinforcement and concrete[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- [16] 姜慧,喻孟雄,刘荣桂.混凝土保护层均匀锈胀内裂分析[J].混凝土,2014(9):1-4.
JIANG Hui, YU Mengxiong, LIU Ronggui. Analysis on the internal cracking of concrete cover due to rebar uniform corrosion[J]. Concrete, 2014(9): 1-4. (in Chinese)
- [17] 李德宝,耿欧,张毅.混凝土中钢筋非均匀锈蚀的余玄函数模型的建立与理论分析[J].四川建筑科学研究,2013,39(5):98-103.
LI Deibao, GENG Ou, ZHANG Yi. The development of rust expansion force of steel bar in concrete and reinforcement corrosion rate's time-varying property[J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(5): 98-103. (in Chinese)