

文章编号:1007-9629(2024)04-0309-11

钢筋非均匀锈蚀与混凝土开裂试验及数值模拟

孙佳, 金祖权*, 秦一琦
(青岛理工大学土木工程学院, 山东青岛 266520)

摘要:采用恒电位驱动氯离子渗透并加速钢筋锈蚀来模拟海洋钢筋混凝土锈蚀,研究了水胶比、保护层厚度和钢筋直径对试件锈胀开裂的影响;利用 COMSOL Multiphysics 软件建立了真实骨料混凝土模型并进行数值模拟.结果表明:本试验制备的混凝土试件在恒电位加速锈蚀下钢筋发生非均匀锈蚀并导致混凝土产生 3 条主裂缝,钢筋临界锈胀应力为 2.85~3.51 MPa,开裂时间为 190~311 h,降低水胶比及增大保护层厚度均可延缓锈胀开裂时间;数值模拟可以很好地再现钢筋混凝土非均匀锈蚀过程,其获得的锈胀应力演变及混凝土开裂模式与试验结果吻合.

关键词:混凝土;钢筋;非均匀锈蚀;锈胀应力;数值模拟

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.04.004

Experimental and Numerical Simulation on Non-uniform Corrosion of Steel Bar and Concrete Cracking

SUN Jia, JIN Zuquan*, QIN Yiqi

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: To simulate the corrosion of reinforced concrete, chloride penetration was driven under constant potential. The effects of water to cement ratio, cover thickness, and steel bar diameter on the rust expansion cracking of specimens were studied. Additionally, the concrete model of real aggregate was established to simulate using COMSOL Multiphysics software. The results show that non-uniform corrosion of steel bar occurs and leads to three main cracks in concrete under constant potential accelerated corrosion. The rust expansion stress of concrete specimen is 2.85–3.51 MPa and the cracking time is 190–311 h in this experiment. Moreover, the cracking time of specimens can be delayed by reduction of the water to cement ratio and increase of the cover thickness. The numerical simulation can well reproduce the non-uniform corrosion process of reinforced concrete, and the evolution of rust expansion stress and crack development is consistent with the test results.

Key words: concrete; steel bar; non-uniform corrosion; rust expansion stress; numerical simulation

钢筋混凝土结构暴露在海洋环境中,海洋中氯离子通过混凝土渗透至钢筋表面并破坏其钝化膜,导致钢筋出现点蚀和非均匀锈蚀^[1-2].钢筋锈蚀后其锈蚀产物体积会膨胀 2~7 倍,当锈蚀产物填满混凝土孔隙之后还会继续膨胀,引起混凝土开裂^[3].

对于钢筋锈蚀诱导混凝土开裂,国内外主要通

过试验、理论模型和数值模拟等进行研究.试验研究中,一些学者^[4-6]改进了通电加速锈蚀试验来研究钢筋的非均匀锈蚀.研究表明非均匀锈蚀钢筋表面出现明显的锈坑;保护层厚度、箍筋、钢筋直径和间距等都会影响钢筋的锈胀开裂.在理论模型方面,Bazant^[7]最早推导了钢筋锈胀开裂的解析模型,后来,椭圆模型^[8]、半椭圆模型^[9]和高斯模型^[10]等非均匀

收稿日期:2023-05-31; 修订日期:2023-08-21

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(52225905)

第一作者:孙佳(1995—),女,山东威海人,青岛理工大学博士生.E-mail:sunjiaqut@outlook.com

通讯作者:金祖权(1977—),男,四川南充人,青岛理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail:jinzuoquan@126.com

锈蚀模型逐渐得到发展.此外,为可视化再现钢筋混凝土锈胀开裂过程,一些数值模型被广泛用于模拟钢筋的均匀/非均匀锈蚀及其导致的混凝土开裂,包括有限元模型^[11-13]、近场动力学模型^[14]、格构模型^[15]和黏聚裂缝模型^[16-17].模拟发现:与均匀锈蚀相比,非均匀锈蚀导致混凝土表面更早出现裂纹;提高混凝土强度等级^[11,16]、增加保护层厚度^[11,16]和增大骨料级配^[13],均可以延缓钢筋的锈蚀;与中部钢筋相比,角部钢筋更容易锈蚀^[12-14,16-17].然而,目前的试验研究主要侧重钢筋锈蚀及混凝土开裂形态描述,对钢筋锈胀应力的精确测量研究较少;同时,在数值模拟方面,现有模型大多采用均质或者随机骨料混凝土模型,难以反映真实骨料的影响,并且加载方式局限于锈蚀产物位错量加载,鲜有考虑锈蚀电流密度的时变加载.

因此,本文通过改进通电加速锈蚀试验来实现氯离子快速渗透至钢筋表面并诱导其非均匀锈蚀,精确测量钢筋锈胀应力,并考虑水胶比、保护层厚度

和钢筋直径对混凝土锈胀开裂的影响.并且,构建真实骨料混凝土模型,依据钢筋锈蚀电流密度计算锈胀应力,数值再现钢筋混凝土锈胀开裂全过程.本文的研究为实现钢筋非均匀锈蚀及锈胀应力监测提供了方法指导,也对评估钢筋混凝土结构的耐久性提供了试验数据及模拟依据.

1 试验

1.1 原材料与配合比

水泥采用P·I 42.5级基准水泥;粗骨料为花岗岩碎石,细骨料为天然河砂,细度模数2.7;选择I级粉煤灰和S95级矿粉作为矿物掺合料;减水剂为JM-PCA(I)聚羧酸高效减水剂,减水率¹⁾为31%左右;水为自来水.通过调整水胶比 m_w/m_b 来控制混凝土强度,试件标准养护至不同龄期以测试混凝土的抗压强度.混凝土的配合比及抗压强度结果如表1所示.

表1 混凝土的配合比及抗压强度
Table 1 Mix proportions and compressive strength of concretes

Concrete No.	m_w/m_b	Mix proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)							Compressive strength/MPa		
		Cement	Mineral powder	Fly ash	Sand	Stone	Water	JM-PCA(I)	3 d	7 d	28 d
C1	0.36	337.0	45.0	68.0	650.0	1 130.0	162.0	3.4	24.5	38.8	46.8
C2	0.32	337.0	50.0	70.0	650.0	1 130.0	145.0	5.4	29.9	46.0	56.2
C3	0.28	380.0	50.0	70.0	650.0	1 130.0	130.0	6.8	34.8	52.6	65.9

1.2 试件设计和制作

钢筋选用HRB400型螺纹钢筋(钢筋直径 D 分别为16、20、25 mm),长度为295 mm,制成空心钢筋后在其内壁环向粘贴应变片,通过DH3816应变采集仪来采集钢筋锈胀产生的应变.应变片的粘贴位置如图1所示.混凝土保护层厚度 C 分别为15、25、35 mm.混凝土试件尺寸为100 mm×100 mm×300 mm.为模拟海洋钢筋混凝土氯离子由表及里渗透,在混凝土保护层表面设置一个溶液槽放置海水.

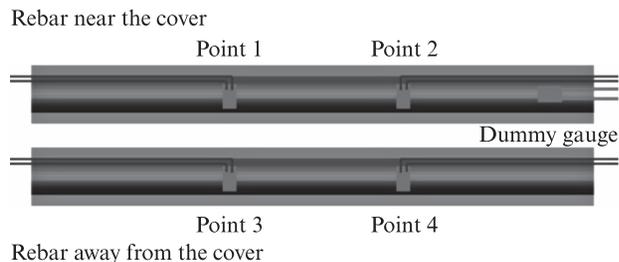


图1 应变片的粘贴位置
Fig. 1 Position of strain gauge

1.3 通电加速锈蚀试验

钢筋混凝土通电加速锈蚀试验装置如图2所示.试验时采用30 V恒压通电,钢筋作为阳极连接直流电源正极,海水槽内的不锈钢片作阴极连接直流电源负极,通过恒电位加速溶液槽中的离子快速渗透至钢筋表面并加速钢筋锈蚀.实时采集钢筋内表面应变并定期记录通电电流.对试件一直通电直至混凝土表面裂缝宽度达到0.2 mm,试验结束后采用超景深显微镜(放大倍数控制在20~200倍)观测钢筋表面的锈蚀情况.

1.4 电化学测试

采用电化学阻抗谱法测试混凝土中钢筋锈蚀电流密度,在通电加速锈蚀试验前期每隔12 h对混凝土试件进行1次电化学测试.测试时采用三电极体系,电化学测试方法与试验装置如图3所示.

2 试验结果分析

2.1 混凝土锈胀开裂分析

试验初期,由于氯离子未渗透至钢筋表面,钢筋

1)文中涉及的减水率和水胶比等均为质量分数或质量比.

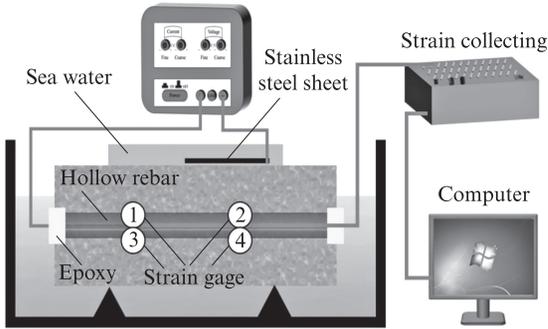


图2 钢筋混凝土通电加速锈蚀试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electrochemical accelerated corrosion device for reinforced concrete

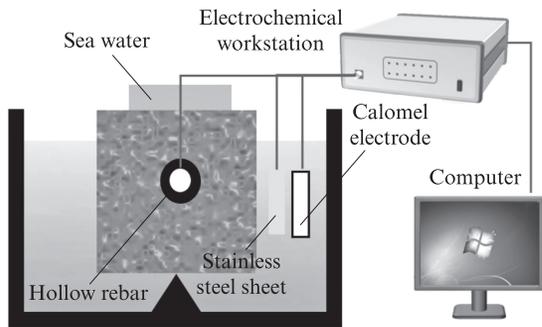


图3 电化学测试示意图

Fig. 3 Schematic diagram of electrochemical test

锈蚀速率较慢.但随着恒电位加速锈蚀时间(t)的延长,混凝土试件中部和表面逐渐因为钢筋锈蚀产物增加及膨胀而出现裂缝,且裂缝逐渐向钢筋两侧扩

展.同时锈蚀产物逐渐填充裂缝并从裂缝处溢出,试件表面出现黄锈,如图4所示.

将锈蚀后的钢筋混凝土试件切开,观察试件裂缝及锈蚀形貌,如图5所示.图5(a)为混凝土试件内部的裂纹形态,从图中可以看出锈蚀产物主要分布在靠近保护层侧钢筋与混凝土界面的上半部分,并形成了相互垂直的3条主裂缝.从图5(b)、(c)可以发现近保护层一侧的钢筋锈蚀严重且表面坑洼,而另一侧几乎没有锈蚀,这表明采用单面渗透可实现混凝土中钢筋非均匀锈蚀.文献[18]通过人工模拟气候加速试验也发现了钢筋与混凝土界面处锈蚀产物的不均匀分布,并且界面附近的裂缝大多被锈蚀产物填充,这与本试验观察到的现象一致.

采用超景深显微镜观测锈蚀钢筋混凝土界面区,得到其局部观测图,如图6所示.从图6(a)、(b)可以看出:钢筋锈蚀产物分布不均匀,靠近保护层处厚度最大,向外则逐渐减小,呈半椭圆形;锈蚀产物不仅出现在钢筋混凝土界面区,而且渗透至裂缝处;近保护层一侧钢筋有一处明显锈坑,深度约为896.38 μm .随着钢筋锈蚀程度的增加,锈蚀产物膨胀会填充钢筋与混凝土之间的界面区,界面区靠近钢筋处锈蚀产物致密、靠近混凝土处由于氧气充分锈蚀产物反而酥松,如图6(c)所示.从图6(d)可以看出,锈胀裂缝主要沿混凝土的骨料-浆体界面过渡区(ITZ)进

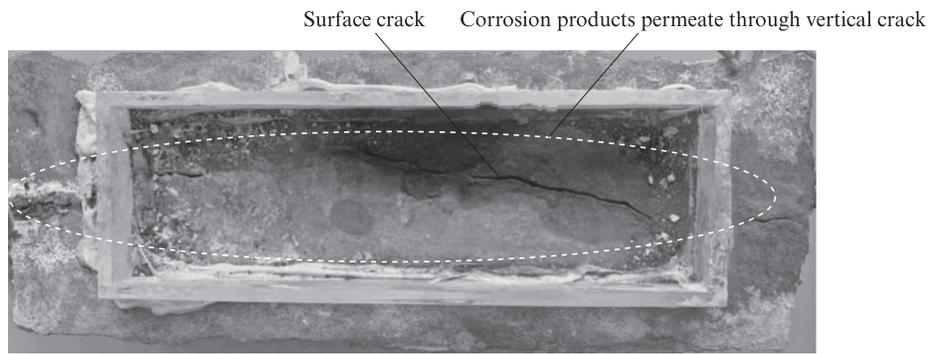


图4 试件裂缝观测图

Fig. 4 Crack observation diagram of specimen

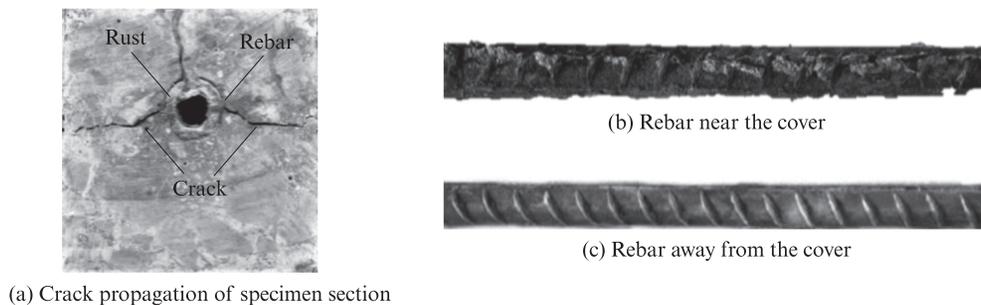


图5 钢筋混凝土试件裂缝及锈蚀形貌图

Fig. 5 Crack and corrosion development of reinforcement concrete specimen

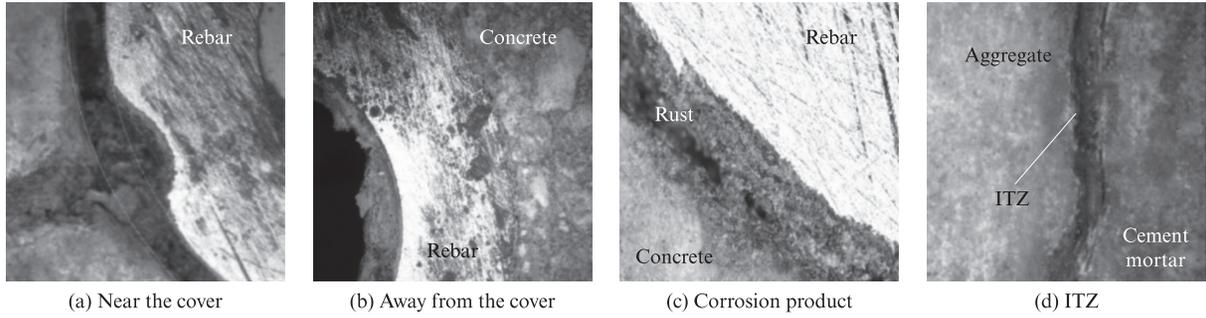


图6 钢筋混凝土试件局部观测图

Fig. 6 Local observation view of reinforcement concrete specimen

行扩展,这主要是由于界面过渡区孔隙率高、强度低,为锈蚀产物提供了膨胀空间和传输路径.

2.2 电化学测试分析

图7为钢筋混凝土中钢筋的电化学阻抗谱.从

图7可以看出:试验开始时钢筋处于钝化状态,阻抗非常大;随着锈蚀时间的延长,阻抗谱曲线呈现明显收缩,容抗弧半径逐渐减小,这表明钢筋锈蚀电流密度逐渐增大,锈蚀加剧.

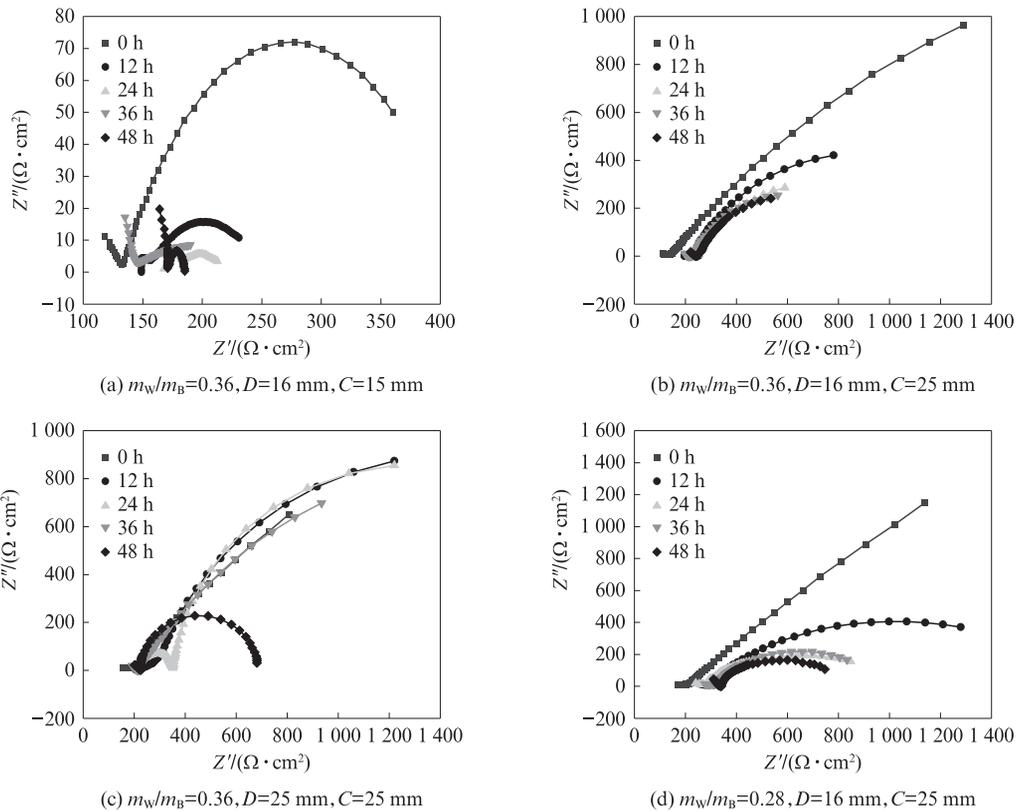


图7 钢筋混凝土中钢筋的电化学阻抗谱

Fig. 7 Electrochemical impedance spectra of steel bar in reinforced concrete

利用Zsimpwin软件中的 $R(QR)(QR)$ 等效电路进行拟合,得到不同类型钢筋混凝土的极化电阻 R_p ,结果见表2.然后根据Stern-Geary公式(式(1))进一步计算得出钢筋锈蚀电流密度 i_{corr} ,其中对于混凝土中已经脱钝的钢筋,塔菲尔斜率 B_e 取26 mV,对于未脱钝的钢筋, B_e 取52 mV^[19].根据 R_p 值变化可以判断得出试验开始12 h时钢筋已经脱钝^[20].因此,计算 i_{corr} 时,本试验0 h时取 $B_e = 52$ mV,此后 B_e 均取26 mV.

采用指数函数对锈蚀电流密度演变进行拟合,结果如图8所示,其相关系数 R^2 均大于0.926 8.

$$i_{corr} = \frac{B_e}{R_p} \tag{1}$$

2.3 钢筋锈胀应力测量

连续采集混凝土试件6 ($m_w/m_b = 0.32, D = 16$ mm, $C = 15$ mm)中钢筋内表面应变,结果如图9(a)所示.按照钢筋内壁环向应变与应力的关系(式

表2 不同类型钢筋混凝土的极化电阻
Table 2 Polarization resistance under different reinforced concrete types

No.	m_w/m_b	C/mm	D/mm	$R_p/(k\Omega \cdot cm^2)$				
				0	12 h	24 h	36 h	48 h
1	0.36	15	16	543	235	129	89	46
2	0.36	25	16	1 206	613	323	93	54
3	0.36	35	16	1 772	498	379	110	63
4	0.36	15	20	524	221	164	121	72
5	0.36	15	25	522	324	206	102	54
6	0.32	15	16	862	436	209	84	59
7	0.28	15	16	1 024	372	193	72	53

(2)计算钢筋的外壁锈胀应力^[21],结果如图9(b)所示.

$$q = (1 - \sqrt{1 - \epsilon_{hs}}) \frac{E_s (D^2 - r_1^2)}{2\mu D^2} \quad (2)$$

式中: q 为钢筋外壁锈胀应力; ϵ_{hs} 为钢筋内壁环向应变, $\epsilon_{hs} = \frac{r_1^2 - r_2^2}{r_1^2}$; r_1 为钢筋锈蚀前内半径; r_2 为钢筋锈蚀后内半径; E_s 为钢筋弹性模量; μ 为钢筋泊松比.

从图9可以看出:靠近保护层侧钢筋测点1和测点2应力曲线均呈现先增大后减小的趋势,其应力释放点即为钢筋锈胀诱导混凝土开裂点(此时的应力为临界锈胀应力),钢筋达到临界锈胀应力3.00~3.50 MPa时混凝土开裂;背离保护层侧的钢筋测点3和测点4锈胀应力趋于0 MPa,说明该侧钢筋未锈蚀.因此,采用钢筋内表面环贴应变片可以监测到钢筋锈胀应力演变,并捕捉到钢筋锈胀诱导混凝土开裂时间.

2.3.1 水胶比影响

钢筋直径为16 mm,保护层厚度为15 mm,混凝土水胶比为0.36、0.32和0.28的混凝土试件中钢筋锈胀应力计算结果如图10所示.由图10可见:随着混凝土水胶比的降低(强度增加),钢筋临界锈胀应力出现时间延长、诱导混凝土开裂时间滞后;水胶比为0.36、0.32、0.28混凝土的锈胀开裂时间分别为220、264、295 h(测点1)和210、252、294 h(测点2),临界锈胀应力分别为2.93、3.23、3.50 MPa(测点1)和2.94、3.30、3.51 MPa(测点2).

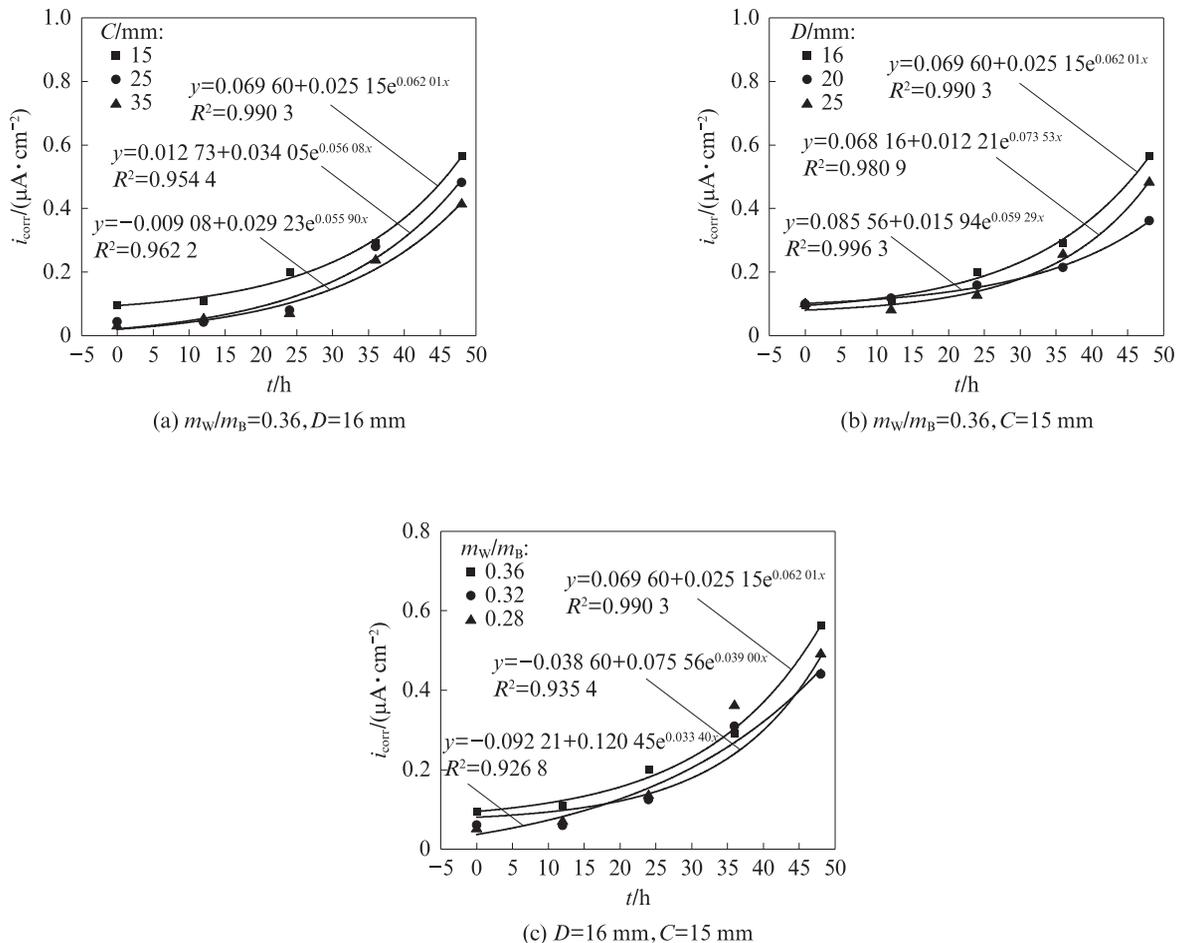


图8 不同类型钢筋混凝土拟合的锈蚀电流密度演化方程

Fig. 8 Fitting regression equation of corrosion current density of different types of reinforced concretes

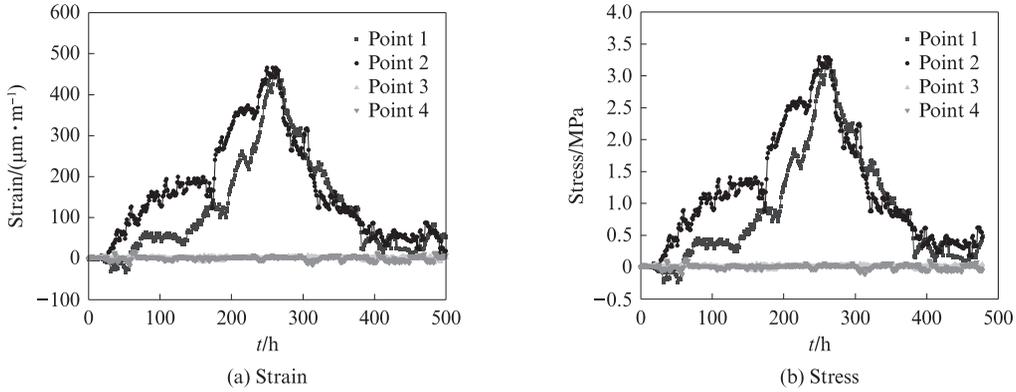


图9 混凝土试件6($m_w/m_b=0.32, D=16\text{ mm}, C=15\text{ mm}$)中钢筋锈胀应变及应力变化

Fig. 9 Evolution of rust expansion strain and stress of concrete specimen 6($m_w/m_b=0.32, D=16\text{ mm}, C=15\text{ mm}$)

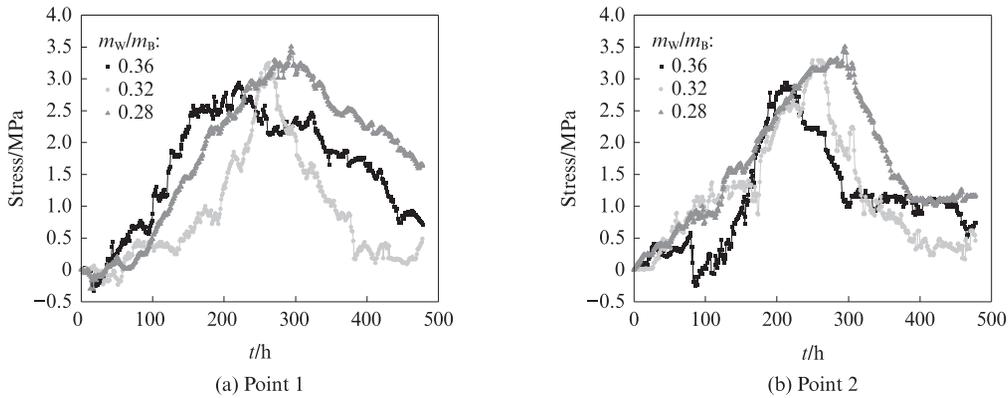


图10 不同水胶比混凝土试件中钢筋锈胀应力变化

Fig. 10 Evolution of rust expansion stress of concrete specimens with different water to cement ratios($D=16\text{ mm}, C=15\text{ mm}$)

2.3.2 保护层厚度影响

选取钢筋直径为16 mm、水胶比为0.36的混凝土试件,分析保护层厚度对钢筋锈胀应力的影响,结果如图11所示.由图11可见,保护层厚度为15、25、35 mm的混凝土试件锈胀开裂时间分别为220、247、311 h(测点1)和210、252、294 h(测点2),临界锈胀应

力分别为2.93、3.07、3.28 MPa(测点1)和2.93、3.04、3.28 MPa(测点2).这说明混凝土保护层厚度越大,氯离子渗透至钢筋表面的时间越长,钢筋混凝土锈胀开裂时间越滞后,临界锈胀应力越大.适当提高保护层厚度可以延缓钢筋锈蚀速率及其诱导混凝土开裂时间,从而延长其服役寿命.

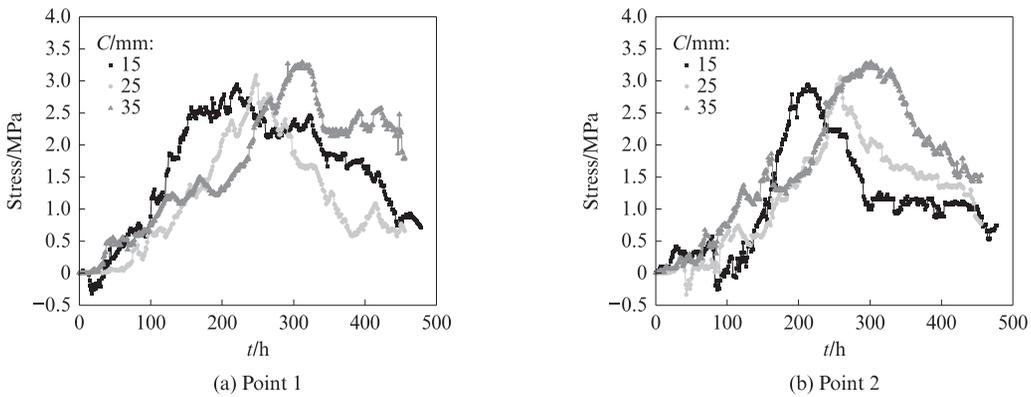


图11 不同保护层厚度混凝土试件中钢筋锈胀应力变化

Fig. 11 Evolution of rust expansion stress of concrete specimens with different cover thicknesses($m_w/m_b=0.36, D=16\text{ mm}$)

2.3.3 钢筋直径影响

混凝土水胶比为0.36、保护层厚度为15 mm,钢筋直径为16、20、25 mm时,钢筋锈胀应力变化曲线

见图12.由图12可见,在锈蚀200 h左右时,钢筋锈胀应力均达到峰值,混凝土出现锈胀开裂.这说明钢筋直径对混凝土锈胀开裂影响不明显.

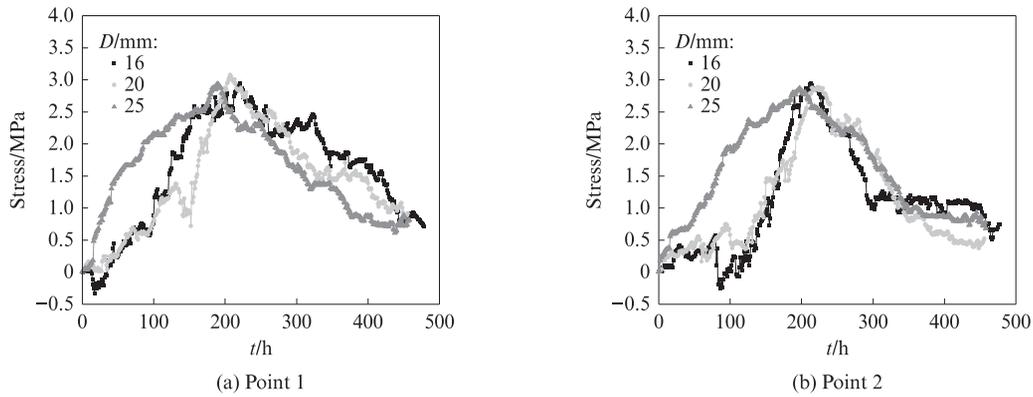


图12 不同钢筋直径混凝土试件中钢筋锈胀应力变化

Fig. 12 Evolution of rust expansion stress in concrete specimens with different steel rebar diameters($m_w/m_b=0.36$, $C=15$ mm)

3 非均匀锈蚀钢筋诱导混凝土开裂数值模拟

3.1 数值模拟方法

基于混凝土数字图像处理技术建立真实骨料混凝土模型^[22],建模过程中考虑界面过渡区的影响,引入200 μm厚度的界面过渡区,具体的建模操

作过程见图13.采用COMSOL Multiphysics软件进行数值模拟,材料参数选用混凝土试件的力学参数,采用Structural Mechanics Module定义载荷和边界条件.模拟过程中假设混凝土的各项性能指标在开裂前后一致,忽略锈蚀产物对混凝土孔隙和裂缝的填充.

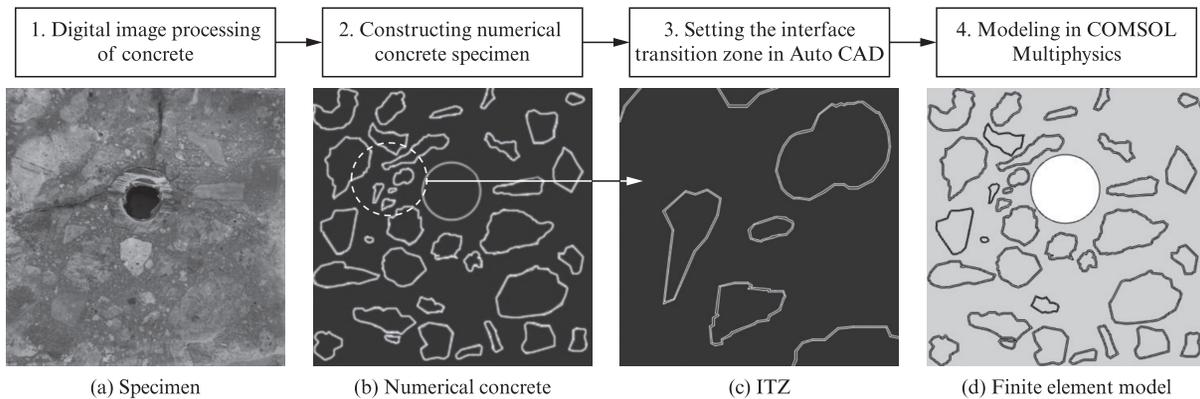


图13 真实骨料混凝土建模步骤

Fig. 13 Modeling process of real aggregate concrete

通过考虑钢筋与混凝土界面“空隙区”的钢筋半椭圆锈蚀模型^[9](图14)来模拟钢筋的非均匀锈蚀.钢筋非均匀锈蚀产物总量 W_{rust} 主要由钢筋半椭圆锈蚀带(最大厚度为 d_{cost})的锈蚀产物量 W_s 、空隙区(深度为 d_0)的锈蚀产物量 W_0 以及导致混凝土开裂的锈蚀产物量 W_m (最大厚度为 d_m)组成.

考虑钢筋混凝土二维平面模型,由此可以得到钢筋锈蚀产物总量的表达式为:

$$W_{rust} = \alpha_{rust} \times W_{rust} \times \frac{\rho_{rust}}{\rho_{st}} + \frac{\pi}{2} \times \rho_{rust} \left((D + d_0) d_0 + \left(\frac{D}{2} + d_0 \right) d_m \right) \quad (3)$$

式中: α_{rust} 为铁与锈蚀产物相对分子质量的比值,一般为0.523~0.622^[23]; ρ_{st} 为钢筋的密度; ρ_{rust} 为钢筋锈

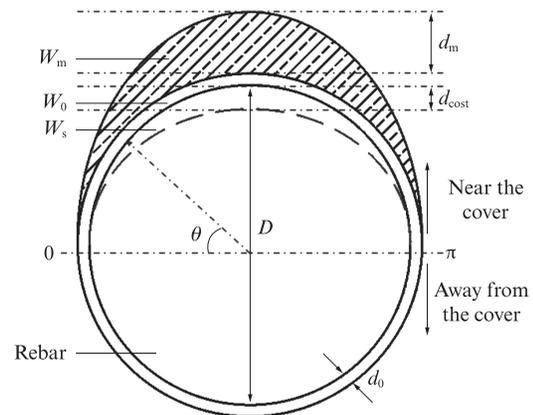


图14 钢筋半椭圆锈蚀模型

Fig. 14 Model of semi-elliptical corrosion of rebar

蚀产物的密度.

为了得到 d_m 值,采用文献[9]给出的公式:

$$d_m = \frac{4W_{rust}}{\pi D} \left[\frac{1}{\rho_{rust}} - \frac{\alpha_{rust}}{\rho_{st}} \right] - 2d_0 \quad (4)$$

钢筋锈蚀产物总量与锈蚀电流密度 i_{corr} 和钢筋直径 D 的关系为:

$$\delta(\theta, t) = \frac{\left[D + 2d_0 + \frac{8W_{rust}}{\pi D} \left(\frac{1}{\rho_{rust}} - \frac{\alpha_{rust}}{\rho_{st}} \right) - 4d_0 \right] (D + 2d_0)}{\sqrt{(2D + 4d_0)^2 + 32 \left[\frac{2W_{rust}}{\pi D} \left(\frac{1}{\rho_{rust}} - \frac{\alpha_{rust}}{\rho_{st}} \right) - d_0 \right] \sqrt{\left[D + 2d_0 + \frac{4W_{rust}}{\pi D} \left(\frac{1}{\rho_{rust}} - \frac{\alpha_{rust}}{\rho_{st}} \right) - 2d_0 \right] \cos^2 \theta}} - \frac{D}{2} - d_0 \quad (6)$$

式中: θ 为极坐标系下钢筋内边界点的极角, $0 \leq \theta \leq \pi$.

将电化学阻抗谱获得的钢筋锈蚀电流密度演化方程(见图8)作为参数代入模型中,然后按照式(6)计算出的锈胀位移进行径向加载.

3.2 数值模拟结果

选取混凝土水灰比为 0.32, 保护层厚度为

$$W_{rust} = \sqrt{2 \int_0^t 0.105(1/\alpha_{rust}) \pi D i_{corr}(t) dt} \quad (5)$$

据此,可以得到钢筋内边界的锈胀位移 $\delta(\theta, t)$:

25 mm, 钢筋直径为 25 mm 的钢筋混凝土试件进行有限元模拟, 模拟结果如图 15 所示. 从图 15 可以看出: 锈胀裂缝首先出现在钢筋与混凝土界面; 在 200 h 时, 试件出现 3 条主裂缝, 其中垂直裂缝在混凝土表层逐渐扩展; 在 500 h 时, 裂缝沿着骨料间的界面过渡区和砂浆扩展, 最终的裂缝呈现出非均匀锈蚀形态.

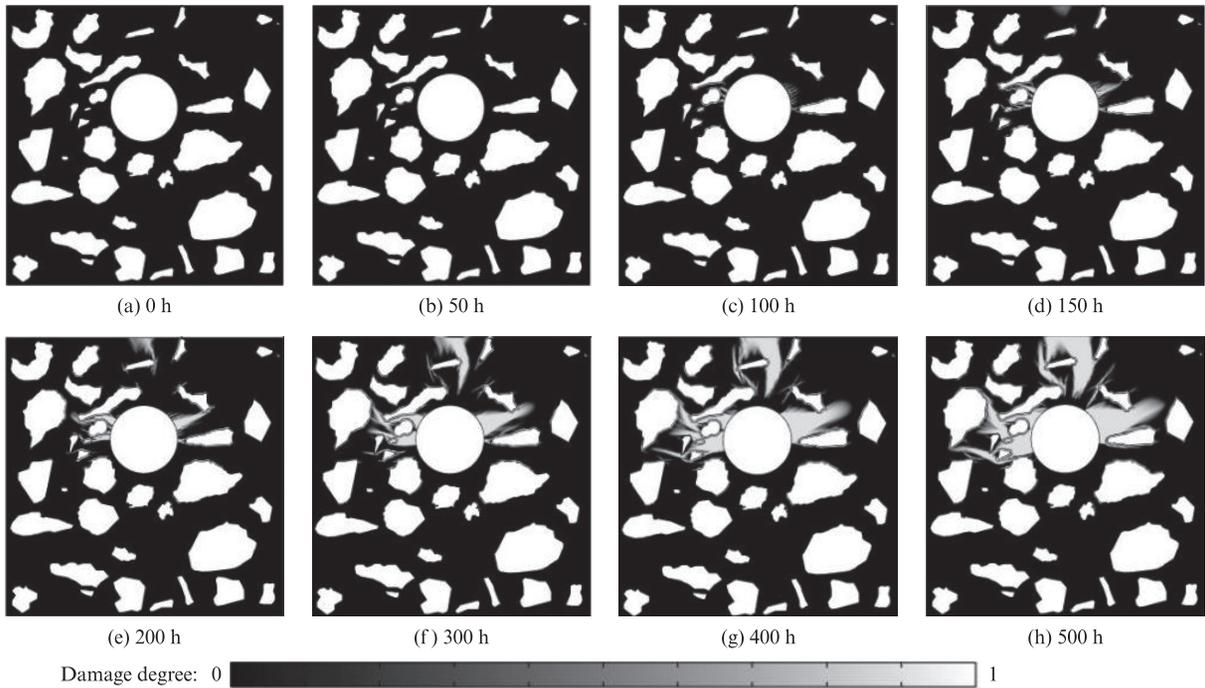


图 15 钢筋混凝土试件开裂过程模拟图

Fig. 15 Simulated diagram of cracking process for reinforced concrete specimen

3.3 试验与模拟结果对比验证

3.3.1 钢筋锈胀应力对比

把试验与模拟结果得出的钢筋临界锈胀应力和开裂时间进行对比, 结果如表 3 所示. 由表 3 可见, 试验与模拟结果非常接近, 这表明数值模拟能可靠地模拟钢筋的非均匀锈蚀及其诱导的混凝土开裂过程.

图 16 为试验与模拟的临界锈胀应力对比图. 从图 16 可以看出: 试验结果的曲线具有波动性, 但与模

拟的曲线趋势大体一致, 这是因为混凝土是非均匀介质, 会造成钢筋周围锈蚀电流不均匀从而影响锈胀应力^[24]; 与试验结果相比, 临界锈胀应力的模拟结果略大, 开裂时间的模拟结果也略微延长, 这主要是因为有限元模型未考虑混凝土本身存在的缺陷.

3.3.2 裂缝扩展情况

将试验后的钢筋混凝土试件切面图像导入 Auto CAD 中, 模拟锈胀裂缝扩展情况, 并与试验结果进行对比, 结果见图 17. 由图 17 可以看出, 试验与

表3 不同钢筋混凝土材料参数下钢筋非均匀锈蚀的临界锈胀应力和开裂时间

Table 3 Critical rust expansion stress and cracking time of non-uniform corrosion under different reinforced concrete material parameters

No.	Critical rust expansion stress of rebar/MPa				Critical cracking time/h			
	Point 1	Point 2	Mean value	Model	Point 1	Point 2	Mean value	Model
1	2.93	2.94	2.94	3.24	220	210	215	234
2	3.07	3.04	3.06	3.34	247	252	250	265
3	3.28	3.28	3.28	3.48	311	294	303	282
4	3.08	2.89	2.99	3.18	209	222	216	217
5	2.93	2.85	2.89	3.15	190	200	195	206
6	3.23	3.30	3.27	3.55	264	252	258	286
7	3.50	3.51	3.51	3.76	295	294	295	310

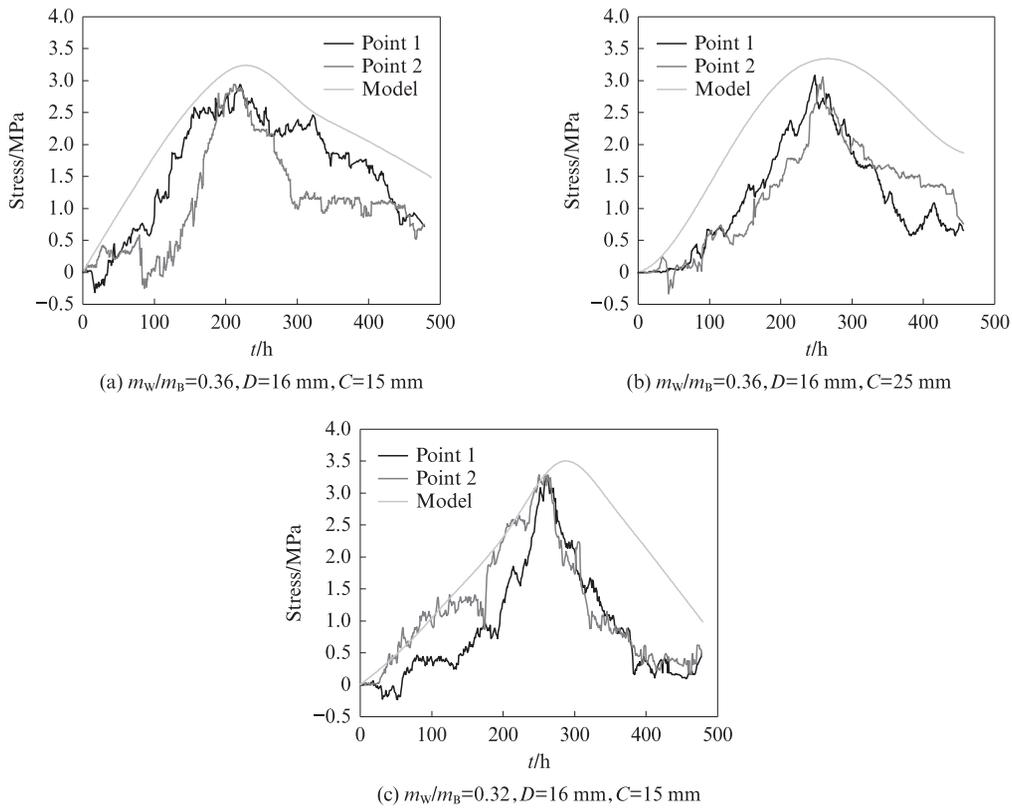


图16 试验与模拟的锈胀应力对比

Fig. 16 Rust expansion stress of test and simulation

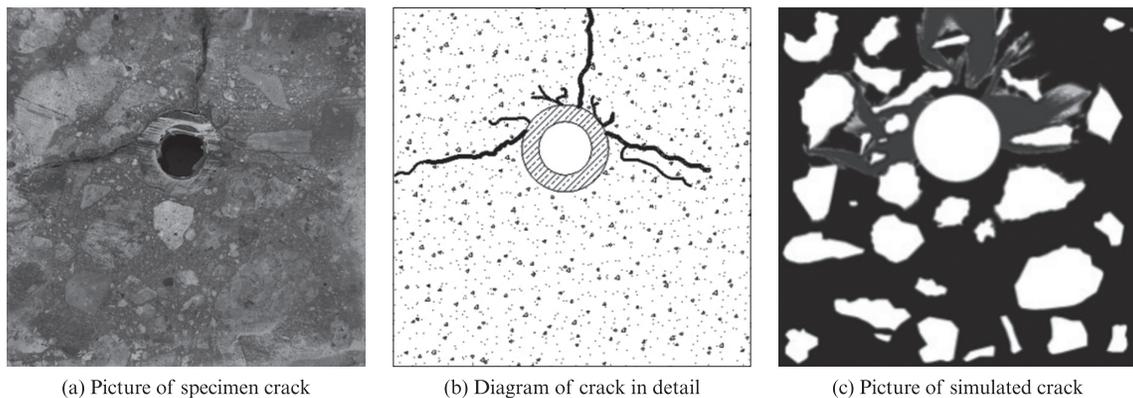


图17 试验与模拟锈胀裂缝扩展情况

Fig. 17 Schematic diagram of crack of test and simulation

模拟结果均显示混凝土出现3条主裂缝,裂缝分布于靠近保护层的钢筋上部,并且优先沿着界面过渡区

的位置进行扩展.对比结果表明本数值模型能较好地模拟出钢筋混凝土锈胀开裂全过程.

4 结论

(1)采用恒电位驱动混凝土表面氯离子向内部渗透可以实现钢筋非均匀锈蚀.试件靠近保护层侧的混凝土表面中间部分先开裂形成垂直裂缝,之后向两侧扩展形成3条主裂缝.

(2)混凝土试件的钢筋锈胀应力均呈现先增大后减小的趋势,临界锈胀应力在2.85~3.51 MPa,开裂时间在190~311 h;降低水胶比和增大保护层厚度均会增大钢筋临界锈胀应力,明显延长钢筋混凝土试件锈胀开裂的时间;钢筋直径对混凝土试件锈胀开裂时间和临界锈胀应力的影响不明显.

(3)真实骨料混凝土模型有助于更加真实准确地模拟钢筋混凝土裂缝模式和开裂过程,因此在模拟时应考虑混凝土真实骨料的影响.此外,采用半椭圆锈蚀模型模拟的钢筋非均匀锈蚀结果与试验结果基本吻合,验证了数值模拟的可靠性.

(4)后续会进一步研究钢筋数量、钢筋位置以及骨料级配等参数对钢筋锈胀开裂的影响,并引入温湿度和氧气含量等环境条件参数进行分析,为钢筋混凝土构件的耐久性设计和评估提供指导.

参考文献:

- [1] 钟小平,戴仁礼,袁承斌,等.氯盐环境下钢筋锈蚀损伤混凝土应力-应变本构模型[J].建筑材料学报,2021,24(4):788-793. ZHONG Xiaoping, DAI Renli, YUAN Chengbin, et al. Stress-strain constitutive model of concrete damaged by rebar corrosion in chloride environment [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):788-793. (in Chinese)
- [2] OTIENO M, BEUSHAUSEN H, ALEXANDER M. Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete-Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine environments[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 79: 373-385.
- [3] 赵铁军,毕忠华,张鹏,等.氯盐环境下混凝土中钢筋锈蚀的梯形电极监测[J].建筑材料学报,2014,17(6):989-993. ZHAO Tiejun, BI Zhonghua, ZHANG Peng, et al. Ladder-shaped-electrode monitoring for corrosion of steel bar in concrete under chloride environment [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(6):989-993. (in Chinese)
- [4] 金南国,何家豪,付传清,等.钢筋加速非均匀锈蚀试验方法和锈蚀形态研究[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(3):483-490. JIN Nanguo, HE Jiahao, FU Chuanqing, et al. Study on experimental method and morphology of accelerated non-uniform corrosion of steel bars [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(3):483-490. (in Chinese)
- [5] 王坤,赵羽习,夏晋.混凝土结构锈裂形态试验研究及数值模拟[J].建筑结构学报,2019,40(7):138-145. WANG Kun, ZHAO Yuxi, XIA Jin. Experimental study and numerical simulation of corrosion-induced crack patterns of concrete structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(7):138-145. (in Chinese)
- [6] 尚明刚,张云升,何忠茂,等.盐渍土环境下钢筋混凝土恒电流加速锈蚀试验及可靠性分析[J].建筑材料学报,2022,25(7):751-759. SHANG Minggang, ZHANG Yunsheng, HE Zhongmao, et al. Constant current accelerated corrosion test and reliability analysis of reinforced concrete in saline soil environment [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):751-759. (in Chinese)
- [7] BAZANT Z P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures—Theory [J]. Journal of the Structural Division, 1979, 105(6):1137-1153.
- [8] 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.
- [9] YANG S T, XI X, LI K F, et al. Numerical modeling of nonuniform corrosion-induced concrete crack width [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(8):04018120.
- [10] ZHAO Y X, ZHANG X W, DING H J, 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.
- [11] 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.
- [12] 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. JIN Liu, ZHANG Renbo, DU Xiuli, et al. Investigation on cracking behavior of concrete cover induced by corner located rebar corrosion [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 255-261. (in Chinese)
- [13] 李永珑,张志强,林迪睿,等.钢筋锈胀对混凝土构件保护层开裂影响的分析[J].铁道工程学报,2022,39(5):73-79. LI Yonglong, ZHANG Zhiqiang, LIN Dirui, et al. Analysis of the influence of reinforcement corrosion expansion on cracking of concrete cover [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(5):73-79. (in Chinese)
- [14] ZHAO J M, CHEN Z G, MEHRMASHHADI J, et al. A stochastic multiscale peridynamic model for corrosion-induced fracture in reinforced concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 229:106969.
- [15] GRASSL P, DAVIES T. Lattice modelling of corrosion induced cracking and bond in reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(9):918-924.
- [16] GUZMÁN S, GÁLVEZ J C. Modelling of concrete cover cracking due to non-uniform corrosion of reinforcing steel [J]. Construction and Building Materials, 2017, 155:1063-1071.
- [17] XI X, YANG S T, LI C Q. A non-uniform corrosion model and meso-scale fracture modelling of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 108:87-102.

- [18] 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.
- [19] 冯兴国, 范琦琦, 杨洋, 等. 交变温度对细骨料珊瑚混凝土中钢筋耐腐蚀性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(5):525-531. FENG Xingguo, FAN Qiqi, YANG Yang, et al. Effect of alternating temperature on corrosion resistance of reinforcements in fine coral aggregate concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(5):525-531. (in Chinese)
- [20] ZUO X B, LI X N, LIU Z Y, et al. Electrochemical and microstructural study on depassivation of ductile iron surface in chloride-contained simulated cement-mortar pore solution[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229:116907.
- [21] CHEN F X, JIN Z Q, WANG E D, et al. Relationship model between surface strain of concrete and expansion force of reinforcement rust[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):4208.
- [22] 李宁, 金祖权, 于泳, 等. 混凝土真实细观模型的生成及氯离子传输的数值模拟[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(6):71-79. LI Ning, JIN Zuquan, YU Yong, et al. Generation of real mesoscopic model of concrete and numerical simulation of chloride ions transportation [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(6):71-79. (in Chinese)
- [23] BHARGAVA K, GHOSH A K, MORI Y, et al. Modeling of time to corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(11):2203-2218.
- [24] 李亚辉, 郑山锁, 董立国, 等. 非均匀锈蚀钢筋拉伸性能试验与模拟[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(9):991-998. LI Yahui, ZHENG Shansuo, DONG Liguang, et al. Tensile properties test and simulation of non-uniform corroded reinforcement[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(9):991-998. (in Chinese)