

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.027



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



砂浆内钢筋锈胀应力监测与数值模拟研究

秦一琦, 金祖权, 李师财, 高源, 鹿婷, 孙涛
(青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要: 钢筋锈蚀是导致海洋混凝土结构失效破坏的最主要原因, 探明钢筋锈胀应力发展及其诱导混凝土开裂的过程对于钢筋混凝土服役寿命预测有重要意义。采用内掺盐与恒电位加速砂浆内钢筋锈蚀, 通过砂浆外不锈钢圆环环贴应变片实现钢筋锈蚀过程的应变监测, 并计算锈胀应力, 利用 COMSOL 软件分析混凝土中钢筋锈胀应力发展及混凝土锈胀开裂历程。结果表明: 利用有限元与钢筋锈胀时变径向位移加载, 实现钢筋混凝土锈胀开裂过程的模拟, 模拟结果与试验结果基本一致; 不考虑砂浆、钢筋的非均匀性及锈蚀产物对开裂砂浆的充填效应, 模拟结果不能真实反映锈胀应力的波动性及锈胀应力释放与缓慢增加的过程; 提高砂浆强度、减小钢筋直径可以有效延缓钢筋锈胀导致混凝土开裂的时间。

关键词: 砂浆; 钢筋; 均匀锈蚀; 数值模拟; 锈胀应力

中图分类号: TU511.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)02-0179-08

Experimental and numerical simulation study on corrosion evolution of steel bar in mortar

QIN Yiqi, JIN Zuquan, LI Shicai, GAO Yuan, LU Ting, SUN Tao

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, P. R. China)

Abstract: Reinforcement corrosion is the primary cause of the failure of marine concrete structures. Thus, it is necessary to explore the development of corrosion expansion stress and the process of induced concrete cracking, which is beneficial to the service life prediction of reinforced concrete. In the experiments, the reinforcement corrosion in mortar is accelerated by adding salt and using constant potential. The strain in the reinforcement corrosion process is monitored by the strain gauge attached to the stainless steel ring outside the mortar to calculate the corrosion expansion stress. The COMSOL software is used to analyze the development of corrosion expansion stress in concrete and the whole concrete cracking process induced by reinforcement corrosion. The results show that the finite element method and the time-varying radial displacement loading method can be used in simulating and testing the corrosion expansion and cracking process of reinforced concrete

收稿日期: 2021-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(52078259, 5191102012)

作者简介: 秦一琦(1997-), 女, 主要从事海洋环境混凝土结构耐久性研究, E-mail: tumuqyq@163.com。

金祖权(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: jinzuquan@126.com。

Received: 2021-11-22

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No.52078259, 5191102012)

Author brief: QIN Yiqi (1997-), main research interest: durability of concrete structure in marine environment, E-mail: tumuqyq@163.com.

JIN Zuquan (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: jinzuquan@126.com.

respectively, the results of which are basically consistent. Without considering the inhomogeneity of mortar and reinforcement and the filling effect of corrosion products on cracked mortar, the simulation results fail to reflect the fluctuation and the process of release and gradual increase of corrosion expansion stress. In addition, by increasing the mortar strength and decreasing the reinforcement diameter, corrosion expansion and cracking of reinforcement can be effectively delayed.

Keywords: mortar; reinforcement; uniform corrosion; numerical simulation; rust expansion stress

钢筋锈蚀是导致海洋工程混凝土结构破坏的主要原因^[1],柯伟^[2]用 Uhlig 方法和 Hoar 方法研究发现,每年钢筋腐蚀损失在 2 000 亿元人民币以上。世界各国的腐蚀损失平均可占国民经济总产值(GDP)的 2%~4%,其中,与钢筋腐蚀有关的损失高达 40%^[3]。监测混凝土中钢筋锈蚀过程并获得其锈胀应力发展是建立钢筋混凝土第二阶段服役寿命预测、提出延缓钢筋锈蚀措施的基础^[4]。

考虑到混凝土的不透明性,学者们常用电化学方法获得混凝土中钢筋腐蚀电流密度,利用法拉第定律获得钢筋锈胀产物量,推导出钢筋锈胀应力。Wang 等^[5]利用 XCT 与 DIC 技术相结合实现了混凝土中钢筋锈胀应力发展的实时监测。在此基础上,陈永丰^[6]利用砂浆外圆环环贴应变片实时采集钢筋锈胀传递到砂浆和钢环上的锈胀变形。通过精确建模和数值模拟技术,也能较好地实现混凝土中钢筋锈胀应力发展模拟,赵羽习等^[7]利用 ANSYS 软件对混凝土构件中钢筋锈胀力进行计算分析,提出了基于有限元数值分析的混凝土锈胀时刻钢筋锈胀率的计算方法。李海波等^[8]采用快速锈蚀试验和平面非线性有限元方法建立了钢筋锈胀率与钢筋直径、保护层厚度和混凝土强度等级的定量关系。金浏^[9]从细观尺度出发,采用 Monte-Carlo 法建立了混凝土二维随机骨料模型,对钢筋均匀锈蚀引发的保护层开裂行为进行数值研究。王坤^[10]利用 ABAQUS 对多根钢筋锈胀引起的混凝土开裂进行了数值模拟,并采用电加速试验进行对照研究。此外,李倩^[11]基于弥散裂缝模型对中部与角部钢筋、单排钢筋与多排钢筋的均匀锈蚀引起的混凝土保护层开裂进行研究,得到了保护层胀裂破坏时钢筋临界锈胀力的计算模型。但上述数值模拟中有关钢筋锈胀应力主要通过锈胀位移加载实现,锈胀位移增加与真实混凝土中钢筋锈胀变形是否吻合有待进一步研究。

笔者针对内掺氯盐砂浆进行恒电位加速腐蚀,获得砂浆中钢筋锈胀应力演变,建立钢筋锈胀时变位移模型,利用有限元分析软件 COMSOL 分析钢

筋混凝土锈胀开裂各时刻的裂缝发展和应力场变化,通过监测锈胀应力演变验证模拟的可靠性。在此基础上,进一步分析砂浆强度等级和钢筋直径对钢筋锈胀应力及砂浆锈胀开裂的影响。

1 试验

1.1 砂浆原材料与配合比

以中国建筑材料科学研究总院生产的 P·I 42.5 基准水泥(主要成分为 CaO(63.3%)、SiO₂(20.6%)、Al₂O₃(4.5%)等)、S95 级矿粉(主要成分为 CaO(38.6%)、SiO₂(30.8%)、Al₂O₃(15.1%)等)、一级粉煤灰(主要成分为 SiO₂(50.8%)、Al₂O₃(25.2%)等)作为胶凝材料,细度模数为 2.7、含泥量为 1.7% 的青岛大沽河河砂为细骨料,江苏苏博特生产的 JM-PCA(I)型聚羧酸减水剂用于调节砂浆的工作性能。考虑混凝土中钢筋锈胀临界氯离子浓度在 0.1% 左右,通过部分掺加海水实现砂浆中氯离子含量保持在 0.1% 左右,砂浆配合比如表 1 所示,测得 3 组试件的抗压强度及弹性模量如图 1 所示。

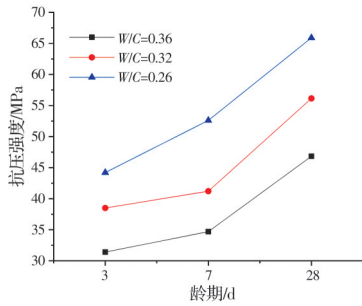
表 1 砂浆配合比

Table 1 Mix proportion of mortar

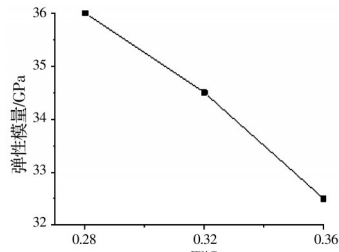
| 编号 | 配合比/(kg·m ⁻³) | | | | | | | 水胶比 W/C |
|----|---------------------------|--------|------|-----|------|-----|----|------------|
| | 水泥 | 水 | 海水 | 砂子 | 减水剂 | 粉煤灰 | 矿粉 | |
| S1 | 337 | 153.90 | 8.10 | 700 | 3.40 | 68 | 45 | 0.36 |
| S2 | 337 | 137.80 | 7.25 | 700 | 5.40 | 70 | 50 | 0.32 |
| S3 | 380 | 123.50 | 6.50 | 700 | 6.80 | 70 | 50 | 0.28 |

1.2 加速腐蚀试验

采用 16、20、25 mm 三种直径的圆钢,对钢筋进行酸洗除锈处理后,放入饱和氢氧化钙溶液中,随后清水冲洗并用真空干燥箱烘干处理。订制内径为 90 mm、壁厚为 4 mm、高为 60 mm 的 304 不锈钢圆环,并采用塑料板进行封底,浇筑砂浆时在圆环中心垂直放置一根钢筋,然后在钢筋和圆环之间灌注掺盐砂浆。标准养护 28 d 后取出,沿不锈钢圆环的外壁中间环贴应变片(120-100AA,灵敏度为



(a) 抗压强度

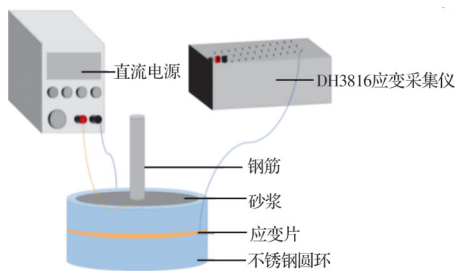


(b) 弹性模量

图 1 砂浆基本力学性能

Fig. 1 Basic mechanical properties of mortar

2.0±1%),以砂浆为通电介质,钢筋为正极,不锈钢圆环为负极,采用30V恒压加速砂浆中钢筋锈蚀。采用DH3816静态应变采集仪实时采集不锈钢圆环的膨胀应变,全程用摄像头辅助EV软件记录电流的变化。恒电位加速腐蚀试验如图2所示。



(a) 加速腐蚀及数据采集示意图



(b) 试验实测图

图 2 钢筋砂浆恒电位加速腐蚀试验

Fig. 2 Potentiostatic accelerated corrosion test of reinforced mortar

1.3 钢筋锈胀应力计算

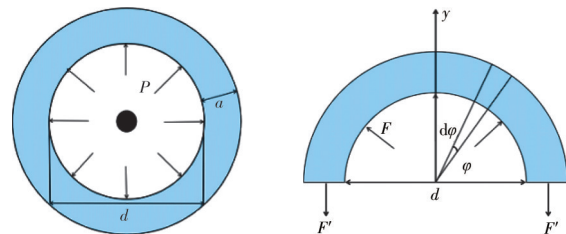
以不锈钢圆环为研究对象,对其进行受力分析,如图3所示。由于钢筋锈蚀后锈蚀产物体积膨胀,不锈钢圆环会受到均匀的膨胀应力 P ,故在包含圆环轴线的任一径向截面上作用有相同的法向拉力 F' 。为求该拉力,可将圆环截分为两部分,并研究半环(图3(b))的平衡。

$$S = \frac{F'}{A} = \frac{Pbd}{2ba} = \frac{Pd}{2a}$$

因为 $S = \epsilon \times E$,故可得到不锈钢圆环所受的膨胀应力为

$$P = \frac{2a\epsilon E}{d} \tag{1}$$

式中: P 为圆环受到的膨胀应力,MPa; a 为不锈钢圆环的壁厚,mm; E 为圆环的弹性模量,GPa; ϵ 为圆环外侧产生的应变; d 为圆环的内径,mm。



(a) 不锈钢圆环受力分析 (b) 半环受力分析

图 3 应力分析过程

Fig. 3 Stress analysis process

2 数值模拟方法

利用COMSOL有限元软件的固体力学物理场进行模拟计算。通过在锈蚀钢筋的孔洞周边施加时变径向位移实现锈蚀钢筋的体积膨胀效应。

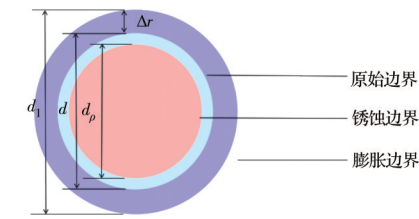
模拟研究基于3个基本假设:1)钢筋锈蚀为均匀锈蚀或钢筋表面凹坑腐蚀为均匀形态;2)不考虑钢筋锈蚀产物进入钢筋与砂浆交界面,同时,忽略钢筋与砂浆间多孔区钢筋锈蚀产物的消耗量;3)在分析过程中不考虑外力作用对混凝土损伤过程的影响。选择直径为16、20、25mm的3种钢筋,28d砂浆强度分别为46.8、56.2、65.9MPa,按照拉压强度比0.1确定砂浆抗拉强度,泊松比均假设为0.2,弹性模量按照图1取值,模拟中采用的砂浆力学参数取值如表2所示。

对钢筋锈蚀后产物膨胀引起的混凝土位移分析如图4所示。

钢筋锈蚀量理论上可根据法拉第定律进行定

表 2 砂浆力学参数取值

| 抗拉强度/MPa | 弹性模量/GPa | 泊松比 |
|----------|----------|-----|
| 4.68 | 32.5 | 0.2 |
| 5.62 | 34.5 | 0.2 |
| 6.59 | 36.0 | 0.2 |



图中: d 为钢筋原始直径; d_1 为钢筋锈蚀后自由膨胀物直径; d_p 为钢筋锈蚀后的残余半径; Δr 为钢筋锈蚀的膨胀位移。

图 4 钢筋锈胀引发的混凝土位移示意图

Fig. 4 Sketch map of concrete displacement caused by steel bar rust expansion

量描述,在阳极钢筋上发生化学变化的物质的量与通过该电极的电量成正比,其锈蚀质量 M_{loss} 计算式如式(2)所示^[12]。

$$M_{\text{loss}} = \frac{M \times \int I(t) dt}{F \times |Z|} \quad (2)$$

式中: M 为铁的摩尔质量, 55.8 g/mol; $I(t)$ 为电流随时间的变化, A; F 为法拉第常数, 96 485 C/mol; $|Z|$ 为金属离子价数的绝对值, 取 2.5。

钢筋锈蚀产物膨胀率 n 一般取值 2~4^[13], 可由膨胀率建立径向位移关系式。

$$n - 1 = \frac{m}{M_{\text{loss}}} = \frac{[\pi(R + \Delta r)^2 - \pi R^2] \times \rho}{M_{\text{loss}}} \quad (3)$$

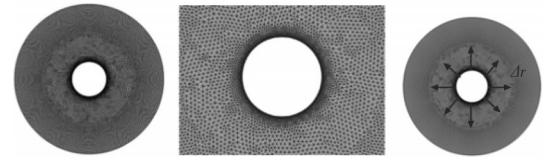
式中: n 为锈蚀产物膨胀率; m 为锈蚀产物膨胀量; M_{loss} 为锈蚀产物量; R 为钢筋的原始半径, $R = \frac{d}{2}$; Δr 为钢筋锈蚀的膨胀位移; ρ 为钢筋锈蚀产物的密度。

由式(2)、式(3)可得钢筋锈蚀膨胀位移随时间的变化。

$$\Delta r = \frac{(n - 1) M \int I(t) dt}{2\pi R \rho F Z} \quad (4)$$

整个砂浆被分为两个部分,一个是损伤开裂部分,另一个是并未开裂部分。采用弹性力学分析完整未受到损伤的部分,损伤力学用于处理裂纹部分。基于 Mohr-Coulomb 破坏准则,采用 Mazar 损伤模型的损伤变量 D 来描述混凝土沿钢筋边界径向

的不同损伤。建立与试验相同尺寸的二维砂浆模型,导入到 COMSOL 软件中,进行极细化网格划分,并在钢筋边界处采用固定单元数为 100 的边界自由三角形网格进行加密,如图 5 所示。模拟中采用强制径向锈蚀膨胀位移 Δr (式 4)直接作用在图 5(c)所示的钢筋圆孔边的节点上,以此来表征钢筋锈蚀膨胀对周围砂浆的力学作用,以获得锈胀力和砂浆损伤随时间变化的全过程。



(a)极细化网格划分 (b)边界加密处理 (c)位移加载方法

图 5 模拟处理方法

Fig. 5 Analog processing

3 结果与讨论

3.1 砂浆中钢筋锈胀应力监测

在恒电位加速腐蚀过程中,砂浆中钢筋加速锈蚀并不断积累锈蚀产物,造成砂浆开裂,由于外部不锈钢环的限制,当积累到一定程度,锈斑会从钢筋和砂浆的界面或者外缘裂缝处溢出,呈现出明显的溢锈现象。

3.1.1 砂浆强度等级的影响 选择预埋钢筋直径为 25 mm 的 3 种水胶比 ($W/C=0.36$ 、 $W/C=0.32$ 和 $W/C=0.28$) 砂浆进行分析。在 30 V 恒电位腐蚀下,钢筋与不锈钢圆环间的腐蚀电流演变如图 6 所示,可见,混凝土水胶比降低,强度等级提高,电阻增加,其初始电流密度降低。

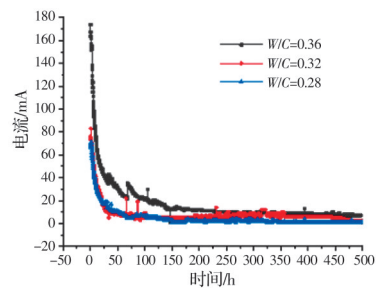


图 6 腐蚀电流演变

Fig. 6 Corrosion current evolution

测试得到砂浆外部不锈钢圆环的膨胀应变如图 7(a)所示,依据式(5)计算得到不锈钢圆环受到的膨胀应力如图 7(b)所示。由图 7 可见,水胶比大的

砂浆中钢筋锈蚀速度快、开裂时间短且开裂极限应力低,这是由于砂浆水胶比大、孔隙多、钢筋表面氧气充足,且砂浆抗拉强度低,抵抗钢筋锈胀能力差所致。随着钢筋锈蚀程度的增加,边界受到的膨胀应力先增加后减小,锈胀力拐点的出现意味着砂浆开裂、应力释放。相比水胶比为 0.36 的砂浆,水胶比为 0.32 和 0.28 的砂浆开裂临界应力分别提高约 30.28% 和 38.9%, 砂浆开裂应力分别为 1.31、1.37 MPa。

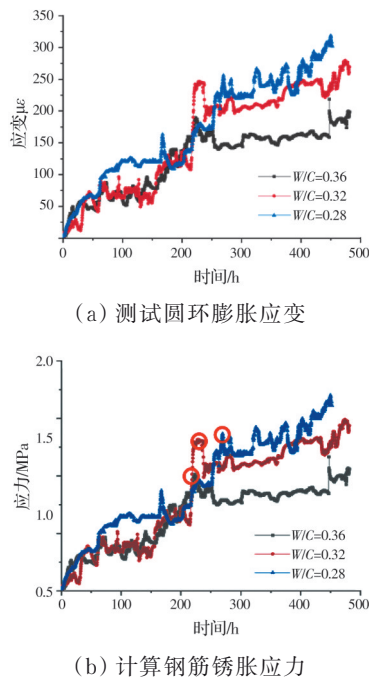


图 7 不同砂浆强度等级下钢筋锈蚀施加在圆环上的膨胀应变与锈胀应力

Fig. 7 Expansion strain and expansion stress of steel bar subjected to corrosion on steel ring under different mortar strength grades

3.1.2 钢筋直径的影响 选择水胶比为 0.36 时预埋钢筋直径为 16、20、25 mm 的砂浆进行分析。在 30 V 恒电位加速腐蚀下,钢筋与不锈钢圆环间的腐蚀电流值几乎相等,其演变如图 8 所示。

测试砂浆外部不锈钢圆环的膨胀应变并计算其锈胀应力,如图 9 所示。直径为 16、20、25 mm 的钢筋锈胀所导致的混凝土开裂临界应力分别为 1.32、1.12、1.01 MPa。钢筋直径增大导致开裂时间缩短,且开裂极限应力降低,原因在于直径大的钢筋表面积大,同等加速腐蚀下会产生更多的锈胀产物、更大的锈胀力。此外,钢筋直径的增加导致砂浆保护层厚度降低,开裂时间明显缩短。

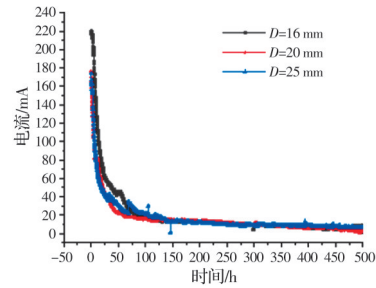


图 8 腐蚀电流演变

Fig.8 Corrosion current evolution

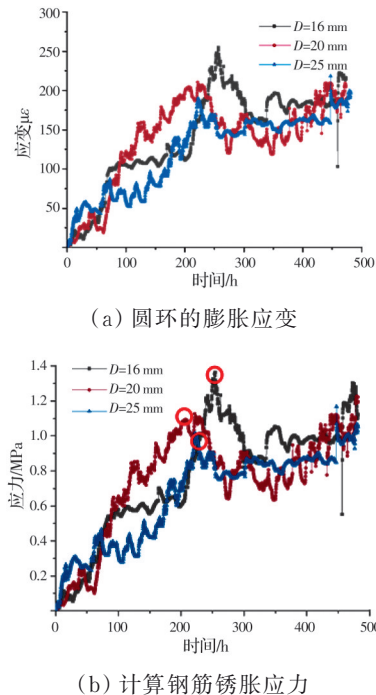


图 9 不同直径钢筋锈胀施加在圆环上的膨胀应变与锈胀应力

Fig. 9 Expansion strain and expansion stress of corroded steel bar on steel ring under different diameter of steel bar

3.2 数值模拟结果分析

借助细观数值分析方法,利用试验获得的电流变化,按式(4)计算出位移加载量,对不同抗拉强度及不同钢筋直径条件下砂浆锈胀开裂过程进行分析。钢筋直径为 16 mm、抗拉强度为 4.68 MPa 砂浆中钢筋锈蚀并诱导其早期开裂,过程如图 10 所示,砂浆锈胀 50 h 后的连续锈胀开裂形态如图 11 所示。钢筋锈胀后向砂浆周边产生均匀的锈胀力,砂浆在第 15 h 时出现初始损伤,随着时间的增长,锈胀力不断增大,裂纹逐步扩展并延伸至整个试件,导致整个结构开裂破坏。

3.2.1 模拟与试验结果对比 砂浆抗拉强度为

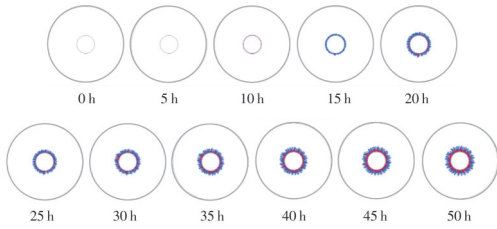


图 10 腐蚀 0~50 h 的均质砂浆模型早期开裂破坏形态
 Fig. 10 Initial failure mode of homogeneous mortar corroded initial from 0 hour to 50 hours

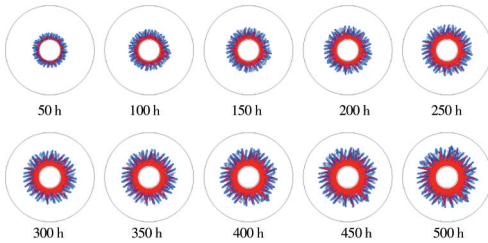
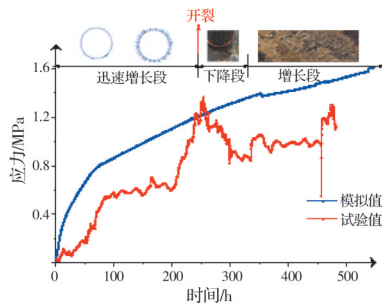


图 11 腐蚀 500 h 的均质砂浆模型连续开裂破坏形态
 Fig.11 Continuous cracking failure mode of homogeneous mortar corroded for 500 hours

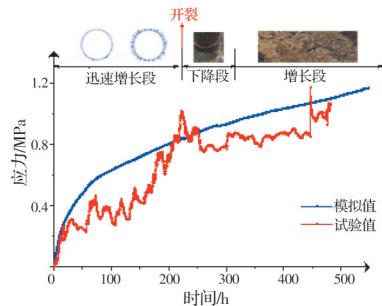
4.68 MPa, 直径为 16、25 mm 的钢筋锈胀应力试验与模拟结果如图 12 所示。

测试的钢筋锈胀应力发展大致分为 3 个阶段：

1) 钢筋开始锈蚀, 锈蚀产物快速增加, 锈胀应力迅



(a) $f_c = 4.68 \text{ MPa}, D = 16 \text{ mm}$



(b) $f_c = 4.68 \text{ MPa}, D = 25 \text{ mm}$

图 12 试件试验值与模拟值的对比

Fig. 12 Comparison of test value and simulation value of specimen

速增长, 直至临界开裂; 2) 钢筋锈胀应力导致砂浆形成微裂缝或裂纹, 锈胀应力释放呈下降趋势; 3) 随着锈蚀产物量的进一步增加, 钢筋锈胀应力不断增加, 但砂浆开裂区域不断加大, 逐步释放锈胀应力并容纳更多的锈蚀产物, 锈胀应力保持缓慢上升。锈胀应力发展的模拟结果与试验结果总体趋势类似, 但也存在差异: 1) 真实的钢筋锈胀应力曲线更波动, 而模拟结果更平滑。原因在于模拟认为砂浆中钢筋为均匀锈蚀, 而事实上砂浆与钢筋材质具有非均匀性, 即便在内掺氯盐的情况下, 钢筋仍存在非均匀锈蚀情况, 其锈胀应力也更波动。2) 模拟结果不能很好地表征砂浆开裂后导致的锈胀应力释放与缓慢增加, 原因在于模拟未能考虑锈蚀产物向裂缝中传输与填充导致的锈胀应力下降。

3.2.2 材料参数对钢筋砂浆锈胀开裂的影响 图 13 所示为不同抗拉强度砂浆 (4.68、5.62、6.59 MPa) 中钢筋锈蚀引起砂浆开裂破坏模式的演变。通过计算锈蚀产物量施加的位移加载, 模拟获得的 3 种强度等级砂浆的破坏路径及裂缝发展过程基本相同。由此可见, 提高砂浆抗拉强度可以延缓砂浆的开裂时间。试验中考虑钢筋与圆环的厚度为 32 mm, 按此厚度模拟计算距离钢筋 32 mm 的砂浆表面应力, 如图 14 所示。

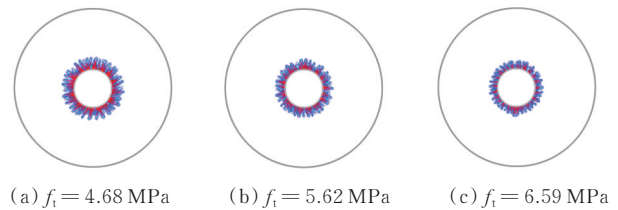


图 13 3 种强度下第 50 h 的砂浆损伤模式

Fig. 13 Damage mode of mortar at 50 hour under three kinds of mortar strength

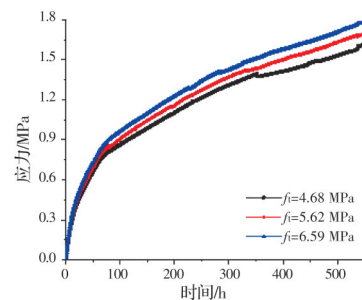


图 14 3 种砂浆强度下圆环应力模拟结果

Fig. 14 Simulation results of ring stress under three kinds of mortar strength

图15为不同直径钢筋(16、20、25 mm)锈蚀引起的砂浆开裂破坏历程。钢筋直径变化不会影响砂浆开裂破坏路径,钢筋直径减少会产生更多的微裂纹,但砂浆损伤程度轻,钢筋初裂时间延后。计算圆环位置的砂浆表面应力,并与试验结果进行对照,如图15所示,钢筋直径增加,钢筋锈蚀速度更快,砂浆初裂时间提前。试验中考虑3种直径钢筋与圆环的厚度为32、30、27.5 mm,按此厚度模拟计算的砂浆表面应力如图16所示。

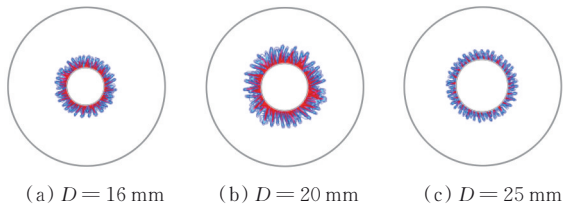


图15 3种钢筋直径下第50 h砂浆的损伤模式

Fig. 15 Damage mode of mortar under three kinds of steel bar diameter

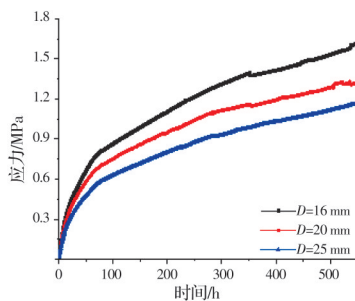


图16 3种直径钢筋增强砂浆表面圆环应力演变模拟结果

Fig.16 Simulation results of ring stress evolution on surface of mortar reinforced by steel bar with three kinds of diameter

4 结论

1)通过砂浆外表面不锈钢钢环上环贴应变片实时采集应变数据,可实现钢筋锈胀应力演变监测,钢筋锈蚀导致的砂浆开裂可分为钢筋起锈导致锈胀应力快速增加;砂浆开裂导致锈胀应力释放并下降;锈蚀产物填充裂纹扩展导致锈胀应力缓慢增加。

2)通过腐蚀电流计算钢筋锈胀膨胀变形量,并将其作为位移量对砂浆进行加载,可实现砂浆锈胀开裂过程的模拟,试验与模拟获得的锈胀应力总体演变趋势一致。但模拟未能考虑砂浆、钢筋的非均匀性及锈蚀产物对开裂砂浆的充填,导致模拟结果不能反映锈胀应力的波动性及锈胀应力释放与缓

慢增加的过程。

3)降低砂浆水胶比,使得砂浆初裂时间延长,锈胀应力降低,钢筋直径由16 mm增加到25 mm,砂浆锈胀初裂时间缩短,开裂极限应力降低。

参考文献

- [1] 李哲,金祖权,邵爽爽,等.海洋环境下混凝土中钢筋锈蚀机理及监测技术概述[J].材料导报,2018,32(23):4170-4181.
- LI Z, JIN Z Q, SHAO S S, et al. A review on reinforcement corrosion mechanics and monitoring techniques in concrete in marine environment [J]. Materials Review, 2018, 32(23): 4170-4181. (in Chinese)
- [2] 柯伟.中国工业与自然环境腐蚀调查的进展[J].腐蚀与防护,2004,25(1):1-8.
- KE W. Progress in public inquiry concerning corrosion in Chinese industrial and natural environments [J]. Corrosion & Protection, 2004, 25(1): 1-8. (in Chinese)
- [3] 宋立元.海洋钢筋混凝土结构氯离子腐蚀耐久性研究[D].辽宁大连:大连理工大学,2009.
- SONG L Y. Study on chloride corrosion durability of reinforced concrete marine structures [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [4] 许小奕.钢筋非均匀锈蚀作用下混凝土锈裂行为研究[D].杭州:浙江大学,2020.
- XU X Y. Experimental study on the concrete cracking behavior due to rebar non-uniform corrosion [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [5] WANG X X, JIN Z Q, LIU J P, et al. Research on internal monitoring of reinforced concrete under accelerated corrosion, using XCT and DIC technology [J]. Construction and Building Materials, 2021, 266: 121018.
- [6] 陈永丰.混凝土中钢筋锈胀应力应变场分析[D].山东青岛:青岛理工大学,2016.
- CHEN Y F. Stress and strain field induced by corrosion of steel bar in concrete [D]. Qingdao, Shandong: Qingdao Tehcnology University, 2016. (in Chinese)
- [7] 赵羽习,金伟良.混凝土锈胀时刻钢筋锈蚀率的数值分析方法[J].浙江大学学报(工学版),2008,42(6):1080-1084.
- ZHAO Y X, JIN W L. Numerical-based method for calculating reinforcement corrosion at concrete cover cracking due to corrosion [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(6): 1080-1084. (in Chinese)

- [8] 李海波, 鄢飞, 赵羽习, 等. 钢筋混凝土结构开裂时刻的钢筋锈胀力模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2000, 34(4): 415-422.
LI H B, YAN F, ZHAO Y X, et al. Model of corroded expansion force at cracking on reinforced concrete structures [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2000, 34(4): 415-422. (in Chinese)
- [9] 金浏. 细观混凝土分析模型与方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
JIN L. Study on meso-scopic model and analysis method of concrete [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [10] 王坤. 混凝土内钢筋非均匀锈蚀及其锈胀开裂研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
WANG K. Study on the non-uniform corrosion distribution of steel bars and corrosion-induced cracking of reinforced concrete structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [11] 李倩. 钢筋锈蚀作用下混凝土保护层胀裂过程研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2018.
LI Q. The research of the process about corrosion-induced cracking of concrete cover [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [12] GOLUBEVA O Y, PAVLOVA S V, YAKOVLEV A V. Adsorption and in vitro release of vitamin B₁ by synthetic nanoclays with montmorillonite structure [J]. Applied Clay Science, 2015, 112/113: 10-16.
- [13] CUI Z, ALIPOUR A. Concrete cover cracking and service life prediction of reinforced concrete structures in corrosive environments [J]. Construction and Building Materials, 2018, 159: 652-671.

(编辑 王秀玲)