

内部钢筋锈蚀作用下混凝土结构 破坏过程研究*

高清洋¹, 李美奇¹, 杨之良¹, 郭瑾¹, 张永兴²

(1. 天津津港建设有限公司, 天津 300450; 2. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 为准确反映内部钢筋锈蚀作用下混凝土结构从开裂至破坏不连续过程的真实裂缝形态, 以钢筋混凝土试件电化学加速锈蚀内部钢筋为对象, 采用钢筋-锈蚀产物-混凝土共同作用模型, 研究内部钢筋锈蚀作用下钢筋混凝土结构开裂破坏行为, 并揭示内部钢筋锈蚀量对钢筋混凝土结构内部真实裂缝形态影响。结果表明: 所采用的钢筋-锈蚀产物-混凝土共同作用模型可以反映内部钢筋锈蚀作用下钢筋混凝土结构开裂行为, 内部钢筋锈蚀作用下钢筋混凝土试件随内部钢筋锈蚀量增加出现表面及内部裂缝, 且裂缝发展初期的宽度增加量大于发展后期, 原因在于裂缝发展过程中钢筋锈蚀产物渗入钢筋混凝土试件内部裂缝减缓了钢筋混凝土试件内部钢筋锈蚀作用引起的膨胀压力。

关键词: 混凝土结构; 内部钢筋; 锈蚀量; 破坏过程; 真实开裂形态

中图分类号: U654; TU528

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0047-05

Failure process of concrete structures under internal reinforcement corrosion

GAO Qingyang¹, LI Meiqi¹, YANG Zhiliang¹, GUO Jin¹, ZHANG Yongxing²

(1. Tianjin Jingang Construction Co., Ltd., Tianjin 300450, China;

2. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: To accurately reflect the true crack pattern of concrete structure discontinuous process from cracking to failure under the action of internal steel reinforcement corrosion, we take the electrochemical accelerated corrosion of internal reinforcement in reinforced concrete (RC) specimens as the object, adopt a joint action model of reinforcement-corrosion product-concrete to study the cracking and failure behavior of RC structures under internal reinforcement corrosion, and reveal the influence of internal reinforcement corrosion amount on the true crack pattern of RC structure. The results show that the employed joint action model of steel reinforcement-corrosion product-concrete can reflect the cracking behavior of RC structure under the action of internal steel reinforcement corrosion. Moreover, the surface and internal cracks appear in RC specimen as the amount of internal steel reinforcement corrosion increases under the action of internal steel reinforcement corrosion in RC specimen, and the width increase of the aforementioned cracks in the early stage of crack development is greater than that in the later stage. The reason is that the infiltration of reinforcement corrosion products into the internal cracks of RC specimens during crack development slows down the expansion pressure caused by internal reinforcement corrosion.

Keywords: concrete structure; internal reinforcement; corrosion amount; failure process; true crack pattern

港口混凝土建(构)筑物内部钢筋在恶劣自然环境下易出现锈蚀问题^[1], 内部钢筋锈蚀易引起

混凝土结构开裂^[2], 且混凝土结构裂缝加速引发钢筋锈蚀和结构劣化进程, 甚至出现混凝土结构

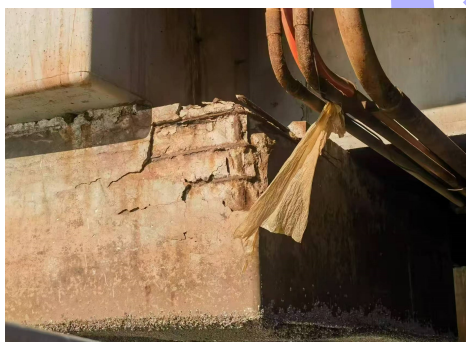
收稿日期: 2025-02-13

*基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20211281)

作者简介: 高清洋(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程设计工作。

通信作者: 张永兴(1981—), 男, 博士, 教授, 从事混凝土及地下工程结构研究。E-mail: zhanguongxing81@aliyun.com

保护层剥落等问题^[3],致使港口混凝土构筑物在正常荷载下易因耐久性不足引起损伤,见图1。此外,开裂的钢筋混凝土结构表现出裂缝宽度难以控制等特征,不但影响港口混凝土构筑物正常使用,而且缩短使用寿命^[4-5]。因而,提升港口混凝土构筑物耐久性能、满足生命周期内使用功能需求,是当前亟待解决的重要问题。然而,钢筋混凝土结构内部钢筋锈蚀产生膨胀压力且对钢筋混凝土结构开裂损伤影响规律较为复杂^[6-7],致使锈蚀介质侵蚀作用下港口混凝土构筑物耐久性损伤机理尚不明确,且缺乏有效的分析手段^[8-9]。鉴于此,本文以钢筋混凝土试件电化学加速锈蚀内部钢筋为对象,采用钢筋-锈蚀产物-混凝土共同作用模型,研究内部钢筋锈蚀作用下钢筋混凝土结构开裂破坏行为,揭示内部钢筋锈蚀量对钢筋混凝土结构内部真实裂缝形态影响,以期定量评价钢筋混凝土结构内部钢筋锈蚀与内部裂缝发展行为。



a) 结构裂损1



b) 结构裂损2

图1 码头混凝土结构裂损

Fig.1 Concrete structure cracking and damage at wharf

1 钢筋混凝土试件电化学加速锈蚀试验

1.1 试验概要

钢筋混凝土试件电化学加速锈蚀内部钢筋布置见图2。电解液使用 NaCl 溶液,钢筋侧连接阳极,铜板侧连接阴极,密度为 0.9 mA/cm^2 的电流通过恒流电源。钢筋混凝土长方体试件尺寸为 $300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),试件内部埋置1根直径 19 mm 的变形钢筋(钢筋长度为 250 mm,钢筋保护层厚度为 30 mm),混凝土养护 28 d 后的抗压强度为 26.2 MPa。此外,采用长度为 100 mm 的 π 形位移计测量试件表面裂缝宽度,并在通电结束后切断试件观察截面内的裂缝形态并测量截面内部裂缝宽度。此后,将内部钢筋取出并在 10% 柠檬酸铵溶液中浸渍约 24 h,除去锈蚀产物后进行质量测定,计算内部钢筋锈蚀量。除去锈蚀物后的内部钢筋见图3。

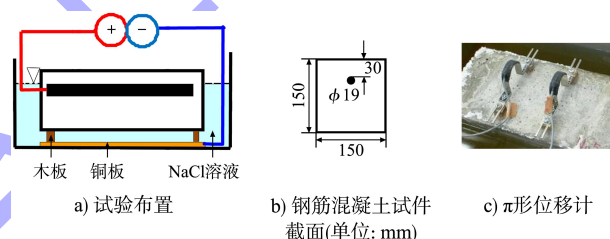


图2 钢筋混凝土试件电锈蚀试验相关布置

Fig.2 Electric corrosion test on RC specimen



图3 除去锈蚀产物后的内部钢筋

Fig.3 Internal reinforcement after removing corrosion product

1.2 试验结果

试验所得钢筋混凝土试件表面裂缝宽度与内部钢筋锈蚀量关系曲线见图4。可以看出,钢筋混凝土试件随内部钢筋锈蚀量增加而出现表面裂缝

(该试件内部钢筋锈蚀量约 50 mg/cm^2 时开始出现表面裂缝)。此外, 钢筋混凝土试件开始出现表面裂缝时的裂缝宽度急剧增加(阶段 I), 其后钢筋混凝土试件表面裂缝宽度增大速率随内部钢筋锈蚀量增加表现出先减缓(阶段 II)再急剧增加(阶段 III)趋势。因而, 内部钢筋锈蚀作用下该钢筋混凝土试件表面裂缝宽度随内部钢筋锈蚀量增加呈现出初期急剧增加、中期减缓、后期再次急剧增加的三阶段特征, 可见内部钢筋锈蚀量增加对钢筋混凝土试件表面裂缝发展影响较大。

试验所得钢筋混凝土试件在内部钢筋锈蚀量分别为 182 与 352 mg/cm^2 时所对应试件截面内部裂缝分布形态见图 5。可以看出, 该钢筋混凝土试件截面在内部钢筋锈蚀量较小时先出现竖向裂缝,

其后随内部钢筋锈蚀量增加在试件截面出现横向裂缝, 且较小内部钢筋锈蚀量对应的内部裂缝宽度小于较大内部钢筋锈蚀量对应的内部裂缝宽度。

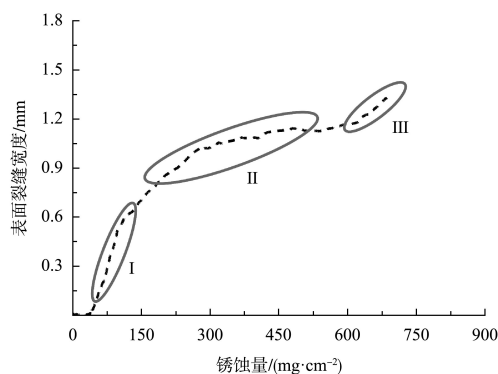


图 4 钢筋混凝土试件表面裂缝宽度与内部钢筋锈蚀量关系曲线

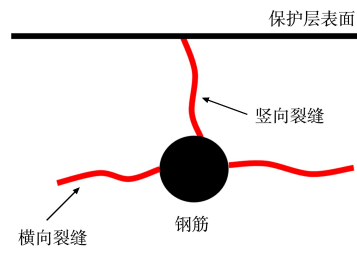
Fig. 4 Relationship curve of surface crack width and internal steel corrosion



a) 钢筋锈蚀量 182 mg/cm^2 对应截面裂缝



b) 钢筋锈蚀量 352 mg/cm^2 对应截面裂缝



c) 截面裂缝分布

图 5 试验所得钢筋混凝土试件截面内部裂缝

Fig. 5 Experimentally obtained internal cracks in cross-section of RC specimens

2 钢筋混凝土试件裂损数值解析

2.1 钢筋-锈蚀产物-混凝土共同作用模型

用于内部钢筋锈蚀作用下钢筋混凝土试件裂损分析的钢筋-锈蚀产物-混凝土共同作用模型见图 6。该模型考虑了钢筋锈蚀产物层引起混凝土内部膨胀应力、部分锈蚀产物渗入混凝土裂缝改变锈蚀产物分布与厚度, 期望揭示内部钢筋锈蚀作用下钢筋混凝土结构破坏过程。

为实现数值解析上述钢筋-锈蚀产物-混凝土共

同作用模型, 对混凝土结构进行离散化处理^[10]: 采用刚体单元离散化处理混凝土基体, 梁单元表征内部钢筋, 刚体元边界面设置无尺寸大小的法向弹簧元与切向弹簧元, 梁单元任意节点与刚体单元均采用两根无尺寸大小弹簧元连接, 见图 7^[11]。此外, 刚体元边界面上上述无尺寸大小法向弹簧元与切向弹簧元分别反映混凝土基体轴向力学行为与剪切力学行为, 且采用法向弹簧元相对变形反映开裂后刚体单元间裂缝进展。

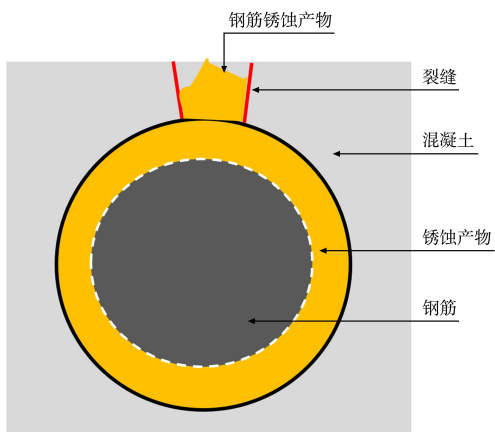


图 6 钢筋-锈蚀产物-混凝土共同作用模型
Fig. 6 Action model of reinforcement-corrosion product-concrete

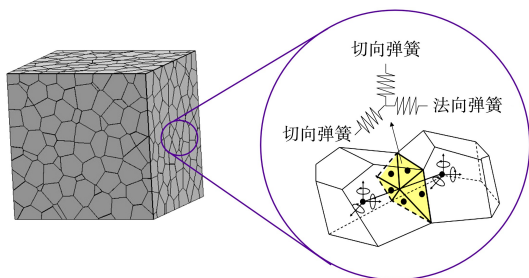


图 7 离散化处理混凝土结构
Fig. 7 Discretization treatment of concrete structure

2.2 解析结果

解析所得钢筋混凝土试件表面裂缝宽度与内部钢筋锈蚀量关系曲线见图 8，其与试验所得结果基本一致。可以看出，钢筋混凝土试件随内部钢筋锈蚀量增加而出现表面裂缝，且钢筋混凝土试件表面裂缝宽度在开始出现表面裂缝时急剧增加，其后钢筋混凝土试件表面裂缝宽度增大速率随内部钢筋锈蚀量增加而出现放缓趋势，原因在于裂

缝发展过程中钢筋锈蚀产物渗入钢筋混凝土试件内部裂缝减缓了钢筋混凝土试件内部钢筋锈蚀作用引起的膨胀压力。

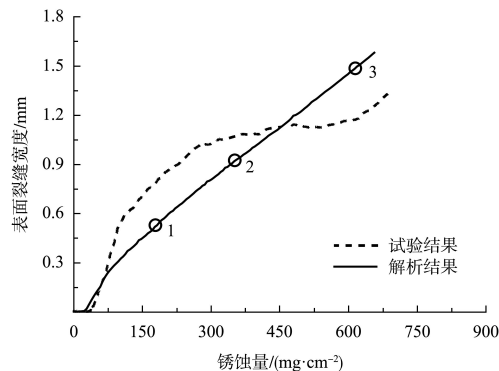
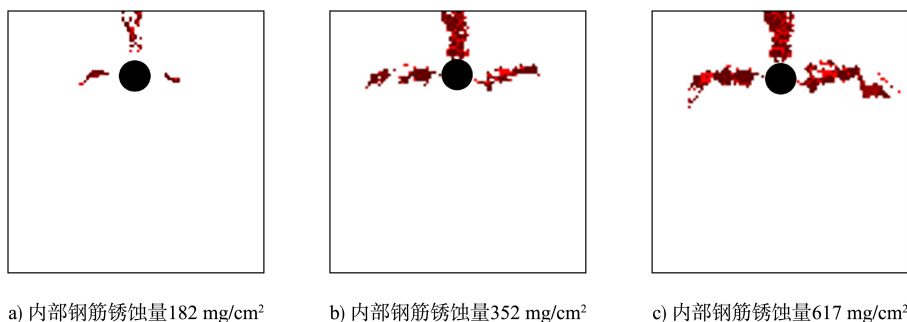


图 8 钢筋混凝土试件表面裂缝宽度与内部钢筋锈蚀量关系曲线

Fig. 8 Relationship curve of surface crack width and internal steel corrosion

解析所得钢筋混凝土试件不同的内部钢筋锈蚀量所对应试件截面内部裂缝分布形态见图 9(内部钢筋锈蚀量分别为 182、352、617 mg/cm^2 ，对应图 8 的点 1、2、3)，其与图 5 的试验结果基本一致，表明所采用数值模型可以反映内部钢筋锈蚀作用下钢筋混凝土结构损伤演化行为。由图 9 可知，解析所得钢筋混凝土试件截面内部裂缝随内部钢筋锈蚀量增加而逐渐发展，且内部裂缝发展初期的宽度增加量大于发展后期的宽度增加量，原因在于裂缝发展过程中钢筋锈蚀产物渗入钢筋混凝土试件内部裂缝减缓了钢筋混凝土试件内部钢筋锈蚀作用引起的膨胀压力，可见内部钢筋锈蚀量增加对钢筋混凝土试件内部裂缝发展也有重要影响。



a) 内部钢筋锈蚀量 182 mg/cm^2 b) 内部钢筋锈蚀量 352 mg/cm^2 c) 内部钢筋锈蚀量 617 mg/cm^2

图 9 解析所得钢筋混凝土试件截面内部裂缝

Fig. 9 Analytically obtained internal cracks in cross-section of RC specimens

3 结论

1) 解析所得钢筋混凝土试件表面与内部裂缝发展变化规律与试验所得结果基本一致, 表明所采用的钢筋-锈蚀产物-混凝土共同作用模型可以反映内部钢筋锈蚀作用下钢筋混凝土结构开裂行为。

2) 内部钢筋锈蚀作用下钢筋混凝土试件随内部钢筋锈蚀量增加出现表面裂缝, 且内部钢筋锈蚀量影响钢筋混凝土试件表面裂缝发展, 钢筋混凝土试件表面裂缝宽度随内部钢筋锈蚀量增加呈现出初期急剧增加、中期减缓、后期再次急剧增加的三阶段特征。

3) 内部钢筋锈蚀作用下钢筋混凝土试件内部裂缝随内部钢筋锈蚀量增加而逐渐发展, 且裂缝发展初期的宽度增加量大于发展后期的宽度增加量, 原因在于裂缝发展过程中钢筋锈蚀产物渗入钢筋混凝土试件内部裂缝减缓了钢筋混凝土试件内部钢筋锈蚀作用引起的膨胀压力。

参考文献:

- [1] 陈云, 郑文博, 付前旺. 氯盐环境下钢筋混凝土腐蚀机理及防腐蚀技术研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(11): 128-141.
CHEN Y, ZHENG W B, FU Q W. Research progress on corrosion mechanism and corrosion prevention technology of reinforced concrete under chloride erosion environment[J]. Materials reports, 2025, 39(11): 128-141.
- [2] 吴林键, 张洪, 刘明维, 等. 内河框架式码头梁构件抗弯承载能力时变概率模型[J]. 水运工程, 2023(1): 34-41, 96.
WU L J, ZHANG H, LIU M W, et al. Time-varying probability model of bending resistance capacity of beam within frame-type wharf in inland river [J]. Port & waterway engineering, 2023(1): 34-41, 96.
- [3] 沈坚, 何晓宇, 侯保荣, 等. 交通基础设施腐蚀的现状[J]. 水运工程, 2022(9): 15-21, 79.
SHEN J, HE X Y, HOU B R, et al. Current situation of corrosion of transportation infrastructure [J]. Port & waterway engineering, 2022(9): 15-21, 79.
- [4] 郑永来, 杨扬. 高桩码头加固方法分析[J]. 结构工程师, 2007, 23(1): 86-90.
ZHENG Y L, YANG Y. Analysis of strengthening method for high-piled wharfs [J]. Structural engineers, 2007, 23(1): 86-90.
- [5] 牛荻涛, 李星辰, 刘西光, 等. 工业建筑混凝土结构耐久性调查与分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(11): 14-18.
NIU D T, LI X C, LIU X G, et al. Investigation and analysis of the durability of reinforced concrete structures in industrial buildings [J]. Industrial construction, 2018, 48(11): 14-18.
- [6] LU C H, JIN W L, LIU R G. Probabilistic lifetime assessment of marine reinforced concrete with steel corrosion and cover cracking [J]. China ocean engineering, 2011, 25(2): 305-318.
- [7] 张东东, 邵吉林. 海港码头钢筋混凝土建筑物的腐蚀和防护[J]. 交通科技, 2010(5): 104-106.
ZHANG D D, SHAO J L. Corrosion and protection of reinforced concrete buildings in sea port terminals [J]. Transportation science & technology, 2010(5): 104-106.
- [8] 王雪松, 金贤玉, 田野, 等. 开裂混凝土中钢筋加速锈蚀方法适用性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(4): 565-574, 580.
WANG X S, JIN X Y, TIAN Y, et al. Applicability of accelerated corrosion method of steel bars in cracked concrete structure [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2013, 47(4): 565-574, 580.
- [9] FELIX E F, CARRAZEDO R, POSSAN E. Carbonation model for fly ash concrete based on artificial neural network: development and parametric analysis[J]. Construction and building materials, 2021, 266: 121050.
- [10] BOLANDER J E, SAITO S. Fracture analysis using spring networks with random geometry [J]. Engineering fracture mechanics, 1998, 61: 569-591.
- [11] 张永兴. 基于离散模型的混凝土构件破坏过程研究[J]. 固体力学学报, 2015, 36(1): 35-41.
ZHANG Y X. Study on discrete model for evaluating failure process of concrete member [J]. Chinese journal of solid mechanics, 2015, 36(1): 35-41.

(本文编辑 王璁)