



基于半电位分布的混凝土中钢筋局部腐蚀位置 和长度数值反演

郭冰冰^{a,b}, 钟涛涛^a, 王艳^c, 牛荻涛^{a,b}

(西安建筑科技大学 a. 土木工程学院; b. 结构工程与抗震教育部重点实验室; c. 材料科学与工程
学院, 西安 710055)

摘要: 半电位法是目前实际工程中混凝土结构钢筋腐蚀最常用的检测方法, 但该方法仅能给出钢筋腐蚀的概率, 无法提供钢筋腐蚀的量化信息。提出基于半电位分布的混凝土中钢筋局部腐蚀位置和长度的量化方法: 首先, 考虑混凝土孔隙饱水度对氧气扩散和电阻率的影响, 建立混凝土中钢筋腐蚀电位分布的正演数值模型; 然后, 以实测半电位分布作为先验约束条件, 采用粒子群优化算法, 建立钢筋局部腐蚀位置和长度的数值反演计算方法; 最后, 以实际工程中腐蚀钢筋混凝土构件为算例, 研究不同饱水度下数值反演结果的变化规律, 并基于实验室构件验证了数值反演模型的适用性。结果表明, 该数值反演方法可以准确地计算出混凝土中钢筋局部腐蚀的位置和长度。此外, 饱水度的变化会影响钢筋表面氧气浓度分布和混凝土电阻率, 改变钢筋表面电位分布, 从而影响数值反演结果, 尤其当饱水度大于 0.4 时, 数值反演结果对其变化较为敏感。

关键词: 钢筋混凝土; 半电位分布; 钢筋腐蚀; 饱水度; 数值反演

中图分类号: TU503 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Numerical inversion of local corrosion location and size of reinforcing steel in concrete based on half-cell potential distribution

GUO Bingbing^{a,b}, ZHONG Taotao^a, WANG Yan^c, NIU Ditao^{a,b}

(a. School of Civil Engineering; b. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance of China Ministry of Education; c. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: The widely used half-cell potential (HCP) method in practical engineering only provides the probability of steel corrosion, and cannot offer any quantitative information. Therefore, in this study, an inversion numerical method was developed to determine the corrosion location and size at the steel in concrete based on HCP. The effects of saturation degree on the oxygen diffusion and concrete resistivity were taken into account, and the forward numerical model was then built to simulate the potential distribution in corroded concrete structures. The measured potential distribution was used as the prior constraint, and particle swarm

收稿日期: 2025-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(51908453)

作者简介: 郭冰冰(1988-), 男, 博士, 副教授, 主要从事混凝土耐久性研究, E-mail: guobingbing212@163.com.

Received: 2025-07-11

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51908453)

Author brief: GUO Bingbing (1988-), PhD, associate professor, main research interest: concrete durability, E-mail: guobingbing212@163.com.

algorithm was employed to search the local corrosion location and size of reinforcing steel in concrete. A corroded reinforced concrete component from practical engineering was taken as a benchmark example, and the numerical inversion results under different saturation degrees were presented, while based on laboratory components, the applicability of the numerical inversion model was verified. The results show that the developed numerical inversion model can accurately present the local corrosion location and size at the in concrete. Additionally, it is found that the variations in saturation degree can affect the oxygen concentration at the steel surface and the potential distribution, thereby affecting the inversion results. However, this effect can be negligible when the saturation degree is below 0.4.

Keywords: reinforced concrete structure; half-cell potential distribution; steel corrosion; saturation degree; numerical inversion

钢筋混凝土结构是土木工程领域中应用最为广泛的结构形式,约占中国工业民用建筑总面积的60%~70%,而在其他基础设施(如道路桥梁工程、水利工程、海洋工程)中占比更高^[1]。据估,中国每年腐蚀损失约占国民经济生产总值的5%,其中大约40%与钢筋混凝土结构腐蚀有关^[2]。近些年来,钢筋腐蚀所诱发的安全事故也屡见不鲜。例如,2021年美国佛罗里达州一栋12层公寓楼由于地下停车场天花板和支撑柱中钢筋的严重腐蚀,引起构件承载力下降,楼体部分坍塌,最终造成28死亡、117人失联;2018年意大利莫兰迪大桥由于11号桥塔顶部钢缆发生了严重的腐蚀,引起结构承载力大幅下降,桥梁倒塌,致使43人遇难。因此,混凝土结构中钢筋腐蚀检测对于国民经济的快速发展和基础设施的安全运维具有重要意义。

目前混凝土中钢筋腐蚀的检测方法主要分为电化学方法和物理方法两类^[3-4]。电化学方法包括半电池电位(HCP)法、极化电阻法等,物理方法包括探地雷达、声发射技术、电磁法、热成像技术等。相较于其他检测方法,电化学方法中HCP法仅需要借助参比电极,采用电位采集仪在混凝土表面测量钢筋半电位进行钢筋腐蚀的检测,具有操作简单、覆盖范围广、检测成本低、数据分析简单等优点。因此,HCP法广泛应用于实际工程中混凝土结构的钢筋腐蚀检测^[5]。在实际应用中,通常将HCP检测结果绘制为彩色等势线图^[6],可以依据颜色深度大致判断腐蚀区域,颜色越深,则钢筋腐蚀的概率越高。然而,目前HCP法仅能给出混凝土结构钢筋腐蚀的概率^[3],尚不能给出准确的腐蚀量化信息(如钢筋腐蚀的位置和长度),严重制约了HCP法在实际工程中的应用价值。

考虑到钢筋腐蚀本质上为系列电化学反应,HCP是钢筋腐蚀释放出最重要的电化学信号。基于HCP信号,对混凝土结构钢筋腐蚀信息进行深入挖掘,获得钢筋腐蚀的量化信息,可显著提高HCP

法在实际工程中钢筋腐蚀无损检测的应用价值。为此许多研究人员基于HCP法,开展了混凝土中钢筋腐蚀位置和长度识别的相关研究。例如,Ridha等^[7]和Minagawa等^[8]将钢筋腐蚀的边界元法(BEM)数值模型与遗传算法(GA)结合,建立了基于HCP的钢筋腐蚀位置和长度的反演计算方法。Adriman等^[9]和Fonna等^[10]以实测HCP为先验条件,将粒子群优化(PSO)算法与BEM结合对混凝土结构中单根钢筋腐蚀状态进行了反演。Fathi等^[11]也采用了PSO与BEM结合,针对单根钢筋上多个钢筋腐蚀位置的情况开展了反演计算。这些研究建立的数值正演模型均未考虑混凝土饱水度对氧气扩散和电阻率的影响。此外,与GA相比,PSO更加简单、计算效率更高^[12]。综上所述,将混凝土结构中钢筋腐蚀的正演数值模型与优化算法相结合,建立钢筋腐蚀的反演计算模型,可实现基于HCP的混凝土结构中钢筋腐蚀的量化检测。

然而,目前已有的钢筋腐蚀反演计算方法大都基于BEM来建立钢筋腐蚀的正演模型。虽然BEM正演数值模型可以显著提高计算效率,但由于仅对钢筋表面边界进行离散化,不能考虑混凝土饱水度和钢筋表面氧气浓度对钢筋腐蚀动力学过程的影响^[9],进而影响数值模型的准确性^[13-15]。此外,耦合饱水度与氧气扩散和混凝土电阻率之间关系的有限元正演模型更贴合实际环境下混凝土中钢筋的腐蚀机理,且实用性更高。因此,笔者采用有限元的正演数值模型与PSO算法相结合,考虑饱水度对氧气扩散及混凝土电阻率的影响,建立混凝土结构钢筋局部腐蚀位置和长度的数值反演计算方法,进而研究饱水度对数值反演结果的影响规律。

1 理论模型

1.1 混凝土中钢筋腐蚀的数值模型

当钢筋表面存在电势差时,电势高的区域为阳极区,发生铁溶解反应,释放电子变为 Fe^{2+} ,电子通

过钢筋流向表面电势较低的区域,形成阴极区,在氧气和水存在情况下生成 OH^- ,如图1所示。同时, Fe^{2+} 在混凝土孔隙溶液中迁移,与阴极生成的 OH^- 结合生成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 。在氧气充足时, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 进一步氧化成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$,脱水后形成 Fe_2O_3 ;缺氧条件下, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 氧化不完全,部分生成 FeO ^[16-17]。所以钢筋表面的阳极区发生溶铁反应,阴极区发生耗氧反应,混凝土充当电解质。因此,可采用 Laplace 方程描述混凝土中钢筋腐蚀时的电位分布^[18-19]。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

式中: ∇^2 为拉普拉斯算子; ϕ 为电位。此外,混凝土中钢筋发生腐蚀时,混凝土中的电位 ϕ 与电流密度 i

之间的关系满足欧姆定律^[20]。

$$i = -\frac{1}{\rho} \nabla \phi \quad (2)$$

式中: ρ 为电阻率,混凝土电阻率决定着孔隙溶液中离子迁移难易程度,进而影响钢筋腐蚀速率^[21]。电阻率主要由自身材料特性、环境温度变化和孔隙结构饱水度等三方面决定^[22],即

$$\rho = \rho_0 \cdot f(\Delta T) \cdot g(\theta) \quad (3)$$

式中: ρ_0 为完全饱水时混凝土电阻率; $f(\Delta T)$ 为温度变化对电阻率的影响函数; $g(\theta)$ 为饱水度对电阻率的影响函数; θ 为饱水度。 $f(\Delta T)$ 和 $g(\theta)$ 可通过实测数据拟合得到。

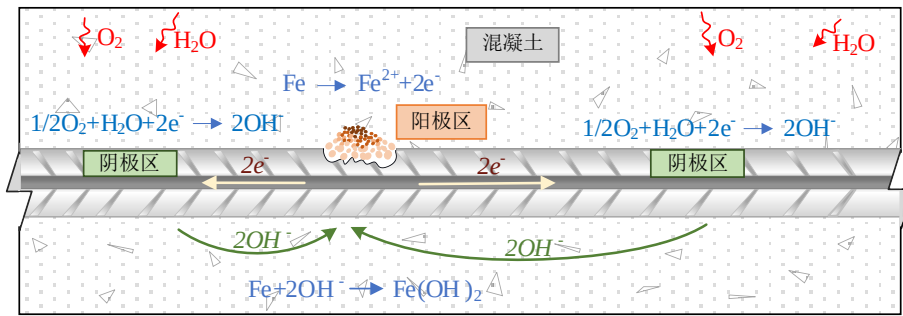


图1 混凝土结构中钢筋腐蚀电化学示意图

Fig.1 Schematic of electrochemical corrosion of steel bars in concrete structures

混凝土中钢筋表面阳极区和阴极区的电流密度 i 与电位 ϕ 间关系可采用式(4)、式(5)表示^[20]。

$$i_c = \frac{C_{\text{O}_2}}{C_{\text{O}_2}^0} f(\phi_c) \quad (4)$$

$$i_a = f(\phi_a) \quad (5)$$

式中: C_{O_2} 为钢筋表面氧气浓度; $C_{\text{O}_2}^0$ 为初始氧气浓度; $C_{\text{O}_2}/C_{\text{O}_2}^0$ 为钢筋表面氧气浓度变化的影响; ϕ_c 、 ϕ_a 分别为阴极和阳极反应电位; i_c 、 i_a 分别为阴极和阳极反应电流密度。

采用 Fick 第二定律描述混凝土中氧气扩散,即

$$\frac{\partial C_{\text{O}_2}}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\text{O}_2} \nabla C_{\text{O}_2}) \quad (6)$$

式中: D_{O_2} 为氧气扩散系数。氧气扩散发生在混凝土孔隙结构的气相中,所以氧气扩散系数受混凝土饱水度影响,即

$$D_{\text{O}_2} = D_{\text{O}_2}^0 \cdot h(\theta) \quad (7)$$

式中: $D_{\text{O}_2}^0$ 为混凝土干燥状态下氧气扩散系数; $h(\theta)$ 为饱水度对氧气扩散系数的影响函数。

若实际工程中半电位检测前后温度不发生变化,则式(3)中 $f(\Delta T)$ 为 1。此外,当对上述数值模型进行求解时,还需确定饱水度对电阻率的影响函数 $g(\theta)$ 、阴阳极反应电流密度与电位间关系(即式(4)和(5))、混凝土完全干燥状态下氧气扩散系数 $D_{\text{O}_2}^0$ 、饱水度对氧气扩散系数的影响函数 $h(\theta)$ 。

1.2 反演计算

采用 PSO 算法开展数值反演,将混凝土表面电位分布将作为先验约束条件。钢筋腐蚀位置和长度为反演目标,即为粒子变量,设置粒子数量,并给粒子群位置和速度设置初始值。然后,将其初始值结合数值正演模型,进行寻优迭代。迭代过程中,当前粒子位置 X_j 和下一代粒子速度 V_{j+1} 决定着下一代的迭代位置 X_{j+1} ,见式(8)。 V_{j+1} 则由 X_j 和当前粒子速度 V_j 以及粒子的个体最优位置 p_{best} 和群体最优位置 g_{best} 共同决定,见式(9)^[9,23]。

$$X_{j+1} = X_j + V_{j+1} \quad (8)$$

$$V_{j+1} = w_j V_j + c_1 r_1 (p_{\text{best}} - X_j) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - X_j) \quad (9)$$

式中: X_j 为第 j 次迭代粒子位置; V_j 为第 j 次迭代粒子速度; w_j 为第 j 次迭代惯性权重参数; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为随机数 $[0, 1]$; p_{best} 为个体最优位置; g_{best} 为群体最优位置。

经过多次迭代,当满足基于先验约束条件的目标函数式(10)^[24]时,停止迭代,从而得到最优解。

$$\epsilon(X) = \sum_{l=1}^N \left[\left(\frac{\phi_l - \bar{\phi}}{\bar{\phi}_{\text{max}}} \right)^2 \right] \quad (10)$$

式中: N 为现场 HCP 实测的电位数量; ϕ_l 为有限元计算出电位矢量; $\bar{\phi}_l$ 为实测电位矢量; $\bar{\phi}_{\text{max}}$ 为实测电

位矢量最大值。

此外,为提高 PSO 算法全局搜索能力,避免陷入局部最优解,将惯性权重参数 w_j 设置为随迭代次数 j 线性递减,见式(11)^[9]。

$$w_j = w_{\max} - \left[(w_{\max} - w_{\min}) \frac{j}{j_{\max}} \right] \quad (11)$$

式中: $w_{\min}$ 和 $w_{\max}$ 分别为最小惯性权重和最大惯性权重; $j_{\max}$ 为最大迭代次数。

实际混凝土结构中,相较于构件截面尺寸,钢筋直径较小。因此,将钢筋的几何模型简化为一维,腐蚀面积转化为沿钢筋长度方向的大小。粒子群变量表示为

$$X_i = \{L_{Ci}, S_{Ci}\} = \{L_{Ci}, \{x_i, y_i, z_i\}\} = \{L_{Ci}, z_i\} \quad (12)$$

式中: X_i 为粒子群; L_{Ci} 为钢筋腐蚀位置,即从钢筋混凝土构件一端至腐蚀中心区域的距离; S_{Ci} 为钢筋腐蚀长度,即沿钢筋长度方向腐蚀区域的范围。

混凝土中钢筋腐蚀位置和长度数值反演计算流程如图 2 所示。首先,将腐蚀位置和长度视为粒子,限定搜索空间,初始化粒子群位置和速度。然后,将粒子代入有限元数值模型中,获取数值计算结果。进而,结合实测 HCP 值,以式(10)评估适应值 $\epsilon(X)$,比较当前粒子与 p_{best} 和 g_{best} 的 $\epsilon(X)$,若优于当前位置,则更新获得更佳的 p_{best} 和 g_{best} 。通过比较 $\epsilon(X)$ 与阈值 $\epsilon_0(X)$ 的长度,以判断是否需要停止寻优迭代。若不满足,则更新粒子向 p_{best} 和 g_{best} 移动,直至

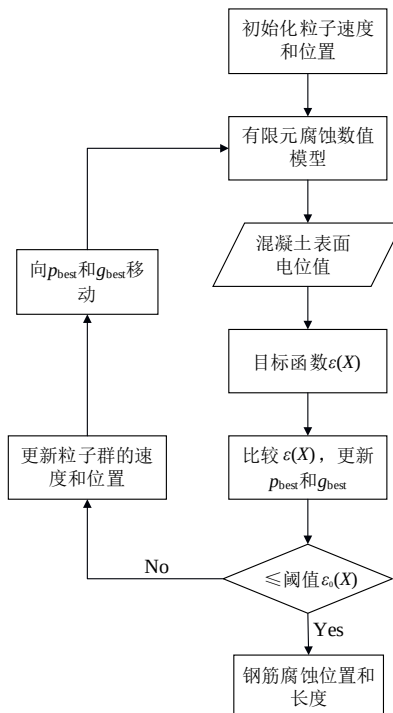


图 2 钢筋腐蚀位置和长度数值反演计算流程

Fig.2 Numerical inverse calculation procedure for location and size of rebar corrosion

满足停止迭代条件。最后,输出满足先验约束条件的粒子变量,即钢筋表面腐蚀的位置和长度。

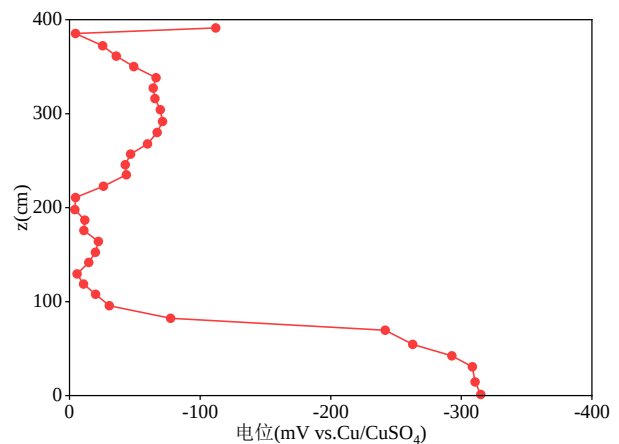
2 混凝土结构钢筋腐蚀的数值反演——以实际工程中混凝土构件为例

2.1 模型及参数

以文献[25]中腐蚀钢筋混凝土柱为例,该柱位于印度尼西亚 Peukan Bada 地区,柱的截面长度为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,高度为 4 m ,混凝土保护层厚度 40 mm 。混凝土柱在结构中的实际位置如图 3(a)所示。选取混凝土柱中一根钢筋,其半电位分布见图 3(b)。为了提高计算效率,采用二维计算模型,见图 4。



(a) 实际工程中混凝土柱及其截面尺寸

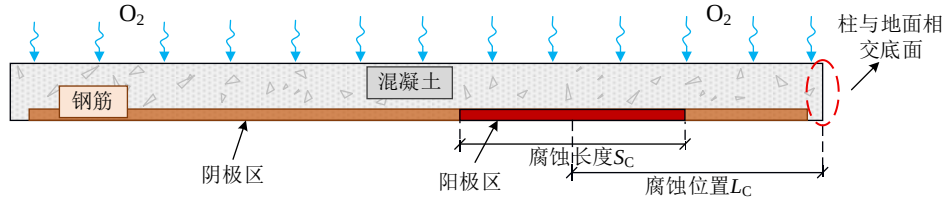


(b) 半电位分布

图 3 实际工程中混凝土柱和腐蚀钢筋的半电位分布^[25]

Fig.3 Concrete columns in practical engineering and its half-cell potential distribution of corroded reinforcing steel^[25]

阴阳极区边界条件采用文献[7]中实测的极化曲线数据,如图 5 所示,有限元模型以线性插值方法计算。饱水度 θ 对混凝土电阻率 ρ 的影响关系基于



注: L_C 为从柱底端到腐蚀中心的距离, S_C 为沿钢筋长度方向的腐蚀长度。

图4 混凝土中钢筋腐蚀位置和长度反演计算的二维模型

Fig.4 Geometric model for inverse calculation of corrosion location and size of steel bar in concrete

文献[26]实测试验数据拟合得到,该数据能有效反映典型钢筋混凝土内部环境下电阻率随饱水度的变化规律,进而推算得到完全饱水状态下混凝土电阻率 ρ_0 为 $66 \Omega\text{m}$ 。如图6所示,其函数表达式为

$$\rho = 66 \times \left(0.83 + \frac{12433.5}{1 + \left(\frac{\theta}{0.055} \right)^{3.85}} \right) \quad (15)$$

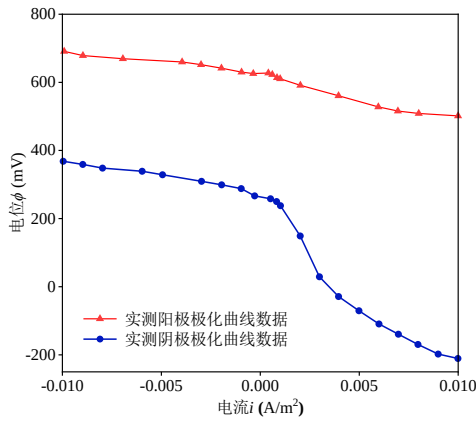


图5 混凝土中钢筋腐蚀阴阳极的极化曲线^[7]

Fig.5 Cathodic and anodic polarization curves at the steel surface in concrete^[7]

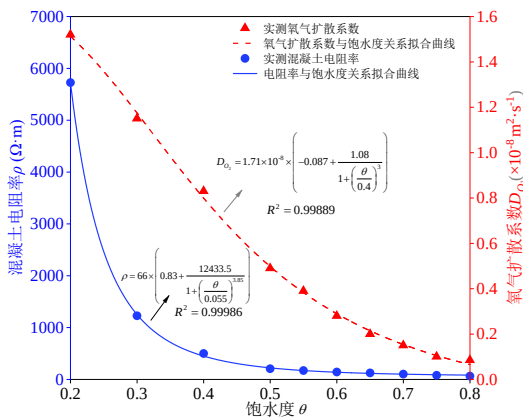


图6 饱水度与氧气扩散系数和电阻率之间关系^[26]

Fig.6 Relationship between water saturation and oxygen diffusion coefficient and resistivity^[26]

混凝土表面初始氧气浓度 $C_{O_2}^0$ 为 8.6 mol/m^3 ^[20]。混凝土饱水度对氧气扩散系数的影响同样基于文

献[26]实测试验数据拟合得到,该数据能准确描述氧气在典型钢筋混凝土孔隙结构中的扩散特性随饱水度的变化规律,进而推算得到完全干燥状态下混凝土中氧气扩散系数 $D_{O_2}^0$ 为 $1.71 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。如图6所示,其函数表达式为

$$D_{O_2} = 1.71 \times 10^{-8} \times \left(-0.087 + \frac{1.08}{1 + \left(\frac{\theta}{0.4} \right)^3} \right) \quad (16)$$

经过多次反演计算,确定反演参数:粒子群数目为25,搜索空间为 $CL \in (0, 400) \text{ cm}$ 、 $CS \in (0, 80) \text{ cm}$,最大迭代次数 $j_{\max}$ 为60,学习因子 c_1 、 c_2 都为0.8,最小惯性权重 $w_{\min}$ 为0.1、最大惯性权重 $w_{\max}$ 为1,停止迭代阈值 $\epsilon_0(X)$ 为1.0066。

数值反演计算采用COMSOL with MATLAB开展。

2.2 结果与分析

2.2.1 反演计算过程

图7给出了混凝土饱水度为0.6时钢筋腐蚀位置和长度的反演迭代过程,红色圆点表示当前群体最优解 g_{best} ,蓝色菱形表示粒子。首先,粒子在搜索空间内随机分布,表示初步对确定腐蚀位置和长度的各种猜测,见图7(a)。然后,为了避免反演迭代过程中出现粒子陷入局部最优导致反演结果错误的问题,通过设置线性递减的惯性权重 w_j ,以帮助粒子跳出局部最优,找到群体最优解 g_{best} ,如图7(a)、(b)所示。在寻优迭代初期,惯性权重 w_j 较大,粒子速度 V_{j+1} 的更新主要由式(9)中的惯性项 ($w_j V_j$) 决定,较大的 V_{j+1} 使粒子以大步长在搜索空间中进行跳跃式的移动,搜索范围更广,同时可避免陷入局部最优。迭代中期,随着群体最优解 g_{best} 逐渐趋于稳定,粒子群中每个粒子的个体最优解 g_{best} 在寻优迭代过程逐渐与群体最优解 g_{best} 重合,因此粒子群开始缓慢向群体最优解 g_{best} 收敛,见图7(b)~(e)。迭代后期,惯性权重 w_j 较小,粒子速度的更新取决于式(9)中的个体最优项 ($c_1 r_1 (p_{\text{best}} -$

X_j))和全局最优项($c_2 r_2 (g_{best} - X_j)$),粒子开始以较小的步长,集中在 g_{best} 的附近区域进行局部搜索,从而加速收敛到群体最优解。最后,经过多次迭代后,

逐渐寻找到群体最优解,所有粒子收敛于某一点($L_c=35.31\text{ cm}$ 、 $S_c=68.15\text{ cm}$),见图7(e)、(f)

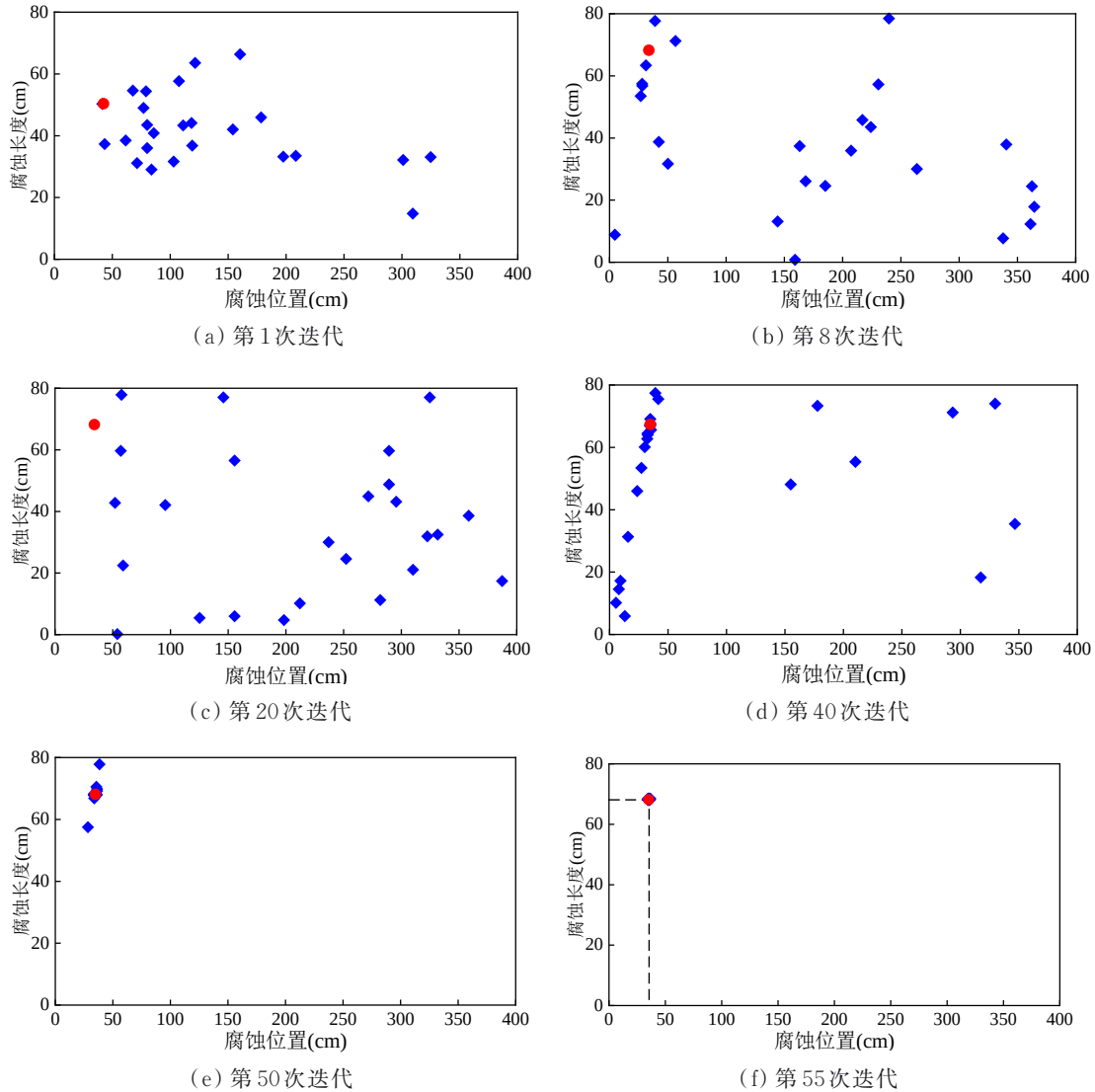


图7 混凝土饱水度为0.6时钢筋腐蚀位置和长度的反演迭代过程

Fig.7 Inverse iterative procedure for the location and size of rebar corrosion in concrete with a 0.6 saturation degree

2.2.2 混凝土饱水度对钢筋表面氧气浓度、电位分布和局部电流密度的影响

当 $L_c=35.31\text{ cm}$ 、 $S_c=68.15\text{ cm}$ 时,图8给出了该腐蚀状态下不同饱水度混凝土中钢筋表面氧气浓度的分布。距离阳极区较远的阴极区域,由于耗氧反应较弱,外界扩散的氧气足以供给其反应所消耗,所以钢筋表面氧气浓度几乎不受影响。距离阳极区较近的阴极区耗氧反应较强,钢筋表面氧气浓度明显低于其他区域。此外,阴极区较强的耗氧反应还影响到附近阳极区的氧气浓度,虽然其附近阳极区不发生耗氧反应,但氧气浓度也会出现一定程度的降低。随饱水度升高,钢筋表面氧气浓度变化的区域逐渐增大,且该区域的氧气浓度降低得更加

显著。

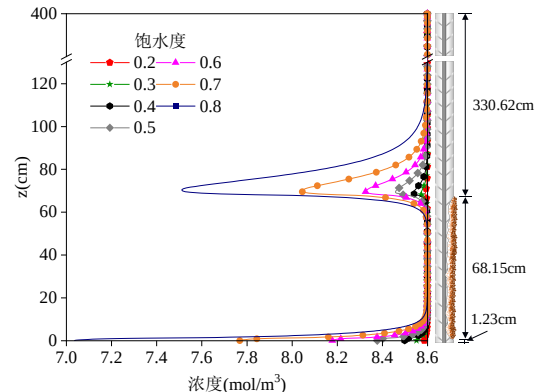


图8 饱水度对钢筋表面氧气浓度的影响

Fig.8 Effect of water saturation on oxygen concentration at the surface of steel bars

整体上看,随混凝土饱水度升高,钢筋表面氧气浓度降低更加明显。饱水度在 0.5~0.8 时,氧气浓度降低较为显著;而在 0.2~0.4 时,氧气浓度变化较小。因此,饱水度低于 0.4 时,由于其对氧气浓度影响较小,可忽略饱水度变化对钢筋表面电极反应的影响,则数值反演模型可不考虑饱水度对混凝土中氧气传输的影响。当饱水度高于 0.5 时,建议考虑饱水度对混凝土氧气传输的影响。

当 $L_c=35.31\text{ cm}$ 、 $S_c=68.15\text{ cm}$ 时,图 9 给出了不同饱水度下钢筋表面的半电位分布。钢筋表面的阳极区发生氧化反应并失去电子,阴极区则发生还原反应并接受电子。所以图 9 中钢筋表面阳极区电位为负,而阴极区电位为正。饱水度不仅会影响钢筋表面电极反应,且还会影响混凝土电解质的电阻率。因此,图 9 中不同饱水度下钢筋表面电位分布不同,尤其在阴阳极交界附近。

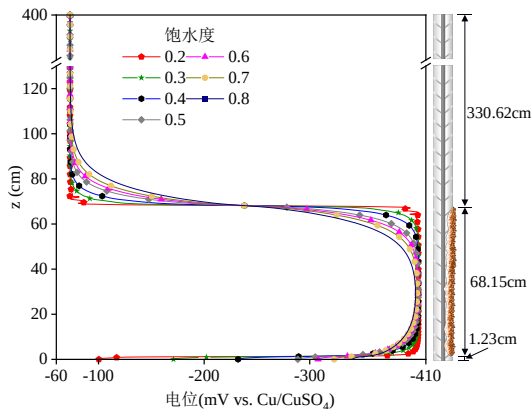


图 9 饱水度对钢筋表面电位的影响

Fig.9 Effect of water saturation on oxygen concentration at the surface of steel bars

随着饱水度的升高,钢筋表面氧气浓度降低,钢筋表面的阴极反应受到影响。为了维持电化学平衡,阳极反应速率降低,所以图 9 中靠近钢筋锈蚀位置的阳极区电位随着饱水度增大而出现较小的正移,而阴极区电位随着饱水度增大而出现较小的负移。

饱水度变化对钢筋局部电流密度的影响如图 10 所示。随饱水度升高,阴极氧还原电流密度与阳极铁氧化电流密度均出现增大趋势。这是由于局部电流密度受混凝土电阻率、氧气浓度和阴阳极电位差影响。随饱水度增大,氧气浓度降低会减小局部电流密度,然而电阻率降低和电位差增大会提升局部电流密度。因此,钢筋局部电流密度呈现增大趋势。

2.2.3 混凝土中钢筋局部腐蚀位置和长度的数值反演

表 1 为不同饱水度下混凝土柱和试验试件数值反演的计算结果。由图 9 可知,对于同一种腐蚀状

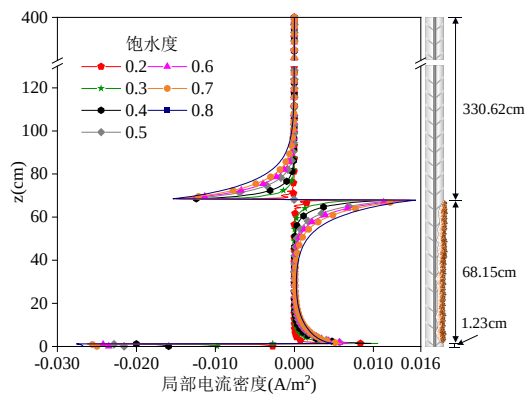


图 10 饱水度对钢筋局部电流密度的影响

Fig.10 Effect of water saturation on local current density at the steel bars

态,不同饱水度下钢筋表面会呈现不同的电位分布。而电位分布为数值反演的先验约束条件,所以表 1 中不同饱水度下钢筋腐蚀位置和长度的反演计算结果不同。

表 1 不同饱水度数值反演计算结果

Table 1 Inversion calculation results for different water saturation values

饱水度 θ	腐蚀位置 L_c/cm	腐蚀长度 S_c/cm
0.2	34.71	69.41
0.3	34.71	69.42
0.4	34.90	69.06
0.5	35.05	68.73
0.6	35.31	68.15
0.7	35.53	67.54
0.8	29.08	52.80

如表 1 所示,当饱水度在 0.2~0.3 时,混凝土柱中钢筋腐蚀位置和长度计算结果分别为: $L_c=34.71\text{ cm}$ 、 $S_c=69.41\text{ cm}$ 和 $L_c=34.71\text{ cm}$ 、 $S_c=69.42\text{ cm}$,结果相差不大,这主要是由于此时饱水度较低,其变化对钢筋表面电极动力学反应影响较小(见图 8)。相反,当饱水度大于 0.4 时,其计算结果由 $L_c=34.90\text{ cm}$ 、 $S_c=69.06\text{ cm}$ 变为 $L_c=35.05\text{ cm}$ 、 $S_c=68.73\text{ cm}$,结果变化较为显著,并随饱水度升高持续发生变化。这主要由于较高的饱水度对钢筋表面电极动力学反应影响较大(见图 8)。因此,当饱水度低于 0.4 时,数值反演结果对其变化敏感性较低;高于 0.4 时,反演结果对变化其敏感性较高。

饱水度为 0.8 时,数值反演结果发生突变,这主要是由于半电位分布作为数值反演的先验条件,受氧气浓度和混凝土电阻影响。较高的饱水度会导致钢筋表面氧气浓度和混凝土电阻率均显著降低,双重影响可能会破坏钢筋表面电化学平衡,进而导致结果突变。

文献[27]将混凝土柱进行破损,得到了钢筋实际真实的腐蚀位置和长度: $L_c=32\text{ cm}$ 、 $S_c=64\text{ cm}$,如图11所示。该柱的混凝土饱水度约为0.6,按照表1的反演计算结果,在该饱水度下,数值反演结果为: $L_c=35.31\text{ cm}$ 、 $S_c=68.15\text{ cm}$ 。钢筋腐蚀位置的误差为10.3%,腐蚀长度的误差为6.1%。实测与数值计算电位分布对比,如图12所示,二者之间存在一定范围内的误差,但其沿钢筋长度方向的变化趋势完全一致。

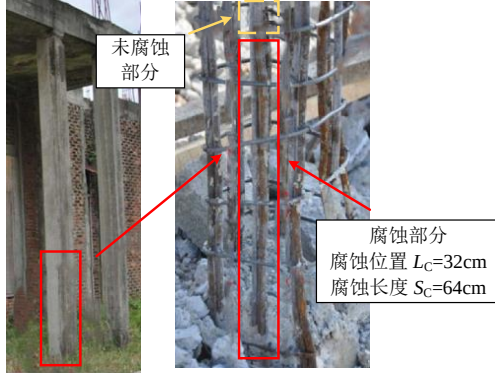


图11 实际混凝土柱中钢筋腐蚀状态测量结果^[27]

Fig.11 Measurements of the corrosion state of steel bar in actual concrete column^[27]

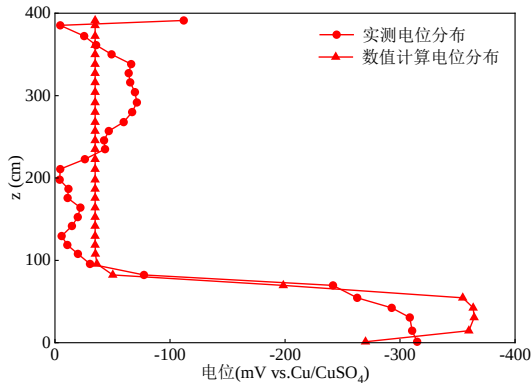


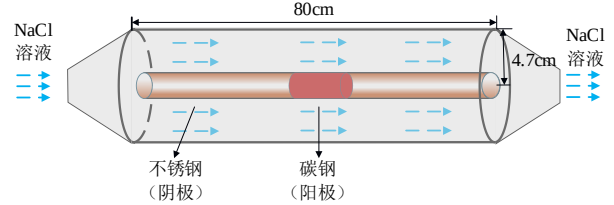
图12 混凝土柱中腐蚀钢筋的实测和数值计算电位分布

Fig.12 Potential distribution of measured and numerically calculated for corroded steel rebar in actual concrete columns

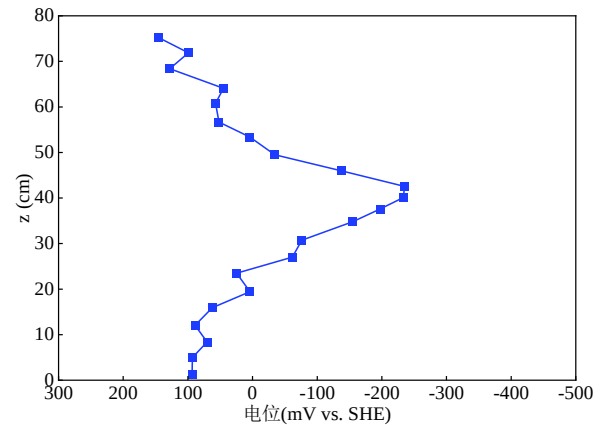
3 基于实验室构件的数值反演模型验证

以文献[28]中实验室的圆柱形构件为例,构件尺寸为 $\Phi 94\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ 。该构件以碳钢作为阳极,不锈钢作为阴极。使用流动池模具,钢筋位于

中心位置,模具内以流动性的NaCl溶液代替混凝土作为电解质,溶液浓度为 0.46 mmol/L ,pH值为7,其电阻率约为 $140\text{ }\Omega\text{m}$ 。构件的示意图及其半电位分布如图13所示。



(a) 实验室构件示意图



(b) 半电位分布

图13 实验室构件和腐蚀钢筋的半电位分布^[28]

Fig.13 Laboratory components and half-cell potential distribution of corroded reinforcing steel^[28]

基于上述实验室构件,建立有限元模型,其反演计算的二维模型如图14所示。阴阳极区边界条件采用文献[7]中实测的极化曲线数据,如图5所示。PSO算法反演参数设置:粒子群数目为25,搜索空间为 $L_c \in (0, 80)\text{ cm}$ 、 $S_c \in (0, 10)\text{ cm}$,最大迭代次数 $j_{\max}$ 为60,学习因子 c_1 、 c_2 都为0.8,最小惯性权重 $w_{\min}$ 为0.1、最大惯性权重 $w_{\max}$ 为1,停止迭代阈值 $\epsilon_0(X)$ 设置为4.5122。

进行数值反演计算,经过多次迭代输出计算结果为: $L_c=40.28\text{ cm}$ 、 $S_c=4.74\text{ cm}$ 。文献[28]提供实验室构件中钢筋真实腐蚀位置和长度分别为: $L_c=40\text{ cm}$ 、 $S_c=5\text{ cm}$ 。钢筋腐蚀位置误差为0.7%,腐蚀长度误差为5.2%。因此,建立的数值反演模型可以准确地预测出混凝土中钢筋锈蚀的位置和

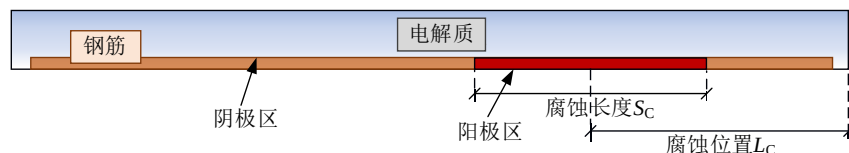


图14 实验室构件中钢筋腐蚀位置和长度反演计算的二维模型

Fig.14 Geometric model for inverse calculation of corrosion location and size of steel bar in in laboratory components

长度。

4 结论与展望

提出了基于 HCP 法的钢筋局部腐蚀位置和长度数值反演计算方法,主要结论如下:

1) 考虑混凝土饱水度对氧气扩散和电阻率的影响,建立了混凝土中钢筋腐蚀电位分布的正演数值模型。以实测半电位分布作为先验约束条件,采用粒子群优化(PSO)算法,建立了考虑混凝土孔隙饱水度对氧气扩散和电阻率影响的混凝土中钢筋局部腐蚀位置和长度的数值反演方法。结果表明,所建立的数值反演模型可以准确地预测出混凝土中钢筋锈蚀的位置和长度。

2) 饱水度影响钢筋表面的氧气浓度,当饱水度较低时,其对氧气浓度影响较小,数值反演模型可不考虑饱水度对混凝土氧气传输的影响。此外,饱水度影响钢筋表面电位,进而影响数值反演计算结果;当饱水度大于 0.4 时,数值反演结果对其变化尤为敏感。

基于半电位法(HCP)实现了钢筋锈蚀位置和长度的反演计算。然而,半电位本质上反映钢筋腐蚀电化学的稳态特征,则意味着无法得到钢筋电化学腐蚀瞬态特征,即腐蚀速率。因此,后续将基于瞬态的恒电位极化法,开展钢筋腐蚀电流密度的反演计算,进而建立钢筋腐蚀深度的计算模型,从而形成混凝土中钢筋腐蚀位置和长度、腐蚀速率及腐蚀深度的电化学无损检测方法。

参考文献

- [1] 牛荻涛, 杨德柱, 罗大明. 混凝土结构耐久性评定方法体系[J]. 建筑结构, 2021, 51(17): 115-121, 114.
NIU D T, YANG D Z, LUO D M. Durability assessment method of existing concrete structures [J]. Building Structure, 2021, 51(17): 115-121, 114. (in Chinese)
- [2] 洪乃丰. 混凝土中钢筋腐蚀与结构物的耐久性[J]. 公路, 2001(2): 66-69.
HONG N F. Corrosion of steel in concrete and structure durability [J]. Highway, 2001(2): 66-69. (in Chinese)
- [3] HU J Y, ZHANG S S, CHEN E, et al. A review on corrosion detection and protection of existing reinforced concrete (RC) structures [J]. Construction and Building Materials, 2022, 325: 126718.
- [4] 张方, 丛龙宇, 王雨辰, 等. 钢筋混凝土结构状态监测技术研究新进展[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024: 1-13. (2024-02-20). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JIAN20240219001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
ZHANG F, CONG L Y, WANG Y C, et al. New advances in condition monitoring technology study for reinforced concrete structures [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024: 1-13. (2024-02-20). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JIAN20240219001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [5] 朱雅仙, 朱锡昶, 葛燕, 等. 用半电池电位评估钢筋混凝土构件中钢筋腐蚀状态[J]. 水利水运工程学报, 2003 (4): 41-44.
ZHU Y X, ZHU X C, GE Y, et al. Evaluation of reinforcement corrosion in reinforced concrete member by half-cell potential method [J]. Hydro-Science and Engineering, 2003(4): 41-44. (in Chinese)
- [6] ELSENER B, ANDRADE C, GULIKERS J, et al. Half-cell potential measurements: Potential mapping on reinforced concrete structures [J]. Materials and Structures, 2003, 36(7): 461-471.
- [7] RIDHA M, AMAYA K, AOKI S. Multistep genetic algorithm for detecting corrosion of reinforcing steels in concrete [J]. Corrosion, 2001, 57(9): 794-801.
- [8] MINAGAWA K, SUGA K, KIKUCHI M, et al. An efficient inverse analysis considering observation error to detect corrosion in concrete structures containing multi-layered rebar[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2012, 8(1): 81-87.
- [9] ADRIMAN R, BIN M, IBRAHIM I, HUZNI S, et al. Improving half-cell potential survey through computational inverse analysis for quantitative corrosion profiling[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00854.
- [10] FONNA S, RIDHA M, HUZNI S, et al. Boundary element inverse analysis by using particle swarm optimization for reinforced concrete corrosion identification[J]. Advanced Materials Research, 2011, 339: 171-175.
- [11] FATHI S, MASYKURI M A, BIN M, et al. Boundary element inverse analysis (BEIA) simulation for detecting corrosion location in reinforced concrete[M]// Akhyar. Proceedings of the 2nd International Conference on Experimental and Computational Mechanics in Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2021: 161-168.
- [12] HASSAN R, COHANIM B, WECK O DE, et al. A comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm[C]//46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference. 2005: 1897.
- [13] ANDRADE C, ALONSO C, GARCÍA A M. Oxygen availability in the corrosion of reinforcements [J]. Advances in Cement Research, 1990, 3(11): 127-132.
- [14] LÓPEZ W, GONZÁLEZ J A. Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement [J]. Cement and

- Concrete Research, 1993, 23(2): 368-376.
- [15] HUET B, L'HOSTIS V, SANTARINI G, et al. Steel corrosion in concrete: Determinist modeling of cathodic reaction as a function of water saturation degree [J]. Corrosion Science, 2007, 49(4): 1918-1932.
- [16] 郭冰冰. 钢混结构氯盐侵蚀-迁移多场耦合机制与主动电场控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- GUO B B. Erosion of chloride in reinforced concrete structures-migration mechanism of multi-field coupling and active electric corrosion control [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [17] 占玉林, 斯睿哲, 臧亚美. 混凝土桥梁耐久性 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021(增刊 1): 100-106.
- ZHAN Y L, SI R Z, ZANG Y M. State-of-the-art review of the durability of concrete bridges in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021 (Sup 1): 100-106. (in Chinese)
- [18] XU J X, JIANG L H, WANG Q. Finite element model of reinforcement corrosion in concrete [J]. Water Science and Engineering, 2009, 2(2): 71-78.
- [19] ISGOR O B, RAZAQPUR A G. Modelling steel corrosion in concrete structures [J]. Materials and Structures, 2006, 39(3): 291-302.
- [20] MUEHLENKAMP E B, KORETSKY M D, WESTALL J C. Effect of moisture on the spatial uniformity of cathodic protection of steel in reinforced concrete [J]. Corrosion, 2005, 61(6): 519-533.
- [21] 李化建, 谢永江, 易忠来, 等. 混凝土电阻率的研究进展[J]. 混凝土, 2011(6): 35-40.
- LI H J, XIE Y J, YI Z L, et al. Advance in research on electrical resistivity of concrete[J]. Concrete, 2011(6): 35-40. (in Chinese)
- [22] 麻秀星, 钱觉时, 何更新, 等. 混凝土导电性能及其应用[J]. 材料导报, 2008, 22(4): 41-44.
- MA X X, QIAN J S, HE G X, et al. Development and application of concrete electrical conductivity [J]. Materials Review, 2008, 22(4): 41-44. (in Chinese)
- [23] 李峰, 唐和生, 薛松涛, 等. 粒子群优化算法在桁架优化设计中的应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(1): 7-12.
- LI F, TANG H S, XUE S T, et al. Application of a particle swarm optimization algorithm in truss structure optimal design [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(1): 7-12. (in Chinese)
- [24] FONNA S, HUZNI S, RIDHA M, et al. Inverse analysis using particle swarm optimization for detecting corrosion profile of rebar in concrete structure [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2013, 37(3): 585-593.
- [25] RIDHA M, FONNA S, HUZNI S, et al. Corrosion risk assessment of public buildings affected by the 2004 Tsunami in Banda Aceh [J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2013, 7(1): 1350004.
- [26] KORETSKY M, ABOOAMERI F, WESTALL J C. Evaluation of the performance of reference electrodes embedded in reinforced concrete [R]. Oregon: Oregon Department of Transportation, 1994.
- [27] FONNA S, GUNAWARMAN, HUZNI S. Boundary element inverse analysis for rebar corrosion detection: Study on the 2004 tsunami-affected structure in Aceh [J]. Case Studies in Construction Materials, 2018, 8: 292-298.
- [28] VAN EDE M C, FICHTNER A, ANGST U. Nondestructive detection and quantification of localized corrosion rates by electrochemical tomography [J]. NDT & E International, 2024, 142: 103005.

(编辑 XXX)