

# 鉄筋上の自然電位評価のための PiBEM 法の開発

熊本大学 学生会員 ○山口 岳人  
 熊本大学 学生会員 小拂 智絵  
 熊本大学 フェロー会員 大津 政康

## 1. はじめに

近年、多くの鉄筋コンクリート構造物から鉄筋腐食による早期劣化が報告されている。原因の一つとして塩害が挙げられ、今後は既存の構造物に限らず新たに建設される構造物においても塩害による鉄筋腐食の発生時期を早期に評価することが不可欠である。本研究では、コンクリート構造物の塩害における環境条件を考慮した浸漬乾燥繰り返し実験を行った。電気化学的手法による計測結果を用いて PiBEM 解析を開発することで、コンクリート表面で計測した自然電位をコンクリート内部の自然電位に換算することに試みた。

## 2. PiBEM(Potential inversion by BEM)解析

電位を  $u(x)$  とすれば、

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

と示されるポテンシャル場を満足する。式(1)の解は、境界要素法(BEM)の基礎式において、

$$u(x) = \int_S \left\{ G(x, y) \frac{\partial u}{\partial n}(y) - \frac{\partial G}{\partial n}(x, y) \cdot u(y) \right\} dS \quad (2)$$

と表示される。 $G(x, y)$  は基本解である。

コンクリート表面では、自然電位はポテンシャル問題であり、BEM 法では式(3)のように定式化される。

$$u(x) = \sum_{j=1}^N G(x, y_j) \frac{\partial u}{\partial n}(y_j) S_j - \sum_{j=1}^I \frac{\partial G}{\partial n}(x, y_j) u(j) S_j \quad (3)$$

コンクリート表面  $S_h$  を面積要素  $S_j$  に分割し、自然電位計測を行う。 $S_h$  以外の面では電流の流入出は 0 であると仮定して、内部点(鉄筋上の点)  $x_i$  の電極を  $u_i$  とすれば、式(3)は次のように離散化する。

$$u_i = \sum_{j=1}^N G_{ij} \frac{\partial u}{\partial n_j} S_j - \sum_{j=1}^I \frac{\partial G_{ij}}{\partial n} u_j S_j \quad (4)$$

ここで、 $u_i$  と  $S_j$  はそれぞれコンクリート表面での自然電位と計測電極部の面積(既知)である。また、 $\partial u / \partial x_j$  は電流、分極抵抗  $I_j$  の間には、

$$\frac{\partial u}{\partial n_j} \propto \frac{B}{I_j} \quad (5)$$

の関係が成立する。さらに、コンクリートの物性により、コンクリート表面の電位には、式(1)の均質体の支配方程式以外の影響を考慮する必要がある。そこで、式(4)の電位項および電流項にそれぞれ係数  $C_1$  および  $C_2$  を代入すれば、

$$u_i = C_1 \left( \sum_{j=1}^N \frac{\partial G_{ij}}{\partial n} u_j S_j \right) + C_2 \left( \sum_{j=1}^I G_{ij} \frac{1}{I_j} S_j \right) \quad (6)$$

と置くことができる。

本実験では、鉄筋上の 2 箇所  $x_1$ 、 $x_2$  で内部電位計測を行っている。したがって、式(6)は、

$$\begin{aligned} u_1 &= C_1 \left( \sum_{j=1}^N \frac{\partial G(x_1, y_j)}{\partial n} u_j S_j \right) + C_2 \left( \sum_{j=1}^I G(x_1, y_j) \frac{1}{I_j} S_j \right) \\ u_2 &= C_1 \left( \sum_{j=1}^N \frac{\partial G(x_2, y_j)}{\partial n} u_j S_j \right) + C_2 \left( \sum_{j=1}^I G(x_2, y_j) \frac{1}{I_j} S_j \right) \end{aligned} \quad (7)$$

という連立方程式となり、 $C_1$ 、 $C_2$  は決定可能となる。

その後、式(6)に  $C_1$ 、 $C_2$  を代入すれば、鉄筋上の全ての点で、表面上の自然電位と自然電位  $u_i$  が決定できる。

## 3. 実験概要

実験に用いたのは、**図-1** に示す床板を模擬した 1000×570×75mm の鉄筋コンクリート供試体である。供試体には、**図-1** に示す 3 本の鉄筋上にそれぞれ 2 箇所埋め込み式の内部センサを設置した。参照電極は銀-塩化銀電極を使用し、計測後に飽和銅-硫酸銅電極(CSE)の値に変換した。自然電位、分極抵抗の計測は鉄

表-1 コンクリート示方配合

G <sub>max</sub> (mm)	Sl (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位水量(kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤 (g/m <sup>3</sup> )	AE 助剤 (g/m <sup>3</sup> )
					W	C	S	G	NaCl		
10	8	55	7	45	174	317	757	1084	0.704	317	634

筋 1 本につきコンクリート表面より 9 箇所、コンクリート表面より 9 箇所、コンクリート内部から 2 箇所の計測を行った。コンクリートの示方配合は表-1 に示すように練り混ぜ水に NaCl を添加している。

#### 4. 試験結果

##### 4.1 自然電位計測値

28 日養生後を 0 日目とし、計測点 1、3 の自然電位計測結果を図-2 に示す。計測点 1 と 3 の表面における自然電位値は 49 日目に鉄筋腐食評価基準である -350mV の値を下回った。これは、90%以上の確率で腐食ありと評価される<sup>1)</sup>。

##### 4.2 PiBEM 解析

800mm の鉄筋上に内部点を 10mm 毎に 81 点設け、PiBEM 解析により、全内部点における鉄筋上での自然電位値を求めた。鉄筋 1 における 63 日目、91 日目および 105 日目の解析結果を図-3 に示す。解析には浸漬直後の計測値を使用した。この結果より、計測点 4 から 9 の 6 点は、105 日目の値が最も低く、日数経過に伴い腐食が進行したことが確認された。また、63 日目と 91 日目の解析結果は右下がりになっており、実験中期に計測点 1 側で腐食が活発であったことが推測される。

##### 4.3 鉄筋はつり出しによる目視観察

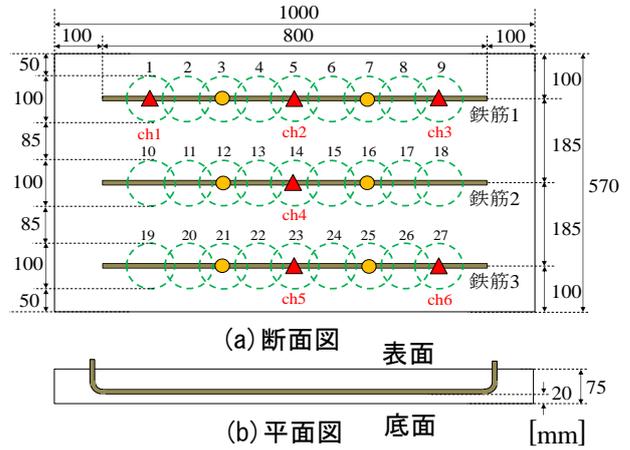
112 日目に実験を終了し、鉄筋を供試体からはつり出し、目視により観察した。図-4 に鉄筋 1 の観察結果を示す。赤い丸で示す計測点 1 で激しい腐食を確認することができた。これは、自然電位での 49 日目での低下および PiBEM 解析結果での 91 日目での分布とよく一致している。これにより、PiBEM 解析の鉄筋腐食評価における有効性が明らかとなった。

#### 5. まとめ

本研究では、実構造物を模擬したスラブ供試体を対象に PiBEM 解析を用いて鉄筋上の自然電位評価を行うことに試みた。その結果、自然電位計測値、PiBEM 解析値による腐食診断結果と実際の腐食状態の一致が確認され、これにより、PiBEM 解析による鉄筋腐食評価の有効性が認められた。

#### 参考文献

- (1) ASTM C876-91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of United Reinforcing Steel in Concrete, 1991



- : コンクリート表面の自然電位・分極抵抗計測点
- : 鉄筋付近の自然電位・分極抵抗計測点
- ▲ : AE センサ設置位置

図-1 コンクリート供試体  
自然電位・分極抵抗および AE 計測位置

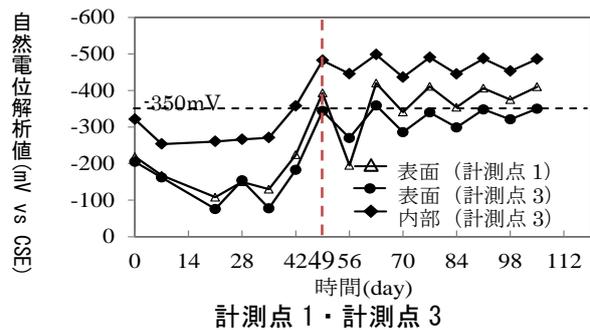


図-2 鉄筋 1 の自然電位計測値

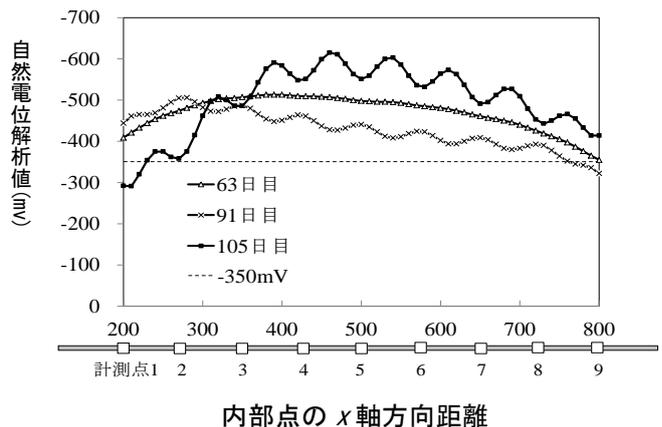


図-3 鉄筋 1 の PiBEM 解析結果

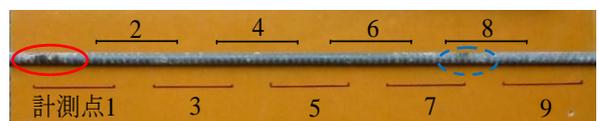


図-4 鉄筋 1 の目視による観察結果