

論文 コンクリート中鉄筋の腐食箇所特定のための完全非破壊手法の開発

橋本 永手*1・江 俊韻*2・加藤 佳孝*3

要旨: 鉄筋コンクリート構造物の維持管理では、コンクリート中の鉄筋の腐食箇所を推定することが重要である。本論文は、著者らが開発中の鉄筋コンクリートの腐食箇所を特定する手法の原理を示したものである。本手法は鉄筋コンクリート表面に対極を 2 枚設置し、表面の様々な箇所で電位の周波数微分の値を得ることで、腐食箇所を同定する。数値実験を通し、本手法の適用性を確認したところ、第一鉄筋のかぶりが 5cm、第二鉄筋のかぶりが 6.9cm の鉄筋コンクリートで腐食箇所の同定が可能であることが示された。

キーワード: マクスウェル方程式、弱形式、インピーダンス、有限要素法

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の維持管理では、コンクリート中の鉄筋の腐食箇所を推定することが重要である。しかし、コンクリート中鉄筋の腐食速度を把握する既往の技術では腐食箇所の特定が困難である。また、鉄筋との電氣的導通が必要な技術が一般的であり、利便性の面での障害となっている。

このような背景の中、著者らは鉄筋コンクリートの腐食箇所を特定する手法（以降、DHz 法とする）の開発を目指している。2 つの対極を鉄筋コンクリートの表面の様々な箇所に設置し、交流電流を印加する。照合電極を 2 つ用い、電流印加中のコンクリート表面の電位差を様々な箇所で測定する。このようにして取得したコンクリート表面の電位差分布の情報に後述の操作を施し腐食箇所を特定する。

本稿では、仮定の鉄筋コンクリートに DHz 法を適用し、コンクリート中鉄筋の腐食箇所を特定する方法について述べる。

2. DHz 法の原理

2.1 支配方程式の導出¹⁾

図-1 のように R^3 空間内の被験体が占める領域 Ω に交流電流を印加する。 Ω の境界を Γ とする。

Γ 上から角周波数 ω の電流 $I(t) = I_0 \cdot e^{j\omega t}$ が供給され、 Ω に角周波数 ω の伝導電流 $i(x, t) = i_e \cdot e^{j\omega t}$ が流れるとする。ここに、 j は虚数単位である。これに伴い Ω の電磁場も同じ角周波数で変動する。磁場の強さは $H(x, t) = H_0(x)e^{j\omega t}$ 、電場は $E(x, t) = E_e(x)e^{j\omega t}$ と表せる。伝導電流 i 、磁場の強さ H および電束密度 D の関係は、アンペール・マクスウェルの法則から次の通りである。

$$\nabla \times H_0(x)e^{j\omega t} - \frac{\partial D(x, \omega, t)}{\partial t} = i_e(x)e^{j\omega t} \quad (1)$$

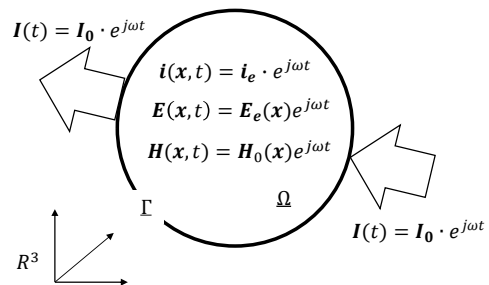


図-1 印加電流による領域 Ω 内の変

電場の強さと電束密度に線形関係を仮定すれば、両者の関係は誘電率 ϵ を用いて次の通りである。

$$D(x, \omega, t) = \epsilon(x)E_e(x)e^{j\omega t} \quad (2)$$

式(1)に式(2)を代入すれば次の通り展開できる。

$$\nabla \times H_0(x)e^{j\omega t} - \frac{\partial \epsilon(x)E_e(x)e^{j\omega t}}{\partial t} \quad (3)$$

$$= i_e(x)e^{j\omega t}$$

$$\nabla \times H_0(x)e^{j\omega t} - j\omega\epsilon(x)E_e(x)e^{j\omega t} \quad (4)$$

$$= i_e(x)e^{j\omega t}$$

$$\nabla \times H_0(x)e^{j\omega t} \quad (5)$$

$$= j\omega\epsilon(x)E_e(x)e^{j\omega t} + i_e(x)e^{j\omega t}$$

また、一般に i_e と E_e はオームの法則より次の通り表現できる。

$$i_e(x)e^{j\omega t} = \sigma(x)E_e(x)e^{j\omega t} \quad (6)$$

ここで、 σ は導電率 [$1/\Omega$] である。式(6)を式(5)に代入すれば次の通りである。

$$\nabla \times H_0(x)e^{j\omega t} \quad (7)$$

$$= j\omega\epsilon(x)E_e(x)e^{j\omega t} + \sigma(x)E_e(x)e^{j\omega t}$$

$$\nabla \times H_0(x)e^{j\omega t} \quad (8)$$

$$= \{j\omega\epsilon(x) + \sigma(x)\}E_e(x)e^{j\omega t}$$

$$\nabla \times H_0(x)e^{j\omega t} \quad (9)$$

$$= \gamma(x, \omega)E_e(x)e^{j\omega t}$$

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 理工学部土木工学科

*3 東京理科大学 理工学部土木工学科 教授 博(工) (正会員)

$$\gamma(\mathbf{x}, \omega) \equiv j\omega\varepsilon(\mathbf{x}) + \sigma(\mathbf{x}) \quad (10)$$

ここで、 γ は複素導電率 $[1/\Omega]$ である。

式(9)の両辺の発散を取れば、左辺は恒等的に0となる。また、電場 \mathbf{E} が電位 $\varphi(\mathbf{x})$ の勾配であることに着目すれば、満たすべき支配方程式は次の通りである。

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla \varphi) = 0 \quad (11)$$

2.2 有限要素法²⁾

式(11)は解析的ではないので、これ以上の展開を望めない。そこで、式(11)を弱形式化し、離散化することを考える。式(11)の両辺に仮想の関数 δw を乗じ、領域 Ω 内で積分すれば次の通りである。

$$\int_{\Omega} \delta w \nabla (\gamma \nabla \varphi(\mathbf{x})) d\Omega = 0 \quad (12)$$

式(12)をガウスの発散定理で展開する。ガウスの発散定理は次の通りである。

$$\int_{\Omega} \operatorname{div} \mathbf{E} d\Omega = \int_{\Gamma} \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} dS \quad (13)$$

ここに、 \mathbf{E} は微分可能な3次元ベクトル場とする。ここで、 \mathbf{E} を δw , γ , $\nabla \varphi$ の積と置く。

$$\mathbf{E} = \delta w \gamma \nabla \varphi \quad (14)$$

式(14)を式(13)に代入し、整理すれば次の通りである。

$$\int_{\Omega} \operatorname{div} (\delta w \gamma \nabla \varphi) d\Omega = \int_{\Gamma} \delta w \gamma \nabla \varphi \cdot \mathbf{n} dS \quad (15)$$

$$\int_{\Omega} \delta w \nabla \cdot (\gamma \nabla \varphi) d\Omega \quad (16)$$

$$= - \int_{\Omega} \gamma \nabla \delta w \cdot \nabla \varphi d\Omega + \int_{\Gamma} \delta w \gamma \nabla \varphi \cdot \mathbf{n} dS$$

式(16)を(12)に代入すれば次の通りである。

$$- \int_{\Omega} \gamma \nabla \delta w \cdot \nabla \varphi d\Omega + \int_{\Gamma} \delta w \gamma \nabla \varphi \cdot \mathbf{n} dS \quad (17)$$

$$= 0$$

$$\int_{\Omega} \gamma \nabla \delta w \cdot \nabla \varphi d\Omega = \int_{\Gamma} \delta w \gamma \nabla \varphi \cdot \mathbf{n} dS \quad (18)$$

ここで、領域 Ω をS個に分割し、N個の節点で線形補間する。 $\varphi(\mathbf{x})$ は式(19)の通り近似的に表すことができる。

$$\varphi(\mathbf{x}) \approx \sum_{i=1}^N N_i(\mathbf{x}) \varphi_i \quad (19)$$

$$= [N_1 \quad N_2 \quad \cdots \quad N_N] \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_N \end{pmatrix}$$

$$N_i(\mathbf{x}_j) = 1 \quad (i = j) \quad (20)$$

$$N_i(\mathbf{x}_j) = 0 \quad (i \neq j) \quad (21)$$

ここに、 i, j は節点番号、 \mathbf{x}_j は節点番号 j の座標、 φ_i は各節点での φ の値である。 N_i は形状関数で、節点間で線形変化する関数とする。式(19)の grad を取れば次の通りであ

る。

$$\nabla \varphi(\mathbf{x}) \approx \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial N_N}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \cdots & \frac{\partial N_N}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \cdots & \frac{\partial N_N}{\partial z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_N \end{pmatrix} \quad (22)$$

仮想関数 δw も同様に次の通りである。

$$\delta w(\mathbf{x}) \approx \sum_{i=1}^N N_i(\mathbf{x}) \delta w_i \quad (23)$$

$$= [N_1 \quad N_2 \quad \cdots \quad N_N] \begin{pmatrix} \delta w_1 \\ \delta w_2 \\ \vdots \\ \delta w_N \end{pmatrix}$$

$$\nabla \delta w(\mathbf{x}) \approx \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial N_N}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \cdots & \frac{\partial N_N}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \cdots & \frac{\partial N_N}{\partial z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta w_1 \\ \delta w_2 \\ \vdots \\ \delta w_N \end{pmatrix} \quad (24)$$

式(22), (23), (24)を式(18)に代入すれば次の通りである。

$$\int_{\Omega} \gamma \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial N_N}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \cdots & \frac{\partial N_N}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \cdots & \frac{\partial N_N}{\partial z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta w_1 \\ \delta w_2 \\ \vdots \\ \delta w_N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial N_N}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \cdots & \frac{\partial N_N}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \cdots & \frac{\partial N_N}{\partial z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_N \end{pmatrix} d\Omega \quad (25)$$

$$= \int_{\Gamma} [N_1 \quad N_2 \quad \cdots \quad N_N] \begin{pmatrix} \delta w_1 \\ \delta w_2 \\ \vdots \\ \delta w_N \end{pmatrix} \gamma \nabla \varphi \cdot \mathbf{n} dS \quad (26)$$

$$= \begin{pmatrix} \delta w_1 \\ \delta w_2 \\ \vdots \\ \delta w_N \end{pmatrix}^T \int_{\Omega} \gamma [K] d\Omega \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_N \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$= \begin{pmatrix} \delta w_1 \\ \delta w_2 \\ \vdots \\ \delta w_N \end{pmatrix}^T \int_{\Gamma} \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_N \end{pmatrix} \gamma \nabla \varphi \cdot \mathbf{n} d\Gamma$$

$$[K] \equiv \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{N1} & K_{N2} & \cdots & K_{NN} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$K_{ij} \equiv \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \quad (28)$$

$$\int_{\Omega} \gamma[K] d\Omega \tilde{\varphi} = [Q] \quad (29)$$

$$\tilde{\varphi} \equiv \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_N \end{pmatrix} \quad (30)$$

$$[Q] \equiv \int_{\Gamma} \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_N \end{pmatrix} \gamma \nabla \varphi \cdot \mathbf{n} d\Gamma \quad (31)$$

ここに、電位の grad に導電率が乗じられた値は単位面積あたりに流入する電流を表すことから、 $[Q]$ は領域 Ω に流入する電流に依存する行列であることがわかる。

ここで、領域 Ω を S 個に分割した s 番目の領域 Ω_s で積分することを考える。領域 Ω_s は k, l, m, n 番目の節点で構成されているとし、領域内で複素導電率 γ_s は一定であると仮定すれば式(29)の左辺の積分部分は次の通りである。

$$\int_{\Omega} \gamma[K] d\Omega = \sum_{s=1}^S [B]_s \equiv [B] \quad (32)$$

$$[B]_s \equiv \begin{pmatrix} \gamma_s B_{11} & \gamma_s B_{12} & \cdots & \gamma_s B_{1N} \\ \gamma_s B_{21} & \gamma_s B_{22} & \cdots & \gamma_s B_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_s B_{N1} & \gamma_s B_{N2} & \cdots & \gamma_s B_{NN} \end{pmatrix} \quad (33)$$

$$B_{ij} \equiv \int_{\Omega_s} K_{ij} d\Omega_s \quad (34)$$

$$B_{ij} = 0 \quad (i \neq k, l, m, n \cup j \neq k, l, m, n) \quad (35)$$

式(32)を式(29)に代入すれば次の通りである。

$$[B] \tilde{\varphi} = [Q] \quad (36)$$

以上で、式(11)を離散化した式が得られた。

2.3 DHz 法の概要

DHz 法は、コンクリート表面に 2 枚の対極を設置し交流電流を印加する。図-2 は交流印加中の鉄筋コンクリートの断面図である。図に示す斜線部分を領域 Ω とする。対極間を流れる電流はコンクリート中を流れる場合と、鉄筋中を流れる場合に大別される。低周波数帯でコンクリートのインピーダンスがほとんど変化しないことを踏まえると、低周波数帯では領域 Ω に流入する電流分布は鉄筋のインピーダンスによって決定される。以降の議論の周波数は、コンクリートのインピーダンスが変化しない程度の低周波帯とする。

図-3 は既往の研究³⁾のコンクリート模擬水溶液中の健全鉄筋および腐食鉄筋のインピーダンス測定結果である。上の図はインピーダンスの大きさと周波数の関係、下の図はインピーダンスの偏角と周波数の関係である。凡例の h は hour を表し、d は day, 括弧の中は水溶液の塩化物イオン濃度を表している。すなわち、規定の時間経過後、水溶液に随時 NaCl を添加し、鉄筋のインピー

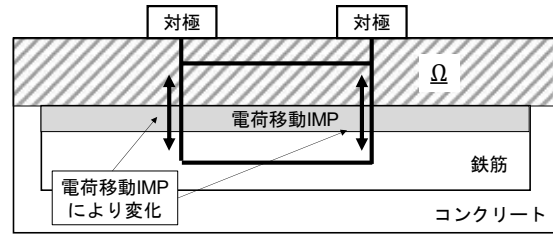


図-2 印加電流による領域 Ω 内の变化

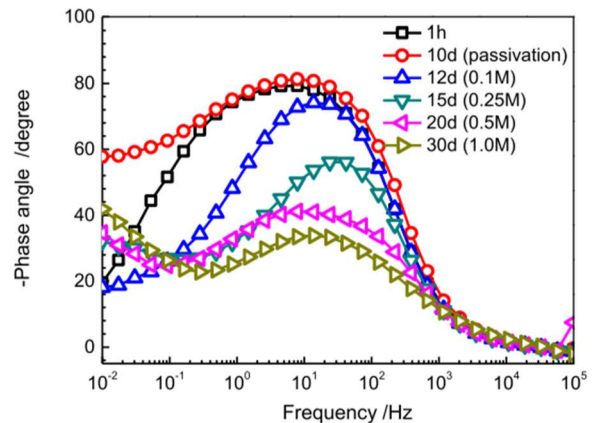
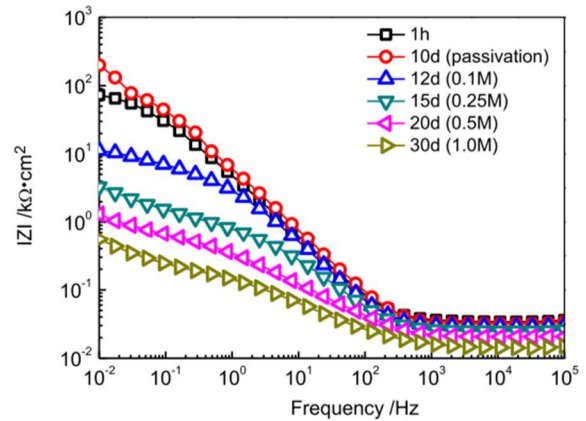


図-3 鉄筋のボード線図

ダンスの経時変化を測定したものである。1h, 10d は健全鉄筋のインピーダンスで、それ以外は腐食鉄筋のインピーダンスである。健全鉄筋のインピーダンスは腐食鉄筋のインピーダンスと比較して、周波数による変化が大きいことがわかる。したがって、健全鉄筋周辺のコンクリートに流入する電流分布は周波数によって大きく変化し、腐食鉄筋周辺のコンクリートに流入する電流分布は周波数による変化が小さいと考えられる。領域 Ω に流入する電流が変化すれば、式(36)中の $[Q]$ が変化することから、領域 Ω 中の電位分布も変化する。これらの事実を応用し、DHz 法ではコンクリート表面の電位分布の周波数微分を測定し、領域 Ω に流入する電流分布の変化から鉄筋の腐食箇所を同定する。

測定可能な電位分布はコンクリート表面上のある一点を基準とし、基準の電位と表面電位の電位差 φ_{cal} であるから、次の通り表現できる。

$$\varphi_{cal} = \varphi - \varphi_0 \quad (37)$$

ここに、 φ_0 は基準電位である。式(37)の両辺を微分すれば、表面電位の周波数微分分布は次の通りである。

$$\frac{\partial \varphi_{cal}}{\partial \omega} = \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} - \frac{\partial \varphi_0}{\partial \omega} \quad (38)$$

対極から十分離れた箇所を基準電位に設定すると、基準電位は周波数の関数ではなくなるため、式(38)は次の通り変形できる。

$$\frac{\partial \varphi_{cal}}{\partial \omega} = \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \quad (39)$$

ここで、 $\partial \varphi / \partial \omega$ を詳細に考察し、領域 Ω に流入する電流の変化と $\partial \varphi / \partial \omega$ の関係を導出する。領域 Ω の電位分布の周波数微分は式(36)を微分することにより次の通りである。

$$\frac{\partial}{\partial \omega} ([B] \tilde{\varphi}) = \frac{\partial}{\partial \omega} [Q] \quad (40)$$

$$\frac{\partial [B]}{\partial \omega} \tilde{\varphi} + [B] \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial \omega} = \frac{\partial [Q]}{\partial \omega} \quad (41)$$

$$\frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial \omega} = [B]^{-1} \frac{\partial [Q]}{\partial \omega} - [B]^{-1} \frac{\partial [B]}{\partial \omega} \tilde{\varphi} \quad (42)$$

式(42)の第2項の $[B]^{-1} \partial [B] / \partial \omega$ は、低周波数帯では0となる。このことの証明は後述する。これを式で表せば次の通りである。

$$\frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial \omega} = [B]^{-1} \frac{\partial [Q]}{\partial \omega} \quad (43)$$

式(43)より、領域 Ω の電位分布の周波数微分は、領域 Ω に流入する電流の周波数微分のみ依存することがわかる。腐食鉄筋周辺のコンクリートでは領域 Ω に流入する電流の周波数依存性が小さいため、領域 Ω の電位分布の周波数微分は0となる。一方、健全鉄筋周辺のコンクリートでは領域 Ω に流入する電流の周波数依存性が大きい場合、領域 Ω の電位分布の周波数微分は大きな値を持つ。このように、低周波数帯で、印加電流の周波数を微小変化させ、コンクリート表面の電位分布の変化を検知することで、周囲の鉄筋の腐食の有無を推定できる。

先述した低周波数帯で、 $[B]^{-1} \partial [B] / \partial \omega$ は零行列に近づくことを証明する。 $[B]^{-1} \partial [B] / \partial \omega$ はN次の逆行列を含むため、 $[B]^{-1} \partial [B] / \partial \omega$ が零行列に近づくことを解析的に証明することは困難であるが、次のように数値実験で証明する。 $[Z]$ を次式の通り一般的な複素行列として定義する。ただし、虚部に実数 ω を含み、対称行列である点は $[B]$ と同じである。

$$[Z] = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1N} \\ Z_{12} & Z_{22} & \cdots & Z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1N} & Z_{2N} & \cdots & Z_{NN} \end{pmatrix} \quad (44)$$

$$Z_{nm} = a_{nm} + j b_{nm} \omega \quad (45)$$

ここに、 a_{nm} 、 b_{nm} は任意の実数である。 $[Z]$ の ω 微分は次

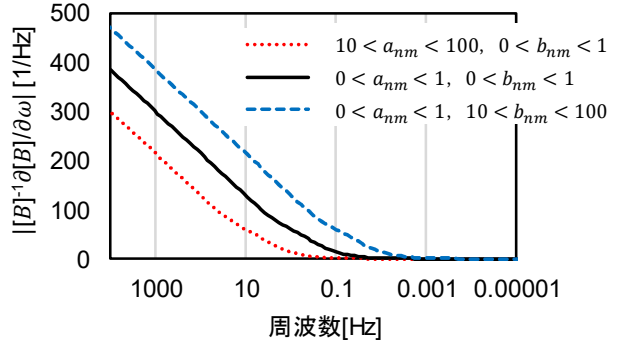


図-4 $|[B]^{-1} \frac{\partial [B]}{\partial \omega}|$ と周波数の関係

の通りである。

$$\frac{\partial [Z]}{\partial \omega} = \begin{pmatrix} j b_{11} & j b_{12} & \cdots & j b_{1N} \\ j b_{12} & j b_{22} & \cdots & j b_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ j b_{1N} & j b_{2N} & \cdots & j b_{NN} \end{pmatrix} \quad (46)$$

ここで、 a_{nm} 、 b_{nm} をランダム関数で無作為の値に設定し、 $|[Z]^{-1} \partial [Z] / \partial \omega|$ と ω の関係を計算した。Nは節点数であり、ここでは7とした。図-4が結果の一例である。図中黒実線は、 $0 < a_{nm} < 1$ 、 $0 < b_{nm} < 1$ の範囲、赤点線は、 $10 < a_{nm} < 100$ 、 $0 < b_{nm} < 1$ の範囲、青破線は、 $0 < a_{nm} < 1$ 、 $10 < b_{nm} < 100$ の範囲で構成した $[Z]$ の計算結果である。 $|[Z]^{-1} \partial [Z] / \partial \omega|$ は行列であるが、すべての要素で同様の傾向が見られたため、無作為に選んだ1つの要素(6行5列)の例を図に示した。いずれの条件でも周波数の減少に伴って $|[Z]^{-1} \partial [Z] / \partial \omega|$ の値は指数関数的に0に収束することがわかる。また、 $[Z]$ の実部が増加(黒実線から赤点線)、虚部が減少(青破線から黒実線)するに従い、 $|[Z]^{-1} \partial [Z] / \partial \omega|$ の値はより高周波数で収束することがわかる。これらを踏まえ、一般的に周波数を0に限りなく近づけた場合には $\partial \tilde{\varphi} / \partial \omega$ は0に収束し、特にコンクリートのような次定数の低い物質が領域 Ω を構成している場合、低周波数帯での $|[Z]^{-1} \partial [Z] / \partial \omega|$ の値は非常に小さくなると考えられる。

3. 数値実験

本章では、FreeFem⁴⁾を用いた数値実験で DHz 法の適用性を確認する。

3.1 想定する鉄筋コンクリート

想定する鉄筋コンクリートの寸法は150×150×10cmで、第一鉄筋のかぶりが5cm、第二鉄筋のかぶりが6.9cmとなるように、10cm間隔で計30本配筋した。鉄筋が腐食していない健全試験体、試験体中央の直径50cmを腐食させた腐食試験体、試験体の一隅の直径50cmを腐食させた試験体、試験体全面を腐食させた試験体の4種類を想定した(図-5)。コンクリートの複素導電率は2.82×

$10^{-4}+9.50 \times 10^{-12} j \omega$ [S/cm]⁵), 鉄筋は対角 1.9cm の正八角形とし, 鉄の複素導電率は $1.00 \times 10^8+1.00 \times 10 j \omega$ [S/cm]⁶)とした。鉄筋表面 0.6cm を反応層とし, 腐食鉄筋であれば反応層の複素導電率は $9.80 \times 10^{-3}+1.83 \times 10^{-3} j \omega$ [S/cm]³)に, 健全鉄筋であれば反応層の複素導電率は $1.85 \times 10^{-5}+2.33 \times 10^{-5} j \omega$ [S/cm]³)とした。

3.2 実験水準

印加電流の振幅は 100 μ A, 周波数は測定の現実的な範囲で 0.1Hz, 1.1Hz とした。図-6 に試験体の座標番号を示す。座標番号は説明のための便宜的な番号で, 対極を n 番および m 番, ω Hz の交流電流を印加した場合のコンクリート表面電位分布は $\varphi_{\omega}(n, m)$, コンクリート表面電位の周波数微分分布は $D\varphi_{\omega}(n, m)$ と表現する。

3.3 DHZ 法の測定方法および測定結果

DHz 法 の 具 体 的 な 測 定 方 法 を 示 す 。 DHz 法 では, 対 極 を 2 つ, 照 合 電 極 を 2 つ 用 い る 。 試 験 体 上 の い ず れ か の 箇 所 に 対 極 を 2 つ, 基 準 用 の 照 合 電 極 (以 降, 基 準 電 極 と する) を 対 極 から 遠 い 位 置 に 1 つ 設 置 する 。 対 極 から 遠 い 位 置 に する 理 由 は 先 述 の 通 り, 基 準 電 極 の 電 位 が 周 波 数 に よ っ て 変 化 し な い よ う に する ため である 。 対 極 間 に 交 流 電 流 を 印 加 し, 残 り の 照 合 電 極 (以 降, 走 査 電 極 と する) を コ ン ク リ ー ト 表 面 の 様 々 な 箇 所 に 接 触 さ せ, 基 準 電 極 と 走 査 電 極 の 電 位 差 を 測 定 する (こ の 作 業 を 「走 査 する」と 表 現 する)。例 えば, 図-7 は, 対 極 を 170 お よ び 171 番, 基 準 電 極 を 27 番 に 設 置 し 0.1Hz の 電 流 を 印 加, コ ン ク リ ー ト 表 面 全 体 を 走 査 電 極 で 走 査 し た 結 果 の 絶 対 値 表 示 である。自 明 である が, $\varphi_{0.1}(170,171)$ は コ ン ク リ ー ト 表 面 の 座 標 に よ っ て 値 を 持 つ 複 素 関 数 である。試 験 体 ごと に 大 き な 差 は 見 ら れ ず, 電 位 分 布 の 情 報 だ け で 腐 食 箇 所 を 同 定 する こと は 難 し い と 考 え ら れ る。同 様 の 走 査 で $\varphi_{1.1}(170,171)$ も 測 定 する。こ こ で, 式(47)の 通 り 計 算 し, $D\varphi_{0.1}(170,171)$ を 算 出 する。

$$D\varphi_{0.1}(n, m) = \left| \frac{\varphi_{0.1}(n, m) - \varphi_{1.1}(n, m)}{0.1 - 1.1} \right| \quad (47)$$

図-8 は $D\varphi_{0.1}(170,171)$ である。腐食箇所の直上に対極が設置されている一隅腐食試験体と全面腐食試験体では, $\partial\varphi_{cal}/\partial\omega$ の値が小さくなり, 図中に明色が示されなくなっていることがわかる。ここで, 数値実験で想定した中央腐食試験体と同じ寸法, 同じ配筋, 同じ腐食位置の鉄筋コンクリート試験体を用い, 実際の鉄筋コンクリートで対極周辺の $D\varphi_{0.1}(91,92)$ および $D\varphi_{0.1}(87,88)$ を測定した。健全試験体では 0.644[V/Hz], 全面腐食試験体では 0.00906[V/Hz]となり, 数値実験の結果と同様に腐食鉄筋直上で $D\varphi_{0.1}(n, m)$ の値が小さくなる傾向が得られた。今後詳細な実験の検証が必要であるが, 提案手法で腐食の箇所を検知できる可能性が確認された。

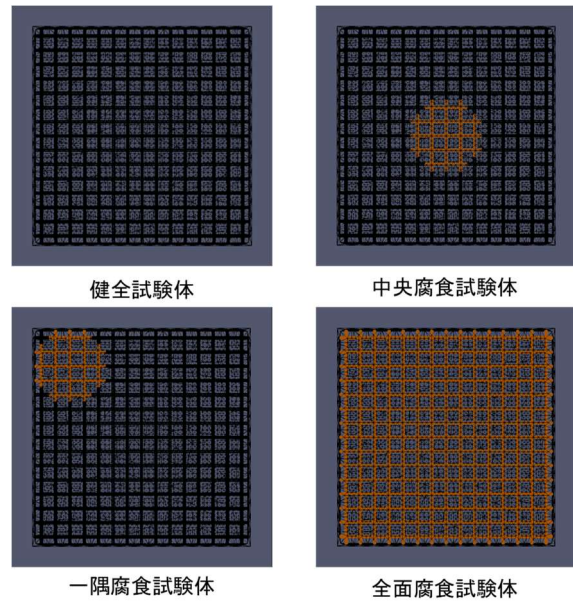


図-5 想定する鉄筋コンクリート

183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196
169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182
155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168
141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

図-6 コンクリート表面の対応番号

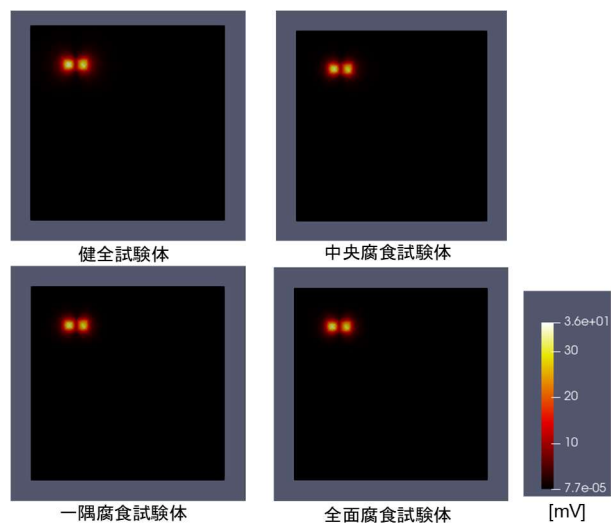


図-7 それぞれの試験体での $\varphi_{0.1}(170,171)$

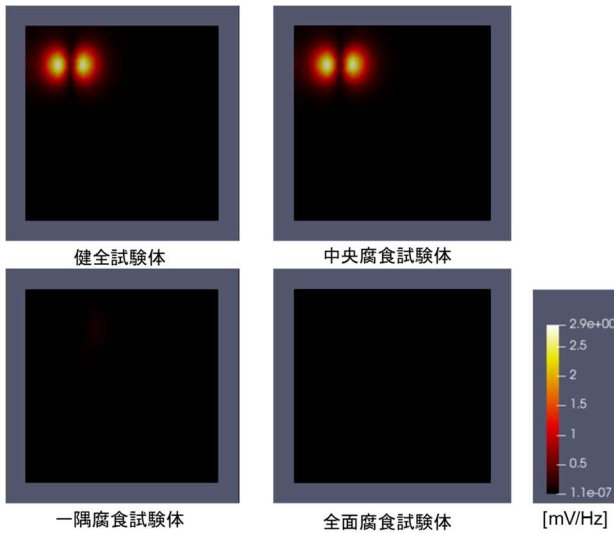


図-8 それぞれの試験体での $D\varphi_{0.1}(170,171)$

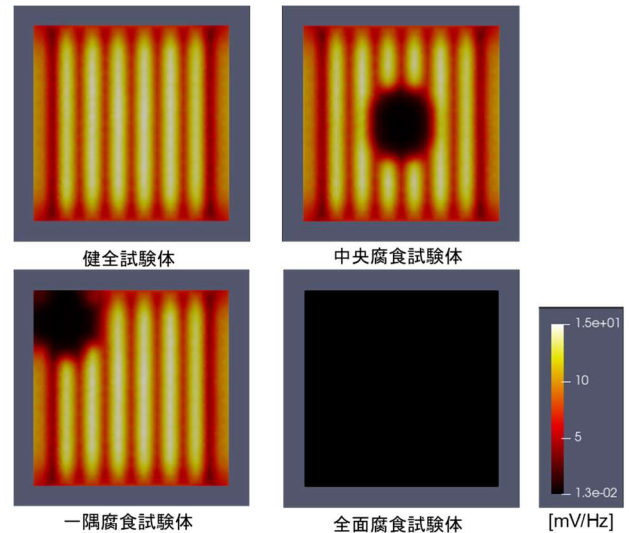


図-9 それぞれの試験体での φ_{DHZ}

同様の走査を $2n$ 番目と $2n-1$ 番目で行い、 $\varphi_{0.1}(2n-1,2n)$ および $\varphi_{1.1}(2n-1,2n)$ を取得する。次の式(48)に従って、パラメータ φ_{DHZ} を算出する。

$$\varphi_{DHZ} = \sum_{n=1}^N D\varphi_{0.1}(2n-1,2n) \quad (48)$$

ここに、 N は座標番号の最大値の半分の値である。 φ_{DHZ} を図示すれば図-9 の通りである。図中暗色に示される箇所が算出された腐食位置である。健全鉄筋では全面に明色が示され、腐食位置がないことが示されている。中央が腐食している水準では中央付近が、一隅が腐食している水準では一隅が、全面腐食の水準では全面が暗色に示され、概ね腐食の箇所が推定されていることがわかる。

4. まとめ

本研究で得られた知見は次の通りである。

- ・ 非絶縁体の領域に交流電流を印加した際の電位分布の支配方程式を導出した。
- ・ 導出した支配方程式を離散化した。
- ・ 電位の周波数微分分布は、領域に流出入する電流の変化に依存することを示した。
- ・ 想定した数値実験の範囲では、領域に流出入する電流の変化をコンクリート表面電位の周波数微分分布から推定することで、対極周囲の鉄筋腐食箇所の有無を把握できた。

- ・ DHZ法により、完全非破壊でコンクリート中鉄筋の腐食箇所が特定される可能性が示唆された。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP19J14403 の助成を受けたものです。また、学部3年生の田中基君とは共同で研究を進め、特に数値実験面での多大な協力をいただきました。感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤 直史：電気インピーダンストモグラフィの原理と応用、計測と制御, vol.56, No.11, pp.827-832
- 2) J.J. Connor: 流体解析への有限要素法の応用, pp.1-74, 株式会社サイエンス社, 1978
- 3) Jinjie Shi, Danqian Wang, Jing Ming, Wei Sun: Long-Term Electrochemical Behavior of Low-Alloy Steel in Simulated Concrete Pore Solution with Chlorides, Journal of Materials in Civil Engineering, vol.30, Issue 4, paper number 04018042, 2018
- 4) FreeFem ホームページ: <https://freefem.org/> (閲覧日: 2020年1月13日)
- 5) M. Keddad, H. Takenouti, X.R. Nóvoa, C. Andrade, C. Alonso: Impedance measurements on cement paste, Cement and Concrete Research, vol.27, Issue8, pp.1191-1201, 1997
- 6) 砂川重信: 理論電磁気学, p.169, 紀伊国屋書店, 1999