

表面電位分布の測定によるコンクリート供試体中の 含水率分布評価手法に関する基礎的検討

東北大学 学生会員 ○武藤 大地

東北大学 正会員 皆川 浩 宮本 慎太郎 久田 真

1. 研究の背景と目的

コンクリート内部の含水状態は塩害や中性化等の劣化機構に影響を及ぼす。そのため、含水状態の評価はコンクリートの耐久性を検討する上で重要な要素となっている。本研究では、通電時の供試体の表面電位分布が含水率分布によって変化することに着目し、計測した表面電位分布から供試体内部の含水率の分布を非破壊で評価する手法を開発するための基礎的検討を実施した。

2. 供試体内部の含水率分布評価手法の概要

本研究では、駒井らの手法¹⁾を参考にして、図-1に示すように角柱供試体に電流電極と電位差電極を配置して通電し、供試体に流れる電流 $I_{\text{test},i}$ と供試体表面の電位差 $\Delta V_{\text{test},ji}$ の比 $R_{\text{test},ji} = \Delta V_{\text{test},ji} / I_{\text{test},i}$ を測定する。次に、供試体のジオメトリモデルの内部に含水率および電気抵抗率を配分し、有限要素法（以下、FEM）によって供試体のジオメトリモデルに流れる電流 $I_{\text{cal},i}$ と同表面の電位差 $\Delta V_{\text{cal},ji}$ の比 $R_{\text{cal},ji} = \Delta V_{\text{cal},ji} / I_{\text{cal},i}$ を計算する。そして $R_{\text{cal},ji}$ と $R_{\text{test},ji}$ の整合性を反復計算によって高め、電気抵抗率および含水率の分布を推定する。つまり、式(1)の目的関数 f_i が最小となる含水率および電気抵抗率の分布を探索することになる。

$$\min. \quad f_i = \sum_j \left(R_{\text{test},ji} - R_{\text{cal},ji} \right)^2 \quad (1)$$

FEM による電流・電位分布は、式(2)の Laplace 方程式を式(3)と式(4)の境界条件で解くことにより計算した。

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V - \mathbf{J}^e) = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_0 \quad (4)$$

ここに、 σ : 導電率、 V : 電位、 $\mathbf{J}^e$: 外部で発生した電流密度、 $\mathbf{n}$: 絶縁壁の法線ベクトル、 $\mathbf{J}$: 電流密度、 $\mathbf{J}_0$: 電流電極（点源）に入出流する電流密度である。

さらに、コンクリート内部の含水率分布は乾燥のみ作

用する場合は式(5)、乾燥後に液状水が作用する場合は式(6)で表現できると仮定した。

$$w(x) = (w_0 - w_d) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_0}} \right) \right\} + w_d \quad (5)$$

$$w(x) = (w_0 - w_d) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_1}} \right) \right\} + w_d + (1 - w_0) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_2}} \right) \right\} \quad (6)$$

ここに、 w_0 , w_d , D_0 , D_1 , D_2 はそれぞれ含水率分布を決定するためのパラメータである。

電気抵抗率と含水率の関係は、式(7)¹⁾を使用した。

$$\rho(w) = \rho_1 \left(w^{-1.56} + w^{-4.16} \right) / 2 \quad (7)$$

ここで、 $\rho(w)$: 相対含水率 w のときの電気抵抗率、 ρ_1 : 相対含水率 $w = 1$ のときの電気抵抗率である。したがって、 f_i を最小化する w_0 , w_d , D_0 , D_1 , D_2 および ρ_1 を適当な初期値を与えて探索することになる。本研究ではこれらの初期値として駒井ら¹⁾と同じ複数の $N = 9$ 個の初期値を用い、電流電極の位置 $i = 1$ の場合の式(1)の Local min. を探索した。そして、それぞれの Local min. の含水率分布の条件下で電流電極が $i = 2 \sim 9$ のときの電流・電位分布を FEM で再現して式(8)に示す F_N を計算し、最も F_N が小さくなったケースを最適解として採用した。

$$F_N = \sum_{i=2}^9 f_i^{(N)} = \sum_{i=2}^9 \sum_j \left(R_{\text{test},ji} - R_{\text{cal},ji}^{(N)} \right)^2 \quad (8)$$

計算には、汎用 FEM ソフトウェアである COMSOL Multiphysics ver. 4.4 とその最適化モジュールを用いた。また、計測器の仕様の関係で、 $R_{\text{test},ji}$ が測定できない部位がある場合は、その部位の $R_{\text{test},ji} - R_{\text{cal},ji}$ は式(1)および式(2)の計算から除外した。

3. 実験概要

3.1 供試体の形状・寸法と配合

供試体表面の電位差を適切に評価できる電位差電極の間隔を検討 (Ser. 1) した上で、含水率分布の評価手の

キーワード 含水率分布, 電気抵抗率, 電位分布, FEM, 最適化

連絡先 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学大学院土木工学専攻 TEL 022-795-7427

の検証 (Ser. 2) を実施した。供試体の形状・寸法は, Ser. 1 は $10 \times 10 \times 10$ cm, Ser. 2 は $10 \times 10 \times 20$ cm である。コンクリートの配合は, セメントの種類: 普通セメント, W/C = 50 % と 60 %, 単位水量 170 kg/m^3 , $G_{\max} = 20 \text{ mm}$ の AE コンクリートである。である。供試体は作製後 20°C 水中にて約 1 年間養生したものを使用した。

3.2 供試体の含水状態の調整方法

Ser.1 用の供試体は, 含水率 100 % と 60 % の 2 水準に調整した。なお, 使用した配合は W/C=50 % のみである。まず, 脱気処理にて飽水状態にし, これを含水率 100 % の供試体とした。また, アルキメデス法により供試体の密度と空隙率を測定し, その結果から含水率 60 % の質量の予測値を算定した。そして, その予測値になるまで 40°C の乾燥炉内で 6 面開放の状態以供試体を乾燥した。その後, 封緘養生をしつつ, 図-2 に示す測定方法で電気抵抗率を測定し, 電気抵抗率の経時変化が収束した時点で含水率が一样になったと判断して実験に用いた。電気抵抗率を算定するためのセル定数は, 既往研究²⁾と同じ方法で FEM により算出した。

Ser.2 では, 脱気処理した供試体を 1 面開放で 40°C , R.H.60 % の恒温槽に静置して乾燥させた。静置期間は W/C = 50 % と 60 % の配合でそれぞれは 49 日間と 31 日間である。W/C = 60 % の配合はさらに JSCE-G582 と同じ方法で暴露面から液状水を 24 時間吸水させた。

3.3 通電方法

Ser.1 および Ser.2 の通電方法を図-2 および図-1 に示す。電極と供試体の接地部には内部の含水状態を乱さないように, ハイドロゲルを用いた。

4. Ser. 1 : 電位差電極の間隔の検討

図-3 の電気抵抗率の測定結果の変動係数と電位差電極の間隔 a の関係より, a が広がるほど変動係数が小さくなる傾向がみられた。これは, a が広がるほど, 骨材や気泡等の不均質性に起因する電流分布や電位分布の歪みの影響が相対的に小さくなったためと考えられる。なお, これ以降の検討では, 電極の取り回しも考慮し, 変動係数が 2.5 % 以下となった $a = 4 \text{ cm}$ を用いた。

5. Ser. 2 : 含水率分布の評価手法の検証

図-4 に含水率分布の実測値と評価結果の比較結果を示す。最大誤差は, 乾燥のみ作用させた条件では 4.1 %, 乾燥と給水を作用させた条件では 5.5 % であり, 概ね含

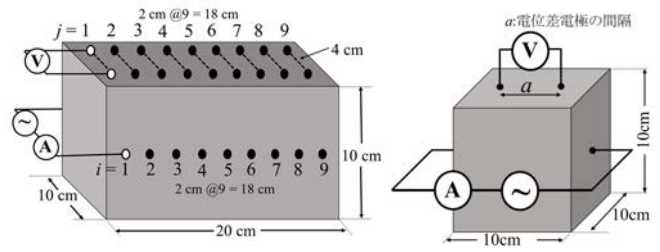


図-1 評価手法の電極配置

図-2 Ser. 1 の電極配置

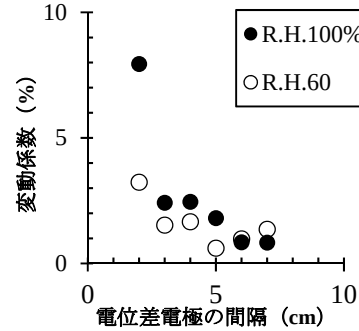


図-3 ρ の変動係数と a の関係

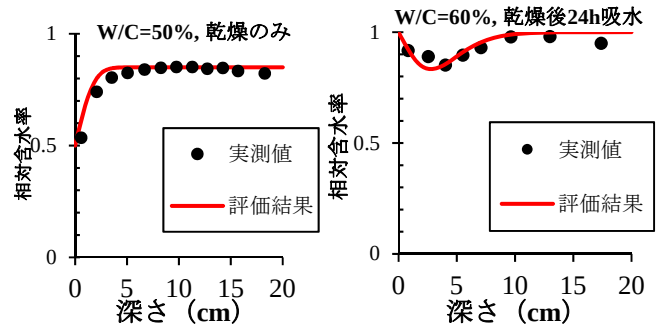


図-4 含水率分布の実測値と評価値の比較結果

水率分布を評価できていることが確認された。測定誤差を生じさせた原因としては, FEM では含水率分布を誤差関数の重ね合わせで表現していること, 電気抵抗率と含水率の関係は乾燥過程と吸水過程によって異なる可能性があるにもかかわらず, 同一の式(7)を使用していること等が考えられる。

6. 結論

乾燥や給水が作用するコンクリート供試体に対して, 電流印加時に生じる表面電位分布から供試体内部の含水率分布の予測ができる可能性を示すことができた。

参考文献

- 1) 駒井ら：表面電位分布の測定による不飽和モルタル中含水率分布の非破壊評価手法に関するフィジビリティスタディ, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 17, pp. 459-462, 2017.
- 2) 皆川ら：4 プローブ法をコンクリート供試体に適用した時のセル定数の数値解析による算定とその検証, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 17, pp. 447-452, 2017.