

表面電位分布に基づくコンクリート供試体内部の含水率分布の評価手法の基礎的検討

東北大学 学生会員 ○武藤 大地, 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。図-1の電極の配置は事前検討の測定結果のばらつきの少なさから選定した。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 $\Delta V_{\text{cal}, ji}$ との比 $R_{\text{cal}, ji} = \Delta V_{\text{cal}, ji} / I_{\text{cal}, i}$ 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。

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

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で計算した。

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

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

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

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、コンクリート中の水分移動は拡散過程として取り扱う文献²⁾が複数あることから、内部の含水率分布は乾燥のみ作用する場合は 1 つの誤差関数による式(5)、乾燥後に液状水が作用する場合は 2 つの誤差関

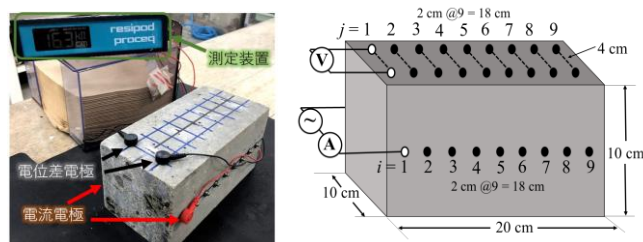


図-1 電極の配置図

数の重ね合わせによる式(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 ρ ($\Omega \text{ m}$) と相対含水率 w の関係は実験式である式(7)³⁾を用いた。

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

ここに、 ρ_1 : 相対含水率 $w = 1$ で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 $N = 9$ 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. (局所的な極小値) を探索した。そして、それぞれの Local min. の含水率分布で電流電極が $i = 2 \sim 9$ のときの電流・電位分布を FEM で再現して式(8)の F を N 個の初期値毎に計算し、そのうちの最小になったケースを最適解として採用した。

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

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、電気抵抗率の温度補正はアレニウス則をベースとした守田らの実験式⁴⁾を用いた。

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 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学工学部建築・社会環境工学科 TEL 022-795-7427

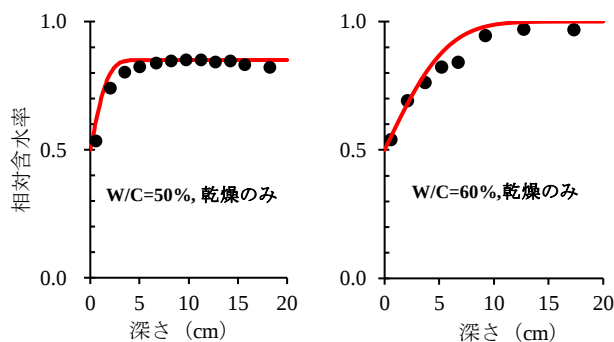


図-2 含水率分布の実測値と評価値の比較結果 (●: 実測値, —: 評価結果)

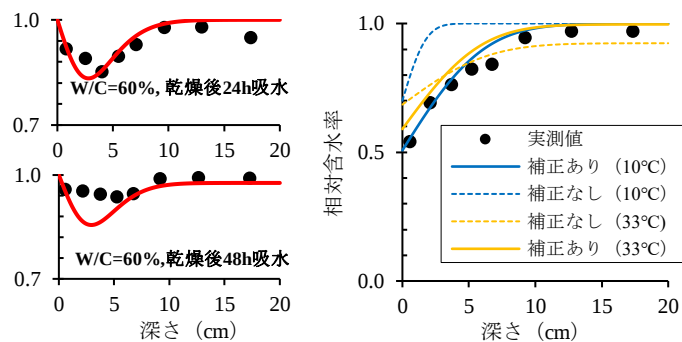


図-3 温度補正の結果

3. 実験概要

Ser.1 では, (a) 乾燥処理→通電→含水率測定, (b) 乾燥処理→吸水処理→通電 (20℃) →含水率測定の手順で実験を実施した. 一方, Ser.2 では, (c) 乾燥処理→温度調整・通電 (10, 20, 33℃) →含水率測定の手順で実験を実施した.

3.1 供試体の形状・寸法と配合

供試体は, 寸法: 10×10×20 cm, 普通ポルトランドセメント, W/C = 50%と60%, 単位水量 170 kg/m³, $G_{max} = 20$ mm の AE コンクリート製である. コンクリートを内寸 10×10×40 cm の鋼製型枠に打ち込んだ後, 24±2 時間で脱型して 20℃ 水中で約 1 年間養生し, 供試体中央部を湿式カットで切断して 10×10×20 cm に成形することで供試体を作製した.

3.2 供試体の含水状態と温度の調整方法

(1) 供試体の乾燥処理

供試体は脱気処理した後, 切断面を除く 5 面をアルミテープでシールし, 1 面開放で 40℃, R.H. 60% の恒温恒湿槽に所定の期間静置して乾燥処理を施した. 乾燥期間は W/C = 50%と60%の供試体でそれぞれ 49 日間と 31 日間である. その後, 供試体を恒温室に静置して温度を 20℃ に調整した.

(2) 供試体の吸水処理

W/C = 60% の供試体については, 乾燥処理を行った後, 吸水処理を施す供試体も準備した. 吸水処理の方法は JSCE-G582 と同じ方法であり, 乾燥処理が済んだ供試体を暴露面から約 1 cm の深さで水道水に半浸せきした. 半浸せきの期間は 24 時間と 48 時間である.

(3) 供試体の温度の調整方法

乾燥処理が終了した W/C = 60% の供試体の全面をアルミテープとポリエチレン製のラップで封緘し, 任意の温度に設定した恒温槽内に 24 時間静置することで, 供試体温度を 10℃ と 33℃ に調整した.

3.4 通電方法

図-1 に示す電極の配置で行った. 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.

3.5 含水率の測定方法

通電を終えた供試体は, 幅 1 cm 以上の間隔で乾式カットにて切断し, 重量差法で相対含水率の分布を測定した.

4. 評価結果と実測値の比較結果

図-2 に Ser.1 の含水率分布の評価結果と実測値の比較結果を示す. 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 8.8% であり, 乾燥のみを作用させた条件では, 概ね含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, 乾燥過程と吸水過程によって同一含水率でも液状水の連続性が異なる可能性があるにもかかわらず, 電気抵抗率と含水率の関係式である式(7)は乾燥過程と吸水過程のデータをそれぞれフィッティングして得た関数を算術平均をして使用したこと等が考えられる.

図-3 に Ser.2 の結果を示す. 10℃ と 33℃ とともに暴露面から 7 cm 付近までの評価結果が, アレニウス則をベースとした温度補正式を用いたことで改善されることを確認した.

5. 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を非破壊で評価できることを示した.

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) 藤原ら: 乾湿を伴うコンクリート内部での水分移動について, セメント技術年報, Vol. 42, pp. 427-430, 1988
- 3) Minagawa, H., et al.: Relationship of Apparent Electrical Resistivity Measured by Four-Probe Method with Water Content Distribution in Concrete, J. Adv. Conc. Tech., Vol. 15, No. 6, pp. 278-289, 2017. 6.
- 4) 守田ら: コンクリートの電気抵抗率の温度依存性に関する基礎的検討, 土木学会東北支部技術研究発表会, V-1, 2019