

# コンクリート中の塩化物量のインピーダンス計測による非侵襲測定に関する研究

(株)竹中工務店 正会員 三井 健郎 山崎 慶太

佐賀大学理工学部電気電子工学科 村松 和弘

東北学院大学工学部電気情報工学科 芳賀 昭 嶺岸 茂樹

## 1. はじめに

既設コンクリート構造物の塩化物濃度などの含有成分の検査方法としては、現状では現場で採取したサンプルを用いる方法が主流であるが、試料の採取、調整、分析に時間がかかったり、構造物の損傷や、サンプル数も限られるなどの課題がある。そこで、筆者らはコンクリートの塩分などの含有成分を、非破壊・非侵襲でしかも現場で簡易に測定・診断する方法<sup>1)</sup>として、インピーダンスの周波数特性に着目した交流電気法による方法を提案している<sup>2)</sup>。本報告では、まず、打設から7ヶ月のコンクリート供試体のインピーダンスの絶対値 $Z$ と位相角 $\theta$ を測定し、含有塩分濃度との関係を検討した。次に、等価回路を用いて、実測のインピーダンスの周波数特性を再現するモデリング方法について検討するとともに、伝導電流と変位電流を考慮した有限要素法による電界解析を用いて、その妥当性を検証した。

## 2. 測定方法および測定結果

図1のように、含有塩化物の量を0.00, 0.45, 2.40 $\text{kg/m}^3$ とした3種類の直径50mm, 高さ95mmの円柱のコンクリートの供試体を製作し、この上下に銅箔の電極を取り付け、電極間のインピーダンスの絶対値 $Z$  [ ], 位相角 $\theta$  [deg]の周波数特性をLCRメータで測定した。その際、電極とコンクリートの間を、導電性ペーストを塗布することにより導通させた場合と、アクリル樹脂板(1mm厚)で絶縁した場合について測定した。

図2に、インピーダンスの測定結果を示す(図の()内は供試体の塩化物量( $\text{kg/m}^3$ )を示す)。(a)の供試体と電極の導電性が確保された場合は、周波数が1kHz以下では、位相角 $\theta$ はほぼ $0^\circ$ で導体としての性質が支配的であり、 $Z$ は主に導電率によって決定されると考えられるため、塩分濃度が高くなるに従って導電率 $\sigma$ が高くなるといえる。また、周波数を高くすると、 $Z$ が小さくなり、 $\theta$ も負の方向に大きくなるため、この領域では誘電体としての性質も影響し、この測定値を詳細に解析することにより含有塩分濃度が誘電率 $\epsilon$ に及ぼす影響も把握できると考えられる。(b)の供試体と電極を絶縁した場合は、周波数が低い領域では、絶縁物により $Z$ が極端に大きくなり供試体による違いが見られないため、周波数が高い領域で(a)と同様な解析を行う必要がある。

## 3. コンクリートのモデリング

### 3.1 等価回路によるモデリング

前節の測定では、含有塩分濃度の影響が導電率で認められ、コンクリート中に残った水分が寄与している可能性が考えられるが、ここではそのモデリングについて検討した。簡単のため、

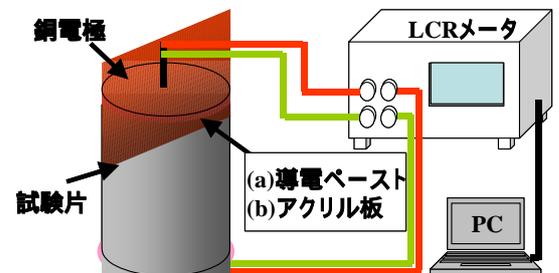
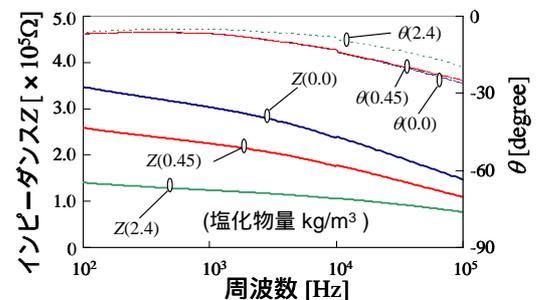
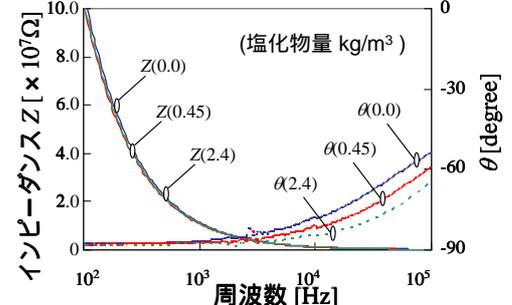


図1 インピーダンス測定方法



(a) 供試体と電極の導電性が確保された試験体



(b) 供試体と電極が絶縁された試験体

図2 円柱供試体のインピーダンス測定結果

キーワード：コンクリート、塩化物濃度、非侵襲測定、インピーダンス、等価回路

連絡先 〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1 (株)竹中工務店技術研究所 TEL0476-47-1700

図 2(a)の塩化物が含まれない導通状態のインピーダンスの周波数特性を説明できるモデリング方法について検討した。図 3(a), (b), (c)にそれぞれコンクリート供試体の材質が空間的に均質でインダクタンスも考慮した場合,インダクタンスを無視しコンクリート中に水が点在する条件で水が導体と誘電体の性質を持ちコンクリートを誘電体と仮定した場合,同じ条件で水,コンクリートとも導体,誘電体であると仮定した場合の等価回路を示す。ここで,  $C_{cw}$ ,  $C_c$ ,  $C_w$  は,それぞれコンクリートと水が均一に混ざっていると仮定した場合,コンクリート,水の静電容量を示し, $R_{cw}$ ,  $R_c$ ,  $R_w$  はそれらの抵抗である。これら等価回路において, $Z$ ,  $\theta$ の周波数特性が測定値となるべく一致するように抵抗  $R$ , インダクタンス  $L$ , 静電容量  $C$  を最適化した場合の  $Z$ ,  $\theta$  の解析結果を図 4(a) ~ (c)にそれぞれ示す。比較のために,(d)に同じ周波数帯における測定結果を示す。図 3(a)の等価回路において得られたインダクタンスの最適値は  $0.38\text{H}$  であり,これは供試体を円柱導体とした場合のインダクタンスの理論値  $2.4 \times 10^{-8}\text{H}$  よりも大きかった。これより,本モデルではインダクタンスの影響は無視でき,またコンクリートと水が均一に混ざっているモデル化では実測値が説明できないことがわかる。一方,図 4(b),(c)に示すように,水分とコンクリートを分離したモデルでは,ある程度測定値を説明できることがわかる。

3.2 有限要素法を用いた電界解析モデリング

前節のモデリング方法についてさらに詳細に検討するため,水とコンクリートを分離した図 5(a)のような解析モデルを考え,以下の(1)を基礎方程式とする二次元電界解析を行った。

$$\text{div}\{(-\sigma - j\omega\epsilon)\text{grad}\phi\} = 0 \tag{1}$$

ここで,  $\phi$  は電気スカラーポテンシャルで  $(\cdot)$  は複素数を表し,  $\omega$  は各周波数である。

前節と同様に,実測の  $Z$ ,  $\theta$  の周波数特性と一致するようにコンクリートと水の  $\sigma$ ,  $\epsilon$  を最適化した場合の  $Z$ ,  $\theta$  の解析結果を図 5(b)に示す。この図より,解析結果は実測値の傾向をほぼ再現しており,水とコンクリートを分離したモデリングの妥当性がわかる。また,今回は水分の体積比率が実際より大きい,最適時の水とコンクリートの  $\sigma$ , 比誘電率  $\epsilon$  は,それぞれ  $4.0 \times 10^{-6}\text{S/m}$ ,  $80$  と  $2.0 \times 10^{-4}\text{S/m}$ ,  $5$  であった。

4. まとめ

含有塩化物濃度の異なる円柱コンクリート供試体のインピーダンスの周波数特性を測定した結果,含有塩分濃度により導電率が変化することが確認できた。さらに,等価回路,電界解析を用いて,実測結果を再現するモデリングを試みた結果,水とコンクリートを分離すれば,実測値を説明できる結果が得られた。今後は,水分比率を詳細に考慮したモデリング法と,電極とコンクリートを簡易に導通させることができる,現場に適した接着の方法を検討する。本研究の一部は日本学術振興会科学研究費基盤(C) (18560416) の助成のもとに行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 木原重光：構造物保全技術とリスクメンテナンス (RBM), 科学技術動向, p.40-46, 2003.9
- 2) 上田智章他：コンクリート含有成分の非侵襲測定方法の提案, 平成 17 年電気学会全国大会, 4-195, 2005.3

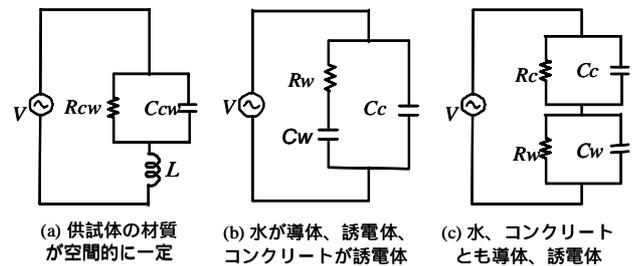


図 3 コンクリート供試体の等価回路モデル

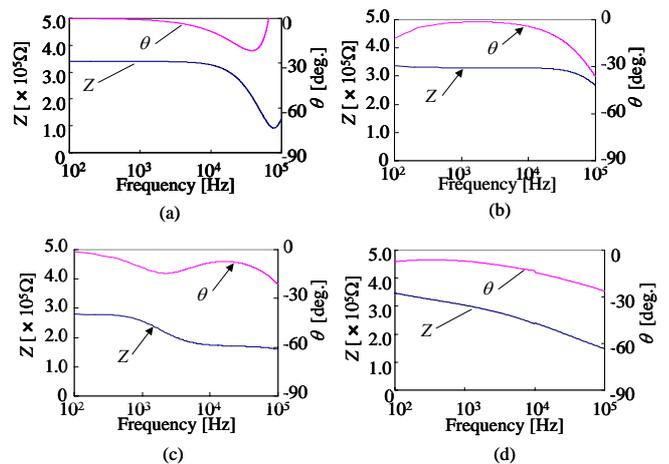


図 4 インピーダンスの周波数特性

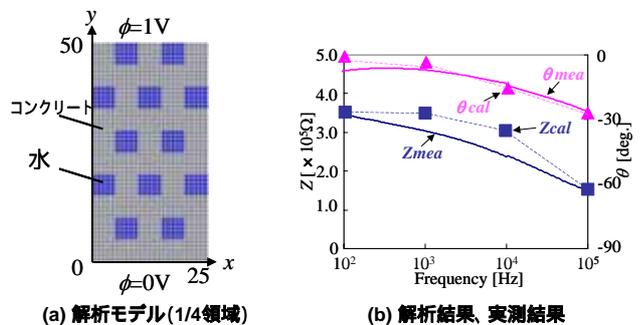


図 5 二次元電界解析