

交流インピーダンス解析によるコンクリートの劣化診断

—内部亀裂の非破壊検査—

露本伊佐男・内川 浩

金沢工業大学工学部環境システム工学科, 921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1

Diagnosis of Degradation of Concrete by Using AC Impedance Analysis

—Non-Destructive Testing of Internal Cracks—

Isao TSUYUMOTO and Hiroshi UCHIKAWA

Department of Environmental Systems Engineering, Kanazawa Institute of Technology, 7-1, Ohgigaoka, Nonoichi-machi, Ishikawa 921-8501

The AC impedance analysis was applied to the non-destructive testing of cracks in concrete. Superposed cement boards were measured as a model of concrete with internal cracks. The interface between the cement boards were clearly detected as an independent electric equivalent circuit in the complex impedance plots. This indicates that the AC impedance analysis allows the non-destructive testing of internal cracks in concrete.

[Received July 14, 2000; Accepted September 20, 2000]

Key-words: Concrete, Cement, Crack, Impedance, Degradation, Non-destructive testing, Complex impedance plot

1. 緒 言

近年、トンネル壁の崩落事故を始めとして、さまざまな要因によるコンクリートの劣化が社会問題となっている。このような事故を未然に防ぐためには、コンクリートの劣化を正確に診断し、崩落を事前に予知する技術が必須となる。現在、内部亀裂の検知には、主に打音検査が行われているが、熟練を要するうえ、簡便な方法と言いが難しいのが現状である。

一方、炭素系材料の電気伝導性を利用して材料の損傷を検知する技術が、重要なコンクリート構造物や防犯システムなどに応用されつつある¹⁾。しかし、これらはあらかじめ導電性材料を構造物中に混合しておく必要があるため、既存の構造物には適用できない。そこで著者らは、導電性材料を含んでいない通常のコンクリートの劣化を、電気的に検知する技術の開発を着想した。

コンクリートの劣化原因としては、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的腐食、凍結融解、施工不良などが知られている²⁾。これらの原因が最終的にコンクリートのひび割れや鉄筋の腐食を引き起こし、コンクリートの崩落に至るとされている。本研究の目的は、コンクリートのひび割れの検知を始めとして、現在、非破壊検査方法のない中性化深さ、及び塩化物含有量の診断を、電気化学的に行うことにある。本論文では、まずコンクリートのひび割れに着目し、交流インピーダンス法^{3),4)}による非破壊検査を検討した結果について報告する。

2. 実験方法

水とセメントを水/セメント比0.5で混合し室温で養生したセメント板を、測定用サンプルとした。図1に示すようにセメント板の上面と下面に炭素電極を塗布したもの2種類(セメント板A, B)と、セメント板AとBを重ね、Aの上面とBの下面にのみ炭素電極を塗布した形状の試料(セメント板A+B)を測定に用いた。炭素電極は直径10 mmの円状に塗布し、その上に測定用プローブを装着して測定した。重ねた試料の測定では、圧力をかけない状態での測定と、重ねた面と垂直方向に110 g/cm²の圧力をかけた状態での測定を行った。圧力をかけた状態ではバルク部分に変化していないことを確認した。また、セメント板を水に含浸させて重量比で11%の水を吸収さ

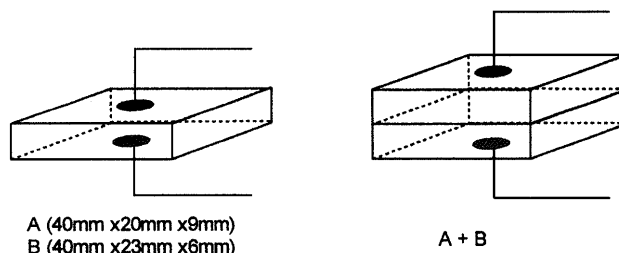


Fig. 1. Schematic view of the samples. The upper and lower surfaces are coated with carbon electrodes.

せた状態(湿潤状態)と、水を吸収させる前の乾いた状態(乾燥状態)と2通りの測定を行い比較した。

測定には、複素インピーダンスアナライザー(日置電機製, LCR ハイテスタ3532)を用い、42 Hz~5 MHzの周波数領域でインピーダンスを測定した。

3. 結果と考察

図2に湿潤状態のセメント板の測定結果を示す。横軸がインピーダンスの実数部、縦軸がインピーダンスの虚数部の逆にした値である。原点に近い方が高周波数におけるインピーダンスとなる。図3(a)で表される電氣的等価回路を試料が有していた場合、プロットは半円を形成しその直径の長さが抵抗(R_{bulk})に相当する。また、図3(b)で表される電氣的等価回路を試料が有していた場合、プロットは横軸上に二つの半円を形成しそれぞれの直径の長さが、それぞれの抵抗(R_{bulk} と $R_{\text{interface}}$)に対応する。本実験では、いずれの測定結果も円の中心が実軸よりも下に存在するつぶれた形状の半円となった。これは試料中の誘電体の周波数応答が不均一であるために引き起こされる誘電緩和現象のためである。セメント板が誘電体として不均一であることを反映した結果と言える⁵⁾。また、高周波領域では実軸よりも下にプロットが回り込んでいる。これは水で濡らした試料の場合にのみ観察されたもので、試料内にコイル成分を含むためと考えられる。

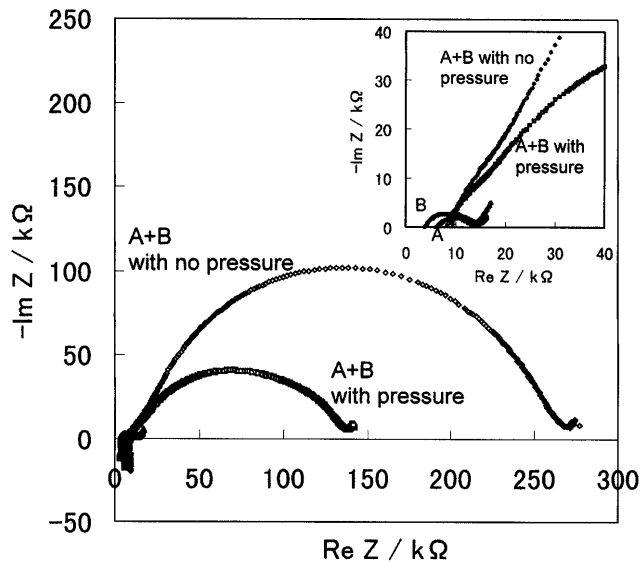


Fig. 2. Complex impedance plots of the wet cement board. The inset is a magnification.

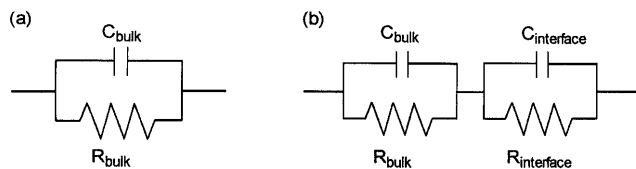


Fig. 3. Electric equivalent circuits for (a) the individual cement board and for (b) the superposed cement boards.

セメント板 A, 又は B のみのときの測定結果について, 図 3(a) のような電気的等価回路を仮定し, 半円の弧長からそのバルク部分の抵抗を概算すると, それぞれ 15 kΩ, 及び 14 kΩ となった. 次に, 2 枚のセメント板を重ねたときの測定結果では, 半円の左端部分に, 上に凸の膨らみが観察された. これは複素インピーダンスプロットが二つの半円で構成され, 左端部分に小さな半円が存在することを示している. この小さな半円の弧長を外挿により見積もった結果, 約 30 kΩ となった. この抵抗は, セメント板 A, B の抵抗の和と一致するから, 小さな半円はセメント板のバルク部分に対応すると考えられる. また, 圧力の有無により, 大きい方の半円の弧長が大きく変化した. 圧力をかけていないときには, 約 270 kΩ で実軸上と交差しているが, 圧力をかけると実軸との交差部分は約 140 kΩ に低下した. これは大きな半円がセメント板 A と B の界面部分に対応し, 圧力をかけることによって, 界面における接触抵抗が減少したことによるものと考えられる. これを電気的等価回路で表すと図 3(b) のようになる.

次に, 乾燥状態のセメント板を測定した結果を図 4 に示す. 乾燥状態ではインピーダンスが大きいので, 低周波領域における挙動が分かりづらくなったが, これは直流近くの低周波部まで測定できる広帯域インピーダンスメーターの使用や, 電極面積を広くすることによって解決可能と考えられる. また, 乾燥状態では, 湿潤状態よりも半円がつぶれる傾向が強く見られたが, 湿潤状態と同様の考察が可能であった. セメント板 A,

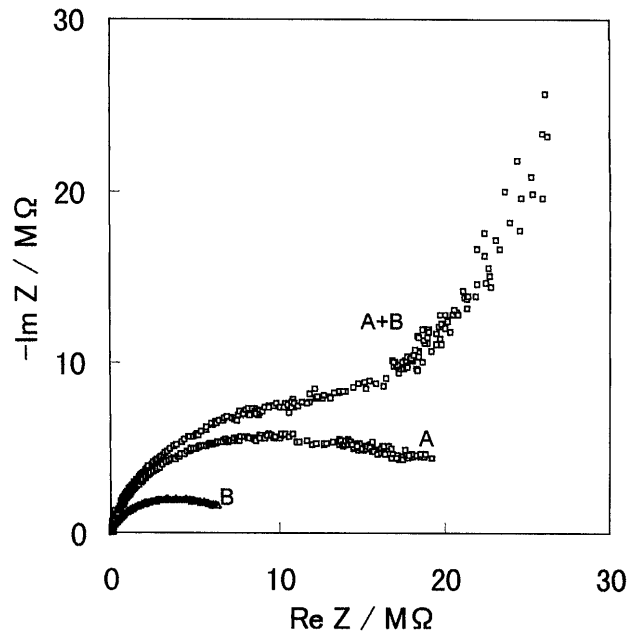


Fig. 4. Complex impedance plots of the dry cement board.

又は B のみのとき, バルク部分の抵抗値はそれぞれ 19 MΩ, 6 MΩ と見積もられた. 2 枚重ねたとき, 左の半円部分から求めた抵抗値は 25 MΩ であり, セメント板 A と B のバルク部分の抵抗の合計に一致した. 乾燥状態では半円が閉じるころまでは観察できなかったが, 湿潤状態の結果からの類推で, 右の立ち上がりは界面部分の等価回路に対応すると考えられる.

以上の結果は, 交流インピーダンス法により, セメント板内に存在する亀裂を, 緩和時間の異なる成分として検知できることを示している. セメント板中の電気伝導は主にマトリックス中のアルカリ金属イオン, カルシウムイオン, 水酸化物イオンなどによるものである. 実際に使用されているコンクリートはセメントペーストに骨材を混合したものであるが, 通常骨材は電気伝導に寄与しないので, コンクリートでも今回と同様に亀裂の検知が可能と考えられる. 本実験では, 亀裂の上下を電極で挟み込む配置をとったが, コンクリート壁の同一面上に電極を二つ並べる配置でも, 同様に内部亀裂を検知することが原理的に可能である. また, 実際の構造物中ではコンクリート中の鉄筋の影響を受ける可能性があるが, 鉄筋自体を電極として使用し, もう一方の電極でコンクリート表面を走査して亀裂の位置を検知する技術, 及び, 鉄筋の交流インピーダンスプロットへの影響を電気化学的に評価し解析する技術の開発により対応できると展望している. 本実験の結果は, これら今後の技術開発の基礎となるものと確信している.

文 献

- 1) Takada, M., Matsubara, H., Shin, S. G., Mitsuoka, T. and Yanagida, H., *J. Ceram. Soc. Japan*, 108, 397-401 (2000) [in Japanese].
- 2) Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., "Concrete Microstructure, Properties, and Materials," McGraw-Hill, New York (1998).
- 3) Momma, T., *Electrochem.*, 68, 298-301 (2000) [in Japanese].
- 4) Ikuta, H., *Electrochem.*, 68, 356-60 (2000) [in Japanese].
- 5) Cole, K. S. and Cole, R. H., *J. Chem. Phys.*, 9, 341-48 (1941).