

論文 表面電極型の比抵抗によるコンクリート内部含水率の定量化

黄 光律*1・野口貴文*2・友澤史紀*3

要旨:本研究ではコンクリートの含水率, 鉄筋腐食状況, 施工欠陥などの諸特性をコンクリートの表面からの的確に把握できる手法を開発する事を目的とし, 電気探査技術のうち, 比抵抗・強制分極法を用いコンクリートの表面から含水率を探査した。電極間隔を数通り変えて水平探査を行い, 複数の探査深度の比抵抗変化をみることによって, 供試体の内部の比抵抗構造断面が得られた。また, 比抵抗は電流を流す電極から遠く離れるほど大きくなり, 比抵抗は含水率が減少するにしたがって著しく増加し, W/C が小さいほど増加し, また供試体の表面から深くなるにつれて増加した。

キーワード:比抵抗, 強制分極法, 含水率, 表面電極型, 非破壊検査

1. はじめに

現在, 海砂使用による鉄筋腐食が懸念されており, 施工不良などによる構造物の安全性・耐久性の再検討も必要となっており, それに伴う非破壊検査法の確立の必要性も高まっている。

兵庫県南部地震によって被災したコンクリート構造物の場合は, 異物混入, 充てん不良など, 施工欠陥が存在するものも見受けられ, 現在, 全国各地で構造物の耐震診断・補強が検討され, 建築基準法の性能規定化への改正も進められているが, 既存構造物に対して適切な補強処置を施すためには, 施工欠陥を把握した上で耐震性能を評価する必要がある。また, 新規構造物の性能を評価・保証するためには, 施工品質が構造物の竣工後に評価できなければならない。

また, コンクリート工学分野においてもなお, セメントおよび混和材の反応からコンクリートの強度, 中性化速度, イオンの拡散, 鉄筋の腐食に至るまでの寿命予測など, 諸物性を理論的に整理したモデルを作製し, またそれを計算機を用いて定量的にシミュレーションを行いその汎用性を検討した後, その結果を材料設計に反

映しようとする研究^{1,2)}が行われている現状である。

本研究では以上のような背景を考慮し, コンクリートの含水率, 鉄筋腐食状況, 施工欠陥などの諸特性をコンクリートの表面からの的確に把握できる手法を開発する事を目的とし, 電気探査技術のうち, 比抵抗・強制分極法をコンクリートへと適用し, コンクリートの表面から内部状況を探査できる非破壊検査手法を確立する。

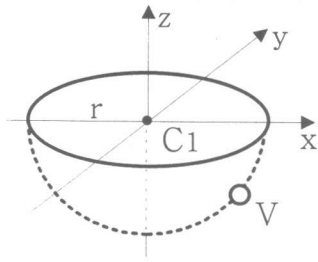
2. 比抵抗・強制分極法の原理

比抵抗法は, 対象物表面から既知の電流(直流・交流)を入力し, それにより形成される電位から対象物内部の比抵抗分布を解析する手法であり, 探査位置の構成物質の種類, 間隙水のイオンの濃度や量を推定することができる。一方, 強制分極法も同様に, 対象物表面から既知の電流(直流・交流)を入力するものであるが, 比抵抗法とは異なり, 対象物の電気的な分極効果を出力電圧として観測し, 物質の電気化学特性の違いを利用して, 比抵抗だけでは周囲の物質と違いがない場合でも構成物質の種類を識別することができる。

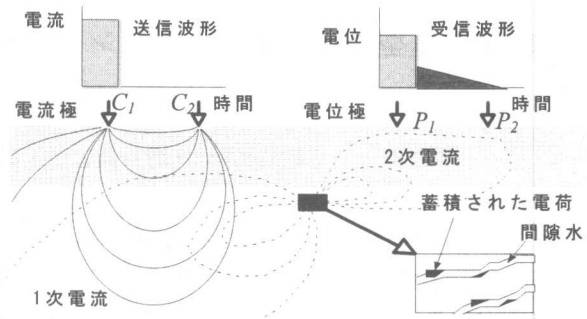
*1 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 研究員 博士(工学)(正会員)

*2 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 助教授 博士(工学)(正会員)

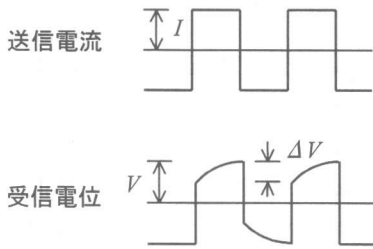
*3 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授 工学博士(正会員)



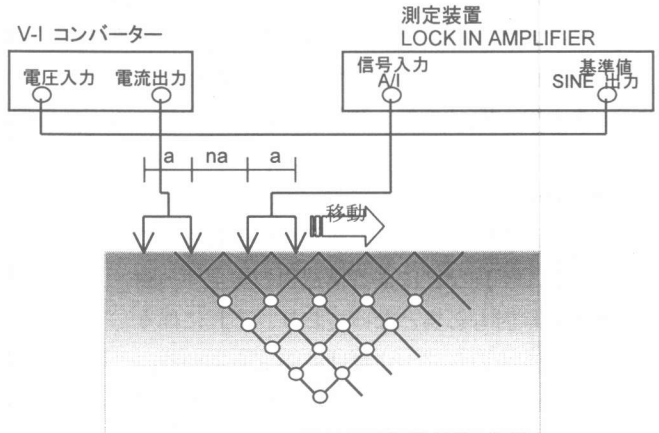
図—1 点電流源周りの電位



図—2 強制分極法の原理



図—3 周波数効果



図—4 ダイポール・ダイポール測定法

図—1に示すように、均質等方の半無限物体の表面にある点電流源 C_1 から電流 I が全ての方向に均等に流し出しているものとする、 C_1 を中心とする半径 r の半球面上の電流 V は、

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (1)$$

ρ : 半無限物体の比抵抗と表される。

しかしながら、現実的には1本の電極から半無限物体に電流を流すことはできないので、図—2に示すように、出力電極 C_2 が必要となる。その場合、点 P_1 における電位 VP_1 は次のように表される。

$$VP_1 = \left(\frac{1}{rC_1P_1} - \frac{1}{rC_2P_2} \right) \times \frac{\rho I}{2\pi} \quad (2)$$

rC_iP_i : 電流極 C_i と電位極 P_i の間の距離

実際には、図—3および図—4に示すように、電位よりもむしろ電位差 ΔV が4本の電極を用いて測定される。

$$\Delta V = \left(\frac{1}{rC_1P_1} - \frac{1}{rC_1P_2} - \frac{1}{rC_2P_1} + \frac{1}{rC_2P_2} \right) \times \frac{\rho I}{2\pi} \quad (3)$$

したがって、物体の比抵抗 ρ は

$$\rho = K \times \frac{\Delta V}{I} \quad (4)$$

K : 電極配置係数

$$K = n(n+1)(n+2)\pi a \quad (5)$$

で考えられる。

物体が均質等方の場合には、 ρ は物体の真の比抵抗を与えるが、不均質な場合には、物体の見掛け比抵抗 ρ_a として計算され物体の構造を反映するものとなる。

また、図—2に示すように、一対の電流極から物体に加えられた1次電流により、構成物質

と間隙水の間には電荷が蓄えられて分極するが、1次電流が切られた直後は、電荷が放出されて2次電流を形成する。蓄積電荷量や放出時間は構成物質の種類によって異なり、減衰電圧として一对の電位極で測定される。交流を入力する場合には、受信電圧の振幅および入力電流に対する場合には、受信電圧の位相角が周波数の関数として測定される。

本実験では、図—4に示すように、電極配置をダイポール・ダイポールとし、電流極および電位極を移動させながら測定し、得られた1次電位差から見掛け比抵抗の類似分布を算出した。ダイポール・ダイポール配置の場合、見掛け比抵抗は下式により計算される。

$$\rho_a = \pi a \times n(n+1)(n+2) \times \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

3. 実験方法

3.1 調査・使用材料

本研究では供試体の含水率を測定する際に、セメントの水和反応から変化する水分移動の影響を排除するため、セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、養生は温度40℃の水中で28日間施した。

水セメント比は40%(PL40)、50%(PL50)および60%(PL60)とし、供試体の表面にはあらかじめ電極として2.5 cm 間隔に釘を埋め込んだ。供試体の寸法は10×10×20cmとした。供試体の電圧の測定は質量変化と併せて測定した。

3.2 試験方法

①電圧の測定：ダイポール・ダイポール方法とし、Lock in Amplifier を用いて以下の条件で測定した。

・電圧入力：V-INPUT

入力電圧：1 V, 入力周波数：1 kHz, 入力イ

表—1 調査表

記号	W/C (%)	s/a (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	A (kg)
PL40	40	43.5	175	438	811	991
PL50	50	47.1	175	350	884	991
PL60	60	48.0	175	291	914	991

※W/C：水セメント比，s/a：細骨材率，W：水，C：セメント，S：細骨材，A：粗骨材

ンピーダンス：100 kΩ

・電流出力：I-OUTPUT

出力電流：1 [mA]RMS (1V/1 mA)

②含水率：重量法³⁾

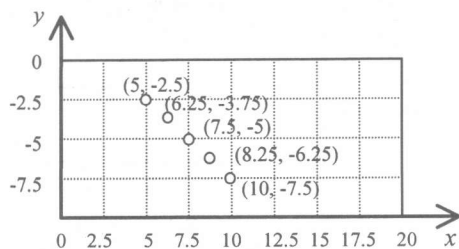
含水率は、JIS A 1125に準じ、乾燥前の供試体質量 W と乾燥後の質量 W_0 との差を W_0 で除して求めた³⁾。

乾燥条件として、槽内温度は105℃とした。

③圧縮強度：φ10×20 cm

電圧の測定に関しては、供試体の飽水状態から温度20±5℃、湿度RH60%の雰囲気中で、徐々に乾燥させながら供試体の質量の変化と共に測定した。また、電極の配置は、ダイポール・ダイポール配置とし、一对の電流電極の間に電流 I を流し、他の電位電極のあいだの電位差 V を測定した。

図—5は電圧が測定される位置の一例を座標として表したものである。

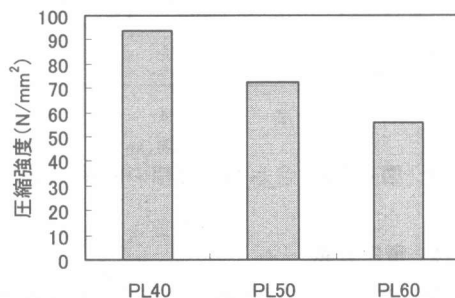


図—5 供試体の座標

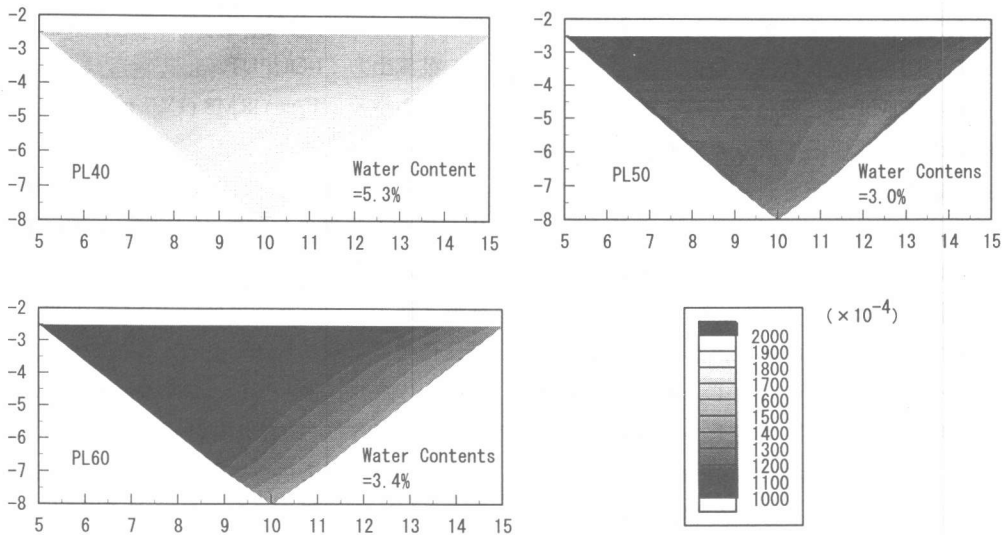
4. 実験結果および考察

4.1 圧縮強度

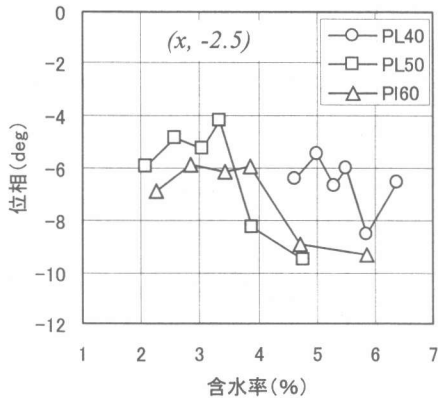
図—6に供試体の圧縮強度を示す。供試体の圧縮強度は、PL40は95、PL50は72、PL60は56 N/mm²であった。



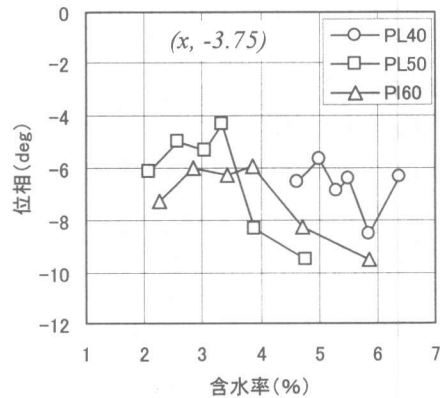
図—6 圧縮強度特性



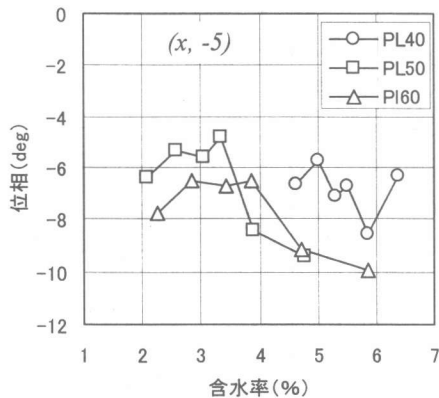
図—7 電圧分布



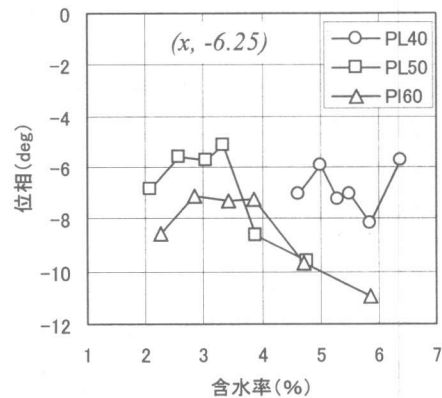
図—8 含水率と位相の関係 ($x, -2.5$)



図—9 含水率と位相の関係 ($x, -3.75$)



図—10 含水率と位相の関係 ($x, -5$)

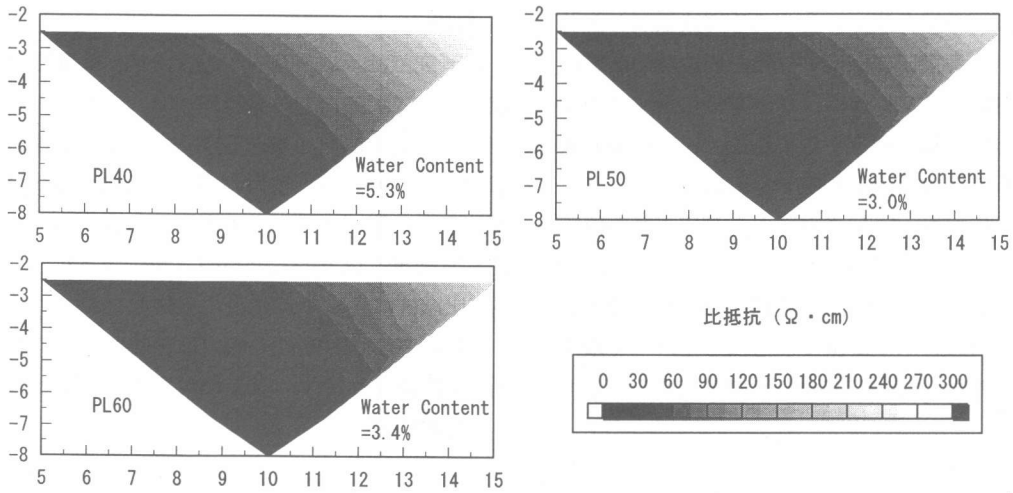


図—11 含水率と位相の関係 ($x, -6.25$)

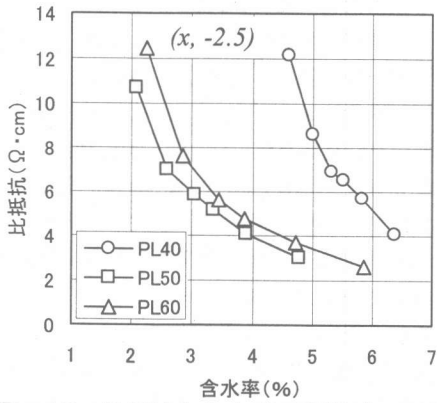
4.2 電圧分布

図—7に測定された電圧分布の一例を示す。電圧はW/Cの低いPL40の方がW/Cの高いPL50,

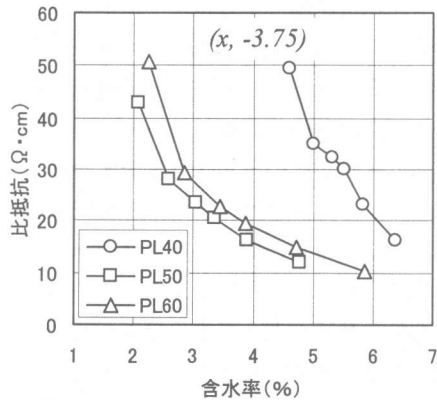
PL60に比べ高いことが分かる。本実験で得られた電圧は一定値の電流を供試体に流し、Lock in Amplifierで検出された値を示しており、電圧の



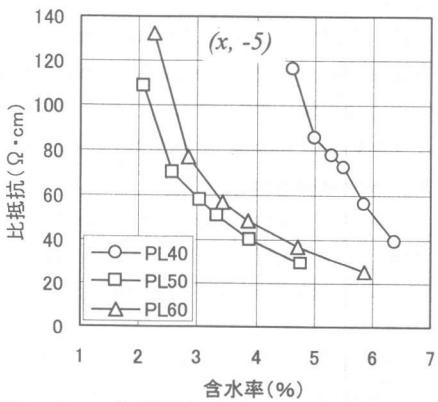
図—12 供試体における比抵抗分布



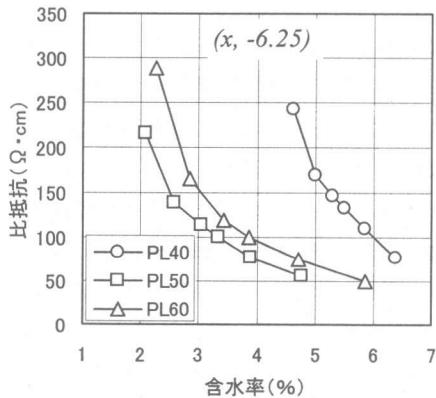
図—13 比抵抗と含水率の関係 (x, -2.5)



図—14 比抵抗と含水率の関係 (x, -3.75)



図—15 比抵抗と含水率の関係 (x, -5)



図—16 比抵抗と含水率の関係 (x, -6.25)

高いのは電気的抵抗も高いことを意味している。W/Cの低いPL40の場合はPL50, PL60に比べ緻密であることから電圧が高くなると考えられる。

4.3 位相特性

強制分極効果を探知するための測定法として周波数領域測定があり、周波数領域測定では、

時間領域の減衰波形に含まれる周波数成分を分離し、応答電圧の振幅と位相を周波数の関数として測定する。位相は、送信電流に対する受信電圧の位相角を測定する方法と、二つの周波数による位相角の差を測定する方法がある。

図—8～図—11に供試体から測定された位相特性を示す。各 x 座標に対する y 座標-2.5、-3.75、-5 および-6.25 の値は各 x 座標を平均した値である。位相は含水率が減少するにしたがって増加しているが、含水率3%あたりで最高値を示している。

4.4 含水率と比抵抗特性

ダイポール・ダイポール配置を用いて測定される見掛け比抵抗は図—12のように電極系がつくる直角二等辺三角形の頂点にプロットした擬似断面図で表される。このプロット位置はあくまで電極の幾何学的な位置関係で決まる点であり、縦方向の距離がそのまま深さを表すわけではない。しかし、見掛け比抵抗の分布を表現するのに便利であり、定性的にコンクリートの内部構造を推定することが可能である。このように、電極間隔を数通り変えて水平探査を行い、複数の探査深度の比抵抗変化をみることによって、供試体の内部の比抵抗構造断面を得ることができる。

図—12に供試体の各位置における比抵抗分布の一例を示す。比抵抗は電流を流す電極から遠く離れるほど大きくなるのが分かる。

図—13に供試体の表面から深さ 2.5cm (x , -2.5) の部分の比抵抗の平均値と含水率の関係を示す。また、図—14には供試体の表面から深さ 3.75cm (x , -3.75) の部分の比抵抗の平均値と含水率の関係を示す。この際、標準偏差は (x , -2.5) の場合は 0.11～1.23 であり、(x , -3.75) の場合は 0.45～4.73 の範囲であった。

比抵抗は含水率が減少するにしたがって著しく増加しており、W/C の低いほど増加することが分かる。また、比抵抗は供試体の表面から深くなるにつれ増加した。

5. 結論

本研究ではコンクリートの含水率、鉄筋腐食状況、施工欠陥などの諸特性をコンクリートの表面からの確に把握できる手法を開発する事を目的とし、電気探査技術の中、比抵抗・強制分極法を用いコンクリートの表面から含水率を測定した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 比抵抗は含水率が減少するにしたがって著しく増加し、W/C の低いほど増加する。
- 2) 比抵抗は供試体の表面から深くなるにつれ増加する。

参考文献

- 1) 友澤史紀：セメント水和反応モデル，セメント技術情報，XXVIII，pp.53～57，1974
- 2) 反応モデル解析研究委員会報告書，社団法人日本コンクリート工学協会，1996.5
- 3) 笠井芳夫，池田尚治：コンクリートの試験方法—下，技術書院，pp.269～275，1993
- 4) 野口貴文，友澤史紀，P.J.Monteiro，藤原浩巳：比抵抗・強制分極法によるコンクリートの内部の状況探査，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1121～1122，1998
- 5) 物理探査学会：図解物理探査，pp.52～62，1989
- 6) Stanley H. Ward：Resistivity and Induced Polarization Methods，Geophysical Engineer，pp.147～189
- 7) Paulo J. M. Monteiro，Frank Morrison，and William Frangos：Nondestructive Measurement of Corrosion State of Reinforcing Steel in Concrete，ACI Materials Journal，Vol.95，No.6，pp.704～709，November-December 1998
- 8) コンクリート総覧：技術書院，pp.460～462，1999
- 9) 鎌田英治 他：セメント技術年報，pp.288～292，1976
- 10) 小野博宣，加藤聡，大岸佐喜：コンクリートの含水率測定における電気抵抗性の適応性，セメント・コンクリート論文集，No.48，pp.238～244，1994
- 11) 福安直幸，山田和夫：高強度コンクリート内部の水分移動状況，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.607～613，1998