

論文 電氣的性質を用いたコンクリート中の鉄筋の腐食診断方法の検討

黄 光律^{*1}・野口 貴文^{*2}・鹿毛 忠継^{*3}・曹 健^{*4}

要旨：本研究では，鉄筋の腐食特性をコンクリートの表面から非破壊的に把握するために，建築研究所で 15 年間暴露したコンクリート試験体を用いて，電気探査技術のうち交流インピーダンス法による測定を行うとともに，実際に破壊して測定した鉄筋の質量減少率や腐食面積率のような鉄筋腐食量と比較し，鉄筋の腐食状態の診断を試みた。その結果，コンクリート表面に取り付けた電極によるインピーダンス測定方法は実際に破壊して測定した鉄筋の腐食量に比較して類似した傾向を示しており，鉄筋の腐食程度を非破壊的に推定できることを確認した。

キーワード：インピーダンス，鉄筋の腐食，表面取り付け電極，非破壊検査，暴露試験

1. はじめに

鉄筋コンクリート造構造躯体に生じる鉄筋腐食によるかぶりコンクリートのひび割れ，浮き，剥落等の損傷に対して用いられる補修材料・工法ならびに外観上は著しい損傷は見られないものの，有害量の塩化物を含んでおり，鉄筋の位置まで中性化が進行し，その場合に用いられる劣化制御工法の選択基準を作成することは非常に重要である。また，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が急務である。一般的な調査・診断方法は，目視によるものであるが，その信頼性は決して高いとは言えず，ハンマー打音による調査・診断も，足場設置などの手間および調査者の経験が必要であり，コア抜き取りによるコンクリートの強度検査・化学分析，鉄筋腐食程度の調査などは，手間がかかる破壊検査であり，調査範囲を限定せざるを得

ない^{1), 2)}。

一方，コンクリートを破壊せずその表面から測定するインピーダンス法は，対象物の表面から既知の電流を入力し，それにより形成される電位から対象物内部のインピーダンス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^{3), 4), 5)}。

本研究では，このような背景を踏まえて，鉄筋の腐食特性をコンクリートの表面から非破壊的に把握するために，建築研究所で 15 年間暴露した試験体（1985 年から 1986 年にかけて製作し，1987 年 8 月から建設省建築研究所の屋外暴露試験場において暴露試験している供試体）を用いて，電気探査技術のうち交流インピーダンス法による測定を行うとともに，実際に破壊して測定した鉄筋の質量減少率や腐食面積率のような鉄筋腐食量と比較し，鉄筋の腐食状態の診断を試みた。

* 1 独立行政法人建築研究所 科学技術特別研究員 博士（工学）（正会員）

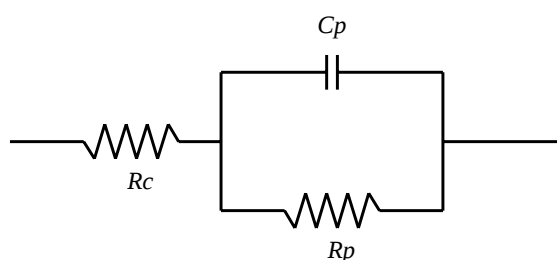
* 2 東京大学大学院工学研究科建築学専攻 助教授 博士（工学）（正会員）

* 3 国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究部 室長 学術博士 （正会員）

* 4 前田工織株式会社 開発技術部工法推進課 主任部員 工学博士

2．交流インピーダンスの測定法

溶液の中に沈積されている金属の表面には電気二重層が形成されているので、その金属を陰極として電流を供給すると金属の表面には電気二重層のコンデンサ容量とインピーダンス（分極抵抗）の並列回路に電流が供給される。交流インピーダンス法は、コンクリートのような電気抵抗の大きな環境下でも、適用できるのが特徴である。その等価回路は以下の通りである。



R_c : コンクリートの抵抗, C_p : 電気二重層容量,
 R_p : 交流インピーダンス

図 - 1 コンクリート抵抗と電気二重層容量
およびインピーダンスの等価回路

ここで、電極界面の全体の抵抗を求めると次の通りである。

$$Z = Z_1 + R_c \quad (1)$$

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_p}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C_p = \frac{1 + j\omega C_p R_p}{R_p} \quad (2)$$

$$\therefore Z_1 = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} - j \frac{\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Z &= R_c + \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} - j \frac{\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \\ &= R - jX \\ &= |Z| (\cos \phi - j \sin \phi) \end{aligned} \quad (4)$$

3．実験

3.1 供試体の概要

本実験で用いた供試体は、建築研究所で 15 年間暴露した試験体（1985 年から 1986 年にかけて製作し、1987 年 8 月から建設省建築研究所の屋外暴露試験場において暴露試験している供試体）であり、その概要は次のとおりである。

(1) 鉄筋

本実験で使用した鉄筋は、黒皮付の丸鋼 ϕ 13mm（電炉 JIS 商品）のものである。

(2) コンクリートの材料

供試体を製作するとき使用したコンクリートの材料は次のとおりである。

- ・セメント：普通ポルトランドセメント
- ・細骨材：大井川産川砂
- ・粗骨材：青海産碎石
- ・混和材：AE 剤
- ・NaCl：一級試薬（塩化物調整用）

(3) コンクリート供試体の概要

表 - 1 に暴露したコンクリート供試体の調査および圧縮強度を示す。

図 - 2 に暴露したコンクリート供試体の概要を示す。供試体は各補修材料・工法の影響を調べるため、図に示すように、鉄筋から V 字型のくぼみを設け、そのくぼみに表 - 2 に示した材料を用いて補修を施したものである。

表 - 1 コンクリートの調査と性質

塩化物イオン量 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	4 週の圧縮強度 (N/mm ²)
0	60	47	185	18 ± 1	4 ± 1	28.8
0.3						25.6



図 - 2 供試体および鉄筋

(4) 補修工法の概要

表 - 2 に補修工法および記号の説明を示す。

表 - 2 補修工法 (記号の説明)

工法区分	記号	補修材料の種類
表面被覆工法	SF	防水型仕上塗装材(複層)
	E	複層仕上塗装材
	RP	リフレッシュペイント
浸透性吸水防水材	SM	シラン化合物系
	PS	ポリエステル系
	AQ	シリコン系
無処理	N	—

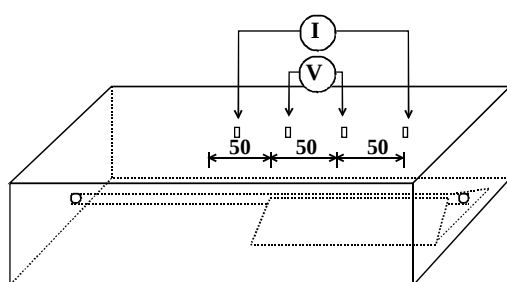


図 - 3 電極の取り付け位置

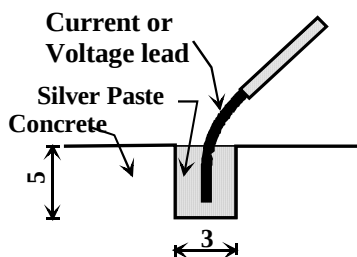


図 - 4 電極の詳細

3.2 電極および電極の取り付け

電極の取り付けは、図 - 3 および図 - 4 に示すように、供試体の表面にあらかじめ穴をあけ、銀ペーストに銅線を埋め込んで作製し、電極の間隔は 50mm とした。

くぼみにはそれぞれ異なる補修材料が施されており、その補修面の上での測定は電気的特性が変わることが予想されるため、コンクリートの性質が一定である補修面の反対側に電極を取り付けた。

3.3 インピーダンスの測定

電極の配列はウェンナ方法とし、電圧は図 - 5 に示す Lock in Amplifier を用いて以下の条件下で、一対の電流電極の間に交流 I を流し、他の電位電極の間の電位差 V を測定した。電圧を測定する際、供試体は表乾状態とし、測定中の水分の蒸発を防ぐため密閉されたプラスチックの容器に入れて測定した。

- ・電圧入力：1 V，入力周波数：0.01 ~ 1Hz
- ・電流出力：1 [mA]RMS (1V/1mA)

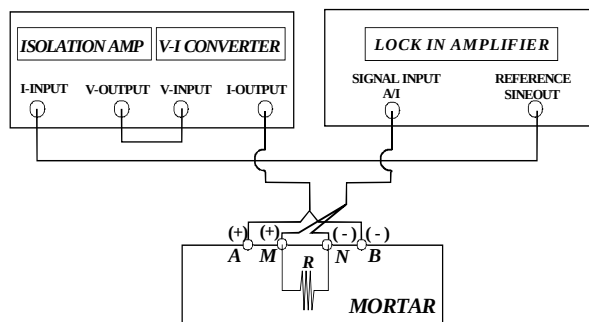


図 - 5 インピーダンスの測定装置の概要

4. 結果および考察

4.1 インピーダンス特性

既往の研究を参照^{1),2)}すると、見かけ比抵抗や位相角のみでは鉄筋の状況を明確に表すことは困難であるため、比抵抗および位相角を複素平面にひとつのグラフと表現^{3),5)}して検討する必要がある。

図 - 6 ~ 図 - 11 に測定された各供試体のイ

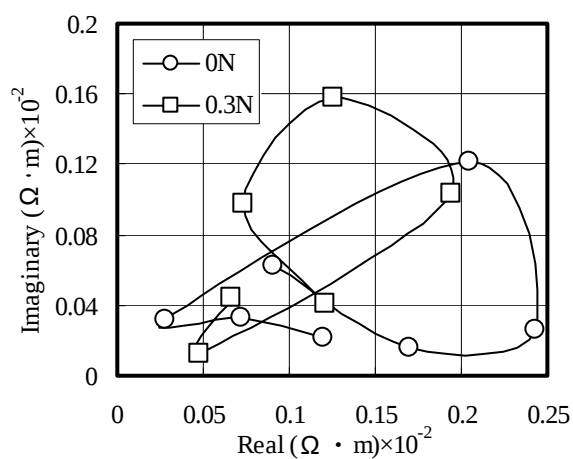


図 - 6 インピーダンス特性

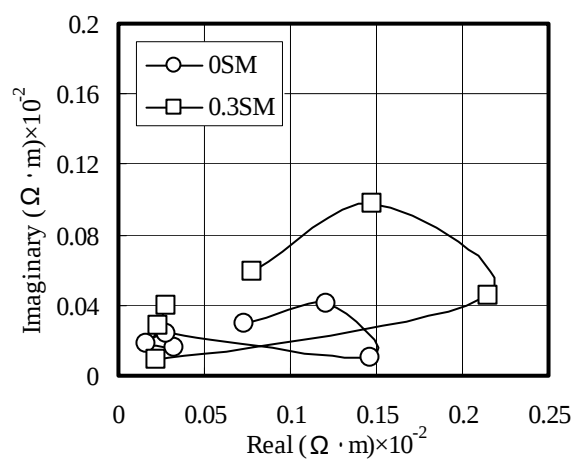


図 - 9 インピーダンス特性

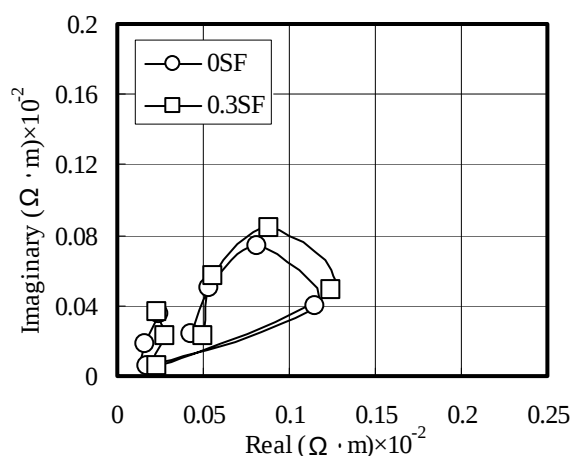


図 - 7 インピーダンス特性

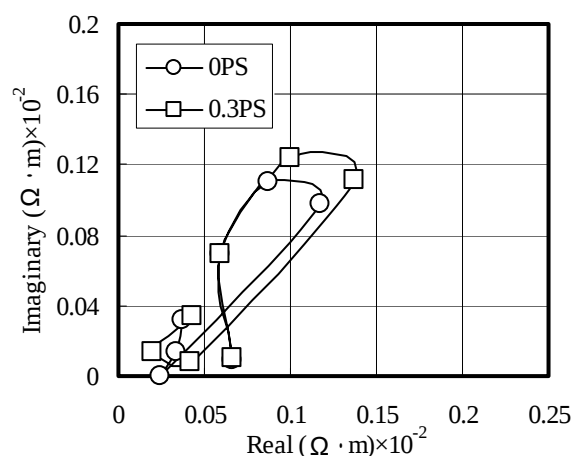


図 - 10 インピーダンス特性

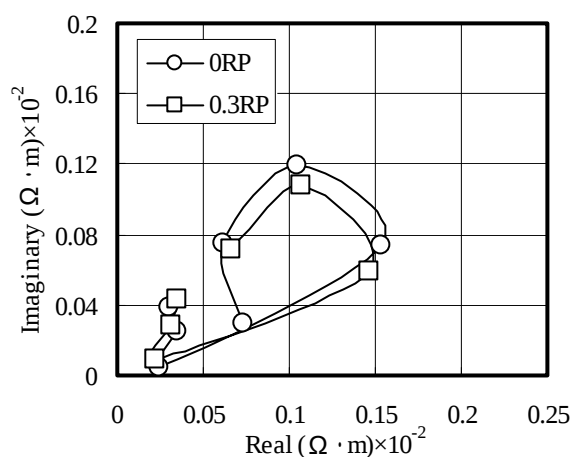


図 - 8 インピーダンス特性

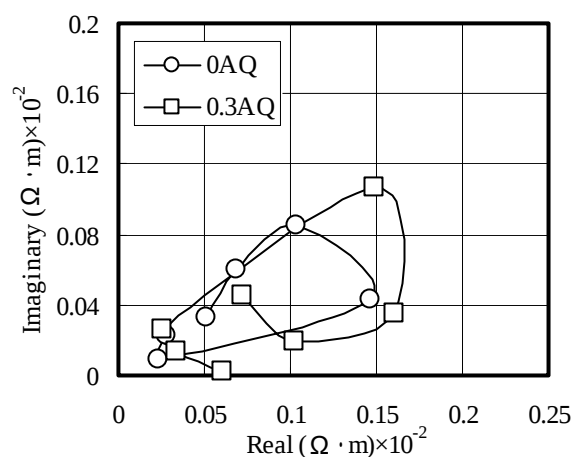


図 - 11 インピーダンス特性

ンピーダンスの Cole-Cole プロットを示す。判例において，数字は塩化物イオンの濃度を，文字は補修材料の種類を表す。

インピーダンスは塩化物が添加されていない供試体に比べ，塩化物が添加された供試体の方が高くなっており，また塩化物の入った場合，鉄

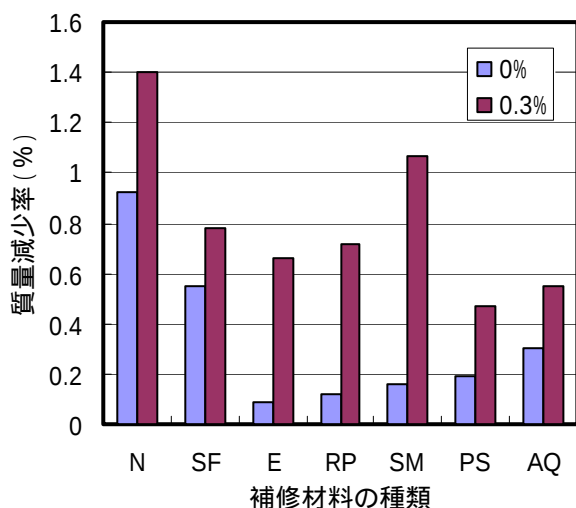


図 - 1 2 質量減少率と補修材料の関係

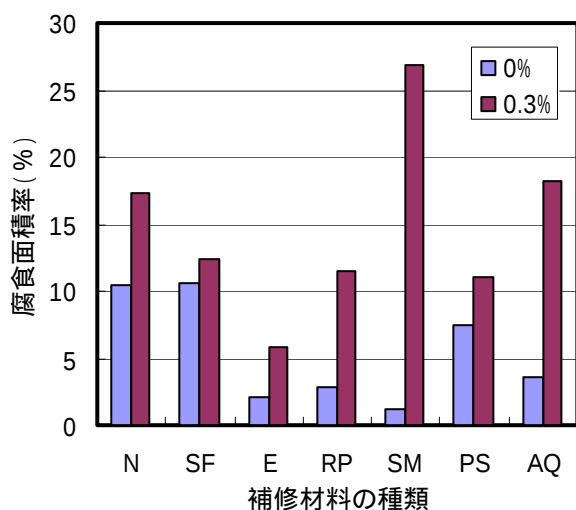


図 - 1 3 腐食面積率と補修材料の関係

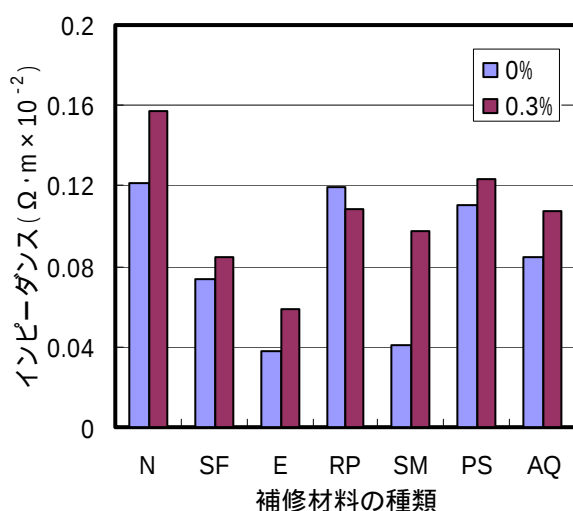


図 - 1 4 インピーダンスと補修材料の関係

筋が腐食していることが推測できる。

4.2 補修材料の種類の影響

図 - 1 2 に質量減少率と補修材料の関係を示す。質量減少率の測定結果，無処理（N）に比べ補修処理を行った供試体の質量減少率が，塩化物の有無にかかわらず，顕著に減少しており，鉄筋の腐食を防止する効果が認められる。特に，補修材料の種類の影響に関しては，塩化物の入っていない供試体の場合，E（表面被覆による工法：複層仕上塗装材）が，塩化物が 30%添加された供試体の場合は PS（浸透性吸水防止材塗布による工法：ポリエステル浸透性吸水防止材）が最も優れた効果を現した。

図 - 1 3 に腐食面積率と補修材料の関係を示す。腐食面積率の測定結果，無処理に比べ補修処理を施した供試体の腐食面積率が小さくなったものの，SM（シラン化合物系浸透性吸水防止材）の塩化物 30%添加の供試体の場合は，腐食面積率が増加した。

図 - 1 4 にインピーダンスと補修材料の種類の関係を示す。インピーダンス値の場合，無処理（N）供試体に比べ補修処理を施した供試体が全体的に減少しており，前もって測定した質量減少率と腐食面積率の結果と類似した傾向を表していることがわかる。インピーダンスの場合，E 供試体の方が他の供試体の比べ腐食率が小さいことがわかり，補修工法・材料として E が最も優れた結果となった。

4.3 インピーダンスと腐食との関係

図 - 1 5 にインピーダンスと質量減少率の関係を示す。インピーダンスは質量減少率が増加するにしたがって大きくなる傾向を示した。

図 - 1 6 にインピーダンスと腐食面積率の関係を示す。インピーダンスは腐食面積率が増加するにしたがって大きくなる傾向を示した。

図 - 1 5 および図 - 1 6 からわかるように，供試体の表面から非破壊的に測定したインピーダンスによる鉄筋の腐食程度は，実際に破壊し

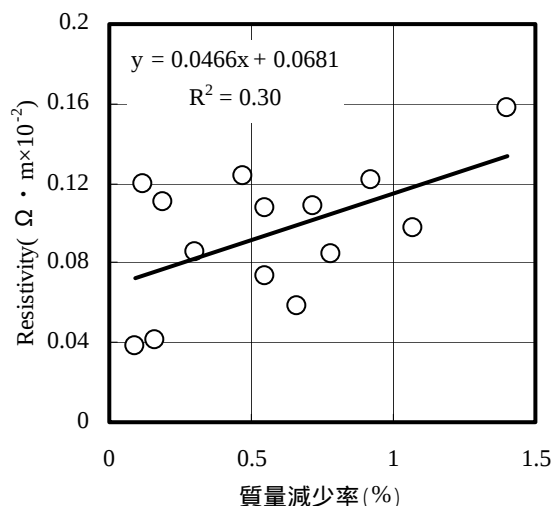


図 - 15 インピーダンスと質量減少率の関係

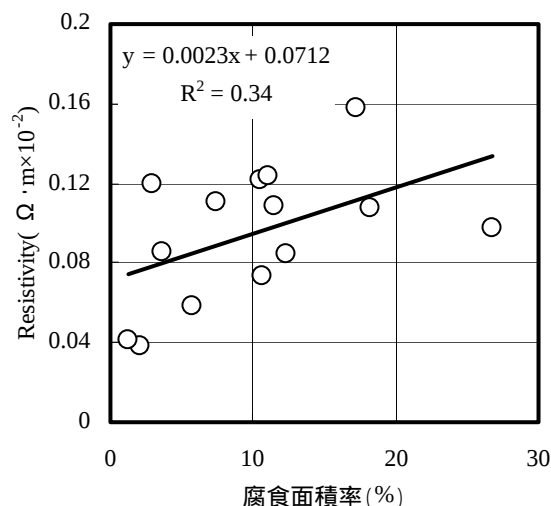


図 - 16 インピーダンスと腐食面積率の関係

て測定した鉄筋の質量減少率や腐食面積率のような鉄筋腐食量に比較し類似した傾向を示しており、コンクリート表面に取り付けた電極によるインピーダンス測定方法で鉄筋の腐食を非破壊的に推定できると考えられる。

5. まとめ

本研究では、鉄筋の腐食特性をコンクリートの表面から非破壊的に把握するために、建築研究所で15年間暴露した試験体(1985年から1986年にかけて製作し、1987年8月から建設省建築研究所の屋外暴露試験場において暴露試験している供試体)を用いて、電気探査技術のうち交流インピーダンス法による測定を行うとともに、さらに実際に破壊して測定した鉄筋の質量減少率や腐食面積率のような鉄筋腐食量と比較し、鉄筋の腐食状態の診断を試みた。

その結果、コンクリート表面に取り付けた電極によるインピーダンス測定方法は実際に破壊して測定した鉄筋腐食量に比較し類似した傾向を示しており、鉄筋の腐食を非破壊的に推定できると考えられる。

参考文献

- 1) 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

- 2) 黄光律, 林永哲, 曹健, 野口貴文, 守明子: 電気的性質を用いたコンクリート内部の非破壊鉄筋探索実験, 日本建築学会東海支部研究報告書, No.40, pp.69 ~ 72, 2002
- 3) 物理探査学会: 図解物理探査, pp.52 ~ 62, 1989
- 4) Stanley H. Ward: Resistivity and Induced Polarization Methods, Geophysical Engineer, pp.147 ~ 189
- 5) 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
- 6) 黄光律, 野口貴文, 友澤史紀: 表面電極型の比抵抗によるコンクリート内部の含水率の定量化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.1, pp.349 ~ 354, 2000
- 7) 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
- 8) 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, pp.607 ~ 613, 1998