

電気探査法を応用したRC構造物の 鉄筋位置と腐食状態の推定

露口雄次¹・町田篤彦²

¹正会員 株式会社関西興産 耐震設計室 (〒543-0021 大阪府大阪市天王寺区東高津町7-18)
E-mail:y-tuyu@nifty.com

²フェロー会員 埼玉大学名誉教授 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
E-mail:atsu_machidajp@ybb.ne.jp

現在、鉄筋腐食状態を推定する非破壊検査法として、主に自然電位法と分極抵抗法が用いられているが、両試験法とも鉄筋端部をはつり出す一部破壊作業が必要である。そのため、本研究では電気探査法の一つである直流比抵抗法と強制分極法を用いて、鉄筋のはつり作業を行うことなくRC構造物の鉄筋位置と腐食状態を非破壊で推定する基礎的研究を実施した。測定は、高精度化と現場適用性の両面を考慮して、新たに開発した携帯型電気測定装置を用いて行った。実験では、鉄筋の有無、腐食状態と腐食要因等の差異が、RC構造物の電氣的性質である見掛け比抵抗と見掛け充電率に与える影響を検討した。解析では、三次元有限要素法の電界プログラムを用いて、数種の逆解析を行い測定結果の妥当性を検証した。

Key Words : *non-destructive testing method, direct current resistivity method, induced polarization method, apparent resistivity, apparent chargeability, finite element method*

1. はじめに

高度成長期の1960～1970年代に建設されたRC構造物は、建設後30～40年以上経過しており非破壊検査の需要が拡大すると予想されている。現状、鉄筋位置や大きさを推定する非破壊検査法には、電磁波レーダ法、電磁誘導法、放射線法等があり、鉄筋腐食状態を推定する非破壊検査法には、自然電位法、分極抵抗法等がある。ただし、上記の非破壊検査法は、鉄筋の位置、大きさと腐食状態を同時に推定することは困難であり、自然電位法と分極抵抗法は、鉄筋端部をはつり出すという一部破壊作業も必要である。

鉄筋端部のはつり作業を行わず、鉄筋位置と腐食状態を同時に推定できる非破壊検査法の研究事例^{1)～10)}は国内外ともに比較的少なく、更に、その測定法としては主に交流インピーダンス法が用いられている。交流インピーダンス法は、入力周波数毎に測定値を検討できることが特徴であるが、その分、測定装置や測定結果の解釈が複雑化する傾向がある。

そのため筆者らは、電気探査法として一般的な直流比抵抗法¹¹⁾¹²⁾と、鉞床探査に実績の多い強制分極法¹¹⁾¹²⁾を応用して、見掛け比抵抗¹¹⁾¹²⁾(直流比抵抗法)と見掛け充電率¹²⁾(強制分極法)の分布状況から、簡便かつ即時的に鉄筋位置と腐食状態を推定する基礎的研究を実験

と解析の両面から実施している。

測定は、高精度化と現場適用性の両面を考慮し、新たに開発した携帯型電気測定装置を用いて行った。そして、鉄筋位置と腐食状態に加えて、コンクリートの打設方向の差異、粗骨材の有無、鉄筋腐食要因の差異が、RC構造物の電氣的性質である見掛け比抵抗と見掛け充電率に与える影響について比較検討した。解析では、測定電位を入力値として既報告¹⁰⁾の三次元有限要素法の電界プログラムを用いた数種の逆解析を行い、比抵抗の解析値を算出して実験結果の妥当性を検証した。

2. 携帯型電気測定装置の開発

(1) 開発の目的

図-1に示すウェンナ法¹¹⁾¹²⁾を用いて、RC構造物の表面C1, C2に矩形形状の直流電流 I [A]を (t_2-t_1) [sec]時間流し、P1, P2間の電位差 V [V]を測定すると、図-2に示すような時系列上の電流と電位が観察される。

本研究では、これらの測定値から、以下に示す見掛け比抵抗 ρ [Ωm]と見掛け充電率 M [mV/V]を算出し、両者の値から、鉄筋位置と腐食状態を推定している。

$$\rho = 2\pi a \frac{V_p}{I_m} \quad (1)$$

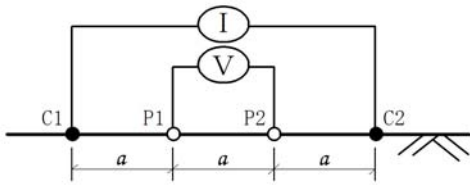


図-1 ウェンナ(Wenner)法を用いた電極配置

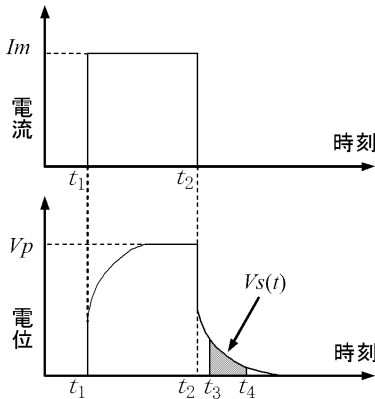


図-2 電流 I_m 、一次電位 V_p と二次電位 $V_s(t)$

$$M = \frac{1}{V_p(t_4 - t_3)} \int_{t_3}^{t_4} V_s(t) dt \quad (2)$$

ここに、 a [m] : 電極間隔、 V_p [V] : 安定した一次電位、 I_m [A] : 安定した電流、 M [mV/V] : 電流切断後の一定時間($t_4 - t_3$) [sec] に関する二次電位 $V_s(t)$ [V]の積分値と、一次電位に関する $V_p(t_4 - t_3)$ [V·sec]との比。

式(1)に示す見掛け比抵抗はデジタルマルチメータ(市販品)でも測定可能であるが、式(2)に示す見掛け充電率を正確に測定する目的でデータ・サンプリング間隔を比較的短時間(本研究では1.0秒/75区間=0.01333秒間)に設定できるオシロスコープを採用した。さらに、現地の劣化したRC構造物の非破壊検査に用いる目的で、以下に示す電気測定装置を携帯型として開発した。

(2) 携帯型電気測定装置の構成

開発した携帯型電気測定装置の回路図を、図-3 に示す。オシロスコープはノートパソコン画面で電位波形が確認出来る携帯型(SDS200A, softDSP 社製、電源はノートパソコンのUSB)を採用した。

RC 構造物に入力する電流は、48V の直流とした。入力電流は、図-3 に示すシャント抵抗(1.0kΩ)で電位換算し差動プローブ¹³⁾¹⁴⁾(Model700925, 横河電機社製、電源は6V 電池)を経て、上記オシロスコープのチャンネル1で測定と記録を行った。差動プローブは、任意な2点間の電位差を測定するための付属装置である。

RC 構造物の出力電位は、可変抵抗器¹⁵⁾(自作)と差動

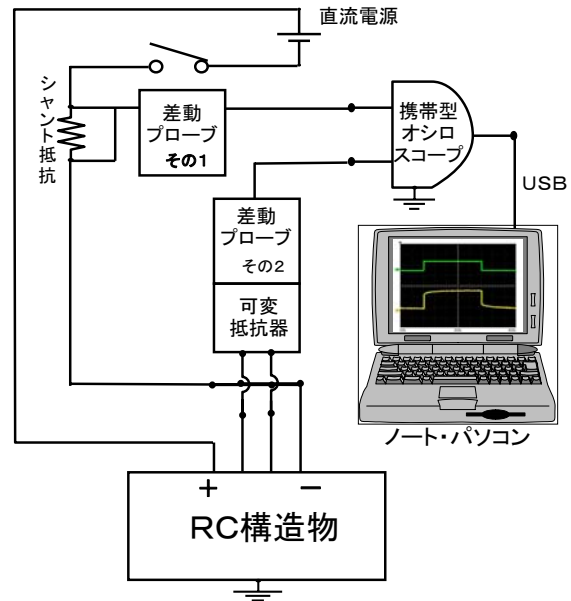


図-3 携帯型電気測定装置の回路

プローブ(電流部と同製品)を経て、上記オシロスコープのチャンネル2で測定と記録を行った。可変抵抗器の選択範囲は4~25MΩであり、接地抵抗の比較的大きな乾燥したRC構造物(具体的には1MΩ程度)の電位測定時にも20倍以上の内部抵抗が確保出来るよう自作した。所定箇所の入力電流と出力電位を測定後、同じノートパソコン上の鉄筋腐食推定コード(Fortran言語とExcel VBA言語で開発)を起動することで、見掛け比抵抗分布図、見掛け充電率分布図を得ることができ、鉄筋位置と腐食状態を画面で瞬時に推定することが可能である。

既報告¹⁰⁾のデジタルマルチメータではデータ・サンプリング間隔が0.345秒であったが、本システムでは0.01333秒と設定したので、それに伴いナイキスト振動数¹⁶⁾(分解能の上限)も1.45Hz(=1/2*0.345)から37.5Hz(=1/2*0.01333)と高精度化した。そのため、図-2に示す二次電位曲線の厳密な測定が可能となり、見掛け充電率を精度良く算出できるようになった。

各構成機器の大きさと重さの概要を以下に示す。

- ・携帯型オシロスコープ : 15×12×5 cm³, 0.3kgf
- ・差動プローブ2台分 : 20×7×6 cm³, 0.9kgf
- ・その他(直流電源, シャント抵抗, 可変抵抗器) : 20×15×10 cm³, 1.3kgf

ノートパソコンを含めても5kgf以下と軽量なので、RC構造物の野外測定も手軽に行えるようになった。

(3) 携帯型電気測定装置の検定

a) 電気解析理論の概要

コイル、コンデンサー、抵抗が並列に繋がれた電気回路を図-4に示す。同図において、 L はコイルのインダク

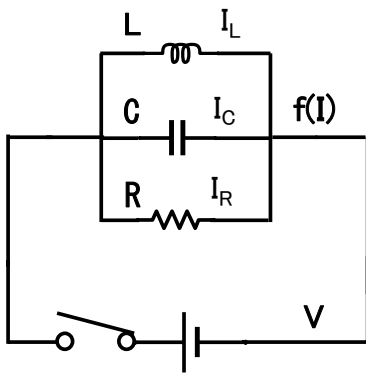


図-4 コイル，コンデンサー，抵抗の並列回路

タンスで I_L はコイルに流れる電流， C はコンデンサー容量で I_C はコンデンサーに流れる電流， R は抵抗値で I_R は抵抗に流れる電流を各々示している。さらに， V はコイル，コンデンサー，抵抗に共通な電位， $f(I)$ は入力電流を表している。

$$I_L = \frac{1}{L} \int V dt \quad (3)$$

$$I_C = C \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

$$I_R = \frac{1}{R} V \quad (5)$$

まず，電気理論の定義¹⁵⁾¹⁷⁾から上記の3式が導かれ，さらに，キルヒホッフの第一法則¹⁷⁾から次式が得られる。

$$\frac{1}{L} \int V dt + C \frac{dV}{dt} + \frac{1}{R} V = f(I) \quad (6)$$

RC構造物の電気測定では，コイル的な挙動（誘導電流の発生）は観測されないため上式の左辺第一項を消去する。

$$C \frac{dV}{dt} + \frac{1}{R} V = f(I) \quad (7)$$

上式は，「慣性力」+「減衰力」+「ばね力」=「外力」を表現した一質点系の運動方程式から「慣性力」（具体的には質量と応答加速度）を消去した方程式と同じ形式のため，運動方程式の数値解法として一般的な線形加速度法¹⁸⁾を用いて，以下に示す検定回路の解析解を算出した。

b) 検定回路の作製と携帯型電気測定装置の実用性確認

開発した携帯型電気測定装置の実用性を確認する目的で，図-5に示す検定回路²⁴⁾を作製した。同図において，C1, C2は電流入力点，P1, P2は電位差の測定点， R_{Cs1} は鉄筋を含むコンクリートの抵抗， R_{C2}, R_{C3} はコンクリートの抵抗， C_{S1} は鉄筋のコンデンサー容量を，各々示して

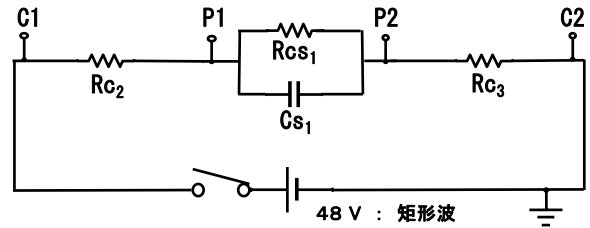


図-5 検定回路の構成

$$R_{Cs1} = 380 \text{ } [\Omega] \quad (8)$$

$$R_{C2} = R_{C3} = 42600 \text{ } [\Omega] \quad (9)$$

$$C_{S1} = 10000 \text{ } [\mu\text{F}] \quad (10)$$

いる。

次章の「コンクリート打設方向，粗骨材の有無，鉄筋の有無による電気的性質の影響検討」で作製した RC 供試体の 1 測点の電流と電位(3 章(3)節と(4)節参照)を模擬して，式(8)から式(10)に示すように，抵抗とコンデンサー容量を定めた。図-5 に示す C1, C2 点間に 48V の直流を流すと，安定状態での C1, C2 点間の電流 $f(I)$ ，P1, P2 点間の電位 V ，電極間隔が 6cm の場合の見掛け比抵抗 ρ は各々以下の値となる(式(11)～(13)参照)。

$$f(I) = 48. / (R_{Cs1} + R_{C2} + R_{C3}) \quad (11)$$

$$= 0.5608 \times 10^{-3} \text{ } [\text{A}] = 0.5608 \text{ } [\text{mA}]$$

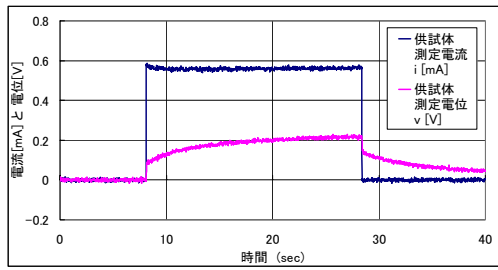
$$V = f(I) \times (R_{Cs1}) = 0.2131 \text{ } [\text{V}] \quad (12)$$

$$\rho = 2. \times \pi \times 0.06 \times V / f(I) = 143.3 \text{ } [\Omega\text{m}] \quad (13)$$

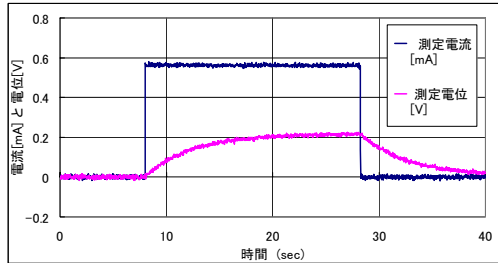
図-6の1)には携帯型電気測定装置(図-3参照)を用いて RC供試体を測定して得られた測定電流と測定電位の一例(3章(3)節c)参照)を，図-6の2)には1)と同じく携帯型電気測定装置を用いて検定回路(図-5参照)で得られた測定電流と測定電位を，図-6の3)には線形加速度法で得られた解析電流と解析電位を，各々示している。測定値，解析値とも，8秒から28秒までの20秒間，直流矩形波を入力し，サンプリング間隔は0.01333秒である。図-6から，以下のことが言える。

RC供試体と検定回路から得られた測定電流と測定電位にはノイズ(測定値のばらつき)が認められるが，線形加速度法による解析電流と解析電位にはノイズが認められない現象は，測定値と解析値であることを考慮すれば妥当と判断できる。

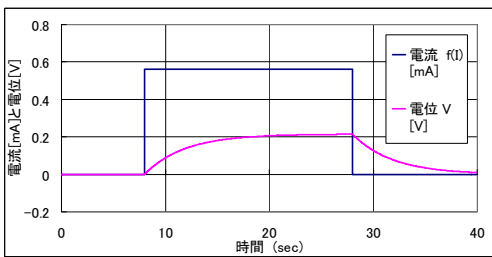
24～26秒間の電流の平均値に着目すると，RC供試体の測定電流(0.5608 mA)，検定回路での測定電流(0.5607 mA)，線形加速度法による解析電流(0.5610 mA)とも，式



1) RC供試体の測定電流と測定電位



2) 検定回路での測定電流と測定電位



3) 線形加速度法による解析電流と解析電位

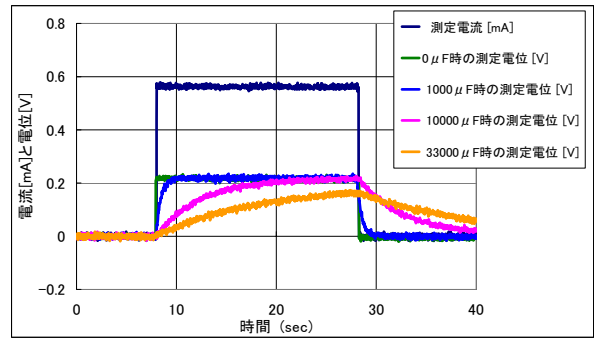
図-6 電流と電位の検定 (その1)

(11)に示した安定状態での電流値(0.5608 mA)に近似しており、予想通りの結果といえる。

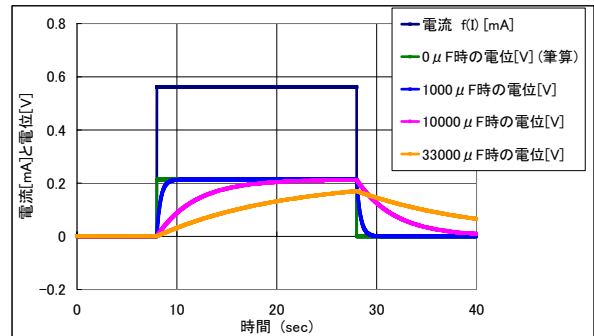
同じく、24~26秒間の電位の平均値に着目すると、RC供試体の測定電位(0.2131 V)、検定回路での測定電位(0.2131 V)、線形加速度法による解析電位(0.2126 V)とも、式(11)に示した安定状態での電位値(0.2131 V)に近似しており、開発した携帯型電気測定装置の見掛け比抵抗算出時の実用性を確認することが出来た。

8~20秒付近の電位の増加形状と、28~40秒付近の電位の減少形状に着目すると、検定回路の測定電位と線形加速度法の解析電位の形状は近似している。そのため、開発した携帯型電気測定装置の見掛け充電率算出時の実用性も確認出来たと判断している。

ただし、RC供試体の測定電位の8秒付近には約0.07Vの急激な上昇部、28秒付近にも約0.07Vの急激な降下部が存在しており、前述の検定回路と線形加速度法の電位とはこの部分の形状が異なっている。その原因は、図-5に示す検定回路と、RC供試体の電気的性質の差異であり、具体的にはコンデンサー C_1 (図-5参照)に直列に100Ω程度の抵抗を追加することで、この電位急変部に近似することを確認している。なお、この急変部がほと



1) 検定回路での測定電流と測定電位



2) 線形加速度法による解析電流と解析電位

図-7 電流と電位の検定 (その2)

表-1 検定回路での測定電位と解析電位の相関係数一覧

コンデンサー容量 μF	0	1,000	10,000	33,000
40秒間データの 相関係数	0.983	0.998	0.992	0.993

んど存在しないRC供試体の測定例も存在するため、より論理的かつ正確な検定回路を構築することも今後の重要課題と考えている。

追加検討として、図-5に示すコンデンサー C_1 の容量を0, 1000, 10000, 33000[μF(マイクロファラッド)]に切り換え可能な検定回路を作製し、携帯型電気測定装置を用いて電流と電位を測定した。その後、それら測定値を、線形加速度法による解析電流および解析電位と比較検討し、0~33000[μF]間で各々が近似していることを確認した(図-7と表-1参照)。

以上の検討結果から、開発した携帯型電気測定装置(図-3参照)は十分実用可能と判断し、次章からの測定に用いている。

3. コンクリート打設方向、粗骨材の有無、鉄筋の有無による電気的性質の影響検討

(1) 検討の目的

研究の主目的は鉄筋位置と腐食状態の推定であるが、

コンクリートの打設方向，粗骨材の有無，鉄筋の有無でもRC構造物の電氣的性質である見掛け比抵抗と見掛け充電率は変化することが予想される．そのため，RC構造物の電氣的性質から，鉄筋位置と腐食状態を精度良く推定するには，上記の要因による見掛け比抵抗と見掛け充電率の傾向も明らかにしておく必要がある．

上記の必要性から，本章では，コンクリート打設方向，粗骨材の有無，鉄筋の有無による電氣的性質の影響検討を目的として，1)打設深さ75cmの無筋鉛直供試体，2)厚さ12cmの半分がコンクリート製で残り半分がモルタル製の無筋水平供試体，3)黒皮無しで未腐食の鉄筋(D29mmを1本)を入れたRC水平供試体を作製し，各々の電氣的性質である見掛け比抵抗と見掛け充電率を比較検討した．

(2) 実験の概要

a) 供試体コンクリートの使用材料と配合など

普通ポルトランドセメントを使用し，粗骨材の最大寸法は20mmである．供試体コンクリートの配合と91日圧縮強度を表-2に示す．粗骨材は，兵庫県飾磨郡家島町西島産の碎石で，岩種は流紋岩質安山岩である．

b) 供試体の概要

同バッチで作製した3供試体(全て長さ75cm，高さ10cm，幅12cm)の概要一覧を表-3に示す．無筋鉛直供試

表-2 配合と91日圧縮強度

W/C (%)	単用量 (kg/m ³)				σ ₉₁ (N/mm ²)
	水	セメント	細骨材	粗骨材	
50	169	338	818	1027	33.1

備考：σ₉₁は無筋鉛直供試体から作成した角柱3個の圧縮強度平均値．

表-3 供試体の概要一覧

供試体名称	W/C (%)	鉄筋直径 (mm)	かぶり (mm)	鉄筋腐食状況
			電極設置面から	
無筋鉛直	50	—	—	—
無筋水平 (二層)	50	—	—	—
RC水平	50	D29	45.5	健全

備考：無筋水平供試体は，コンクリート部とモルタル部の二層構造．
備考：鉄筋はJIS G3112 SD295A規格品．

表-4 測定試験時の3供試体材齢の内訳

供試体名称	型枠設置	脱型後			測定試験時の材齢 (日数)
	湿潤養生 (日数)	水中養生 (日数)	空中放置 (日数)		
無筋鉛直	7	21	47	75	
無筋水平 (二層)	7	21	48	76	
RC水平	7	21	49	77	

備考：無筋水平供試体は，コンクリート部とモルタル部の二層構造．

体は，コンクリート打設方向と見掛け比抵抗の相関関係を明らかにする目的で，打設深さを75cmとした．

無筋水平供試体は，コンクリート中の粗骨材の電氣的性質を明らかにする目的で，厚さ12cmの半分がコンクリート製で残り半分がモルタル製とした．モルタルは，5mm間隔の金網を用いて同一バッチのコンクリートをウェットスクリーニングする方法で作製した．

RC供試体中の健全鉄筋そのものの電氣的性質を明らかにするため，10%クエン酸二アンモニウム溶液でD29mm鉄筋表面の黒皮を除去したが，既報告¹⁰で行った事前腐食は実施しなかった．

3供試体の立体図を図-8に示す．図中の連続的な小円は，3cm間隔で設置した電極位置(供試体の1測定面毎に24個=75cm/3cm-1)を各々示している．

c) 測定試験時の材齢

3供試体の測定試験時の材齢を表-4に示す．

d) 電極

図-9に示す既報告¹⁰と同じ構成の電極を用いている．

e) 測定方法

既報告¹⁰と同様，見掛け比抵抗と見掛け充電率の測定共，ウェナ法(図-1参照)を用いて実施した．絶対電位が必要な逆解析時の境界条件と一致させる目的で各供試体底面中央にアース点(電位=零V)を設けたことも，既報告¹⁰と同じである．

まず，見掛け比抵抗ρは前述の式(1)から算出した．無筋コンクリート位置では電流，電位とも綺麗な矩形形

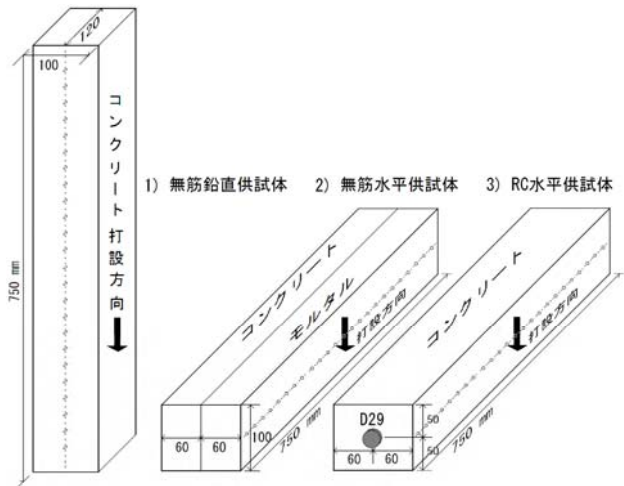


図-8 3供試体の形状と鉄筋・電極位置

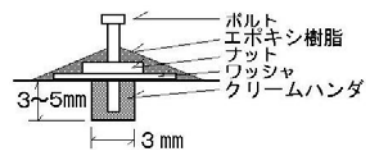


図-9 クリームハンダを用いた電極断面

状の波形が測定されたが、鉄筋位置付近では図-2に示すような曲線部を有する電位波形が測定され安定状態に達するまでに15秒以上必要な場合もあった。そのため、測定試験時のデータ抽出時間の差異による見掛け比抵抗の変動を低減する目的で、図-2に示す(t_2-t_1)区間を20.0秒(表-5参照)と定めた。

見掛け充電率の算出に必要な(t_3-t_2)区間と(t_4-t_3)区間(図-2参照)は、既報告¹⁰⁾の抽出時間を参考にして各々2.00秒、3.60秒と設定した。

表-5 測定試験時のデータ抽出時間

区間	サンプリング		1) x 2) 抽出時間 (sec)
	1) 時間間隔 (sec)	2) 個数 (個)	
($t_2 - t_1$)	0.01333	1500	20.0
($t_3 - t_2$)	0.01333	150	2.00
($t_4 - t_3$)	0.01333	270	3.60

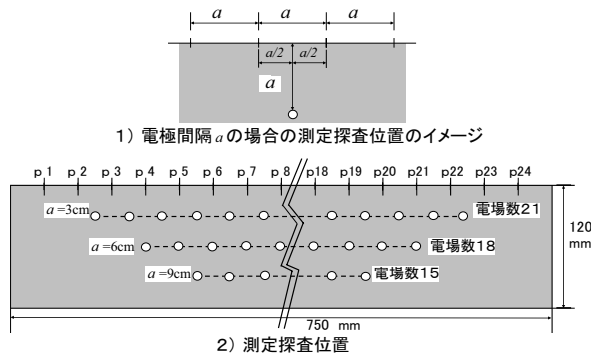


図-10 供試体の測定探査位置のイメージ

表-6 入出力電流と電位測定点一覧

1) 電極間隔 $a = 3\text{cm}$ の場合(電場数21)

測点 p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
電場01	+I	V	V	-I																				
電場02																								
電場20																					+I	V	V	-I
電場21																								

2) 電極間隔 $a = 6\text{cm}$ の場合(電場数18)

測点 p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
電場01	+I	-I	V	V	-I																			
電場02																								
電場17																					+I	V	V	-I
電場18																								

3) 電極間隔 $a = 9\text{cm}$ の場合(電場数15)

測点 p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
電場01	+I			V	V	-I																		
電場02																								
電場14																					+I	V	V	-I
電場15																								

備考: $\pm I$ は電流の入出力点。 V は電位の測定点。 \square は未使用測点。

また、電源はスイッチング電源(市販品、最大能力: 直流48V, 2.2A)を使用した。

f) 測定の手順

無筋鉛直供試体(図-8参照)の見掛け比抵抗と見掛け充電率を得るため、p1~p24の電極(3cm間隔毎、図-10参照)を用いて、電場数54(電極間隔 $a=3\text{cm}$ が21電場、 $a=6\text{cm}$ が18電場、 $a=9\text{cm}$ が15電場の計54電場、表-6参照)の測定を行った。二層構造の無筋水平供試体の場合は、コンクリート側とモルタル側の両側から54電場ずつ、計108電場の測定を実施した。RC水平供試体の場合は、かぶり45.5mm(表-3参照)を考慮して、電場数39(電極間隔 $a=3\text{cm}$ が21電場、 $a=6\text{cm}$ が18電場の計39電場)の測定を行った。

(3) 見掛け比抵抗の測定結果

図-11は、無筋鉛直供試体、無筋水平供試体のコンク

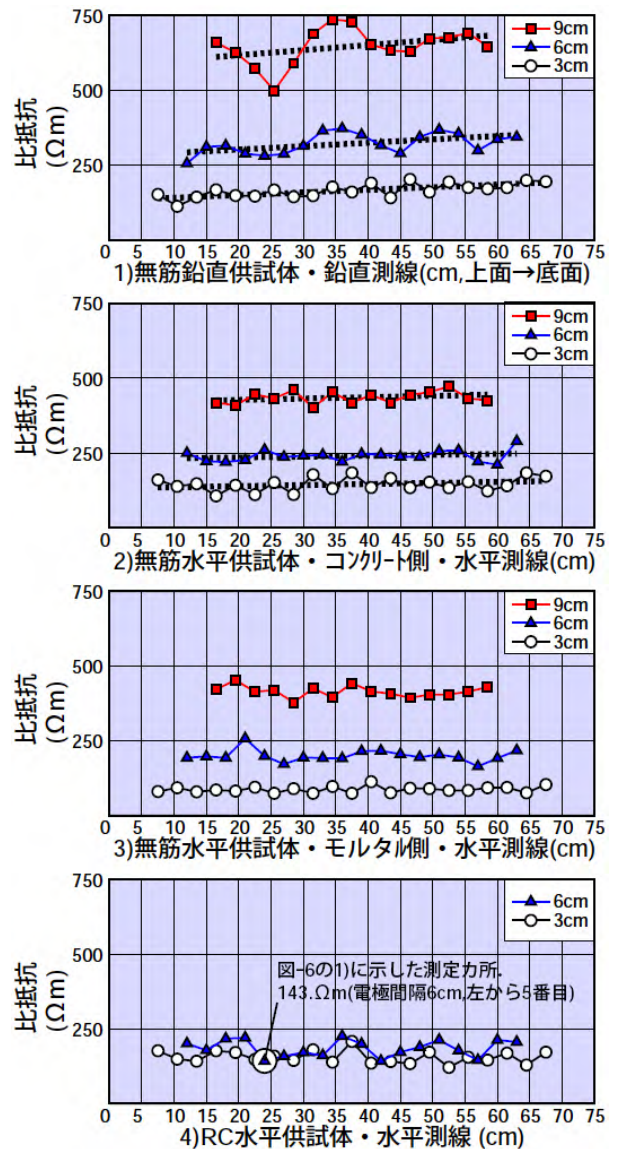


図-11 見掛け比抵抗分布

リート側，無筋水平供試体のモルタル側，RC水平供試体の順に，実験で得られた見掛け比抵抗分布を示している．特に，無筋鉛直供試体と，無筋水平供試体のコンクリート側では，測定位置による見掛け比抵抗の回帰式を黒点線で示している．以下，これらの検討結果を供試体別に示す．

a) 無筋鉛直供試体の見掛け比抵抗分布

無筋鉛直供試体と無筋水平供試体のコンクリート側（図-11の1）と2）参照）の見掛け比抵抗の平均値，回帰式，見掛け比抵抗の測定値と回帰式の値との相関係数を，表-7に示す．

図-11の1）から，「打設深度が増すに従い，見掛け比抵抗が大きくなる現象」が明らかとなった．確認目的で算出した無筋鉛直供試体の見掛け比抵抗の回帰式の傾きも，無筋水平供試体（コンクリート側）の回帰式の傾きに比べて2.46～3.82倍大きくなった（電極間隔 a=3, 6, 9cmの場合とも，表-7参照）．

b) 無筋水平供試体の見掛け比抵抗分布

無筋水平供試体の見掛け比抵抗（図-11の2）と3）参照）の平均値と標準偏差一覧を，表-8に示す．この表に示すように，コンクリート側の見掛け比抵抗の平均値が，モルタル側の平均値よりも1.05～1.66倍大きくなった

表-7 鉛直供試体と水平供試体の見掛け比抵抗一覧

電極間隔 a (サンプル数)	統計量	(1)	(2)	(1)/(2) (無次元)
		無筋鉛直供試体	無筋水平供試体 コンクリート側	
9cm (15個)	平均値 (Ω m)	646.6	435.1	1.49
	回帰式	Y=1.700X+583	Y=0.453X+418	1.70/0.453=3.75
	測定値と回帰式の値との相関係数	0.374	0.299	1.25
6cm (18個)	平均値 (Ω m)	321.3	239.9	1.34
	回帰式	Y=1.134X+279	Y=0.296X+229	1.13/0.296=3.82
	測定値と回帰式の値との相関係数	0.530	0.249	2.13
3cm (21個)	平均値 (Ω m)	164.6	145.1	1.13
	回帰式	Y=0.880X+132	Y=0.357X+132	0.88/0.357=2.46
	測定値と回帰式の値との相関係数	0.708	0.290	2.44

備考：回帰式のXは測定原点からの距離 (cm), Yは見掛け比抵抗 (Ω m).

表-8 コンクリート側とモルタル側の見掛け比抵抗一覧

電極間隔 a (サンプル数)	統計量	無筋水平供試体		(1)/(2) (無次元)
		(1)コンクリート側 (Ω m)	(2)モルタル側 (Ω m)	
9cm (15個)	平均値	435.1	414.8	1.05
	標準偏差	20.3	19.1	1.07
6cm (18個)	平均値	239.9	199.9	1.20
	標準偏差	19.0	19.8	0.96
3cm (21個)	平均値	145.1	87.4	1.66
	標準偏差	22.9	10.4	2.20

た．電極間隔a=6cmの場合は，コンクリートとモルタル（共に厚さ6cm）の境界面付近の測定（探査位置6cm，図-10の1）参照）となるので，コンクリートとモルタルの差異を検討するのに適していないと判断した．電極間隔a=3cm（探査位置3cm）の方が，コンクリートとモルタル，本来の見掛け比抵抗の差異の検討に適しており，両者の比が1.66倍となったため，粗骨材の存在が見掛け比抵抗を増加させていると考えられる．

表-8に示す無筋水平供試体における電極間隔a=3cm時のコンクリート側の見掛け比抵抗の標準偏差は，モルタル側の標準偏差の2.20倍と大きくなった．そのため，粗骨材の存在が，見掛け比抵抗のバラツキも増加させていると判断している．

文献調査で得られた岩石などの比抵抗を図-12¹⁹⁾に示す．この図によれば，堆積岩の比抵抗は0.5～1,000Ωm，火成岩の比抵抗は600～100,000Ωmと認められる．使用した粗骨材（碎石）は火成岩の一種（流紋岩質安山岩）であるため，モルタル側よりコンクリート側の見掛け比抵抗の方が大きく測定されたことは，粗骨材が存在する分，妥当と考えている．

c) RC水平供試体の見掛け比抵抗分布

表-9に示す電極間隔a=6cmの見掛け比抵抗の平均値に着目すると，無筋水平供試体よりRC水平供試体の方が，見掛け比抵抗が小さく0.77倍 (=185Ωm/240Ωm) と測定された．そのため，D29mm鉄筋の存在が，見掛け比抵抗を低下させていると推定できる．この低下傾向を確認する目的で，FEM逆解析で得られた比抵抗値による検討結果を後述(3章(5)参照)している．

(4) 見掛け充電率の測定結果

図-13は，1)無筋水平供試体のコンクリート側（無筋供試体の一例として），2)RC水平供試体の順に，実験

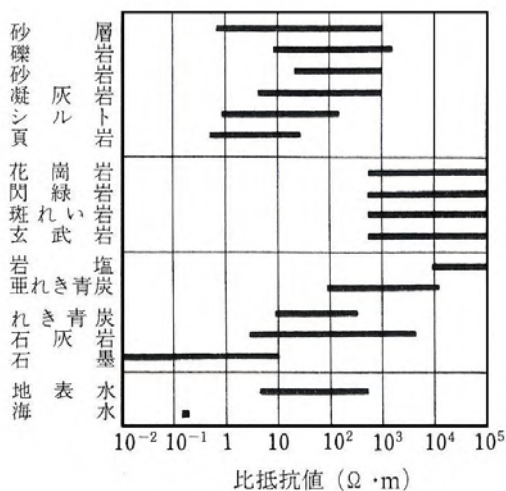


図-12 岩石などの比抵抗¹⁹⁾

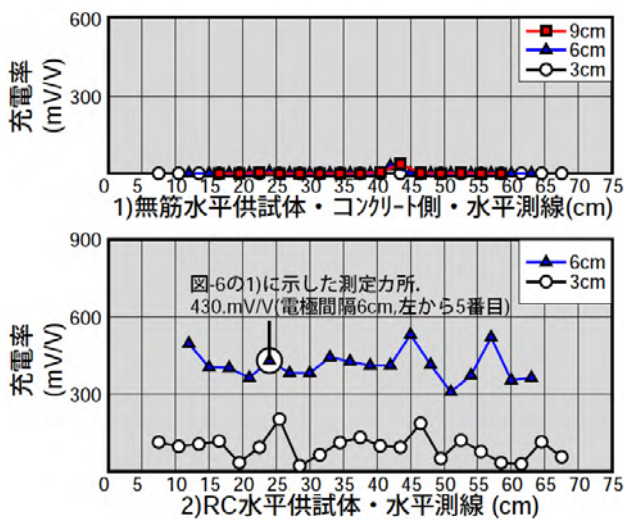
で得られた見掛け充電率分布を表示している。また、表-10には測定した全供試体の見掛け充電率の平均値と標準偏差一覧を示している。

無筋鉛直供試体、無筋水平供試体のコンクリート側、無筋水平供試体のモルタル側の計3組の見掛け充電率は、RC水平供試体のそれに比べて極端に小さな値となった(図-13と表-10参照)。そのため、図-2に示す電位の残留現象は、コンクリートの打設方向や粗骨材の有無に無関係であることと、鉄筋の存在のみにより発生していることが推定できた。

図-13の2)に示すように、電極間隔 $a=3\text{cm}$ から 6cm に増加するに従い見掛け充電率も増加しており、 $a=6\text{cm}$ の平

表-9 RC供試体と無筋供試体の見掛け比抵抗一覧

電極間隔 a (サンプル数)	統計量	(1)	(2)無筋水平供試体	(1)/(2) (無次元)
		RC水平供試体 (Ωm)	コンクリート側 (Ωm)	
6cm (18個)	平均値	185.1	239.9	0.77
	標準偏差	27.9	19.0	1.47
3cm (21個)	平均値	155.4	145.1	1.07
	標準偏差	21.2	22.9	0.92



注) 無筋供試体の一例として無筋水平供試体コンクリート側を表示。

図-13 見掛け充電率分布

表-10 見掛け充電率の平均値と標準偏差一覧

電極間隔 a (サンプル数)	統計量	無筋鉛直供試体 (mV/V)	無筋水平供試体		RC水平供試体 (mV/V)
			コンクリート側 (mV/V)	モルタル側 (mV/V)	
9cm (15個)	平均値	3.37	3.20	5.66	—
	標準偏差	9.20	9.39	13.5	—
6cm (18個)	平均値	1.87	2.00	8.11	411.7
	標準偏差	4.30	6.78	17.4	57.7
3cm (21個)	平均値	1.98	0.33	0.00	93.6
	標準偏差	5.97	0.10	0.00	47.6

均値は $a=3\text{cm}$ のその約4.4倍(=412/94, 表-10参照)と大きくなっている。この増加傾向は既報告¹⁰⁾と同様であり、電極間隔を変化させて見掛け充電率を測定することで、鉄筋位置を精度良く推定可能と考えられる。

(5) 測定結果解釈のためのFEM逆解析

a) 逆解析の概要

供試体で得られた測定電位とFEM逆解析で得られた解析電位(以下、逆解析電位)が近似していれば、供試体の比抵抗分布とFEMモデルの比抵抗分布も近似していると判断できる。そのため、供試体で得られた測定電位に近似するFEMモデルの比抵抗分布を、拡張カルマンフィルタを用いた逆解析手法¹⁰⁾により算出した。

作成した無筋鉛直モデル、無筋水平モデル、RC水平モデルの計3個の3次元モデル(3個共、 $75 \times 12 \times 10\text{cm}^3$, 節点数7293, 要素数6000)を図-14に示す。

なお、測定電位と逆解析電位の比較による逆解析結果に関する精度の判断材料の一つとして、以下に定義する残差 $r[\%]$ を用いている。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n |V_i - V_{oi}|}{\sum_{i=1}^n |V_{oi}|} \times 100 \quad (14)$$

ここに、 i : 電位数に相当する1から始まる数字で n はその最大値、 V_{oi} : i 番目の測定電位、 V_i : i 番目の逆解析電位。

無筋鉛直モデルは、逆解析区間を図-14の1)に示すように上部から15cm毎に5等分割した。そして、表-6の2)に示す電極間隔 $a=6\text{cm}$ 時の絶対電位36個(=18電場 \times 2個、測定電位)を用いて逆解析と残差算定(式(14)参照)を実施した。

無筋水平モデルは、逆解析区間をコンクリート部とモルタル部に一致させて、左右に2等分割した(図-14の2)

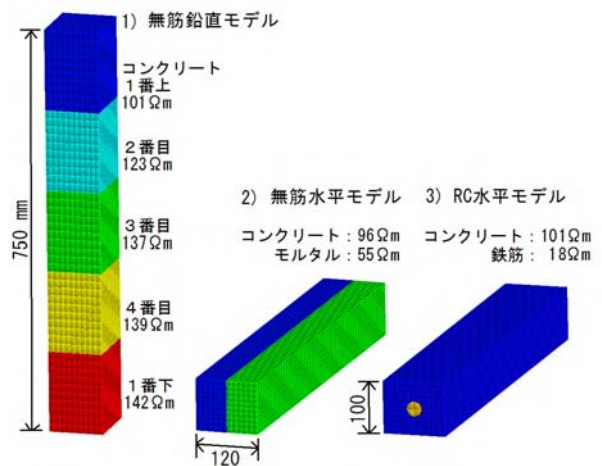


図-14 3次元モデルの材質区分と逆解析時の比抵抗収束値

参照) . 表-6の1)に示す電極間隔 $a=3\text{cm}$ 時の絶対電位84個 (=21電場 \times 2個 \times 2面, コンクリート面とモルタル面の測定電位) を用いて逆解析と残差算定を行った.

RC水平モデルは, 逆解析区間を図-14の3)に示すようにコンクリート部と鉄筋部に合わせて2区分とし, 鉄筋部断面は, D29mm鉄筋の断面積に一致した正八角形でモデル化した. 表-6に示す電極間隔 $a=3\text{cm}$ と 6cm 時の絶対電位78個 (=21+18)電場 \times 2個, 測定電位) を用いて逆解析と残差算定を実施した.

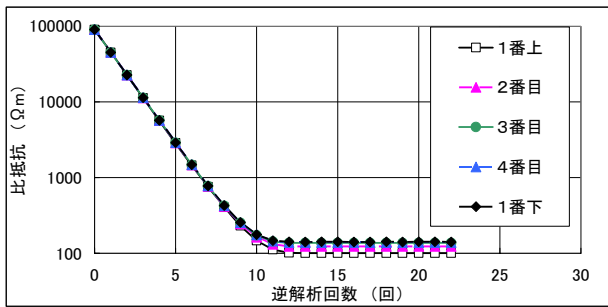
b) 逆解析結果

逆解析時の比抵抗の収束状況を図-15に, 逆解析で得られた比抵抗を表-11に, 測定電位と逆解析電位の相関関係の一例を図-16に, 各々示す. さらに, 無筋鉛直供試体を例として, 見掛け比抵抗の測定値分布と解析値分布比較を図-17に示している. ここで, 図-17の2)は, 逆解析で得られた比抵抗の収束値 (図-14の1) と表-11の1) 参照) を3次元モデル (図-14の1) 参照) に改めて入力し, 逆解析ではなく順解析による数値実験で算出した

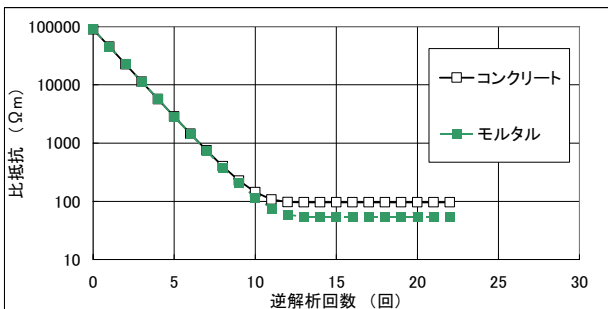
見掛け比抵抗の解析値分布である. これらの図表から, 以下のことが考えられる.

無筋鉛直モデルでは, 上部から順に101~142 Ωm の逆解析結果となったが, 図-15に示すように逆解析回数12~22回目で比抵抗が安定している点, 表-11に示すように逆解析回数22回目の測定電位と逆解析電位の残差が6.5% (式(14)参照) と比較的小さい点, の2点から判断して妥当な結果と推定している.

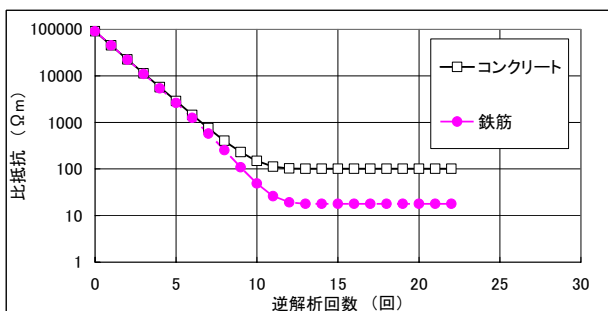
図-17に着目すると, 電極間隔 $a=6\text{cm}$ 時のみの絶対電位 (測定電位) を用いて逆解析を実施したので, $a=3\text{cm}$ と 9cm 時に比べて, $a=6\text{cm}$ 時の見掛け比抵抗の測定値と解析値が最も近似している. 101~142 Ωm の逆解析結果に比べて, 見掛け比抵抗が大きい (測定値平均=165~647 Ωm , 解析値平均=207~605 Ωm , 図-17参照) 現象は, 有限境界を有するRC構造物やRC供試体を対象に, 無限領域を前提とした見掛け比抵抗の式(1)を適用する際の見掛け上の増加現象と推定している. この増加現象を確認するため, 無筋鉛直モデル (図-14の1) 参照) の幅と奥行きを各々2倍した「無筋鉛直2倍モデル」と, 4倍した「無筋鉛直4倍モデル」の見掛け比抵抗の解析値を算出した. この解析結果から, モデル幅が大きくなるほど,



1) 無筋鉛直モデル



2) 無筋水平モデル



3) RC水平モデル

図-15 逆解析時の比抵抗の収束状況

表-11 逆解析で得られた比抵抗と電位の残差

1) 無筋鉛直モデル

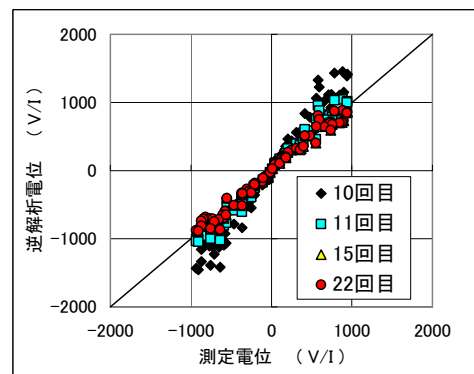
逆解析回数	1番上 Ωm	2番目 Ωm	3番目 Ωm	4番目 Ωm	1番下 Ωm	残差 r %
0	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	68.304
10	147.5	163.1	173.2	174.9	176.8	28.7
11	111.9	131.0	143.1	145.0	147.4	7.6
15	100.6	123.3	136.7	138.9	141.6	6.5
22	100.6	123.3	136.7	138.9	141.5	6.5

2) 無筋水平モデル

逆解析回数	コンクリート Ωm	モルタル Ωm	残差 r %
0	90,000	90,000	123.524
10	143.7	116.2	78.8
11	107.7	75.2	31.3
15	96.0	54.5	21.9
22	96.0	54.5	21.9

3) RC水平モデル

逆解析回数	コンクリート Ωm	鉄筋 Ωm	残差 r %
0	90,000	90,000	104.051
10	148.9	48.8	61.4
11	113.0	26.3	21.0
15	101.2	17.9	14.8
22	101.2	17.9	14.8



注) 測定電位と逆解析電位の相関関係の一例.

図-16 RC水平モデルの測定電位と逆解析電位の相関関係

見掛け比抵抗は、逆解析で得られた比抵抗 (101~142Ωm) に近似することが明らかである(図-18参照)。

無筋水平モデルでは、コンクリート部が96Ωm、モルタル部が55Ωmの逆解析結果になり、見掛け比抵抗(表-8参照)と同様、モルタル部よりコンクリート部の比抵抗が大きくなった。ただし、表-11に示す逆解析22回目の残差は21.9%であり、無筋鉛直モデルの6.5%の3.4倍の大きな値となった。そのため、精度の良い逆解析結果が

得られたとは言えないが、無筋鉛直モデルの最上部の逆解析値(101Ωm)や、図-15に示す比抵抗の収束状況から、モルタル部の方がコンクリート部より比抵抗が小さいと推定できる。

無筋鉛直モデルでは電極間隔 $a=6\text{cm}$ 時の絶対電位36個(=18電場×2個、測定電位)のみを用いたが、無筋水平モデルでは粗骨材の影響でバラツキが生じやすい電極間隔 $a=3\text{cm}$ 時の絶対電位84個(=21電場×2個×2面、測定電位)を用いて逆解析を実施したことが、測定電位と逆解析電位の残差(式(14)参照)を大きくした原因と推定している。

RC水平モデルでは、コンクリート部が101Ωm、鉄筋部が18Ωm、測定電位と逆解析電位の残差は14.8%(表-11の3)参照)となった。前述の無筋鉛直モデルの最上部の逆解析値(101Ωm)や、無筋水平モデルのコンクリート側の逆解析値(96Ωm)、鉄は導体であることから推定して、コンクリート部(101Ωm)と黒皮を除去した健全鉄筋部(18Ωm)で比抵抗に差が生じたことは妥当な結果と考えられる。図-19は、図-17の2)や図-18と同様、逆解析で得られた比抵抗の収束値を3次元モデルに改めて入力し、逆解析ではなく順解析による数値実験で算出した見掛け比抵抗の解析値分布である。具体的には、鉄筋の有無による見掛け比抵抗の変化を解析で確認するため、「101Ωmの無筋水平モデル」と「コンクリート部が101Ωm、鉄筋部が18ΩmのRC水平モデル」(図-14の3)と表-11の3)参照)の見掛け比抵抗の解析値分布を算出した。その解析結果は、測定結果(図-11の2),4)と表-9参照)と同様、RC水平モデルの電極間隔 $a=6\text{cm}$ 時の見掛け比抵抗が、鉄筋の影響で無筋水平モデルに比べて0.84倍(=204Ωm/244Ωm)に低下(図-19参照)した。そのため、黒皮を除去した健全鉄筋の存在が見掛け比抵抗を低下させる測定結果(0.77倍=185Ωm/240Ωm、表-9参照)と同様の傾向を、解析で確認することができた。

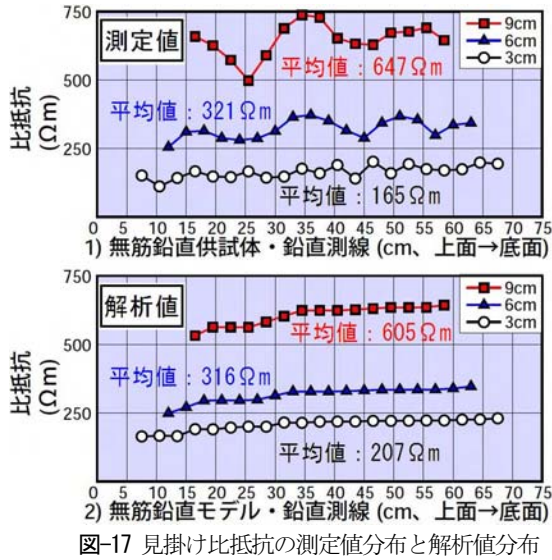


図-17 見掛け比抵抗の測定値分布と解析値分布

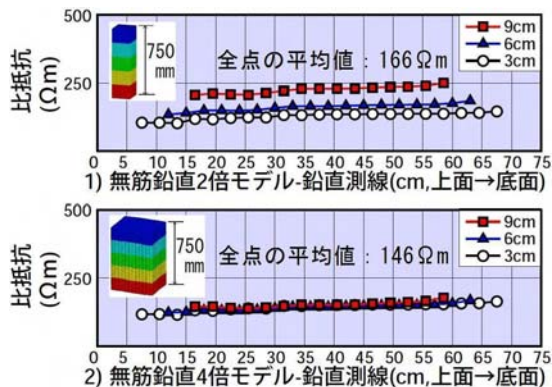


図-18 部材寸法拡大時の見掛け比抵抗解析値分布

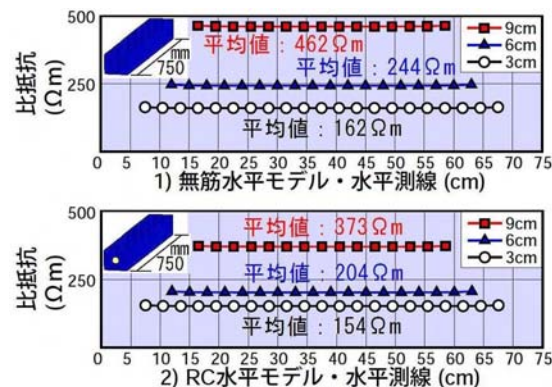


図-19 無筋モデルとRCモデルの見掛け比抵抗解析値分布

4. 鉄筋腐食要因の差異による電気的性質の影響検討

(1) 検討の目的

RC構造物の電気的性質である見掛け比抵抗と見掛け充電率から、鉄筋位置と腐食状態を精度良く推定するには、鉄筋腐食要因の差異による電気的性質も明らかにしておく必要がある。

そのため、本章では、鉄筋腐食要因の差異による電気的性質の影響検討を目的とした。具体的には、1)無筋供試体、2)コンクリート打設以前に鉄筋を28日間、塩分腐食させたRC供試体(以下、事前腐食供試体)、3)塩分15kgf/m³をコンクリートに混入したRC供試体(以下、塩分混入供試体)、4)38日間、電食試験を行ったRC供試

表-12 配合と28日圧縮強度

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				σ ₂₈ (N/mm ²)
	水	セメント	細骨材	粗骨材	
45	171	380	759	1022	42.2

表-13 供試体の概要一覧

供試体名称	W/C (%)	鉄筋直径 (mm)	かぶり		打設時の鉄筋状況		空洞直径 (mm)
			上面から(mm)	左側	右側		
無筋	45	—	—	—	—	—	
事前腐食	45	D25	37.5	健全	腐食	25	
塩分混入	45	D25	37.5	健全	黒皮除去	25	
電食	45	D25	37.5	健全	黒皮除去	25	

備考：鉄筋はJIS G3112 SD295A規格品

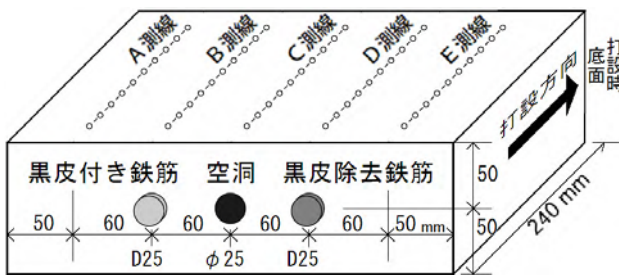


図-20 3供試体の鉄筋・空洞・電極位置

体（以下、電食供試体）の、計4供試体の見掛け比抵抗と見掛け充電率を比較検討した。4供試体の測定試験時（材齢242～245日）において、1)無筋供試体は他のRC供試体との電気的性質の差異を比較検討するための供試体、2)事前腐食供試体の黒皮付き鉄筋は健全鉄筋、黒皮除去鉄筋は事前腐食後の鉄筋、3)塩分混入供試体の黒皮付き鉄筋は黒皮付き状態からの内的塩害による腐食を想定した鉄筋、黒皮除去鉄筋は黒皮無し状態からの内的塩害による腐食を想定した鉄筋、4)電食供試体の黒皮付き鉄筋は黒皮付き状態からの外的塩害による腐食を想定した鉄筋、黒皮除去鉄筋は黒皮無し状態からの外的塩害による腐食を想定した鉄筋、とした。

(2) 実験の概要

a) 供試体コンクリートの使用材料と配合など

3章と同じ材料で、普通ポルトランドセメントを使用し、碎石を用いた粗骨材の最大寸法は20mmである。供試体コンクリートの配合と28日圧縮強度を表-12に示す。

b) 供試体の概要

同バッチで作製した4供試体（全て長さ34cm、高さ10cm、奥行き24cm）の概要一覧を表-13に示す。無筋供試体以外の3供試体中の右側のD25mm鉄筋は、全て10%クエン酸二アンモニウム溶液で黒皮を除去している。

表-14 測定試験時の4供試体材齢の内訳

供試体名称	型枠設置	脱型後	気中放置	電食試験	気中放置	測定試験時の材齢 (日数)
	湿潤養生 (日数)	水中養生 (日数)	その1 (日数)	(日数)	その2 (日数)	
無筋	7	21	156	—	58	242
事前腐食	7	21	156	—	59	243
塩分混入	7	21	156	—	60	244
電食	7	21	118	38	61	245

備考：電食供試体だけは、電食試験中とその直前直後も、表面と裏面の測定を行った。

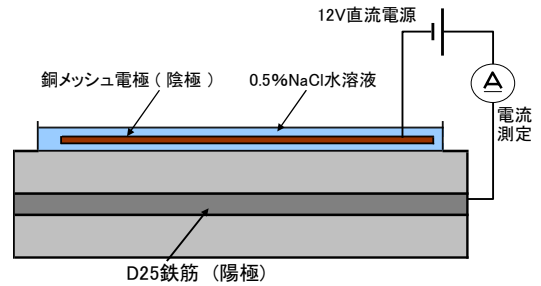


図-21 電食回路(奥行き方向断面)

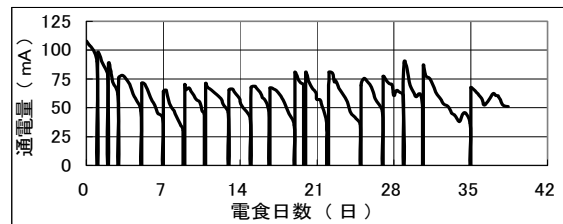


図-22 通電量の経時変化

つぎに、無筋供試体を除く3供試体の立体図を図-20に示す。図中の、左側の円形が「黒皮付き鉄筋」、真ん中の円形が「空洞」、右側の円形が「黒皮除去鉄筋」を各々示している。また、図中の供試体上面にはA～Eの各測線と2cm間隔で設置した電極位置を各々示している。

c) 測定試験時の材齢等

4供試体の測定試験時の材齢を表-14に示す。表中の塩分混入供試体は他の3供試体とは別の水槽で水中養生を行った。電食試験を38日目で終了した理由は、鉄筋腐食から1mm幅以上のひび割れが発生し電解液(0.5%NaCl水溶液)を一定水位に保つことが困難になったためである。

電食試験終了から58～61日後に、4供試体とも測定試験を実施したが、特に電食供試体に関しては電食試験直前直後と、電食試験中も週に3～4回の割合(電解液の交換時)で測定試験を行った。なお、電食試験終了から61日目においても、無筋供試体、事前腐食供試体、塩分混入供試体には、ひび割れが発生しなかった。

d) 電食試験の概要

電食試験の回路図を図-21に示す。RC供試体上面に0.5



写真-1 電食試験終了直後(電食38日目)の電食供試体

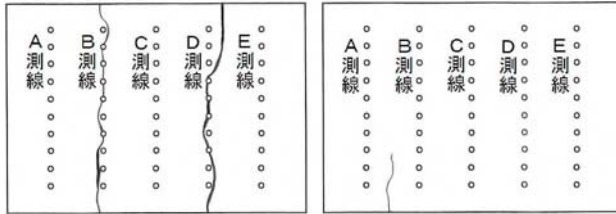


図-23 ひび割れ分布のスケッチ(電食38日目)

%濃度の NaCl 水溶液を満したのち銅メッシュ板を水没させ、D25mm 鉄筋(左右 2 本共、図-20 参照)を陽極、銅メッシュ板を陰極とした。

12V の直流電流を 38 日間通電し、電流を連続的に測定管理した際の通電量の経時変化を図-22 に示す。図中で、1~5 日に 1 回の割合で通電量が零 mA に戻っている状態は、電解液の交換、銅メッシュ板の洗浄、電食供試体の見掛け比抵抗と見掛け充電率の測定(表面、裏面共)を実施したことを示している。

電食試験終了直後に銅メッシュ板と配線を除去した状態の電食供試体を写真-1 に示す。B 測線手前側と D 測線奥側に鉄錆が析出しており、B 測線は 0.3~1.0mm 幅、D 測線は 0.5~1.5mm 幅のひび割れが共に、供試体手前から奥行き方向(全 24cm)に貫通した状態が観察できた(図-23 の 1)参照)。

供試体前面の鉄筋位置から錆汁が滲み出る状態(写真-1 参照)は対称位置の供試体背面でも同様であるが、NaCl 水溶液を満した供試体表面と対称位置の供試体裏面は幅 0.1~0.2mm、全長約 9cm のひび割れが 1 本発生しただけの比較的きれいな状態であった(図-23 の 2)参照)。

e) 測定方法

測定方法は、3章と同じである。

f) 測定の手順

各供試体とも、見掛け比抵抗と見掛け充電率は、図-24 に示した 2cm 間隔毎の p1~p10 の電極を用いて、電場数 20 (電極間隔 a=4cm で A~E の 5 測線毎に 4 電場、表-15 参照) の測定を行った。ただし、電食供試体(写真-1 参照)だけは、電食表面と電食裏面の両側から 20 電場ずつ、計 40 電場の測定を実施した。

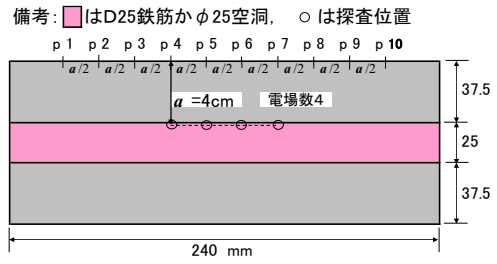


図-24 A~E 測線の測定探査位置(電極間隔 a=4cm)

表-15 入出力電流と電位測定点一覧

電極間隔 a=4cm (電場数 4, A~E 測線共)

測点 p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
電場 1	+I	-	V	-	V	-	-I	-	-	-
電場 2	-	+I	-	V	-	V	-	-I	-	-
電場 3	-	-	+I	-	V	-	V	-	-I	-
電場 4	-	-	-	+I	-	V	-	V	-	-I

備考: ±I は電流の入出力点、V は電位の測定点、- は未使用測点。

(3) 見掛け比抵抗の測定結果

図-25 は、1) 無筋供試体、2) 事前腐食供試体、3) 塩分混入供試体、4) 電食供試体の表面、5) 電食供試体の裏面の順に、材齢 242~245 日目(表-14 参照)の実験で得られた測定探査深度 4cm 位置(図-24 参照)の見掛け比抵抗の水平分布を示しており、X 軸の()内の数字は A~E 測線の見掛け比抵抗の平均値を、Y 軸の p4~p7 表示は電場 1~4 の測定探査位置を各々表している。また、表-16 は供試体別および測線別の見掛け比抵抗平均値一覧を示している。これらの検討結果を、以下に列記する。

a) 無筋供試体(図-25の1) 参照)

B, C, D 測線 (196, 188, 180Ωm) に比べ、A と E 測線 (203, 224Ωm) の見掛け比抵抗の平均値が大きい原因は、主に供試体端部である幾何学的な影響と考えている。この幾何学的な影響を確認する目的で FEM 逆解析で得られた比抵抗値による検討結果を後述(4章(6)参照)している。

幾何学的な対称位置である A と E、B と D 測線の見掛け比抵抗の差異は、粗骨材位置の差異や測定誤差が原因と推定している。

b) 事前腐食供試体(図-25の2) 参照)

事前腐食鉄筋位置(D 測線)、黒皮付き鉄筋位置(B 測線)、無筋位置(A 測線)、空洞位置(C 測線)の順に、見掛け比抵抗が大きくなる傾向は、既報告⁹⁾と同様である。

E 測線(平均値 173Ωm)は、D 測線(平均値 145Ωm)の影響を受けて見掛け比抵抗が低下していると考えられる。

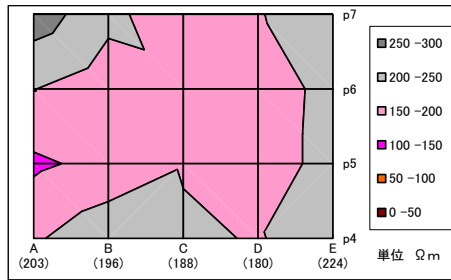
c) 塩分混入供試体(図-25の3) 参照)

他の測線に比べて、鉄筋位置である B, D 測線 (112, 125Ωm) の見掛け比抵抗の平均値が小さいので、内的塩害が生じている RC 構造物においても、見掛け比抵抗を測定して鉄筋の存在を知ることが可能と推定できる。

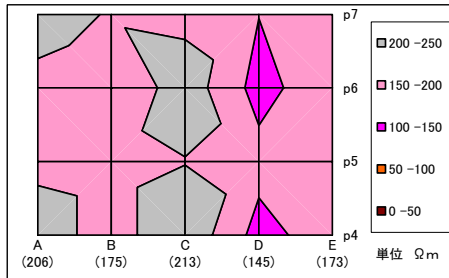
ただし、空洞位置である C 測線 (162Ωm) の見掛け比抵抗

表-16 供試体別と測線別の見掛け比抵抗平均値一覧

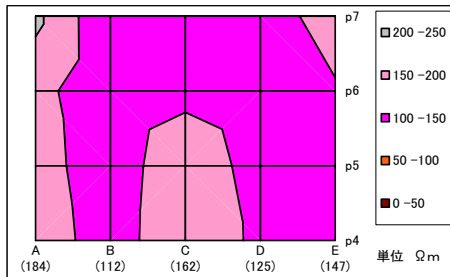
測線 供試体	A 測線	B 測線	C 測線	D 測線	E 測線	平均値
無筋	203	196	188	180	224	198
事前腐食	206	175	213	145	173	182
塩分混入	184	112	162	125	147	146
電食表面	222	173	301	154	231	216
電食裏面	227	178	267	165	206	208
平均値	208	167	226	154	196	190



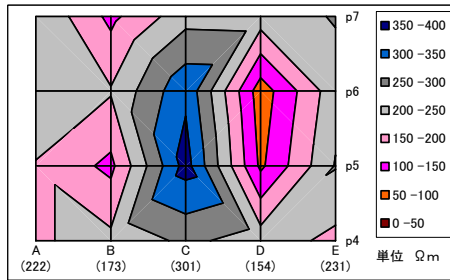
1) 無筋供試体



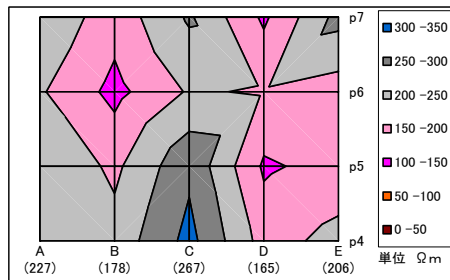
2) 事前腐食供試体



3) 塩分混入供試体



4) 電食供試体(表面)



5) 電食供試体(裏面, 透視図)

図-25 見掛け比抵抗分布 (電極間隔 $a=4\text{cm}$ 時)

抗の平均値がA測線(無筋位置, $184\Omega\text{m}$)より小さいので、空洞は探查出来ていないと考えられる。

表-16から明らかなように、 $36\Omega\text{m}(=182-146)$ 以上、他の3供試体に比べて見掛け比抵抗の平均値が小さいので、コンクリートに混入した塩分 15kg/m^3 の存在が見掛け比抵抗を小さくしていると推定している。

d) 電食供試体の表面側 (図-25の4) 参照)

図-23の1)に示すようにBとD測線沿いに $0.3\sim 1.5\text{mm}$ 幅の太いひび割れが生じているにも関わらず、均質な無限材質を仮定した見掛け比抵抗の式(式(1)参照)を用いることで、黒皮除去鉄筋位置(D測線)、黒皮付き鉄筋位置(B測線)、無筋位置(A, E測線)、空洞位置(C測線)の順に、見掛け比抵抗の平均値が大きくなる傾向を確認することが出来た。

なお、筆者らは、水セメント比60%の電食供試体でも上記と同様の見掛け比抵抗分布を報告済み⁹⁾である(本章の供試体の水セメント比は45%、表-13参照)。

上記の測定結果から、電食試験38日間経過後に61日間、気中放置として外的塩害が休止している状態(以下、外的塩害休止状態)のRC構造物の鉄筋位置と腐食状態、空洞位置を、見掛け比抵抗を測定することで、探查可能と推定している。

e) 電食供試体の裏面側 (図-25の5) 参照)

図-23の2)に示すようにAとB測線の間に $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 幅の細かいひび割れが1本生じただけであるが、表面側と同様、黒皮除去鉄筋位置(D測線)、黒皮付き鉄筋位置(B測線)、無筋位置(A, E測線)、空洞位置(C測線)の順に、見掛け比抵抗の平均値が大きくなる傾向を確認出来た。

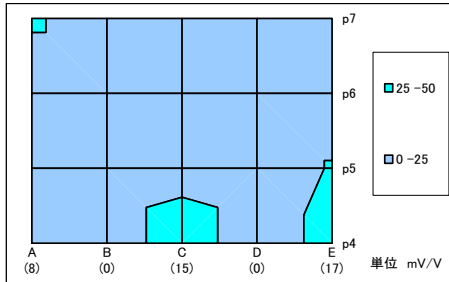
上記の測定傾向から、ひび割れ発生の有無に関わらず、外的塩害休止状態のRC構造物の鉄筋位置と腐食状態、空洞位置を見掛け比抵抗を測定することで探查可能と推定している。

(4) 見掛け充電率の測定結果

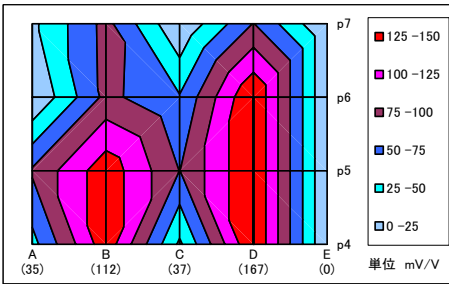
図-26は、1)無筋供試体、2)事前腐食供試体、3)塩分混入供試体、4)電食供試体の表面、5)電食供試体の裏面、の順に材齢242~245日目(表-14参照)の実験で得られた測定探查深度 4cm 位置(図-24参照)の見掛け充電率の

表-17 供試体別と測線別の見掛け充電率平均値一覧

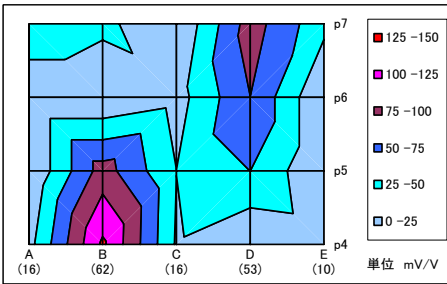
測線 供試体	A 測線	B 測線	C 測線	D 測線	E 測線	平均値
無筋	8	0	15	0	17	8
事前腐食	35	112	37	167	0	70
塩分混入	16	62	16	53	10	31
電食表面	0	28	12	40	30	22
電食裏面	5	78	11	37	4	27
平均値	13	56	18	60	12	32



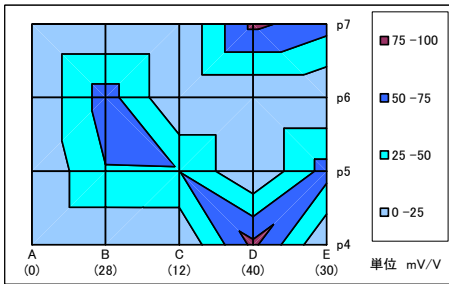
1) 無筋供試体



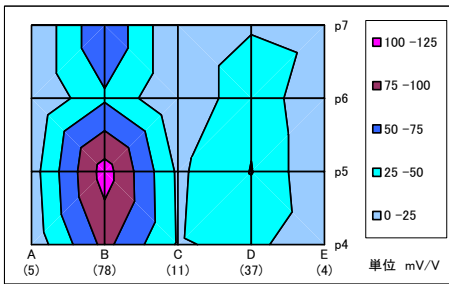
2) 事前腐食供試体



3) 塩分混入供試体



4) 電食供試体(表面)



5) 電食供試体(裏面, 透視図)

図-26 見掛け充電率分布 (電極間隔 $a=4\text{cm}$ 時)

水平分布を示しており、X軸の()内の数字はA～E測線の見掛け充電率の平均値を、Y軸のp4～p7表示は電場1～4の測定探査位置を各々表している。また、表-17は供試体別および測線別の見掛け充電率平均値一覧を示している。これらの検討結果を、以下に列記する。

a) 無筋供試体 (図-26の1) 参照)

他の事前腐食供試体、塩分混入供試体、電食供試体に比べ、見掛け充電率の平均値が小さい(表-17参照)ので、見掛け充電率は鉄筋の存在で発生する現象であることが推定できる。

b) 事前腐食供試体 (図-26の2) 参照)

事前腐食鉄筋位置(D測線)、黒皮付き鉄筋位置(B測線)の順に見掛け充電率が大きく、無筋位置(A, E測線)と空洞位置(C測線)で見掛け充電率が小さい傾向は既報告¹⁰⁾と同様である。

上記の傾向から、鉄筋位置と腐食有無の差異を探査出来ているが、供試体作製以前に鉄筋を腐食させているため、この供試体は実験室のみで作製出来るRC供試体であることに留意する必要がある。

c) 塩分混入供試体 (図-26の3) 参照)

鉄筋位置(B, D測線)で見掛け充電率が大きく、無筋位置(A, E測線)と空洞位置(C測線)で見掛け充電率が小さい傾向は、前述の事前腐食供試体と同様である。そのため、内的塩害が生じているRC構造物においても、見掛け充電率を測定して鉄筋の存在を知ることが可能と推定できる。供試体全体の見掛け充電率平均値は、事前腐食供試体平均値の44%(=31/70, 表-17参照)と小さいので、塩化物の存在は見掛け充電率を下げる傾向があると推定している。

黒皮付き鉄筋位置(62mV/V, B測線)と黒皮除去鉄筋位置(53mV/V, D測線、腐食有無は不明)の見掛け充電率平均値の大小関係は、前述の事前腐食供試体とは逆の傾向なので、内的塩害の場合、見掛け充電率から鉄筋の腐食状態を判断することは困難と推定している。

d) 電食供試体の表面側 (図-26の4) 参照)

図-23の1)に示すようにBとD測線沿いに0.3～1.5mm幅の太いひび割れが生じているにも関わらず、見掛け充電率の式(式(2)参照)を用いてみると、最もひび割れ幅の

大きい黒皮除去鉄筋位置(40mV/V, D測線)の見掛け充電率平均値が、他の測線位置より大きくなる傾向を確認することが出来た。

ただし、黒皮付き鉄筋位置(28mV/V, D測線)の見掛け充電率平均値は、無筋位置(30mV/V, E測線)より小さいため内的塩害と同様、外的塩害休止状態も見掛け充電率から鉄筋腐食状態を判断することは困難と推定している。

e) 電食供試体の裏面側 (図-26の5) 参照)

黒皮付き鉄筋位置(78mV/V, B測線)と黒皮除去鉄筋位置(37mV/V, D測線)の見掛け充電率平均値は、無筋位置や空洞位置の見掛け充電率平均値より大きいので、ひび割れ発生前後の外的塩害休止状態も、見掛け充電率を測定することで鉄筋位置を推定可能と考えられる。

ただし、黒皮付き鉄筋位置(78mV/V, B測線)と黒皮除去鉄筋位置(37mV/V, D測線)の見掛け充電率平均値の大小関係は、事前腐食供試体の黒皮付き鉄筋位置(112mV/V, B測線)と黒皮除去鉄筋位置(167mV/V, D測線)の見掛け充電率平均値とは逆傾向であるため、前述の表面側と同様、外的塩害休止状態の鉄筋腐食状態を見掛け充電率から判断することは困難と推定している。

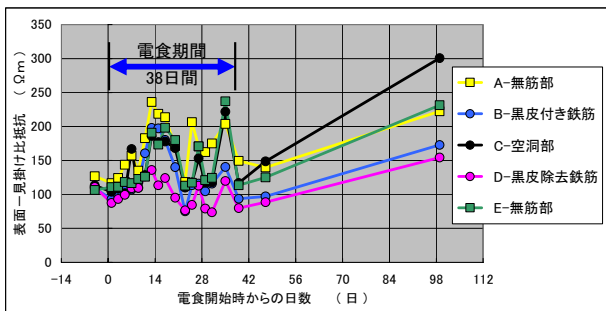
(5) 電食試験中とその前後の測定結果

電食試験開始4日前と、電食試験中(小計16回)、電食試験終了1日後、9日後、61日後の合計20回の見掛け比抵抗履歴とその平均値一覧を、各々図-27と表-18に、同じく見掛け充電率履歴とその平均値を、各々図-28と表-19に示している。なお、前節では電食試験終了後61日目(電食開始後99日目)の見掛け比抵抗と見掛け充電率の水平分布を検討したが、本節では、これらの履歴を検討した。その検討結果を、以下に列記する。

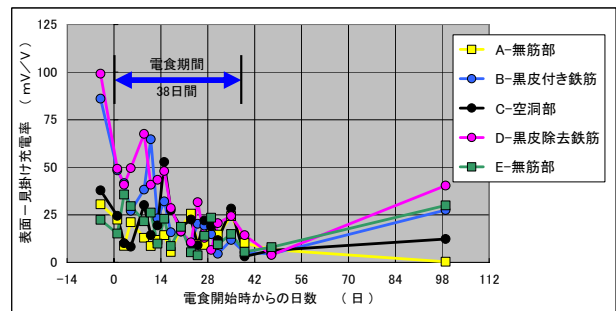
a) 電食試験中とその前後の見掛け比抵抗

裏面側(図-27の2)参照)に比べて、表面側の見掛け比抵抗履歴の変動が激しい理由は、ひび割れ発生が原因と推定している。電食開始16日目に黒皮除去鉄筋位置の表面(D測線)で、電食開始19日目には黒皮付き鉄筋位置の表面(B測線)で、各々目視観察により、ひび割れ発生を確認している。

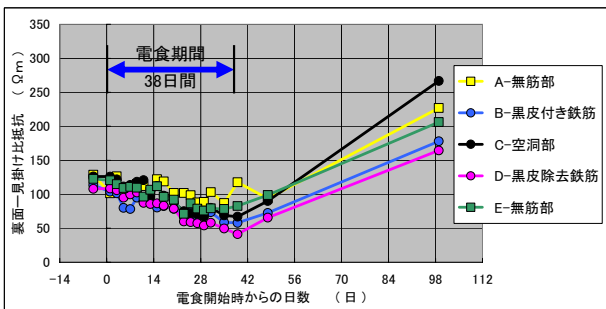
表面側、裏面側とも、一部の例外データを除くと、黒皮除去鉄筋位置(D測線)、黒皮付き鉄筋位置(B測線)、他の測線の順に見掛け比抵抗が小さい(表-18参照)ので、見掛け比抵抗を正確に測定出来れば、鉄筋の位置と、



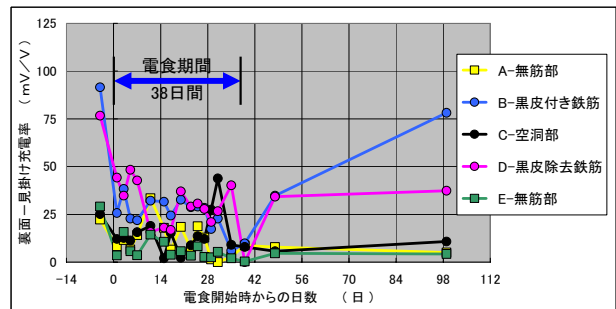
1) 表面から測定した見掛け比抵抗履歴



1) 表面から測定した見掛け充電率履歴



2) 裏面から測定した見掛け比抵抗履歴



2) 裏面から測定した見掛け充電率履歴

図-27 電食供試体の見掛け比抵抗履歴(電極間隔α=4cm時)

図-28 電食供試体の見掛け充電率履歴(電極間隔α=4cm時)

表-18 電食試験中(38日間)の見掛け比抵抗一覧(単位: Ωm)

測線 供試体	A 測線	B 測線	C 測線	D 測線	E 測線	平均値
電食表面	171	129	142	103	146	138
電食裏面	105	80	96	79	96	91
平均値	138	105	119	91	121	115

表-19 電食試験中(38日間)の見掛け充電率一覧(単位: mV/V)

測線 供試体	A 測線	B 測線	C 測線	D 測線	E 測線	平均値
電食表面	15	26	21	33	17	22
電食裏面	11	26	15	31	6	18
平均値	13	26	18	32	12	20

RC構造物毎の相対的な鉄筋腐食状態の判断は可能と考えている。

表面側，裏面側とも，電食試験終了後61日目（電食開始後99日目）での空洞位置（C測線）の見掛け比抵抗は他の測線より大きく（図-27参照）測定されているが，電食試験中の空洞位置の見掛け比抵抗平均値（119Ωm，C測線，表-18参照）は無筋位置（AとE測線）より小さい値である。そのため，電食期間38日間の外的塩害が進行している状態（以下，外的塩害進行状態）のRC構造物の空洞位置を見掛け比抵抗から判断するのは困難と推定している。

b) 電食試験中とその前後の見掛け充電率

電食試験4日前に着目すると，表面側，裏面側とも，鉄筋位置（B,C測線）の見掛け充電率は高く（75mV/V以上，図-28参照），その他の測線は低い（38mV/V以下）傾向が明らかである。しかし，電食開始直後（具体的には1日後）には，表面側，裏面側とも，鉄筋位置（B,C測線）の見掛け充電率が50mV/V以下まで大きく低下する現象が認められる。そのため，外的塩害は，鉄筋位置の見掛け充電率を大きく低下させ，鉄筋位置と他の測線との見掛け充電率の差異を小さくしていると考えられる。

ただし，鉄筋位置と他の測線との見掛け充電率の差異は電食試験開始前ほど大きくないが，表-19に示すように，黒皮付き鉄筋位置（26mV/V，B測線），黒皮除去鉄筋位置（32mV/V，D測線）とも他の測線の見掛け充電率平均値より大きいので，見掛け充電率を正確に測定出来れば，外的塩害進行状態のRC構造物の鉄筋位置を推定可能と考えている。

(6) 測定結果解釈のためのFEM逆解析

a) 逆解析の概要

作成した「無筋モデル」（節点数9625，要素数8160，34×24×10cm³）と「事前腐食，塩分混入，電食モデル」（節点数9600，要素数8064，34×24×10cm³）を図-29に示す。この図に示すように，本節では，鉄筋部と空洞部の位置と形状を既知とした3次元モデルを作成し，主に，黒皮付き鉄筋部と黒皮除去鉄筋部の比抵抗の差異に着目した。

表-15に示す電位測定点と，電極配置面（図-20参照）と反対側面の中央に設置したアース点（電位=零V）間の電位差を，絶対電位と見なして逆解析を実施した点は，3章と同様である。

無筋モデル，事前腐食モデル，塩分混入モデル，電食モデルの表面と裏面も各々表-15に示す電極間隔 $a=4\text{cm}$ 時の絶対電位40個（5測線×4電場×2個）を用いて逆解析と残差算定（式(14)参照）を行った。

b) 逆解析結果

逆解析時の比抵抗の収束状況を図-30に，逆解析で得られた比抵抗を表-20に，測定電位と逆解析電位の相関関係の一例を図-31に，各々示す。これらの図表から，以下のことが考えられる。

無筋モデルでは，コンクリート部の比抵抗として166Ωmの逆解析結果が得られたが，図-30の1)に示す比抵抗の収束状況や，表-20の1)に示す比較的小さな残差（逆解析22回目で10.7%）から判断して，妥当な結果と考えている。

表-16に示す無筋供試体のB,C,D測線（196, 188, 180Ωm）に比べ，AとE測線（203, 224Ωm）の見掛け比抵抗の平均値が大きい原因は，主に供試体端部である幾何学的な影響と推定している。この現象を確認するため，コンクリート部を166Ωm（表-20の1）と図-30の1）参照）とした「無筋モデル」の見掛け比抵抗の解析値を算出すると，測定結果と同様，モデル端部のAとE測線の見掛け比抵抗が大きくなった（A,E測線とも215Ωm，図-32参照）。

事前腐食モデルでは，コンクリート部が157Ωm，黒皮付き鉄筋部が731Ωm，黒皮除去鉄筋部が119Ωmの逆解析結果となり，「黒皮付き鉄筋部の比抵抗がコンクリート部の約4.7倍と大きいこと」，「黒皮除去鉄筋の比抵抗が20Ωm以下と小さいこと」とも既報告¹⁰⁾と同様の結果となった。

塩分混入モデルでは，コンクリート部が134Ωm，黒皮付き鉄筋部が12Ωm，黒皮除去鉄筋部が9Ωmの逆解析結果となった。無筋モデル，事前腐食モデル，電食モデルで得られたコンクリート部の比抵抗に比べて，塩分混入モデルのコンクリート部の比抵抗が17~48%（表-20参照）小さい傾向は，表-16に示す見掛け比抵抗でも同様であったので，塩化物の存在は比抵抗を小さくする傾向があると推定している。また，黒皮付き鉄筋部の比抵抗

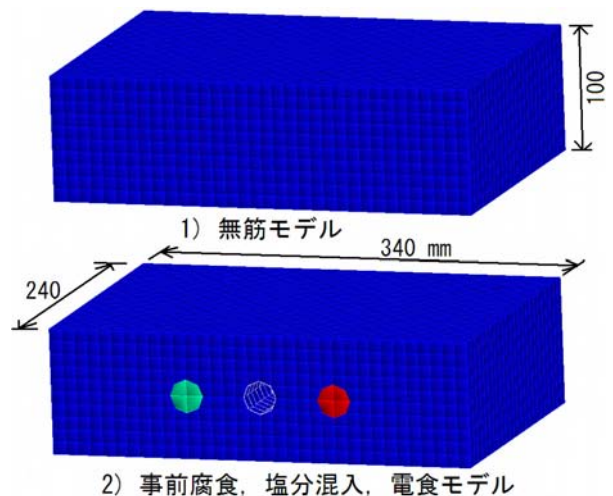


図-29 鉄筋腐食要因の影響検討用3次元モデル

表-20 逆解析で得られた比抵抗と電位の残差

1) 無筋モデル

逆解析回数	コンクリート Ω_m	残差 r %
0	90,000	54.468
10	195.0	19.7
11	169.5	10.8
15	165.7	10.7
22	165.7	10.7

2) 事前腐食モデル

逆解析回数	コンクリート Ω_m	黒皮付き鉄筋 Ω_m	黒皮除去鉄筋 Ω_m	残差 r %
0	90,000	90,000	90,000	59.982
10	188.6	485.9	26.7	24.9
11	161.4	796.4	14.7	13.1
15	156.9	730.8	11.4	12.1
22	156.9	730.6	11.4	12.1

3) 塩分混入モデル

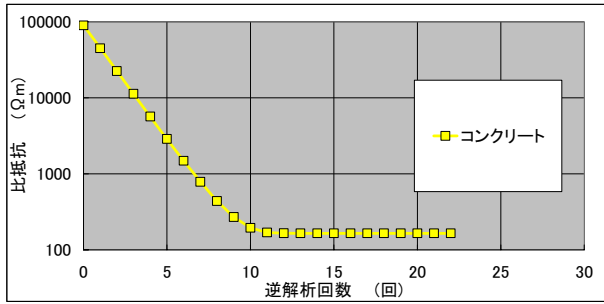
逆解析回数	コンクリート Ω_m	黒皮付き鉄筋 Ω_m	黒皮除去鉄筋 Ω_m	残差 r %
0	90,000	90,000	90,000	75.069
10	173.8	26.9	23.6	36.7
11	142.2	15.0	12.4	16.6
15	134.3	12.0	9.0	14.0
22	134.3	12.0	9.0	14.0

4) 電食モデル(表面)

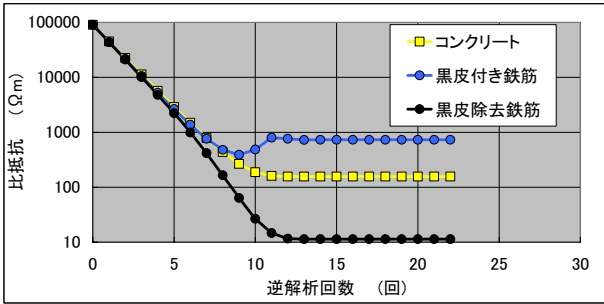
逆解析回数	コンクリート Ω_m	黒皮付き鉄筋 Ω_m	黒皮除去鉄筋 Ω_m	残差 r %
0	90,000	90,000	90,000	50.592
10	223.7	27.9	23.8	28.1
11	201.0	18.5	15.9	23.2
15	197.9	16.9	14.8	23.1
22	197.9	16.9	14.8	23.1

5) 電食モデル(裏面)

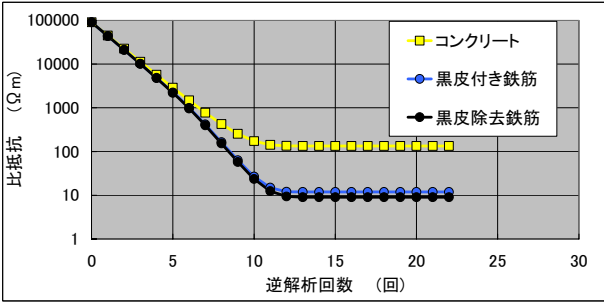
逆解析回数	コンクリート Ω_m	黒皮付き鉄筋 Ω_m	黒皮除去鉄筋 Ω_m	残差 r %
0	90,000	90,000	90,000	52.482
10	211.2	68.7	30.4	24.7
11	187.4	52.9	19.5	17.3
15	184.0	50.9	17.5	17.0
22	184.0	50.9	17.5	17.0



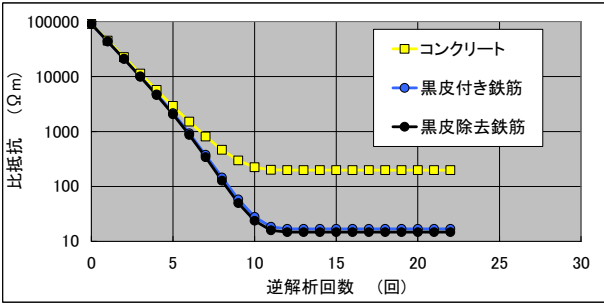
1) 無筋モデル



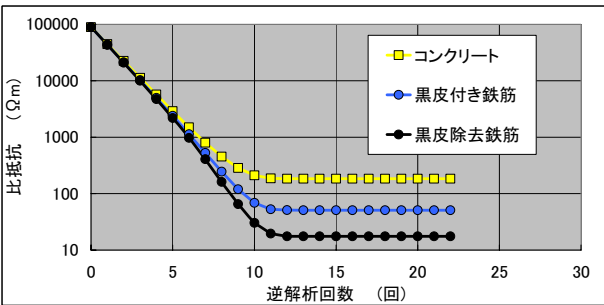
2) 事前腐食モデル



3) 塩分混入モデル

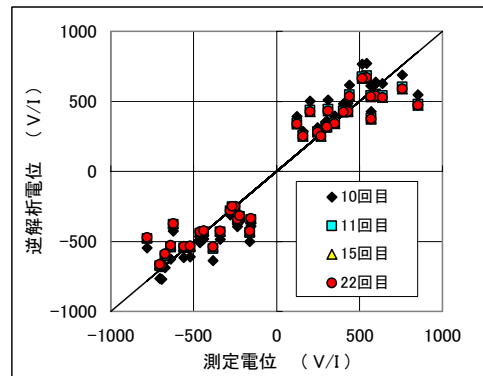


4) 電食モデル(表面)



5) 電食モデル(裏面)

図-30 逆解析時の比抵抗の収束状況



注) 測定電位と逆解析電位の相関関係の一例。

図-31 電食モデル(表面)の測定電位と逆解析電位の相関関係

も12 Ω_m と比較的小さいので、塩分混入モデル中の材齢244日の黒皮は鉄筋保護機能が消失と考えられる。

測定電位と逆解析電位の残差(式(14)参照)が23.1%

と比較的大きいので精度の良い逆解析結果とは言えないが、電食モデル表面（電解液の湛水側）では、コンクリート部が $198\Omega m$ 、黒皮付き鉄筋部が $17\Omega m$ 、黒皮除去鉄筋部が $15\Omega m$ の逆解析結果となった。0.1~1.5mm幅のひび割れが生じた電食供試体（図-23参照）を、図-29の2）に示す（ひび割れを無視した）連続体モデルで逆解析したにも関わらず、塩分混入モデルや電食モデル裏面と同様の比抵抗（黒皮除去鉄筋部<黒皮付き鉄筋部<<コンクリート部）が算出された。そのため、ひび割れが生じたRC構造物の比抵抗を、ひび割れを無視した3次元FEMモデルを用いて逆解析により算出することは、実用上は可能と推定している。

電食モデル裏面では、コンクリート部が $184\Omega m$ 、黒皮付き鉄筋部が $51\Omega m$ 、黒皮除去鉄筋部が $18\Omega m$ の逆解析結果となった。0.1~0.2mm幅、全長約9cmのひび割れが1本生じただけ（図-23の2）参照）であるため、黒皮除去鉄筋部の比抵抗は、事前腐食モデルや塩分混入モデルと同様の比較的低い値となった。一方、黒皮付き鉄筋部の比抵抗は、黒皮除去鉄筋部の約2.8倍（ $=51\Omega m / 18\Omega m$ ）となり鉄筋腐食状態で差が生じたと考えられる。

実験を行った「黒皮付き健全鉄筋（事前腐食供試体のB測線直下）」から「0.5~1.5mm幅のひび割れが生じた塩害による腐食鉄筋（電食供試体表面のD測線直下）」の範囲では、同モデル中の黒皮付き鉄筋部は、黒皮除去鉄筋部の比抵抗より、大きな値となった。そのため、上記の腐食範囲では、鉄筋腐食が激しいほど低い比抵抗が

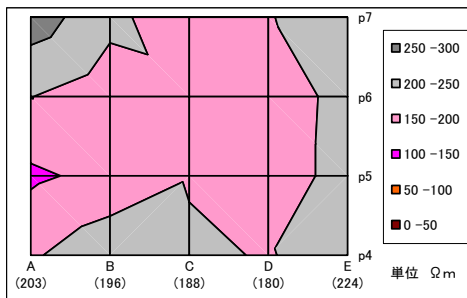
得られると考えられる。また、黒皮付きの健全鉄筋部は、コンクリート部より約4.7倍（ $=731\Omega m / 157\Omega m$ 、表-20の2）参照）高い比抵抗が得られたので、FEM逆解析により比較的容易に鉄筋の健全性が判断できると考えている。

5. 見掛け充電率と(見掛け)比抵抗の概略関係

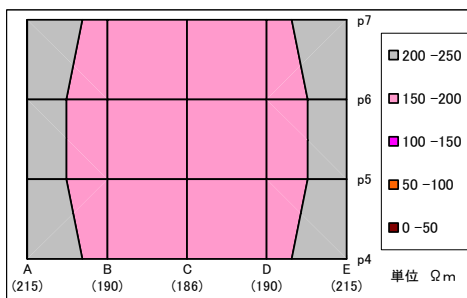
既報告⁹⁾¹⁰⁾と本論文で測定した12供試体（表-21参照）から得られた「見掛け充電率と見掛け比抵抗の概略関係」及び「見掛け充電率とFEM逆解析で得られた比抵抗の概略関係」を各々図-33の1)と2)に示す。図-33のX軸に関して、見掛け比抵抗と、FEM逆解析で得られた比

表-21 12供試体の概要

大きさ 長さ	cm x cm x cm		W/C %	材齢 日	鉄筋の 有無	供試体の 個数	備考
	奥行	幅					
34	24	8	60	315	D16	1 (電食供試体1)	既報告 ⁹⁾
34	24	8	40	29~32	無し	1	既報告 ¹⁰⁾
					D10, D16, 3xD16	3	
75	10	12	50	75~77	無し	2	3章参照
					D29	1	
34	24	10	45	242~245	無し	1	4章参照
					D25	3 (電食供試体1)	

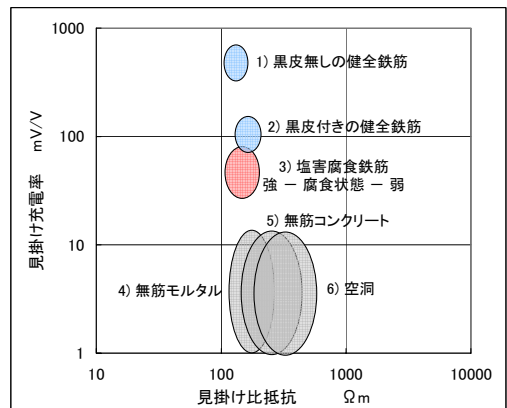


1) 無筋供試体の見掛け比抵抗(測定値)



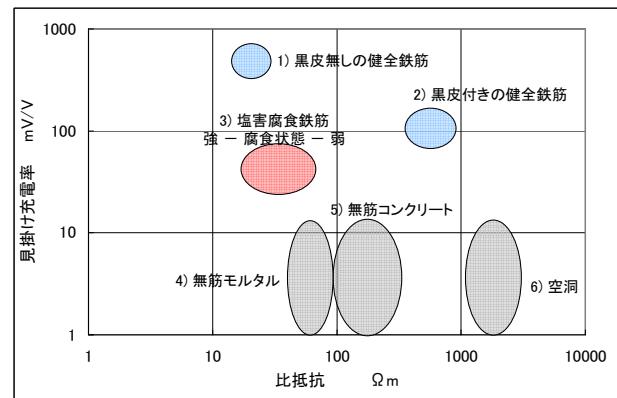
2) 無筋モデルの見掛け比抵抗(166Ωm均質時の解析値)

図-32 見掛け比抵抗の測定分布と解析分布
(電極間隔a=4cm時)



注)
6)の空洞は水分や固体を含まない単なる空隙。

1) 見掛け充電率と見掛け比抵抗



2) 見掛け充電率と比抵抗

図-33 見掛け充電率と(見掛け)比抵抗の概略関係

抵抗の2種類で整理している理由は、以下に示すように各々欠点と長所を有するためである。

1) 見掛け比抵抗は、供試体や構造物の大きさ、電極間隔等で変化するが、電流と電位を測定するだけで値が得られるのが長所である。2) FEM逆解析で得られる比抵抗は、FEMモデルの作成、逆解析の実行等の手間が発生するが、鉄筋やコンクリート自体の電気の通し難さを表す値であることが長所である。

図-33の留意点を以下に示す。まず、電極間隔 a でも見掛け比抵抗、見掛け充電率とも変化するので、「電極間隔 a ≒鉄筋や空洞のかぶり」と設定した。見掛け比抵抗(図-33の1)参照)に比べ、FEM逆解析で得られた比抵抗(図-33の2)参照)は直接、検討箇所の比抵抗が得られるため、絶対値(具体的にはX軸)の幅が大きくなっている。検討対象としたRC供試体の材齢は、最長でも315日と比較的若材齢である。一方、乾燥状態にある既設RC構造物のコンクリート部は電気を通し難くなるため、見掛け比抵抗や比抵抗が10倍以上²⁰⁾、高くなる可能性もあると予想している。また、今回の電食試験で得られたRC供試体表面の最大ひび割れ幅は約1.5mmで錆汁も認められるが、裏面は比較的きれいな状態であったので、ひび割れ鉄筋全周に断面欠損が生じている状態ではなく劣化過程「加速期」^{21)~23)}と考えている。

図-33の特徴を以下に列記する。1) 黒皮は電気を通し難いので、黒皮付きの健全鉄筋は、黒皮無しの健全鉄筋に比べて見掛け比抵抗、比抵抗とも高い傾向が得られた。2) 塩害腐食鉄筋は、その腐食状態が激しいほど見掛け比抵抗、比抵抗とも低くなる傾向が得られた。3) 黒皮無しの健全鉄筋は、黒皮付きの健全鉄筋や塩害腐食鉄筋に比べて見掛け充電率が高い測定結果となった。

本研究の現時点での成果を踏まえ、図中の各楕円の左右関係や上下関係を示したが、個々の楕円の大きさや形状等を明確にしていくことは今後の重要課題と考えている。

6. まとめ

RC構造物の鉄筋位置と腐食状態を非破壊で推定することを主目的に、携帯型電気測定装置を開発し、直流比抵抗法と強制分極法を用いた実験と、逆解析手法を用いた三次元有限要素法解析を行って、以下の結論を得た。

- 1) 携帯型電気測定装置(図-3参照)を用いて、RC供試体の測定結果を模擬した検定回路の電流と電位を測定した。それら測定値は、線形加速度法による解析電流および解析電位と近似していることを確認できたので、携帯型電気測定装置は十分実用可能と判断した。
- 2) 高さ75cmの無筋鉛直供試体の見掛け比抵抗とFEM逆解

析結果(最上部=101Ωm, 最下部=142Ωm)から、コンクリートの比抵抗は、打設方向の影響を受ける(具体的にはコンクリート打設上面ほど比抵抗が小さい)ことが確認できた。

- 3) コンクリートとモルタルが半分ずつの無筋水平供試体の見掛け比抵抗とFEM逆解析結果(コンクリート部=96Ωm, モルタル部=55Ωm)から、コンクリート(粗骨材の岩種は流紋岩質安山岩)に比べモルタルの方が、比抵抗が低いことが確認できた。
- 4) 最大1.5mm幅のひび割れが生じた電食試験進行中と、その後61日間、気中放置した電食試験終了後とも、鉄筋腐食状態が激しい方(具体的には黒皮付き鉄筋より、供試体作製以前に黒皮を除去した鉄筋)が、鉄筋位置の見掛け比抵抗は低い値になった。上記の電食試験終了後のRC供試体をFEM逆解析した際も、腐食状態が激しい鉄筋の比抵抗が低い値(裏面の逆解析結果では、黒皮付き鉄筋=51Ωm, 黒皮除去鉄筋=18Ωm)になった。
- 5) 黒皮無しの健全鉄筋、黒皮付きの健全鉄筋、塩害腐食鉄筋、無筋コンクリートの順に見掛け充電率が低下する測定結果となった。また、電食試験開始1日後から、黒皮の有無に関わらず、鉄筋位置の見掛け充電率が1/2前後まで減少したので、見掛け充電率は塩化物の影響を受けて消散しやすい測定値と考えられる。

なお、「電食供試体は、外的塩害が生じているRC構造物」、「塩分混入供試体は、内的塩害が生じているRC構造物」と仮定して本研究を実施したが、室内のRC供試体と、実際のRC構造物の劣化現象とは、異なる電氣的性質が生じている可能性も考えられる。そのため、今後は、本研究で得られた成果を、塩害や中性化で鉄筋腐食^{21)~24)}が生じた既設RC構造物に適用し、直流比抵抗法と強制分極法を用いたRC構造物の鉄筋位置と腐食状態の推定方法のレベルアップを進めていく予定である。

謝辞：携帯型電気測定装置を開発するにあたり、日本テキサス・インスツルメンツ(株)の川田章弘氏^{13), 14)}から多くのご教示を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 武若耕司：コンクリートの非破壊検査方法(原理と手法) —鋼材腐食—, 特集*コンクリートの非破壊検査/3.8, コンクリート工学, Vol.27, No.3, pp.69-74, 1989.
- 2) Monteiro, P. J. M., Momison, F. and Frangos, W. : Nondestructive Measurement of Corrosion State of Reinforcing Steel in Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No.6, pp.704-709, November-December 1998.
- 3) 野口貴文, 友澤史紀, Monteiro, P.J.M., 藤原浩巳：比抵抗・強制分極法によるコンクリート内部の状況探査, 日本建築学会学術講演概要集 A-1, pp.1121-1122, 1998.

- 4) Zhang, J., Monteiro, P. J. M. and Morrison, H. F. : Noninvasive Surface Measurement of Corrosion Impedance of Reinforcing Bar in Concrete-Part 1 : Experimental Result, *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No.2, pp.116-125, March-April 2001.
- 5) 黄光律, 野口貴文, 鹿毛忠継, 曹健 : 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, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.25, pp.1649-1654, No.1, 2003.
- 6) 野口貴文, 林永哲 : コンクリート表面からの鉄筋の位置・腐食状態の完全非破壊検査法—その 1. 鉄筋の位置探査, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, Vol. A-1, pp.809 - 810, 2003.
- 7) 林永哲, 野口貴文 : コンクリート表面からの鉄筋の位置・腐食状態の完全非破壊検査法—その 2. 腐食程度の評価, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, Vol. A-1, pp.811 - 812, 2003.
- 8) 露口雄次, 町田篤彦 : 直流比抵抗法を用いたコンクリート構造物の内部推定に関する基礎的研究, *土木学会第 60 回年次学術講演会*, 5-590, pp.1179-1180, 2005.
- 9) 露口雄次, 町田篤彦 : 携帯型鉄筋腐食度判定装置の開発と試用, *土木学会第 61 回年次学術講演会*, 5-547, pp.1089 - 1090, 2006.
- 10) 露口雄次, 町田篤彦 : 直流比抵抗法を用いた RC 構造物の内部推定に関する基礎的研究, *土木学会論文集 E*, Vol. 62, No.4, pp.641-656, 2006.10.
- 11) 物理探査学会 : 図解物理探査, pp.53-62, 1989.
- 12) 島裕雅, 梶間和彦, 神谷英樹 : 建設・防災・環境のための新しい電気探査法/比抵抗映像法, *古今書院*, pp.12 - 189, 1995.
- 13) 川田章弘 : 差動増幅器とインスツルメンテーション・アン
プの使い方, *IC レビュー実験室 (第 3 回)*, *トランジスタ技術*, pp.225-237, CQ 出版, 2004.3.
- 14) 川田章弘 : 差動アンプとインスツルメンテーション・アン
プの評価実験, *IC レビュー実験室 (第 4 回)*, *トランジスタ技術*, pp.223-230, CQ 出版, 2004.4.
- 15) 力武常次, 清水光治 : チャート式シリーズ新物理, pp.275 - 370, 数研出版, 1970.
- 16) 大崎順彦 : 地震動のスペクトル解析入門, pp.43 - 111, 鹿島出版会, 1987.
- 17) C. R. ワイリー (富久泰明訳) : 工業数学 (上), pp.141 - 177, プレイン図書, 1976.
- 18) Mario Paz (木村欽一訳) : パソコンで解く振動と力, pp.68 - 92, 丸善, 1989.
- 19) 佐々宏一, 芦田謙, 菅野強 : 建設・防災技術者のための物理探査, pp.128 - 130, 森北出版, 1993.
- 20) 小林一輔編集, 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三共著 : コン
クリート構造物の耐久性診断シリーズ 3/鉄筋腐食の診断, pp.24-48, 森北出版, 1993.
- 21) コンクリート工学協会 : コンクリート診断技術 '01[基礎編], pp.180-185, 2001.
- 22) 魚本健人 : コンクリート診断学入門/建造物の劣化対策, pp.88-91, 朝倉書店, 2004.
- 23) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編 : 鉄道構造
物等維持管理標準・同解説 (構造物編) コンクリート構造
物, pp.249-250, 丸善, 2007.
- 24) 小林一輔, 和泉意登志, 出頭圭三, 睦好宏史 : 図解コンク
リート事典, pp.1-43, オーム社, 2001.

(2007. 2. 22 受付)

APPLICATION OF ELECTRICAL EXPLORATION METHOD TO PRESUME POSITIONS AND CORROSION STATE OF REINFORCING BARS IN CONCRETE

Yuji TSUYUGUCHI and Atsuhiko MACHIDA

Nowadays the half cell potential method or the polarization resistance method is mainly used as a non-destructive testing method to presume corrosion state of reinforcing bars in concrete. In these methods, however, some destruction works are needed such as to expose edges of reinforcing bars from concrete.

Considering these situations, fundamental studies were executed to presume the positions and the corrosion state of reinforcing bars in concrete structures using the direct current resistivity method and the induced polarization method, in which no destruction works are needed.

In order to achieve high accuracy and site applicability a portable electric measurement device was newly developed for reinforced concrete structures. In the experiment, the influence given to the apparent resistivity and the apparent chargeability whose differences between the corrosion state and the corrosion causes of reinforcing bars, etc. are the electrical nature of the reinforced concrete structure was examined. In addition, several kinds of inversion analysis were carried out using the three dimensional electric field program, which was already reported, and the validity of the experimental results were confirmed.