

報告 中性化と内部塩分環境下における鉄筋腐食状況の電気化学的評価

井上 寛美^{*1}・鳥取 誠一^{*2}・神野 嘉希^{*3}・北後 征雄^{*4}

要旨：コンクリート中に塩分を含み、中性化が鉄筋位置程度までに達した供試体の暴露試験を行い、自然電位、分極抵抗、分極曲線を測定した。その結果、水セメント比70%、塩化物イオン量 2 kg/m^3 、促進中性化深さ20mmとした供試体では、暴露初期から、腐食状態にあり、6箇月程度でひび割れが生じたものもあった。

キーワード：鉄筋腐食、電気化学的評価、中性化、内部塩分

1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理の上で、補修の要否あるいは放置した場合の劣化進行度等が問題となる場合が少なくない。しかしながら、現状ではこれらに対する定量的な評価法は必ずしも確立されておらず、各機関で研究が進められている段階にある。

筆者らは、コンクリート中に塩分が存在する環境下で、中性化が鉄筋位置程度までに達した場合の鉄筋腐食を把握するための暴露試験を実施している。本論は、暴露試験中に測定した自然電位、分極抵抗等を基に、コンクリート中の鉄筋の腐食状況を検討したものである。

2. 試験の概要

2. 1 供試体の製作

試験に用いた供試体を図-1および表-1に示す。コンクリートには、普通ポルトランドセメント、細骨材（酒匂川産）、粗骨材（大月市初狩産、 $G_{max}=10\text{mm}$ ）およびAE減水剤を用いた。コンクリートの配合は表-2のとおりで、大部分の供試体には、塩化物イオン量が 2 kg/m^3 になるように食塩を添加した。

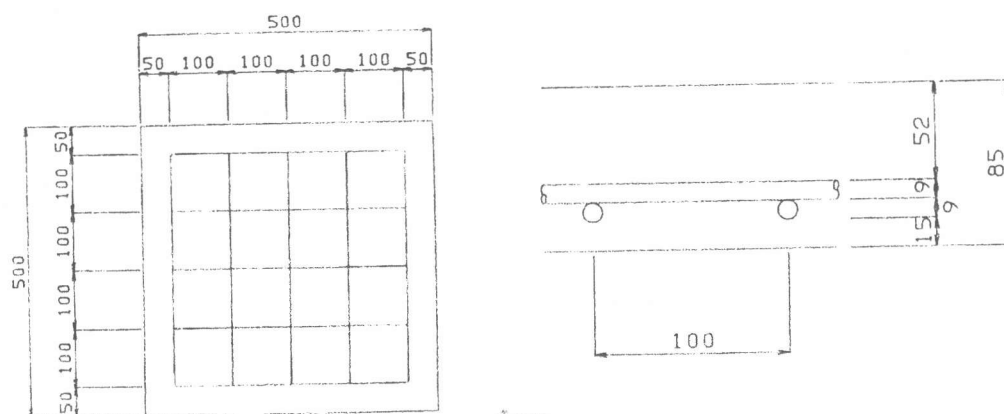


図-1 供試体の概要

* 1 財鉄道総合技術研究所 構造研究室 副主任研究員（正会員）

* 2 財鉄道総合技術研究所 構造研究室 主任研究員（正会員）

* 3 西日本旅客鉄道(株) 鉄道本部 施設部 主幹

* 4 ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) 新設計推進室長（正会員）

表-1 供試体一覧

供試体 No.	水セメント比 (%)	塩化物イオン量 (kg/m ³)	促進中性化深さ (mm)	製作 時期	供試体 数	コンクリート中の 鉄筋の導通状態
1	70	2	20	94. 2	2	絶縁
2	70	2	20	94. 5	4	導通
3	70	2	20	94. 7	1	導通
4	70	2	20	94. 12	1	導通
5	70	5	20	94. 12	2	導通
6	70	2	0	94. 12	1	導通
7	70	0	20	94. 7	2	導通
8	60	0	20	94. 4	3	2体導通、1体絶縁
9	60	0	10	94. 4	1	導通

表-2 コンクリートの配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラング (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
10	10	4	70	48	173	247	882	955
	13	4	60	47	177	295	839	964

鉄筋にはφ9mmのみがき丸鋼(SS41)を使用した。電気化学的測定のため、供試体にはリード線を継いだ。一部の供試体ではコンクリート中では鉄筋を絶縁し、すべての鉄筋にリード線を接続した。これらの供試体では、測定時以外は供試体外で電氣的に接続した状態とした。供試体は1994年2月から12月までの間、5回に分けて製作した。

2. 2 暴露試験

(1) 暴露試験方法

供試体製作後、材齢2日まで湿潤養生を施し、材齢5日まで気中養生を行った。その後、供試体は促進中性化槽に存置し、10あるいは20mmの中性化深さを与えた。促進中性化の条件は炭酸ガス濃度10%、温度30℃、湿度60%とした。中性化深さは、同時に製作・養生したダミー供試体により管理した。促進中性化後、供試体は屋外に暴露し、1週に3～4回程度の散水を行った。

(2) 測定項目

暴露期間中、適宜に自然電位、FRA (Frequency Response Analyzer)によるACインピーダンス測定および鉄筋の分極試験を行った。測定には、松岡ら¹⁾が開発した二重のリング状対極と中央の照合電極を一体化した電極(φ65mm)を用いた。なお、既往のデータとの比較のため、二重対極の機能は用いなかった。照合電極には飽和塩化銀電極を使用した。

3. 暴露期間中の外観観察

表-1中のNo.1～3の一部の供試体(水セメント比:70%, Cl⁻:2kg/m³, 中性化深さ:20mm)に鉄筋腐食によると思われるひび割れが、かぶりの小さい中央の鉄筋に沿って発生しているのを暴露後約6箇月で発見した。ひび割れ長さはほぼ鉄筋全長に匹敵していたが、ひび割れ発生の初期のためか、錆汁は溶出していない。

4. 自然電位の測定結果

4. 1 供試体製作直後の自然電位

表-1中のNo. 4~6の供試体の促進中性化前後での自然電位の測定結果を表-3に示す。なお、促進中性化期間は約3週間である。

この結果によれば、促進中性化前（材齢5日）でも、鉄筋の自然電位は相当に卑な状態にあり、促進中性化後においてもほぼ同様な状態であった。

4. 2 暴露後の自然電位

(1) コンクリート中の鉄筋相互の導通を確保した状態での測定

表-1のNo. 1~3およびNo. 7~9の供試体の自然電位の経時変化を図-2に示す。表-1中に示すように、各No.の供試体は複数体あるが、これらの複数の供試体間では自然電位の差は最大でも50mV程度であるため、同図中では複数体の平均値を示してある。

表-3 製作直後の自然電位
(-mV vs Ag/AgCl)

供試体No.	中性化前	中性化後
4	364	406
5	422	422
6	362	—

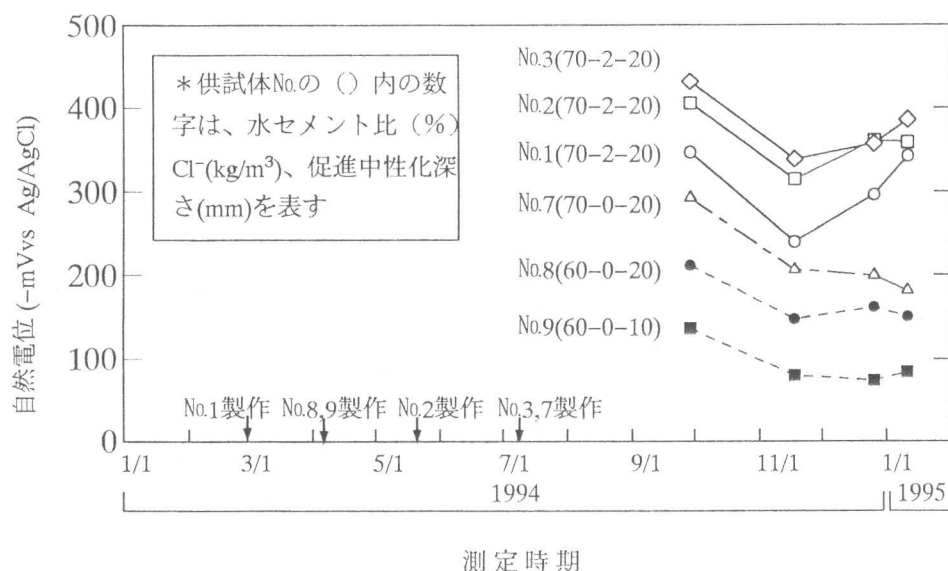


図-2 自然電位の経時変化

この結果によれば、No. 1~3の供試体は製作時期が異なるのみで、配合・暴露条件は同一なため（水セメント比：70%， Cl^- ：2 kg/m³，中性化深さ：20mm），自然電位は -250 ~ -430mV (Ag/AgCl) の範囲にあり，ASTM C-876によれば「90%以上腐食あり」の評価となった。また，経時変化パターンは各供試体ともほぼ同一であることから，温度等が経時変化に影響していると考えられた²⁾。

No. 7の供試体には塩化物イオンが含まれていないため（水セメント比：70%， Cl^- ：0 kg/m³，中性化深さ：20mm），自然電位はやや貴な側にシフトしている。

No. 8, 9の供試体（水セメント比：60%， Cl^- ：0 kg/m³，中性化深さ：10, 20mm）の自然電位は -80 ~ -210mV (Ag/AgCl) 程度であり，ASTMによれば「不確定」の評価となった。

(2) コンクリート中の鉄筋相互を絶縁した状態での測定

表-1に示すように，一部の供試体ではコンクリート中の鉄筋相互を供試体外で導通している

ので、これを絶縁した状態で、自然電位を鉄筋1本ずつ測定した。表-4には、縦横に配筋した下側鉄筋(かぶり15mm)の自然電位の平均値、上側鉄筋(かぶり24mm)の平均値および全鉄筋を導通させた状態で測定した自然電位の平均値を示す。

この結果によれば、下側鉄筋のほうが卑な状態にあること、導通状態で測定した自然電位は下側鉄筋の自然電位に支配されることがわかる。

表-4 コンクリート中の鉄筋相互を絶縁した状態で測定した自然電位

供 試 体 No.	自然電位 (-mV vs Ag/AgCl)		
	下側 鉄筋	上側 鉄筋	全体 鉄筋
1 (70-2-20)	386	296	344
8 (60-0-20)	229	91	195

5. ACインピーダンス法による分極抵抗

FRAによるACインピーダンスの測定結果を表-5に示す。測定位置は供試体のほぼ中央付近であり、ひび割れの生じている供試体では、ひび割れ位置に該当している。

表-5 ACインピーダンス測定結果

供 試 体 No.	1994.9 測定		1995.1 測定		備 考
	コンクリートの抵抗 R_s (k Ω)	分極抵抗 R_p (k Ω)	コンクリートの抵抗 R_s (k Ω)	分極抵抗 R_p (k Ω)	
1 ~ 3 (70-2-20)	0.3	0.2	0.6	0.2	7体の平均値
7 (70-2-0)	0.8	0.4	1.1	1.3	2体の平均値
8 (60-0-20)	8-1	1.5	0.6	2.5	—————
	8-2	1.2	0.2	1.5	
	8-3	1.4	91	3.2	
9 (60-0-10)	1.4	1.0	1.7	8.0	—————

*供試体No. ()内の数字は、水セメント比(%), $C\ell^-$ (kg/m³), 促進中性化深さ(mm)を表す。

No.1~3のコンクリートの抵抗 R_s 、分極抵抗 R_p は他の供試体に比べ非常に小さい。代表的なBode線図およびCole-Coleプロットを図-3(1)に示す。低周波側は1mHzまで測定したが、Bode線図はほぼ直線であり、Cole-Coleプロットは位相差も小さいため、つぶれた半円の軌跡を示している。なお、高周波側の半円は測定電極自体のインピーダンスと考えられる。

No.7の供試体には塩化物イオンが含まれていないため(水セメント比:70%, $C\ell^-$:0 kg/m³, 中性化深さ:20mm), やや分極抵抗が高いようであった。

供試体No.8では、3体の供試体の分極抵抗が0.2~91 k Ω と非常に異なった値を示した。この原因は明確でないが、供試体の中性化深さにばらつきが生じていることも推測される。最も分極抵抗が大きい場合の結果を図-3(2)に示す。

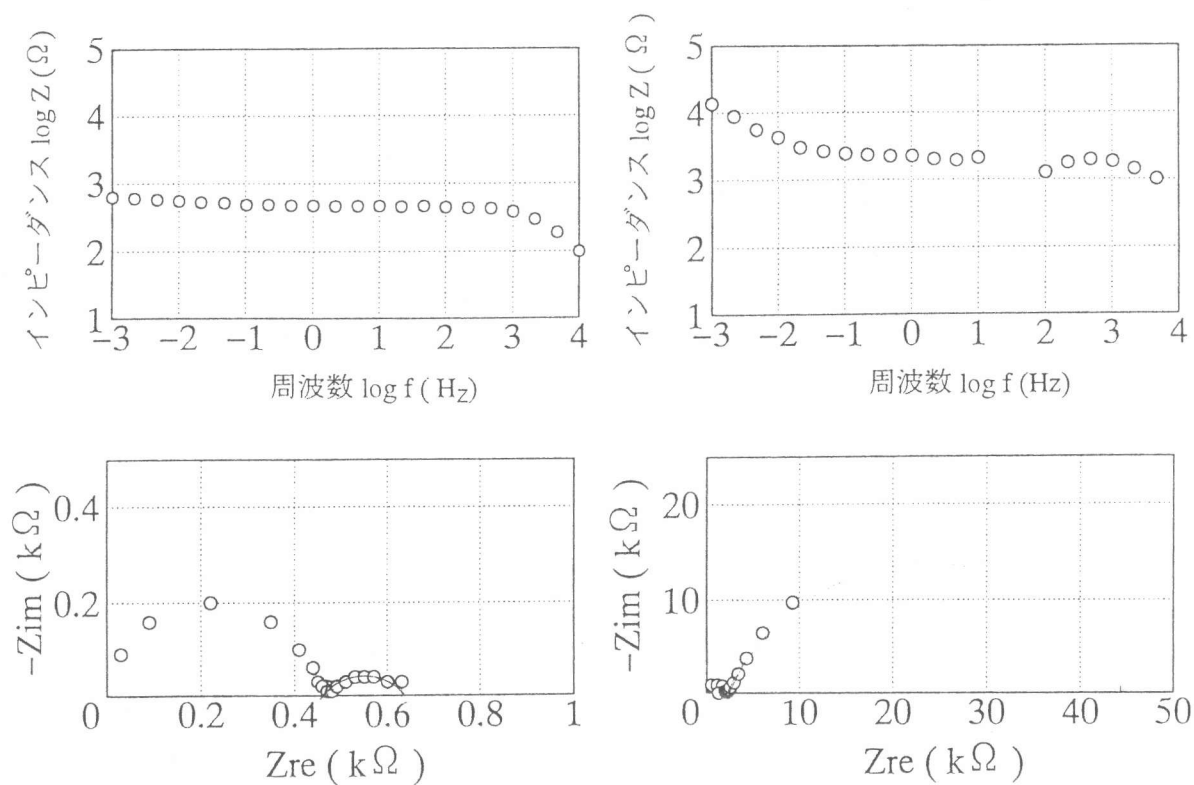
また、供試体No.8とNo.9は中性化深さが異なるが、この条件が R_s 、 R_p に与える影響は必ずしも明確でなかった。

6. 鉄筋の分極試験および鉄筋腐食速度の検討

コンクリート内で鉄筋相互を絶縁した供試体を用いて分極試験を行った。結果を図-4に示す。

No.1-1(水セメント比:70%, $C\ell^-$:2 kg/m³, 中性化深さ:20mm)とNo.8-3(水セメント比:60%, $C\ell^-$:0 kg/m³, 中性化深さ:20mm)のアノード、カソード両分極曲線の立上り位置の電流量を比較すると、前者の電流量のほうが大きく、自然電位、ACインピーダンス測定の結果とも定性的に符合した。また、分極曲線の測定は0.1mV/sec, 1mV/secの両方について実施したが、

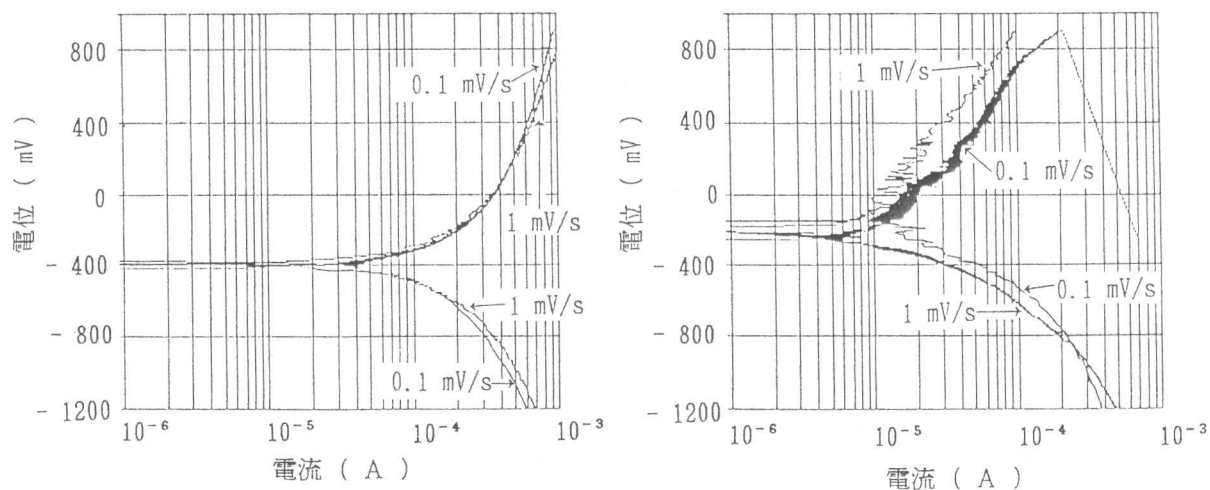
顕著な差は認められなかった。



(1) Na 2 - 1 (70-2-20)

(2) Na 8 - 3 (60-0-20)

図-3 Bode線図およびCole-Coleプロット



(1) Na 1 - 1 (70-2-20)

(2) Na 8 - 3 (60-0-20)

図-4 鉄筋分極曲線

式(1) および表-5 から求まる分極抵抗 R_p を用いて、ファラデー則により鉄筋腐食量を試算した。式(1) 中の K は、既往の研究⁸⁾ に基づき 27mV の値を用いた。

$$I_{corr} = K / R_p$$

(1)

鉄筋腐食量算定の際、鉄筋表面積は測定電極の径の2倍 ($6.5 \times 2 = 13$ cm)の長さの表面積とした。また、暴露期間は6箇月とした。結果は、表-6に示すとおりである。供試体No.1-1(70-2-20)の鉄筋腐食量は 15 mg/cm^2 となったが、一般には 10 mg/cm^2 程度でひび割れが生じるとされていること⁴⁾、本供試体には腐食ひび割れが生じていることから、計算鉄筋腐食量はオーダー的には概ね妥当とも考えられる。しかしながら、腐食ひび割れは同一配合の供試体すべてに生じているわけではなく、今後、供試体解体時の鉄筋腐食量調査等により、より詳細な検討を行う必要があると考えられる。

表-6 鉄筋腐食量の試算

供試体 No.	分極抵抗 R_p ($k\Omega$)	腐食電流 i_{corr} (μA)	鉄筋 腐食量 (mg/cm^2)
1-1	0.23	120	15
8-3	43	0.6	0.04

また、供試体No.8-3(60-0-20)は分極抵抗 R_p が大きく、腐食量は僅かであろうことが推測された。

7. まとめ

コンクリート中に塩分を含み、中性化が鉄筋位置程度までに達した供試体の暴露試験を行った結果をまとめると下記のようなものである。

- (1) 水セメント比70%, $C \ell = 2 \text{ kg/m}^3$, 中性化深さ20mmの供試体の自然電位は、材齢初期から卑な状態にあり、暴露中もほぼ同程度の電位にあるようであった。一方、同一配合で、塩分を含まない供試体の自然電位は上記供試体よりも貴な側にあり、自然電位に及ぼす塩分の影響が比較的大きいと考えられた。
- (2) ACインピーダンス試験の結果、水セメント比70%, $C \ell = 2 \text{ kg/m}^3$, 中性化深さ20mmの供試体の分極抵抗は非常に小さい値であった。
- (3) 水セメント比70%, $C \ell = 2 \text{ kg/m}^3$, 中性化深さ20mmの供試体の場合には、腐食電流 i_{corr} の値も大きく、計算鉄筋腐食量とひび割れ発生状況が符合する供試体もあった。しかしながら、同一配合の供試体すべてに腐食ひび割れが生じたわけではなく、今後、より詳細な検討が必要であると考えられた。

〔謝 辞〕

本研究の実施に際しては、日本材料学会「コンクリートのひび割れ補修に関する基礎的調査研究委員会（委員長：京都大学教授 藤井 学）」の委員各位に御指導戴いた。とりわけ、宮川 豊章 幹事長（京都大学助教授）には試験計画の段階から懇切な御教授を戴いた。ここに記し、感謝の意を表する。

〔参考文献〕

- 1) Matsuoka, K., Kihira, H., Ito, S. and Murata, T.: Development of a Corrosion Monitoring System for Reinforcing Bars in Concrete. R&D Activities at Nippon Steel, Annual Report 1987
- 2) 松村也寸志, 宮川豊章, 小林茂広: 自然電位法による鉄筋腐食診断の実用化について, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, 1994
- 3) 岡田 清, 小林和夫, 宮川豊章, 本田 哲: 分極抵抗法を用いた鉄筋腐食モニタリングによる補修基準について, 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1983
- 4) 須田久美子, MISRA Sudhir, 本橋賢一: 腐食ひびわれ発生限界量に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, 1992