

論文 中性化による鉄筋腐食への電気化学的非破壊検査の適用性

高木 猛志*1・中川 元宏*2・服部 篤史*3・宮川 豊章*4

要旨：電気化学的非破壊検査による鉄筋腐食状態の評価には様々な規格，提案があるが，中性化による鉄筋腐食への適用性については必ずしも定かではない。本研究は，中性化を主因とする鉄筋腐食状態を電気化学的非破壊検査により推定する場合の適用性を明らかにすることを目的として，促進中性化下の各種ＲＣ供試体を用いて実験を行った。

その結果，中性化を主因とする鉄筋腐食では従来の基準より貴な電位で鉄筋腐食が始まること，散水による自然電位の変化はコンクリート抵抗の変化と相関が高いこと，および分極抵抗とコンクリート抵抗の間に高い相関が認められることなどが明らかとなった。

キーワード：鉄筋腐食診断，中性化，自然電位，分極抵抗，コンクリート抵抗（液抵抗）

1. はじめに

近年，高度経済成長期に大量に構築されたＲＣ構造物の早期劣化による変状が，施設管理者にとって切実な問題となっている。ＲＣ構造物では，コンクリート中の鉄筋腐食が，耐久性能を低下させる最大の要因であり，その腐食状態を的確に把握することが重要である。

このような背景の下，ＲＣ構造物中の鉄筋腐食状態を調べるための非破壊検査手法に関する研究が行われ，自然電位法および分極抵抗法などの電気化学的手法の有用性が確認されており，実構造物への適用事例も多い。しかし，測定方法や評価方法などについては，検討の余地が残されている状態¹⁾でもある。

また，これまでは，鉄筋腐食の原因となる劣化要因として塩害が主に取り上げられてきたが，最近では，高欄等の薄層部材で，中性化や中性化を主因とする塩害との複合劣化によるかぶりコンクリートのはく落の事例もみられる。その一方で，電気化学的手法で測定される自然電位による鉄筋腐食の評価は，塩害による鉄筋腐食事例に基づき定められたものである²⁾など，中性化が主因の鉄筋腐食に対する適用性について

は，現状では必ずしも定かではなく³⁾，さらなる検討が必要である。

また，電気化学的手法を用いた測定の際には，コンクリート表面に十分な散水を行う必要があるが，散水により測定値が変化するため，散水が測定値に与える影響の把握も必要である。

本研究では，中性化を主因とする鉄筋腐食状態を，電気化学的非破壊検査で得られる自然電位，分極抵抗およびコンクリート抵抗（液抵抗）により推定する場合の適用性を明らかにすることを目的として，促進中性化下の各種ＲＣ供試体を用いて実験を行った。

2. 実験概要

供試体は，図 - 1 に示す角柱とした。試験要因は，表 - 1 に示す水セメント比（ W/C ），かぶ

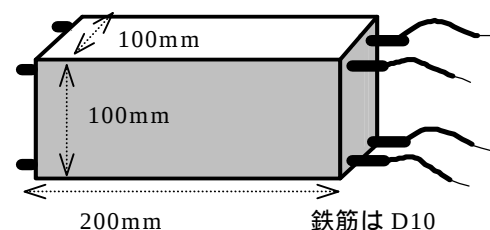


図 - 1 供試体図

*1 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻（正会員）

*2 阪急電鉄(株)鉄道技術部構造物メンテナンス担当（正会員）

*3 京都大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 博士（工学）（正会員）

*4 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博（正会員）

表 - 1 試験要因

要因 シリーズ	W / C (%)	かぶり (cm)	Cl ⁻ (kg/m ³)
70-1-0	70	1.0	0.0
70-1-0.3	70	1.0	0.3
70-1-3	70	1.0	3.0
70-2-0	70	2.0	0.0
55-1-0	55	1.0	0.0
55-1-0.3	55	1.0	0.3
55-1-3	55	1.0	3.0
55-2-0	55	2.0	0.0

りおよび含有塩分量 (Cl⁻) とした。塩分は、コンクリート標準示方書による上限である 0.3kg/m³、多量に含む場合として 3.0kg/m³、および含まない場合の 3 通りの含有量を設定し、それぞれ打設時の練混ぜ水に混入して外割で与えた。各供試体は材齢 1 日で脱型し、材齢 28 日まで水中養生した。なお、シリーズの名称は、水セメント比 - かぶり - 含有塩分量とした。

その後、温度 30℃、CO₂ 濃度 5%、RH55% で 100 週まで促進中性化を行い、促進中性化 2 週、4 週、8 週、50 週および 100 週で、自然電位 (vs Ag/AgCl)、分極抵抗 (高低 2 周波法)、およびコンクリート抵抗 (液抵抗；高低 2 周波法の高周波側) を測定した。

散水が測定値の変化に与える影響を検討するため、「霧吹きによる 1 分間の散水」、その後「水を十分に含ませたスポンジで覆い、1 時間の散水」の 2 通りの散水を行い、中性化槽より取出した状態、および上記の 2 通りの方法で散水した状態で、各測定および表面含水率の測定 (高周波容量式水分計) を行った。

促進中性化 100 週には、供試体より鉄筋を取出し、目視により鉄筋の腐食度を判定した。

3. 実験結果および考察

3.1 自然電位と鉄筋腐食状態

促進中性化 100 週における、実測の自然電位および目視により判定した鉄筋腐食度を図 - 2 に示す。縦軸の左に示す腐食度と電位の関係は、塩害を主因とする鉄筋腐食を表面含水率 6% 以上で測定した自然電位により提案された基準⁴⁾の例であり、自然電位を測定した時の表面含水率とほぼ同じである。なお、中性化は鉄筋位置より深くまで進んでいた。

実測による腐食度 1 と 2 の境界は、約 -50mV であり、縦軸に示した腐食度の境界より約 100mV 貴である。これらの供試体は塩分を含ん

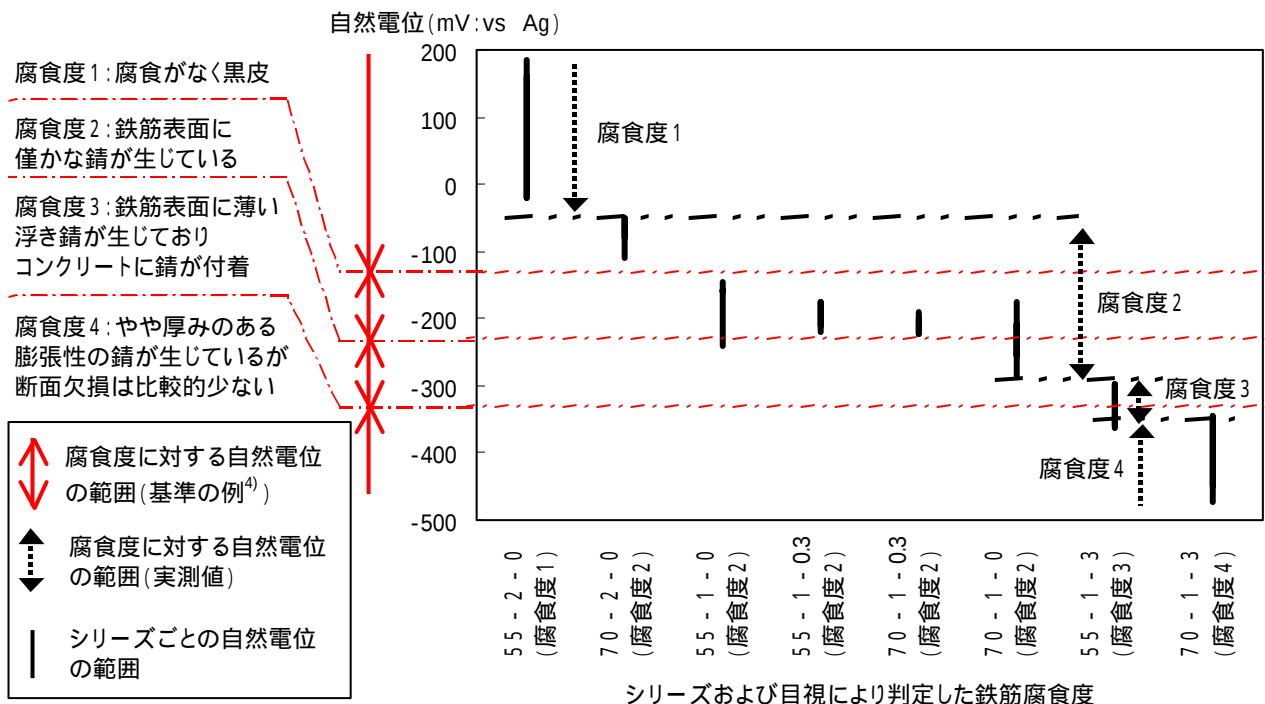


図 - 2 自然電位および鉄筋腐食度 (促進中性化 100 週)

でならず、中性化を主因とする鉄筋腐食については、縦軸に示した基準より貴な電位で鉄筋腐食が始まるものと考えられ、筆者らによる促進中性化初期の測定に基づく指摘⁵⁾および既往の研究⁶⁾と同じ傾向を示す。この原因として、塩分を含まない場合は、かぶりコンクリートでの電位降下が大きくなることが考えられる。

一方、実測による腐食度2と3の境界は、縦軸に示した腐食度の境界より約50mV卑であり、腐食度1と2の境界と逆の傾向が認められるが、この原因については定かではなく、今後の検討課題である。

なお、実測による腐食度3と4の境界は、縦軸に示した腐食度の境界とほぼ同じである。これらの供試体は塩分を多く含んでおり、塩害を主因とする鉄筋腐食については、この基準による評価が妥当であることが確認できる。

3.2 散水が自然電位等の変化に与える影響

中性化槽より取出した状態からの散水による表面含水率の変化を ΔW 、それに伴う自然電位の変化を ΔE と表す。

(1) 塩分量による影響

W/C70%、かぶり1cmで、塩分量のみが異なる場合の ΔW と ΔE の関係を、それぞれ図-3～図-5に示す。

塩分量が 3.0kg/m^3 と多い場合には、 ΔW と ΔE の間に直線的な関係が認められ、その傾きは、散水の方法に関わらずほぼ同じである。また、促進中性化期間による明瞭な相違は認められず、中性化深さの相違による影響はないものと考えられる。一方、塩分を含まない場合は、1分間散水から1時間散水にかけてほぼ同じ傾きで卑に移行するが、1分間散水では自然電位が貴に移行する場合もあり、1時間散水の自然電位の変化は、ばらつきが大きくなっている。

塩分を含まない方が、散水に伴い自然電位が卑に移行する傾きが大きくなるのは、塩化物イオンがかぶりコンクリートの通電性を高めていることが原因であると考えられる。

また、塩分量 0.3kg/m^3 では、塩分を含まない

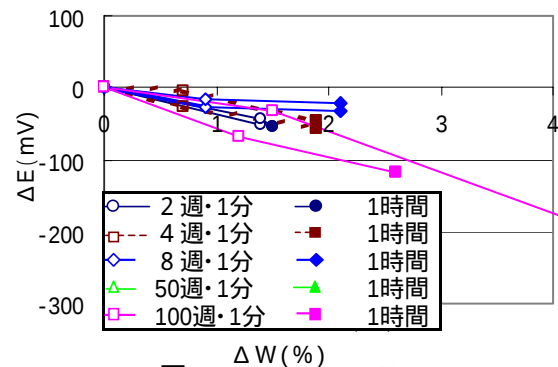


図-3 $\Delta W \sim \Delta E$

(W/C70%, かぶり1cm, $\text{Cl}^- 3.0\text{kg/m}^3$)

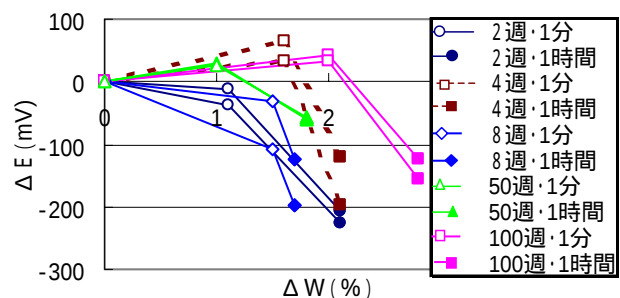


図-4 $\Delta W \sim \Delta E$

(W/C70%, かぶり1cm, $\text{Cl}^- 0.3\text{kg/m}^3$)

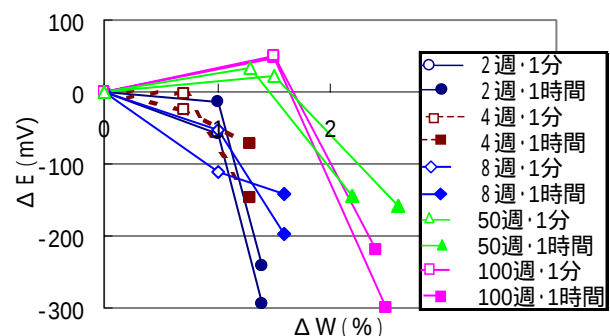


図-5 $\Delta W \sim \Delta E$

(W/C70%, かぶり1cm, $\text{Cl}^- 0.0\text{kg/m}^3$)

場合と同じ傾向が認められることから、塩分量が少ない場合には、塩化物イオンがかぶりの通電性に与える影響はほとんどないものと考えられる。

(2) 水セメント比による影響

W/C55%、かぶり1cm、塩分を含まない場合の ΔW と ΔE の関係を図-6に示す。

1分間散水から1時間散水の間に電位が卑に移行する傾きは、中性化期間に関わらず、ほぼ一定である。しかし、1分間散水での表面含水率および電位のばらつきが大きいため、1時間

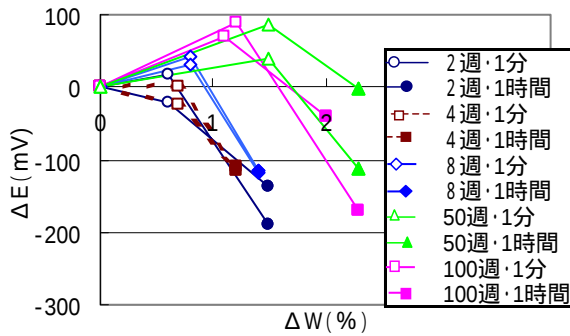


図 - 6 $\Delta W \sim \Delta E$

(W/C55%, かぶり 1cm, $Cl^-0.0kg/m^3$)

散水の電位に安定は認められない。

また, W/C のみが 70%と大きい場合の図 - 5 と比べると, 1 分間散水から 1 時間散水にかけて電位が卑に移行する傾きが小さい。これは, 水セメント比が小さい場合はコンクリートが密実であるため, 水が浸透しにくいことが原因であると考えられる。

(3) かぶりによる影響

W/C が 70%および 55%で, かぶり 2cm, 塩分を含まない場合の $\Delta W \sim \Delta E$ の関係を, それぞ

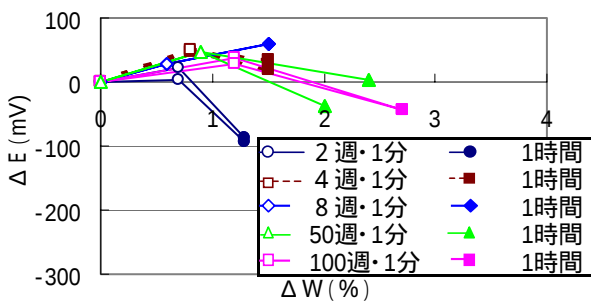


図 - 7 $\Delta W \sim \Delta E$

(W/C70%, かぶり 2cm, $Cl^-0.0kg/m^3$)

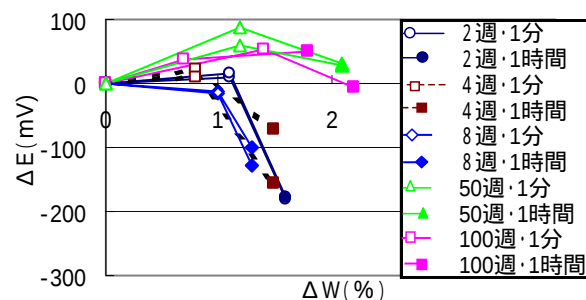


図 - 8 $\Delta W \sim \Delta E$

(W/C55%, かぶり 2cm, $Cl^-0.0kg/m^3$)

れ図 - 7 および図 - 8 に示す。

それぞれ, 促進中性化期間による相違が認められる。また, 図 - 5 および図 - 6 に示した, それぞれかぶりのみが小さい場合と比較すると, 電位が卑に移行する量および傾きともに, かぶりが大きい方が小さい。これは, かぶりが大きい場合は, コンクリート表面への散水が, かぶりコンクリートの深部まで浸透しにくいことが原因であると考えられる。

以上のことから, 散水による表面含水率の変化に伴う自然電位の変化には, 塩分量, 水セメント比, かぶりおよび促進中性化期間による相違が認められ, 塩分量が多い場合にのみ ΔW と ΔE の間に直線的な関係が認められる。

(4) 自然電位の変化とコンクリート抵抗の変化の関係

自然電位の変化 (ΔE) に伴う, コンクリート抵抗の変化を ΔR_c とし, 促進中性化 4 週および 100 週における各シリーズの ΔE と ΔR_c の関係を, それぞれ図 - 9 および図 - 10 に示す。

いずれにおいても, 散水に伴い自然電位が貴に移行する場合も含めて, ΔE と ΔR_c の間には,

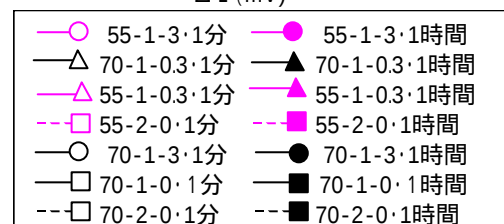
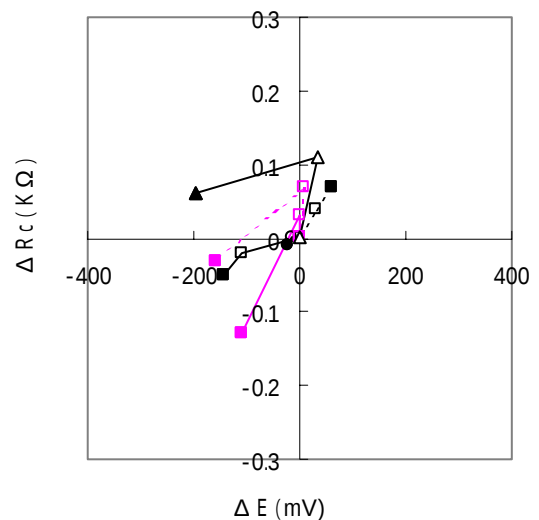


図 - 9 $\Delta E \sim \Delta R_c$ (促進中性化 4 週)

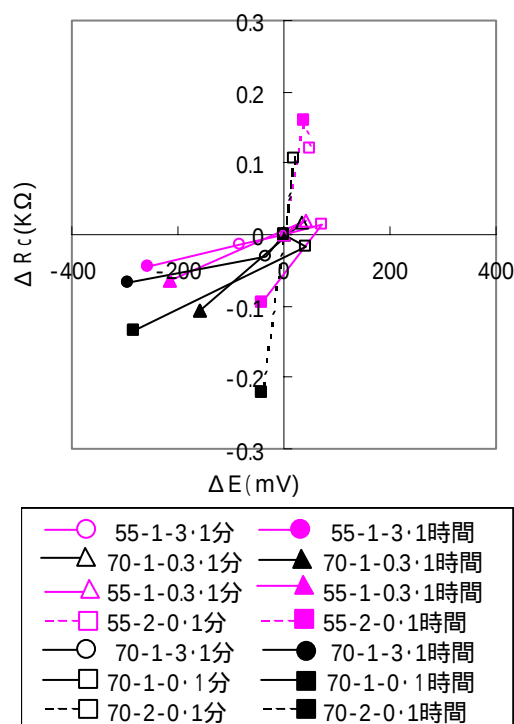


図 - 10 $\Delta E \sim \Delta R_c$ (促進中性化 100 週)

ほぼ直線的な関係が認められる。また、塩分量、水セメント比およびかぶりなどの要因による明確な相違は認められない。したがって、自然電位の変化はコンクリート抵抗によって大きく支配されているものと考えられる。自然電位の測定値に与える温度の影響⁷⁾⁸⁾や、液抵抗として得られるコンクリート抵抗に対する電流分布の特定⁹⁾など、検討課題も残されている。しかし、今回の実験結果から、コンクリート抵抗により、自然電位を補正できる可能性があるものと考えられる。

3.3 コンクリート抵抗と分極抵抗の関係

促進中性化 100 週における、各供試体の分極抵抗の逆数 ($1/R_p$) とコンクリート抵抗の逆数 ($1/R_c$) の関係を図 - 11 に示す。

$1/R_p$ と $1/R_c$ の間には、 $1/R_p$ の増加に伴い $1/R_c$ が増加するほぼ直線的な関係が認められ、その傾向には、水セメント比、かぶりおよび塩分量による相違は認められない。

促進中性化 50 週および 100 週における、各散水状態における各供試体の $1/R_p$ と $1/R_c$ の関係を図 - 12 に示す。

$1/R_p$ と $1/R_c$ の間には、図 - 11 と同様に $1/R_p$

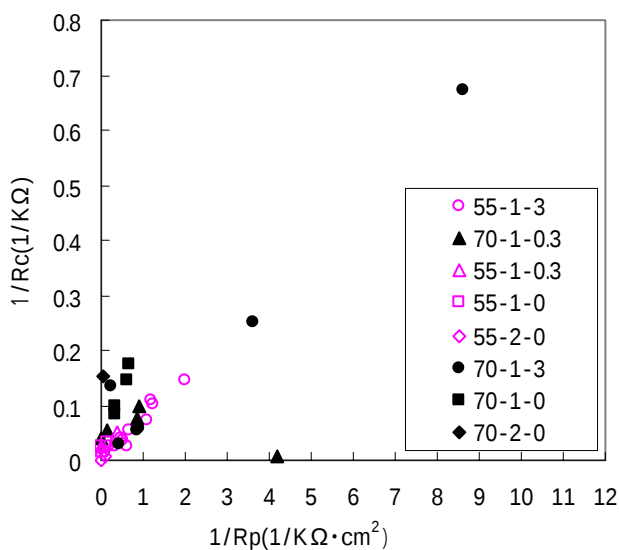


図 - 11 分極抵抗～コンクリート抵抗
(促進中性化 100 週)

の増加に伴い、 $1/R_c$ が増加するほぼ直線的な関係が認められ、その傾向には、促進中性化期間および散水状態による相違は認められず、中性化深さの影響もないものと考えられる。

これらは、水セメント比、塩分量および表面含水率などの要因はコンクリート抵抗に含まれていること、および今回の試験条件下ではコンクリート抵抗が腐食速度を大きく支配して

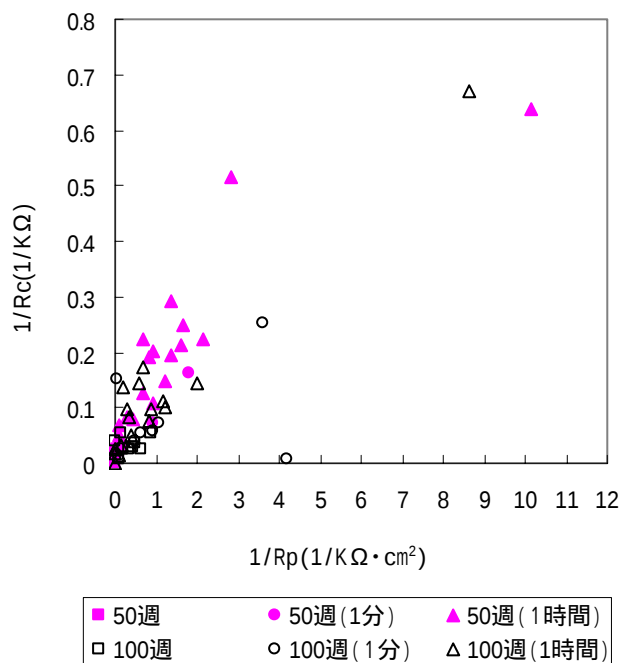


図 - 12 分極抵抗～コンクリート抵抗
(促進中性化 50 週および 100 週)

いることが原因であると考えられる。したがって、コンクリート抵抗の増加に伴い腐食速度が減少する、すなわち $1/R_c$ の減少に伴い腐食速度と比例関係にある $1/R_p$ が減少するものと考えられる。

なお、湿度に伴う分極抵抗の変化⁷⁾⁸⁾の原因が、鉄筋の腐食速度の変動⁷⁾であるのか、その他の外的要因による影響も含まれるのか⁸⁾については、今後の検討課題であると考えられる。

4. 結 論

本研究の範囲内で得られた結論を以下に記す。

(1)中性化を主因とする鉄筋腐食の場合、塩害による既往の基準より貴な自然電位で鉄筋腐食が始まるものと考えられる。その原因として、塩分を含まない場合は、かぶりコンクリートでの電位降下が大きくなることが考えられる。しかし、本研究では、腐食度2と3の境界では逆の傾向が認められた。この原因については定かではなく、今後の検討課題である。

(2)コンクリート表面への散水による表面含水率の変化に伴う自然電位の変化は、塩分量、水セメント比、かぶり、および中性化深さにより異なる傾向を示す。塩分量が多い場合にのみ、両者の間には直線的な関係が認められるが、中性化が主因となる塩分量が少ない場合には、両者の間に明確な相関関係は認められなかった。

(3)表面含水率の変化に伴う、自然電位の変化とコンクリート抵抗の変化の間には、相関性が認められた。したがって、中性化を主因とする場合も含めて、コンクリート抵抗の変化により自然電位を補正できる可能性がある。しかし、自然電位は、温度などによる影響も受けるため、今後は、温度などの要因が自然電位とコンクリート抵抗の関係に与える影響についても検討が必要である。

(4)分極抵抗とコンクリート抵抗の間には、水セメント比、塩分量、および表面含水率などの要因による相違のない相関関係が認められた。

これは、中性化を主因とする場合も含めて、分極抵抗より短時間で測定が可能であるコンクリート抵抗により、分極抵抗を推定できる可能性を示唆するものであると考えられる。しかし、分極抵抗に影響を与える要因については、温度も含めて今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の診断のための非破壊検査試験方法研究委員会報告書，p.184，2000.3
- 2) 小林一輔編集：鉄筋腐食の診断，森北出版，p.87，1993
- 3) 土木学会：2001年度制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕制定資料，p.26，2001
- 4) 立松英信，佐々木孝彦ほか：塩害による鉄筋腐食診断と抑制に関する研究，コンクリート工学論文集第11巻第2号，pp.11-20，2000.5
- 5) 高木猛志，中川元宏ほか：中性化による鉄筋腐食に対する自然電位法の適用性に関する実験的研究，土木学会第56回年次学術講演概要集，V-413，2001.9
- 6) 小寺満，土田伸治：自然電位法に影響する要因と鉄筋腐食に関する実験的研究，土木学会第53回年次学術講演概要集，V-301，1998.10
- 7) 下澤和幸，田村博ほか：コンクリート構造物の鉄筋腐食遠隔モニタリング，コンクリート工学年次論文報告集，Vol21，No.2，pp.997-1002，1999.6
- 8) 白倉篤志，岡本晋作ほか：季節変動を考慮した促進暴露試験における自然電位・分極抵抗のモニタリング，土木学会第57回年次学術講演概要集，V-574，2002.9
- 9) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向，p.137，1997.12