

論文 塩害劣化を有する RC 部材における鉄筋腐食モニタリング

山本 尚樹^{*1}・森川 英典^{*2}・尾崎 健^{*3}・古田 久人^{*4}

要旨：構造物の早期劣化の一つとして塩害を取り上げ、内部鉄筋の腐食の状態を評価するため、初期含有塩分を考慮した供試体を作製し、約3年に亘って腐食モニタリングを行ったのちに解体して内部鉄筋の腐食量を測定した。これにより、分極抵抗より腐食量を求める際に必要な K_v 値を算出した。また、実構造物でのさまざまな変状を考慮した供試体を作製し、定期的な腐食モニタリングを実施した。その結果、鉄筋同士を絶縁させたものより導通させた方が自然電位・分極抵抗が小さくなること、水セメント比が小さい方が分極抵抗の計測値が腐食判定側になる傾向があることがわかった。

キーワード：塩害劣化，RC 部材，鉄筋腐食， K_v 値，分極抵抗，自然電位

1. はじめに

構造物の維持管理を合理的に行うには日常点検に代表される各種点検が適切に行われることが重要である。特に臨海構造物では海水の塩分によるコンクリート中の鉄筋腐食が構造物の諸性能を低下させる要因となっている。また、海岸から離れた構造物であっても打設時に用いた海砂に含まれる塩分によって臨海構造物と同様に塩害による劣化を受ける。近年、鉄筋の腐食状況を把握するための一つの手段として、鉄筋の電気化学的パラメータ(自然電位・分極抵抗・コンクリート抵抗)を計測する方法が提案されている。しかしながら、かぶりコンクリートのひび割れ、散水方法等の諸条件により、それらの測定値が変化することがわかっている¹⁾。また、分極抵抗から鉄筋の腐食量を推定することができるが、この際に用いる換算係数 K_v 値は一般に 0.026～0.052(V)とされているものの、環境条件等で変化するため、正確な腐食量推定には K_v 値の設定が重要である。さらに一般的な K_v 値はかぶりコンクリートにひび割れがない加速期以前を対象としたものであり、計測の適用範囲外とさ

れる加速期以降では検討がなされていない。

本研究では、初期含有塩分の影響を考慮した RC 供試体を作製して、分極抵抗の経時変化を測定した。これらの供試体を暴露終了後に解体し、鉄筋の腐食量を測定して、分極抵抗、供試体の設置方法、 K_v 値に着目して検討した。また、実構造物でのさまざまな劣化状態を付加させた RC 供試体を作製して、高温スチーム室にて暴露し、定期的なモニタリングにおける自然電位、分極抵抗の傾向について検討した。

2. 鉄筋腐食モニタリング概要

モニタリングには SRI-CM-¹、SRI-CM-² (株) 四国総合研究所製)を用いて、自然電位 (mVvsCSE)、分極抵抗($k\Omega\text{cm}^2$)を測定した。その他、気温()はデジタル式温度計にて、コンクリート温度()は熱伝対にて、コンクリート含水率(%)は電気抵抗式水分計にて、それぞれ測定した。ここで、コンクリート含水率・温度は、かぶり深さに相当する位置で得られた値である。

計測時には、計測値を安定させるために噴霧器を用いて供試体に水分を供給(散水)した。散水

*1 神戸大学大学院 自然科学研究科 建設学専攻 (正会員)

*2 神戸大学 工学部建設学科教授 工博 (正会員)

*3 神戸大学大学院 自然科学研究科 建設学専攻 (正会員)

*4 (株)ニチゾウテック 技術コンサルティング本部 技術コンサル部 診断技術チーム

表 - 1 示方配合

	W/C水セメント比 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					単位量(ml/m ³)	
				W 水	C セメント	S 細骨材	G 粗骨材	Cl ⁻¹ 塩化物量	AE減水剤	AE助剤
1	108	20	48	190	175.2	859.5	943.4	3	788	153
2	108	20	48	190	175.2	854.5	943.4	6	788	153
3	55	20	45.3	155	282	829	1043	6	705	
4	75	20	49.3	150	200	940	1011	6	500	

暴露期間が4年ならL
 暴露期間が3年なら無
 水セメント比
 S6-T2-108L
 供試体サイズの種類
 混入した塩化物イオンの量

図 - 1 供試体表記例

方法は、計測 30 分前に対象供試体全体に表面が十分湿潤状態となるように散水し、計測時まで適宜散水して、計測を開始した。

3. 塩害劣化 RC 部材の K_v 値の評価

3.1 促進腐食供試体概要^{2),3)}

供試体の表記例を図 - 1 に、供試体の断面図・側面図を図 - 2 に、供試体の配合を表 - 1 に、供試体の暴露期間等を表 - 2 に示す。供試体には発錆限界塩化物イオン含有量である 1.2kg/m^3 以上の塩化物を打設時に混入し、初期含有塩分による塩害を想定した。Type1 供試体は、打設後約 1 ヶ月間湿布養生を行い、屋内での気中養生(温度 18)のあと、材令 3 ヶ月で暴露試験を開始した。暴露試験中、供試体は布で覆い 1 日 1 回程度、噴霧器により水分を供給した。鉄筋突出部およびその端面はエポキシ樹脂を塗布した。Type2,3 供試体は計測に用いる主鉄筋 2 本にリード線(約 0.1 /m)をハンダ付けした後、エポキシ樹脂と VM テープで被い防水・防食加工した。また、鉄筋接触部分をエポキシ樹脂と VM テープで加工して絶縁させた。供試体端面はエポキシ樹脂でシーリングした。打設 1 日後に脱型し、14 日間湿空養生(温度 18 , 湿度 60%)したあと暴露試験を開始した。表 - 2 にあるスチーム室は温度 60 , 湿度 95% , 地下室は温度 18 , 湿度 80% である。

表 - 2 供試体概要

供試体名	配合	計測面の向き	暴露期間	暴露環境			
				1年	2年	3年	4年
S6-T1-75	2	上下	3年	屋外暴露			
S6-T1-55	1	上下	3年	屋外暴露			
S3-T2-108L	3	上	4年	スチーム室	地下室	屋外暴露	
S6-T3-108L	4	上	4年	スチーム室	地下室	屋外暴露	
S6-T2-108L	4	上	4年	スチーム室	地下室	屋外暴露	
S6-T3-108	4	下	3年	スチーム室	地下室		
S6-T2-108	4	下	3年	スチーム室	地下室		

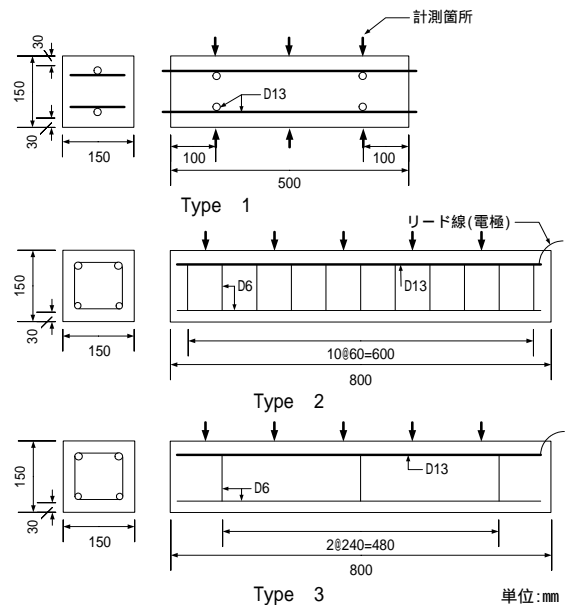


図 - 2 断面図・側面図

3.2 腐食量測定概要

暴露終了後、供試体を解体し、腐食(減)量を測定した。腐食量は、鉄筋を 10%クエン酸二アンモニウム溶液に常温で 24 時間浸漬し、腐食生成物を除去した後、鉄筋の質量を測定した。このとき、腐食生成物の他に黒皮も剥がれ落ちたので、別途健全な鉄筋を用いて同様な方法で質量を測定し、この値と水溶液に浸漬した腐食鉄筋の質量との差を腐食(減)量とした。

3.3 K_v 値の算出方法

供試体各々の K_v 値は以下の式(1)を用いて算出した。暴露開始から 3 ヶ月ごとに行った分極抵抗のモニタリング結果を経過時間で積分して用いた。

$$G = \alpha \sum \left(\frac{\Delta t}{R_p} \right) \dots (1) \quad \alpha = \frac{M}{2} \cdot \frac{K_v}{F_a}$$

ここで、 G ：腐食減量(g/cm^2)

R_p ：分極抵抗(Ωcm^2)

Δt ：経過時間(sec)

M ：鉄の原子量(55.8g)

K_v ：換算係数(V)

F_a ：ファラデー定数(96500 クーロン)

3.4 K_v 値の評価

腐食量と分極抵抗逆数の時間積分値の関係を図 - 3 に示す。なお、S6-T1-75 と、S6-T1-55 は供試体中の鉄筋が上下にあるため、上にあるものを「S6-T1-75up」、「S6-T1-55up」、下にあるものを「S6-T1-75low」、「S6-T1-55low」と記載する。すべてのデータを一括して近似直線を導出したところ、相関係数が低くなったため、表 - 2 より、供試体の計測面の方向に着目し、暴露中の計測面が上向きのグループ(gp1)と下向きのグループ(gp2)とに分けた結果、良い相関が見られた。屋内で暴露した場合、供試体周辺の環境条件は一定であり、計測面の上下による差はないと考えられる。しかし、屋外暴露の場合は、直射日光によるコンクリート温度の上昇、水分の供給不足等の条件が供試体の上下面によって異なるため、腐食の進行に差が生じる。また、計測値を安定させるための散水によって、計測箇所鉄筋付近の状態がどれもほぼ均一となってしまう、計測値に上下面の差が表れにくくなる可能性があると思われる。したがって時間積分値に差が生じにくい腐食量には大きな差があるという結果になったと推察できる。また、屋内暴露の供試体は計測面に常に水分を供給できるようにしていたが、水で満たされた計測面は酸素が不足し、また温度も上がらないため、腐食の進行し難かったと考えられ、同様に、屋外暴露の供試体の下面側の計測面は、温度は上昇するものの、水分が欠乏するため、腐食が進行し難かったと考えられるので、同様のグループに属すと考えた。gp1 と gp2 それぞれの近似直線は以下の

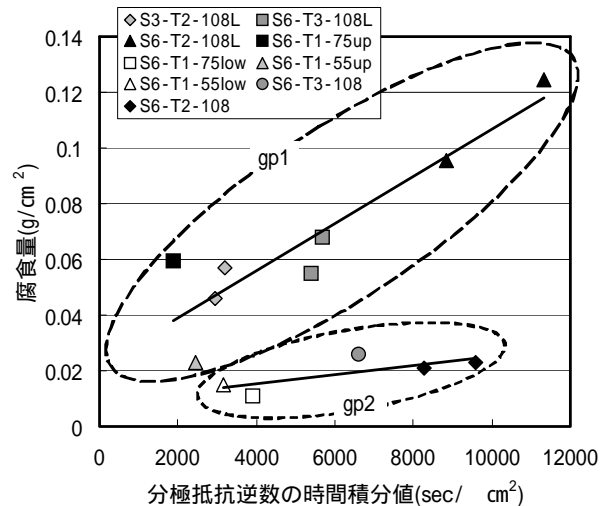


図 - 3 腐食量と分極抵抗逆数の時間積分値の関係式(2)，(3)である。

gp1：

$$Y = 8.47 \times 10^{-6} X + 0.022 \quad (2)$$

gp2：

$$Y = 1.67 \times 10^{-6} X + 0.009 \quad (3)$$

なお、両式とも $X=0$ のとき、すなわち供用開始直後に腐食量が存在することとなり、実際には有り得ない状態だが、数式上の切片として $X=0$ のときの Y 値を設定した。また、供試体の解体時には供試体表面に鉄筋の腐食によるものと思われるひび割れが観察されていることから、式(2)，(3)はコンクリート表面に腐食ひび割れが入り、鉄筋の腐食速度が大きくなり始める加速期前期と呼ばれる劣化状態までにおいて、供試体の計測面の上下によって内部鉄筋の腐食に大きく差が見られ、近似直線の傾きから K_v 値を推定すると、供試体の上面(直射日光の当たる、水分が適度に供給される面)では、供試体の下面(日かげの、水分が直接供給されない面)の約 5 倍も K_v 値が大きくなることがわかった。

4. 実構造物での状況を考慮した供試体

4.1 供試体概要

供試体の断面図・側面図・計測面図とイメージ図それぞれを図 - 4，図 - 5 に、供試体の配合と概要をそれぞれ表 - 3，表 - 4 に示す。主鉄筋同士をスターラップにて電気的に導通させた供試体と絶縁させた供試体を設け、絶縁させた供試

表 - 3 示方配合

	W/C水セメント比 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					単位量(ml/m ³)	
				W水	Cセメント	S細骨材	G粗骨材	Cl ⁻¹ 塩化物量	AE減水剤	AE助剤
1	55	20	48	180	327	817	917	0	1473	229
2	75	20	48	180	240	852	955	0	1080	168
3	75	20	48	180	240	847	955	3	1080	168
4	75	20	48	180	240	842	955	6	1080	168

体はスターラップと主鉄筋の接触部分をエポキシ樹脂と VM テープで絶縁加工した。材令 1 ヶ月後に高温スチーム室にて暴露試験を開始した。暴露期間中は、湿度 100%、温度 60 の状態で 3 日間、その後 4 日は温度 18 で乾燥させる乾湿サイクルとした。打設時に塩分を混入していない供試体については乾燥時に塩化物濃度 5%の塩水を含む布で計測面を湿布して塩分を供給した。

4.2 各パラメータの計測値

(1) 自然電位

暴露 1 年次の各供試体の計測点ごとの自然電位を図 - 6 に示す。なお、図中の点線は ASTM による腐食判断基準値の-350(mVvsCSE)である。図 - 6(a)より、ごく一部の計測点を除き、ほとんどすべての供試体で判定基準を下回っており、鉄筋が腐食しているものと推察される。供試体ごとに考察していくと、一様に塩分を混入した A-1 は、5 体の中でもっとも値が高く、2 本の鉄筋は橋軸方向で類似した値をとった。左右で異なる量の塩分を混入した B-1 は、塩分量の少ない計測点(3, 4, 7, 8)よりも塩分量の多い計測点(1, 2, 5, 6)の方が自然電位は低くなると予想されるが、計測点(1, 2, 3, 4)にはその傾向が表れているが、計測点(5, 6, 7, 8)には見られなかった。計測点 1, 2 のかぶりコンクリートを取り除いた C-1 は、かぶりコンクリート削除部分からの腐食因子の侵入によって計測点(3, 4, 5, 6)の自然電位が低く、計測点(1, 2)からもっとも遠い計測点(7, 8)の自然電位が高い。健全供試体の C-1 は、塩水湿布の効果で腐食が進行しており、2 本の鉄筋は橋軸方向で類似した値をとった。左右で水セメント比が異なる E-1 は、水セメント比が大きくなると腐食速度が大きくなることか

表 - 4 供試体概要

供試体名	配合	暴露期間	鉄筋接触	付加劣化条件
A-1	4	1年	絶縁	塩分を打設時に混入
A-2	4	1年	導通	塩分を打設時に混入
B-1	3.4	1年	絶縁	左右で異なる量の塩分を含む
B-2	3.4	1年	導通	左右で異なる量の塩分を含む
C-1	2	1年	絶縁	かぶりコンクリートの一部を削除
C-2	2	1年	導通	かぶりコンクリートの一部を削除
D-1	2	1年	絶縁	健全
D-2	2	1年	導通	健全
E-1	1.2	1年	絶縁	水セメント比が左右で異なる

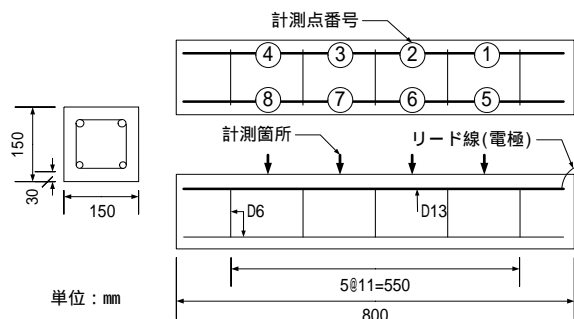
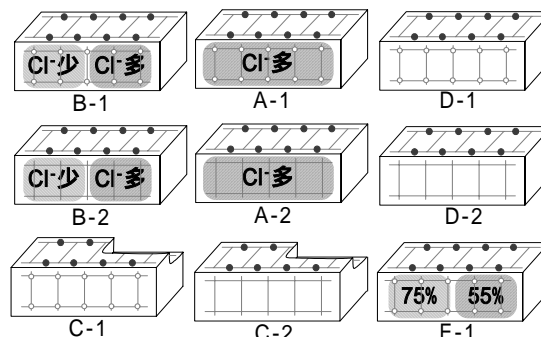


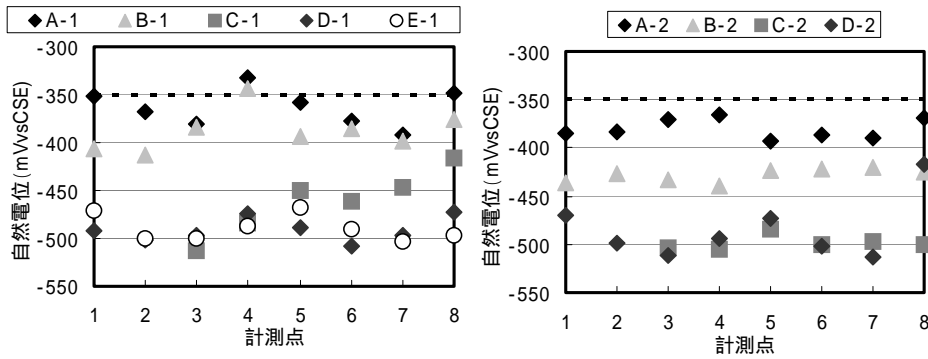
図 - 4 断面図・側面図・計測面図



図中の は計測点、 は鉄筋接触部の絶縁を示す。

図 - 5 供試体イメージ

ら、水セメント比の小さい計測点(3, 4, 7, 8)の方が水セメント比の大きい計測点(1, 2, 5, 6)よりも高い自然電位をとると予想できるが、顕著な差が見られなかった。したがって自然電位では水セメント比による違いはほとんどないものと思われる。一方、図 - 6(b)より、すべての計測点で判定基準を下回っており、鉄筋が腐食しているものと推察される。供試体ごとに考察していくと、一様に塩分を混入した A-2 は、4 体の中でもっとも値が高く、2 本の鉄筋は橋軸方向で類似した値をとっている。左右で異なる量



(a) 鉄筋同士を絶縁させた供試体

(b) 鉄筋同士を導通させた供試体

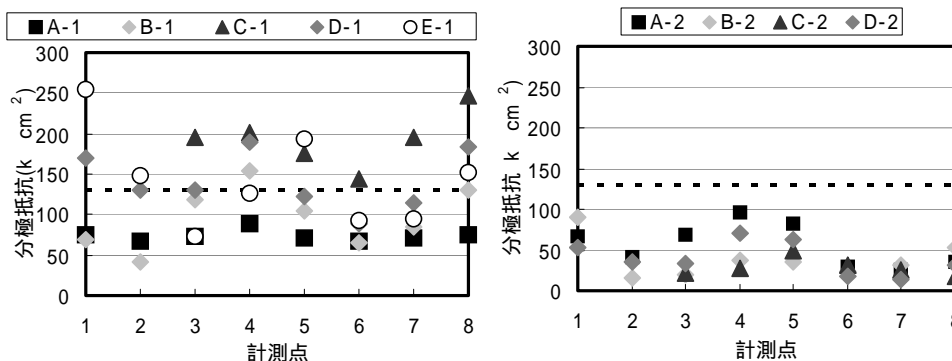
図 - 6 自然電位

の塩分を混入した B-2 は、塩分量の少ない計測点(3, 4, 7, 8)よりも塩分量の多い計測点(1, 2, 5, 6)の方が自然電位は低くなると予想され、わずかではあるものの計測点(3, 4, 7, 8)の方が自然電位が低下しているが、2本の鉄筋全体に亘って自然電位は横ばいとなった。計測点(1, 2)のかぶりコンクリートを取り除いた C-2 は、計測点(5)以外のすべての計測点で自然電位が横ばいとなった。健全供試体の C-2 は、塩水湿布の効果で腐食が進行しており、2本の鉄筋は橋軸方向で類似した値をとった。図 - 6(a), (b)を総じて、鉄筋同士を導通させる方が絶縁するよりも自然電位は低く、供試体全体で自然電位が平滑化される。左右で条件を変化させた場合、鉄筋を絶縁させた場合は計測値が大きくばらつくが、導通させた場合はばらつきは小さい。また、塩分を混入した供試体(A-1, B-1, A-2, B-2)と塩水湿布により塩分を供給している供試体(C-1, C-1, E-1, C-2, C-2)でとりうる自然電位の範囲に違いが見られるのは、混入した塩化物濃度と塩水湿

布の塩化物濃度が異なるためと思われる。

(2) 分極抵抗

暴露 1 年次の各供試体の計測点ごとの分極抵抗を図 - 7 に示す。なお、図中の点線は CEB による腐食速度の判定基準をもとに試算した判定基準値 $130(\text{k}\Omega\text{cm}^2)$ である。図 - 7(a)より、供試体ごとに考察していくと、一様に塩分を混入した A-1 は、計測点全点で判定基準を下回っており、2本の鉄筋は橋軸方向で類似した値をとった。左右で異なる量の塩分を混入した B-1 は、計測点(1, 2, 3, 4)を含む鉄筋では塩分量の大小によって分極抵抗にも変化が大きく現れており、塩分量が多い計測点(1, 2)は分極抵抗が小さい。計測点(1, 2)のかぶりコンクリートを取り除いた C-1 は、全計測点で判定基準を上回った。計測点(5, 6)の分極抵抗が計測点(7, 8)の分極抵抗よりも低いのは、かぶりコンクリート削除部分からの塩化物イオンの侵入によってかぶりコンクリートの電気的な抵抗が小さくなったためであると考えられる。また、鉄筋露出部が犠牲陽極と



(a) 鉄筋同士を絶縁させた供試体

(b) 鉄筋同士を導通させた供試体

図 - 7 分極抵抗

なっているために、計測点(3,4)では分極抵抗が高くなっていると推察される。健全供試体の C-1 は、計測点(2,3,5,6,7)で判定基準を下回っており、腐食が進行していると思われる。左右で水セメント比が異なる E-1 は、水セメント比の小さい計測点(3,4,7,8)の方が水セメント比の大きい計測点(1,2,5,6)よりも比較的低い分極抵抗となった。これは水セメント比が大きい方が散水時の水分の浸透量が大きく、酸素供給に支障をきたしたために実際に分極抵抗よりも大きな値を示したものと思われる。したがって、計測時の前処理(散水)により供給された水分によって、実際の環境条件にある場合とは異なる分極抵抗を計測している可能性があると思われる。一方、図-7(b)より、供試体ごとに考察していくと、4 供試体すべてが判定基準を大きく下回る結果となった。一様に塩分を混入した A-2 は、計測点(1,2,3,4,5)と比べて計測点(6,7,8)で分極抵抗が小さく、腐食の進行具合に差があるものと考えられる。左右で異なる量の塩分を混入した B-2 は、塩分量の少ない計測点(3,4,7,8)よりも塩分量の多い計測点(1,2,5,6)の方が分極抵抗が大きく、計測点 1 を除き、供試体全体で分極抵抗が横ばいである。計測点 1,2 のかぶりコンクリートを取り除いた C-2 は、ほぼ全計測点で分極抵抗が横ばいとなった。健全供試体の C-2 は、計測点(1,2,3,4,5)と比べて計測点(6,7,8)で分極抵抗が小さく、腐食の進行具合に差があるものと考えられる。図-7(a),(b)を総じて、鉄筋同士を導通させる方がさせないよりも分極抵抗が非常に低くなる傾向にあり、供試体全体で平滑化されている。これについては、鉄筋同士を導通させた場合、腐食電流をやり取りできる範囲が鉄筋単体に比べて広がるのが要因であると考えられる。また、左右で条件を変化させた場合、分極抵抗が大きくばらついた。

5. まとめ

本研究では、塩害による RC 部材の劣化を評価

するため、さまざまな劣化条件を付加した供試体を作製し、腐食モニタリングを行った。その結果を以下に示す。

- (1) 供試体の計測面が直射日光を受け、水分が適度に供給される環境にある場合と、日かげで、なおかつ水分があまり供給されない場合では、腐食量と分極抵抗の逆数の時間積分値の関係式が大きく異なり、近似式の傾きより算出された K_V 値には約 5 倍もの差があることがわかった。
- (2) 実構造物における劣化条件を考慮した供試体の鉄筋腐食モニタリングにおいて、
 - (a) 自然電位・分極抵抗ともに、鉄筋を導通させる方が絶縁させたものよりもより腐食していて、分極抵抗において顕著である。また、自然電位・分極抵抗を同じオーダーで比較した場合、鉄筋を導通させた方が絶縁させた方よりも計測値のばらつきが小さい。
 - (b) かぶりコンクリートを削除すると、その周りでも腐食が進行しやすくなる。
 - (c) 水セメント比が小さい方が腐食側の分極抵抗を測定する。これは、計測時の前処理(散水)により供給された水分の浸透量が水セメント比によって影響を受け、実際の環境条件にある場合とは異なる分極抵抗を計測している可能性があると思われる。
 - (d) 塩分量が供試体中で異なる場合、計測値はばらつくが、必ずしも塩分量に比例して、ばらつくとは限らない。

参考文献

- 1) 森川英典, 尾崎健, 森田佑介, 小林秀恵, 古田久人: RC 部材における鉄筋腐食モニタリングと局部腐食を考慮した部材性能の評価, 建設工学研究所論文報告集, 第 46 号, pp.27-46, 2004.11.
- 2) 技術情報協会: コンクリート構造物の非破壊検査・診断技術, 2000.3.
- 3) 岡本晋作, 白倉篤志, 森川英典: 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, 土木学会年次学術講演会, pp.1147-1148, 2002.9.