

論文 かぶりコンクリートの状況に応じた自然電位による鋼材腐食の評価手法の提案

染谷 望^{*1}・加藤 佳孝^{*2}・星 芳直^{*3}・板垣 昌幸^{*4}

要旨：本研究では、Membrane potential が自然電位の測定結果に与える影響について把握することを目的とした。さらに、かぶりコンクリートが測定結果に与える影響を考慮したコンクリート中の鋼材腐食の評価方法について考察した。かぶりコンクリートが自然電位の測定結果に影響を与える要因は、緻密なコンクリートに多い不連続な細孔による水の不連続性の影響と、塩化物イオンの吸湿性の影響の程度により決まると考えられる。また、鋼材腐食が生じていない場合、かぶりコンクリートの飽和度が低下すると、自然電位の測定誤差が大きくなることを定量的に把握した。

キーワード：かぶりコンクリート、電気化学測定、自然電位の補正

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物中の鋼材腐食を把握する測定法の1つに自然電位法があるが、既往の研究^{1),2)}によると、Liquid junction potential (以下、LJP) および Membrane potential (以下、MP) が測定結果に影響することが指摘されている。LJP は、照合電極とコンクリート中の細孔溶液の液性が異なることや、かぶりの劣化進行に伴う細孔溶液の液性変化が原因と考えられている。MP は、電気化学測定時に流れる電流などの影響により、コンクリート中のイオンの電気的な偏りが生じることが原因と考えられている¹⁾。すなわち、コンクリート中の鋼材腐食を電気化学的測定法により正しく把握するためには、かぶりコンクリートの諸特性が測定結果に及ぼす影響を定量的に理解することが重要であることが分かる。

例えば、銀塩化銀の照合電極（液絡部は KCl）を用いた場合、コンクリートの細孔溶液中の液性と異なるために LJP が生じる。ここで、細孔溶液を飽和水酸化カルシウム溶液と仮定すると、式(1)に示す Henderson の式³⁾を用いて LJP を求めると 56mV となる。さらに、塩害環境を簡易に模擬して、飽和水酸化カルシウムと塩化物イオンを 2kg/m³ 含む場合を計算すると 49mV となる。塩害の鋼材腐食評価は、実構造物での結果を ASTM C 876⁴⁾の基準に照らして判断することが多いが、塩害環境下であるため測定結果と基準値の両者に、塩化物イオン（以下、Cl⁻）の影響による LJP=49mV が含まれている。すなわち、LJP の影響は常に存在するものの、測定結果を基準値に照らし合わせて鋼材腐食を評価する場合、LJP の影響を考慮する必要は無いと考えられる。

以上のことから、本研究では MP が自然電位の測定結

果に与える影響について把握することを目的とする。さらに、かぶりが測定結果に与える影響を考慮したコンクリート中の鋼材腐食の評価方法について考察する。

$$E_d = \frac{RT}{F} \cdot \frac{\sum |Z_i| u_i (c_i^\beta - c_i^\alpha)}{\sum u_i |Z_i| (c_i^\beta - c_i^\alpha)} \ln \frac{\sum u_i |Z_i| c_i^\alpha}{\sum u_i |Z_i| c_i^\beta} \quad (1)$$

ここに、E_d : LJP (mV), C : 電解質溶液の濃度 (mol/L), u : イオンの移動度 (m²/Vs), Z : イオンの価数 (-)

2. 実験概要

2.1 かぶりコンクリートの影響の検討

かぶりが自然電位の測定結果に及ぼす影響を実験的に検討する場合、かぶりや環境を試験要因として変化させてコンクリート表面から自然電位を測定することが多いが、この場合、自然電位はかぶりの状態変化と鋼材の状態変化の両者によって変化してしまう。そのため、かぶりの影響のみを分離して解釈することが難しい。これに對して著者らは、溶液に浸せきさせて自然電位の変化が安定した鋼材とコンクリート版を用いて、かぶりの影響を直接把握する模擬鉄筋コンクリート試験体（図-1 参照）を提案している⁵⁾。本研究では、測定結果に与える影響として、コンクリート中や塩害環境を模擬した試験溶液の種類や、かぶりのセメント種類、水結合材比 (W/B)、Cl⁻ 濃度に着目した。なお、測定前後の鋼材表面の自然電位が変化しないことを確認しており、得られる測定結果の変化は、純粹なかぶりの影響であると考えられる。

2.2 各種溶液に浸せきさせた場合の鋼材界面の変化

鋼材の浸せき溶液は、鋼材の腐食状態を変化させるため飽和水酸化カルシウム水溶液（以下、CH）や、飽和水

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 修（工） （学生会員）

*2 東京理科大学 理工学部土木工学科 博（工） （正会員）

*3 東京理科大学 理工学部工業化学科 博（工）

*4 東京理科大学 理工学部工業化学科 博（工）

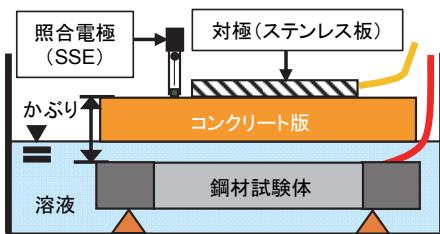


図-1 試験体概要

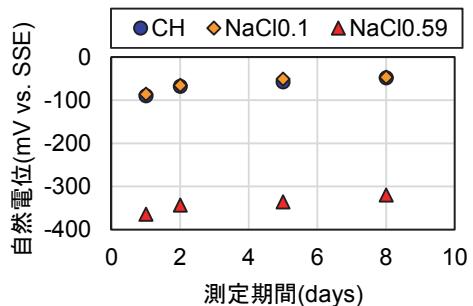


図-2 各溶液に浸せきさせた鋼材の電位変化

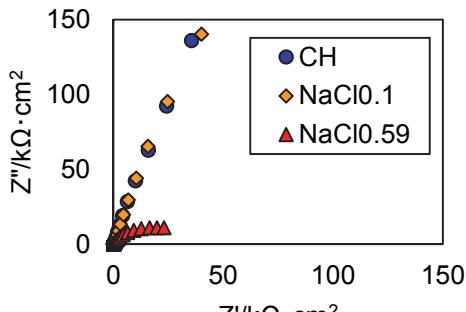


図-3 インピーダンススペクトルの変化
(8日)

酸化カルシウム水溶液に Cl 濃度 0.1, 0.59kg/m³ (以下, NaCl0.1, NaCl0.59) となるように Cl を加えた溶液を用いた。なお、溶液の Cl 濃度は、コンクリート中の細孔溶液中の自由 Cl を想定している。既往の研究の自由 Cl と全 Cl の関係⁵⁾を用いて換算すると、本研究で設定した Cl 濃度はコンクリート 1m³あたりの全 Cl 濃度 2.0, 10.0kg/m³に相当する。

各溶液に浸せきさせた鋼材の自然電位 (mV vs. SSE) の経時変化を図-2 に、浸せき期間 8 日のインピーダンススペクトルを図-3 に示す。なお、測定方法の詳細は 2.4 で後述する。CH や NaCl0.1 は、-50mV の貴な電位で推移し、NaCl0.59 は-320mV 程度の卑な電位で推移した。インピーダンススペクトルの大きさは抵抗の大きさであることから、CH や NaCl0.1 は抵抗が大きいため鋼材の腐食速度が小さく、NaCl0.59 はインピーダンススペクトルが小さいため、抵抗が小さく鋼材の腐食速度が大きいと考えられる。なお、NaCl0.59 は鋼材表面に腐食が生じていることを目視により確認した。

自然電位とインピーダンススペクトルの結果および鋼材表面の腐食状況の観察より、CH や NaCl0.1 は鋼材腐食が生じておらず、NaCl0.59 は鋼材腐食が生じていると考えられる。これらの溶液の結果を鋼材腐食の有無の基準とし、かぶりコンクリートが測定結果に与える影響を検討する。

2.3 実験水準

表-1 に、かぶりコンクリートと鋼材の浸せき溶液の

表-1 コンクリート版と溶液の組み合わせ

種類	W/B (%)	Cl 濃度(kg/m ³)		腐食	略記
		コンクリート版	溶液		
N または B	40	0	0	なし	CIなし
		0.1	0.1		CI0.1
		0.59	0, 0.1	なし	CI0.59
	60	0.59	0.59	あり	CIあり
		0	0.59		鋼材表面 CI残留

組み合せを示す。健全なコンクリート中を想定し、かぶりコンクリートに Cl を含まず、鋼材界面も Cl を含まない場合を「CIなし」とした。次に、実構造物で考えられる条件として、内在 Cl の影響のように、かぶりコンクリートと鋼材界面が均一に Cl を含む場合を「CI0.1」とした。塩害環境下を想定し、かぶりコンクリートに Cl が浸透したが、鋼材腐食が生じない場合を「CI0.59」とした。その後、かぶりコンクリートに Cl が浸透し、鋼材腐食が生じた場合を「CIあり」とした。また、かぶりコンクリートを補修したが、鋼材界面に Cl が残留し鋼材腐食が生じている場合を「鋼材表面 CI 残留」とした。これらの組み合せを用いて、かぶりコンクリートが電気化学的測定結果に与える影響を検討する。

試験に用いたかぶりコンクリートは、セメントに普通ポルトランドセメント (以下, N) および N の 40%を高炉スラグ微粉末で置換 (以下, B) したものを用い、水結合材比 (以下, W/B) が 40%, 60%の厚さ 30mm の試験体とした。また、コンクリート中の Cl 濃度は、前述の通り、コンクリート 1m³中の細孔溶液の自由 Cl 濃度が 0.1, 0.59kg/m³となるように練混ぜ時に Cl を加えた。かぶりコンクリートは、鋼材の浸せき溶液と同種類の各溶液中に、30 日以上浸せきさせた後に試験に用いた。加えて、かぶりコンクリートの飽和度の影響を検討するため、コンクリート版を飽水状態にさせた場合と、温度 40°C の乾燥炉 (湿度の設定なし) に保管し乾燥させた状態のかぶりコンクリート版を用いた。かぶりコンクリートの飽

和度 (M_i) は、試験前のコンクリート版の質量 (M_0)、飽水状態の質量 (M_s)、および絶乾状態の質量 (M_D) を計測し、式(2)より求めた。

$$M_i = \frac{(M_0 - M_D)}{(M_s - M_D)} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 M_i ：飽和度 (%)、 M_0 ：試験前の質量 (g)、 M_s ：飽和質量 (g)、 M_D ：絶乾質量 (g)。

なお、各組み合わせで試験体を 3 体ずつ作成し、3 体の測定結果の平均値を用いて考察する。

2.4 測定項目

(1) 自然電位測定

測定には入力抵抗 1Ω のポテンショガルバノスタット（北斗電工、HZ-7000）を用いた。なお、コンクリート版の飽和度の影響を検討するため、測定前にコンクリート版に散水はしていない。測定した自然電位は、かぶりコンクリートが自然電位の測定結果に与える影響を検討するため、式(3)に示すように溶液中に浸せきさせた鋼材の自然電位を基準とし、かぶりコンクリートを介した測定結果との差を「電位差」とした。

$$V_D = V_{concrete} - V_{liquid} \quad (3)$$

ここに、 V_D ：電位差 (mV)、 $V_{concrete}$ ：かぶりコンクリートを介して測定した鋼材の自然電位 (mV vs. SSE)、 V_{liquid} ：溶液中に浸せきさせた鋼材の自然電位 (mV vs. SSE)

(2) インピーダンススペクトル

測定系は 3 電極系とした。印加電圧は $\pm 10\text{mV}$ (rms)、掃引周波数は $10\text{kHz} \sim 10\text{MHz}$ とした。なお、測定点数は 5 点、 $10\text{kHz} \sim 10\text{Hz}$ の積分回数は 20 回、 1Hz 以下の積分回数は 1 回とした⁷⁾。図中で用いる Z' はインピーダンスの実数値、 Z'' はインピーダンスの虚数値を示している。

3. 実験結果

3.1 かぶりがインピーダンススペクトルに与える影響

図-4 に、かぶりコンクリートの有無による、インピーダンススペクトルの変化を示す。「NaCl0.59」は、Cl 濃度 0.59kg/m^3 の水溶液に、鋼材を浸せきさせた状態で測定した結果である。「版 N0.59」は、自由 Cl 濃度が 0.59kg/m^3 となるようにした N を用いて W/B=40%としたかぶりコンクリート（版 N0.59）を設置した測定結果である。インピーダンススペクトルは、かぶりの抵抗成分によりコンクリート抵抗が $0\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ から $3\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ に変化し、高周波数領域 ($100\text{kHz} \sim 1\text{kHz}$) では抵抗体とコンデンサ容量の並列回路で示される容量性半円が生じた。このことから、かぶりが電気化学的測定結果に与える影響は、「抵抗成分」と、「容量性の挙動」の影響と考えられる。かぶりにより高周波数領域に容量性の挙動が生じる

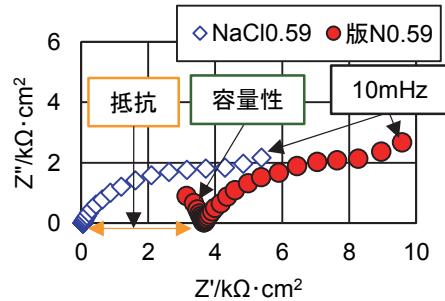


図-4 かぶりが測定結果に与える影響
(Cl 濃度 0.59kg/m^3 含む水溶液に浸せき)

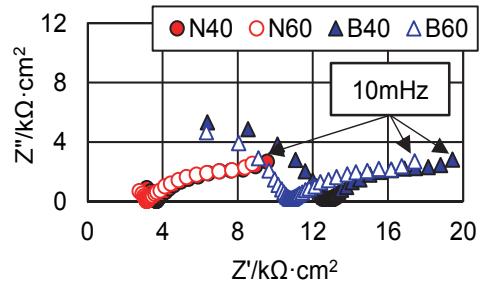


図-5 かぶりの W/B やセメント種類が
測定結果に与える影響

要因は、インピーダンススペクトルの測定時に流れる電流により、コンクリート中の細孔溶液中のイオンが偏ることで⁸⁾、コンデンサの挙動をするためと考えられる。

図-5 に「Cl0.59」における、かぶりのセメント種類や W/B が異なる場合のインピーダンススペクトルを示す。いずれの測定結果も「抵抗成分」と、「容量性の挙動」が見られた。そこで、コンクリート抵抗と Constant Phase Element (以下、CPE) の並列回路⁷⁾を用いて、コンクリート抵抗 R_c や、CPE 素子の CPE 定数 T_{CPE} 、および半円の潰れの程度を示す p などのパラメータを把握し、式(4)からコンデンサ容量を求めた。

$$C = T_{CPE}^{1/p} \cdot R_c^{(1-p)/p} \quad (4)$$

ここに、 C :コンデンサ容量 (μF)、 T_{CPE} :CPE 定数、 R_c :コンクリート抵抗 (Ω)、 p : $0 < p \leq 1$ (p が 1 より小さくなると、インピーダンススペクトルは縦につぶれた半円)

コンクリートの抵抗が大きい順に B40 ($11.9\text{k}\Omega$) > B60 ($11.1\text{k}\Omega$) > N40 ($4.0\text{k}\Omega$) > N60 ($3.1\text{k}\Omega$) となった。また、容量性の挙動として、かぶりによるコンデンサ容量は、N40 ($0.0075\mu\text{F}$) > B40 ($0.0066\mu\text{F}$) ≈ N60 ($0.0062\mu\text{F}$) > B60 ($0.0059\mu\text{F}$) となり、セメント種類の違いによるコンデンサ容量への影響は小さいと考えられる。

インピーダンススペクトルの測定結果より、かぶりは電気化学的測定結果に影響を与えることが分かった。次に、かぶりが自然電位の測定結果に与える影響を検討す

る。

3.2 かぶりが自然電位の測定結果に与える影響

(1) 腐食なし-飽和かぶりコンクリート

図-6に、鋼材腐食が生じていない場合(CH, NaCl0.1)の、かぶりが電位差に与える影響を示す。「Clなし」は、低W/B(40%)および高炉スラグ微粉末で置換した場合に電位差が大きくなっていることから、セメント組織が緻密な場合に電位差が大きくなると考えられる。「Cl0.1」は、かぶりと溶液の濃度差がないため、電位差は小さくなると考えられるが、かぶりBの電位差は最大27mVと大きくなった。「Cl0.59」から、飽和かぶりコンクリートにClが浸透した場合、W/Bおよびセメント種類の違いによる電位差は小さいことが分かる。

式(1)に示したHendersonの式より、イオンの種類や濃度が等しい溶液とかぶりの組み合わせである「Clなし」や「Cl0.1」の電位差は小さくなると考えられるが、「Cl0.59」よりも電位差は大きい結果となった。「Clなし」の電位差の理由として、組織が緻密な低W/B(40%)や高炉スラグ微粉末を用いた場合の電位差が大きくなっていることから、緻密なコンクリートに多いと考えられる不連続な細孔が影響していると考えられる。本研究では、水中浸せきにより飽水状態にしているが、不連続な細孔は水で満たされないことや、連続細孔も完全に水で満たされない可能性も考えられ、これらの水の不連続性の影響により電位差が生じたと考えられるが、今後の検討が必要である。また、「Cl0.1」や「Cl0.59」の電位差が小さくなった理由は、コンクリートが塩化ナトリウム(NaCl)を含むと、コンクリート中のカルシウムイオン Ca^{2+} と Cl^- により、吸湿性(潮解性)のある塩化カルシウム CaCl_2 を含む状態になるとされる。そのため、かぶりのCl濃度が大きくなることで、吸湿性の影響が顕著となり水の不連続性の影響が低下し、結果として電位差は小さくなつたと考えられる。

(2) 腐食なし-飽和度低下の影響

図-7に、飽和かぶりコンクリートの電位差を基準とし、かぶりの飽和度が低下した場合の電位の変化量を示す。Nは、かぶりのCl濃度が大きい「Cl0.59」で、電位の変化量が小さくなつた。BはCl濃度によらず、電位の変化量は最大40~60mVと大きくなり、電位変化量の最大値と最小値の差は、Bが大きいことが分かる。このことは、前述の細孔中の水の不連続性が影響していると考えられる。Cl濃度が低い場合(Clなし, Cl0.1)、水の不連続性の影響が顕著となり、かぶりのセメント種類にかかわらず電位差が大きくなる。Cl濃度が大きくなると(Cl0.59)、Clの吸湿性によりかぶりNでは水の不連続性の影響が小さくなり、電位差は小さくなる。一方、かぶりBでは、水の不連続性の影響が小さくなる場合と、

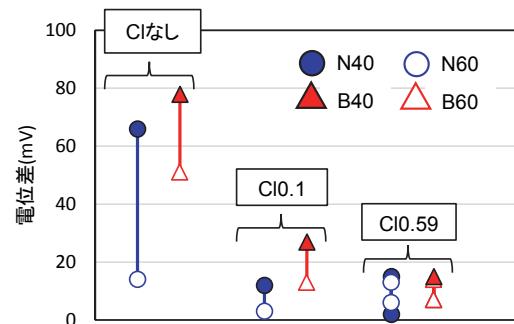


図-6 かぶりが電位差に与える影響
(腐食なし, 飽和度: 100%)

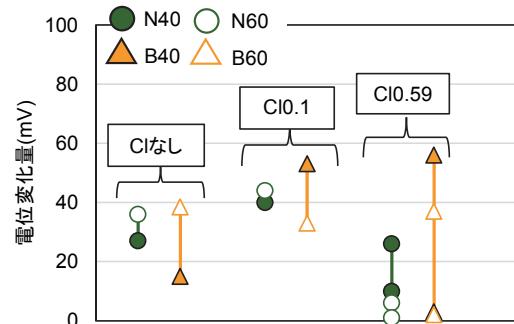


図-7 飽和度変化による電位の変化量
(腐食なし, 飽和度: 86~93%)

ほぼ変化がない場合がある。このことは、BはNと比較し細孔組織が緻密なため、Clによる吸湿性の影響よりも、水の不連続性の影響が顕著になる場合があり、電位変化量がCl濃度によらず大きくなつたと考えられる。

(3) 腐食あり-飽和かぶりコンクリート

図-8に、鋼材腐食が生じている場合(NaCl0.59)の、飽和かぶりが電位差に与える影響を示す。「Clあり」と「鋼材表面Cl残留」を比較すると、セメント種類によらず「鋼材表面Cl残留」の電位差が大きくなつた。Cl濃度が大きい「Clあり」の電位差は5~11mVであることから、殆ど電位差は生じていないことが分かる。

図-6と図-8より、鋼材腐食の有無が電位差に与える影響を検討すると、かぶりのCl濃度の大きい「Cl0.59」と「Clあり」は、概ね同程度の小さな電位差となつた。このことから、かぶりのCl濃度が大きい場合、鋼材腐食の有無に関わらず電位差は小さいことが分かる。一方、かぶりのCl濃度が小さい「Clなし」と「鋼材表面Cl残留」を比較すると、「Clなし」は「鋼材表面Cl残留」の最大6~8倍の電位差となつた。このことから、かぶりのCl濃度が小さい場合は、鋼材腐食の有無の影響を受け、健全鋼材で電位差が大きくなると考えられる⁹⁾。

(4) 腐食あり-飽和度低下の影響

図-9に、鋼材腐食が生じている場合の、飽和かぶりの電位差を基準とし、かぶりの飽和度が低下した場合の

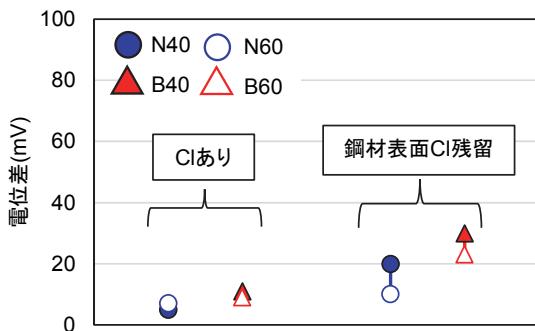


図-8 かぶりが電位差に与える影響
(腐食有り, 飽和度 : 100%)

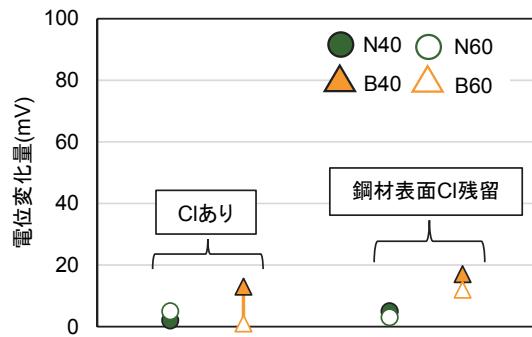


図-9 飽和度変化による電位の変化量
(腐食あり飽和度 : 86~93%)

表-2 かぶりによる電位の補正

セメント種類	N				B				
	W/B (%)		40	60	40		60		
飽和度(%, 電位差(mV))	(%)	(mV)	(%)	(mV)	(%)	(mV)	(%)	(mV)	
腐食なし	Clなし	100	66	100	14	100	78	100	51
		93~	93	89~	89	93~	93	93~	89
	Clあり	100	10	100	7	100	12	100	16
		86~	35	84~	24	90~	49	88~	40
腐食あり	88~100	5~7	86~100	7	92~100	11~24	89~100	8~9	

電位の変化量を示す。「Clあり」、「鋼材表面Cl残留」とも、電位変化量は小さくなつた。図-7と図-9より、鋼材腐食の有無が電位変化量に与える影響を検討すると、かぶりのCl濃度の大きい「Cl0.59」と「Clあり」は、「Cl0.59」が「Clあり」の4~5倍の電位変化量となつた。また、かぶりのCl濃度が小さい「Clなし」と「鋼材表面Cl残留」を比較すると、「Clなし」は「鋼材表面Cl残留」の最大2~7倍の電位変化量となつた。このことから、鋼材腐食が生じていない場合、かぶりの飽和度低下が電位変化に与える影響は大きいことが分かる。

4. セメント種類や飽和度による自然電位に与える影響

表-2に、3章の実験結果を取りまとめ、かぶりのセメント種類、W/B、および飽和度が自然電位の測定結果に与える影響を示す。表中の「腐食なし」の「Clなし」は、かぶりがClを含まず、鋼材腐食が生じていない場合の電位差である。「Clあり」は、かぶりがClを含み、鋼材腐食が生じていない場合の電位差の平均値である。「腐食あり」は、かぶりがClを含み、鋼材腐食が生じている場合の電位差である。

自然電位による鋼材腐食の評価は、一般的にASTMの評価基準が用いられている。ASTMの評価基準はかぶりの影響を含むため、実構造物を対象とした計測では簡単な評価方法であるが、評価基準と実際の鋼材腐食が一致しない場合があると考えられる。そこで本研究では、溶液試験は鋼材の状態を正しく測定可能であることから、

鋼材を浸せきさせた溶液試験を用いた。評価基準は、本研究では自然電位が安定した浸せき70日以上の自然電位(mV vs SSE)を閾値とし、-100mVより貴な電位で「腐食なし」、-100mV~-450mVの電位の範囲で「不確定」、-450mVより卑な電位で「腐食あり」とした。なお、本研究の溶液試験の自然電位は短期間の浸せき結果であり、長期間の浸せき結果より貴な電位となつた。そのため、腐食の評価基準に用いる鋼材の状態(浸せき期間)については、今後の検討が必要である。

コンクリート構造物の自然電位の測定結果の補正方法は、最初にかぶりによる電位差の小さい「腐食あり」の評価をする。例えば、「腐食あり」のNは7mVの電位差であり、溶液による腐食の評価基準は-450mVであることから、-443mV以下の電位で腐食と判定できる。Bの場合は、W/Bに応じてB60は-441mV以下、B40は-426mV以下で腐食と評価する。次に、「腐食なし」の電位の補正の値を用いて、セメント種類、W/B、Clの有無、飽和度などが分かっている場合、それらに基づいて電位の補正をする。図-10に電位補正の使用方法の例を示す。Clを含むN60の自然電位は-443mVよりも卑な-472mVであることから、「腐食あり」と判定できる。なお、表-2よりNの腐食ありの電位補正7mVを考慮すると、自然電位は-479mVとなる。次に、かぶりがB40のClを含み、飽水状態でないことが分かっている場合、測定結果が-32mVの場合を考える。この場合、「腐食あり」であれば-426mV以下となるので、この段階で「腐食なし」と

評価できる。さらに、「腐食なし」Cl⁻ありの電位差49mVを用いて、測定結果の-32mVの電位を補正すると、自然電位は-81mVとなる。そのため、溶液試験の腐食の評価基準と照らし合わせることで「腐食なし」と評価される。

今後は、コンクリート試験体を用いて、かぶりを介した表面に照合電極を設置し自然電位を測定した場合の結果と、鋼材近傍で自然電位を測定した結果を比較し、かぶりの影響を考慮できているか検証する必要がある。

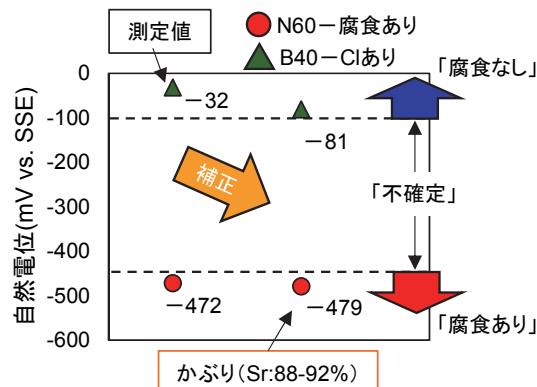


図-10 かぶりを考慮した電位の補正例

5.まとめ

本研究は、かぶりコンクリートが電気化学的測定結果に与える影響について検討した。得られた知見は次の通りである。

- (1) かぶりのセメント種類、W/B、および塩化物イオン濃度により生じる Membrane potential が自然電位の測定結果に与える影響は、組織が緻密な低 W/B(40%)や高炉スラグ微粉末を用いたかぶりで大きくなつた。このことから、緻密なコンクリートに多いと考えられる不連続な細孔が影響していると考えられる。
- (2) かぶりの飽和度が低下する場合、普通ポルトランドセメントを用いた試験体は、かぶりの塩化物イオン濃度が大きくなることで、電位の変化量が小さくなつた。高炉スラグ微粉末を用いたかぶりは塩化物イオン濃度によらず、電位の変化量は最大 40~60mV と大きくなつた。このことは、細孔中の水の不連続性が影響していると考えられる。
- (3) 鋼材腐食の有無が電位差に与える影響は、かぶりの塩化物イオン濃度が大きいことで、鋼材腐食の有無

に関わらず電位差は小さくなつた。また、鋼材腐食が生じていない場合、かぶりの飽和度低下が電位変化に与える影響は大きい。

- (4) 模擬鉄筋コンクリート試験体を用いて、かぶりの影響を考慮した自然電位の評価方法を提案した。

謝辞

本研究の一部は、SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術の「港湾構造物のライフサイクルマネジメントの高度化のための点検診断および性能評価に関する技術開発」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) Ueli Angst, Oystein Vennesland, Roar Myrdal: Diffusion potentials as source of error in electrochemical measurements in concrete, Material and Structures, pp.365-375, 2009.
- 2) 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-, コンクリート工学, Vol.27, No.3, pp.69-74, 1989.3.
- 3) 田村英雄, 田村好晴:現代電気化学, 培風館 pp.63-64, 1977.
- 4) ASTM C 876-91 (1999). Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp457-462
- 5) 染谷望, 加藤佳孝:かぶりコンクリートが電気化学的測定結果に与える影響の検討:腐食防食学会第62回材料と環境討論会, C-115, pp.247-250, 2015.9.
- 6) 石田哲也, Ho Thi Lan Anh:非線形固定化モデルと濃度依存型拡散則の連成による塩分浸透解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.875-880, 2006.
- 7) 板垣昌幸:電気化学インピーダンス法 原理・測定・解析, 丸善出版, 2012.
- 8) J McCarter and S Garvin: Dependence of electrical impedance of cement-based materials on their moisture condition, J. Phys. D: Appl. Phys. 22, pp.1773 – 1776, 1989.
- 9) 腐食防食協会:金属の腐食・防食 Q&A 電気化学入門編, pp.4-6, 2002.