

論文 かぶりコンクリートがマクロセル腐食を生じている鉄筋の電気化学測定結果に与える影響の定量的把握

中川 智統*1・加藤 佳孝*2・江口 康平*3・染谷 望*4

要旨:本研究では、塩橋を用いてマクロセル腐食を模擬できる溶液試験を考案した。溶液試験の妥当性を検討した後、かぶりコンクリートが電気化学測定結果に与える影響や、腐食部・非腐食部間コンクリートがマクロセル腐食に与える影響を検討した。その結果、かぶりコンクリートによって、腐食部では 19~22mV、非腐食部では 30~36mV の電位差を生じ、塩化物イオンを含む場合、かぶりコンクリートが自然電位に与える影響が小さくなることが示された。また、腐食部・非腐食部間の塩橋によって生じる電位差の影響の1つとして、陽イオンと陰イオンの移動度の差が小さい方が、電位差が小さくなることが分かった。

キーワード:マクロセル腐食, 溶液試験, 自然電位, 塩橋

1. はじめに

コンクリート構造物中铁筋の腐食状況を評価する方法として、電気化学測定手法が活用されている。既往の研究¹⁾²⁾から、電気化学測定結果に影響を与える要因として、(1)コンクリート内部に位置する鉄筋と外部に位置する照合電極の間に存在するコンクリートによって生じる液間電位差、(2)鉄筋と対極間のコンクリートによって生じる電圧降下、(3)コンクリート中の含水状態によって生じる電位差が挙げられる。実構造物に対して電気化学測定を行った場合、測定結果は(1)~(3)のすべての要因が複合していると考えられる。しかし、これらの要因が測定結果に与える影響については十分に検討されていない。電気化学測定結果から腐食状況を正確に評価するためには、各要因の影響を把握することは重要である。

これらの要因の中で、代表的な電気化学測定法である自然電位法に影響を与える要因は(1)、(3)である。既往の研究では、これらの中で、(3)の影響について検討している研究は多い^{例え3)}。また、(1)の影響については、マイクロセル腐食環境下では検討が進められている⁴⁾ものの、マクロセル腐食環境下で検討している研究は少ない。

また、マクロセル腐食は腐食部であるアノードと非腐食部であるカソードがコンクリートを介して回路を形成している。そのためマクロセル腐食を理解する上では、腐食部と非腐食部の間に存在するコンクリート（以下、腐食部・非腐食部間コンクリート）がマクロセル腐食に与える影響を把握することが重要である。しかし、腐食部・非腐食部間コンクリートがマクロセル腐食に与える

影響は十分に検討されていない。

そこで本研究では、(1)の影響を個別に検討でき、かつマクロセル腐食を再現できる実験系を提案することや、提案した実験系を用いてかぶりコンクリートが電気化学測定結果に与える影響を把握することを目的とした。

2. マクロセル腐食を模擬した実験系の構築

一般的に用いられているコンクリート中に鉄筋を設置した実験系では、かぶりコンクリートが電気化学測定結果に与える影響と、腐食部・非腐食部間コンクリートがマクロセル腐食に与える影響を分離して把握することは難しい。そこで、コンクリート中の鉄筋周囲が細孔溶液で満たされていると仮定し、溶液試験を用いて、かぶりコンクリートが電気化学測定結果に与える影響と、腐食部・非腐食部間コンクリートがマクロセル腐食に与える影響を個別に把握できるような実験系を構築する。構築に先立ち、マクロセル腐食のメカニズムについて整理する。

2.1 マクロセル腐食のメカニズム

図-1 に腐食部・非腐食部間コンクリートが存在しない場合のマクロセル腐食時の腐食部鉄筋と非腐食部鉄筋の分極曲線の概念を示す。腐食部・非腐食部間で回路を形成していない時（マイクロセル腐食時）の自然電位を $E_{mic.an}$, $E_{mic.ca}$ 、回路を形成している時（マクロセル腐食時）の自然電位を $E_{mac.an}$, $E_{mac.ca}$ とすると、腐食形態がマイクロセル腐食からマクロセル腐食へと変化することで腐食部の自然電位は $E_{mic.an}$ から $E_{mac.an}$ に貴化し、非腐食部は

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (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 理工学部土木工学科 博(工) (正会員)

*4 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 博(工) (正会員)

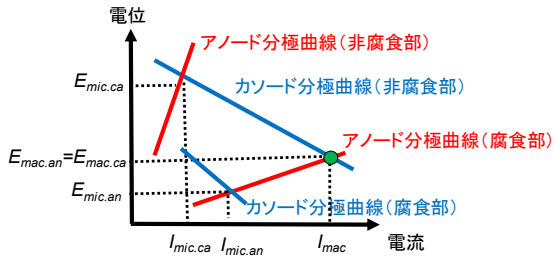


図-1 回路形成前後の分極曲線
(腐食部・非腐食部にコンクリートなし)

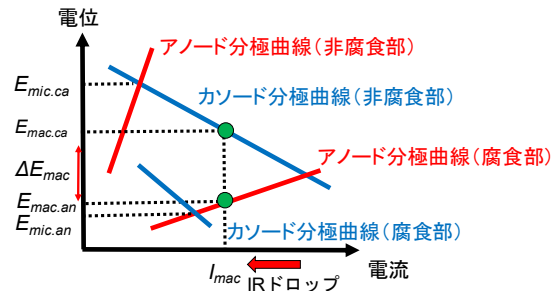


図-2 回路形成前後の分極曲線
(腐食部・非腐食部にコンクリートあり)

$E_{mic.ca}$ から $E_{mac.ca}$ に卑化する。そして、腐食部のアノード分極曲線と非腐食部のカソード分極曲線の交点がマクロセル腐食時の自然電位 ($E_{mac.an}=E_{mac.ca}$) となる。

図-2 に、腐食部・非腐食部にコンクリートが存在する場合の、マクロセル腐食時の腐食部鉄筋と非腐食部鉄筋の分極曲線の概念を示す。図-1 と同様に、ミクロセル腐食からマクロセル腐食へと変化することで腐食部・非腐食部の自然電位は分極するものの、コンクリート内の電気抵抗による電圧降下によって、 $E_{mac.an}$ と $E_{mac.ca}$ の間に電位差が生じる。コンクリート内の電気抵抗は、コンクリートを抵抗体と考え、細孔構造に起因する屈曲度や収斂度、およびコンクリートの飽和度によって影響を受けることを想定している。ここで、 $E_{mac.an}$ と $E_{mac.ca}$ の電位差をマクロセル時の腐食部・非腐食部の電位差 (ΔE_{mac}) とすると、腐食部・非腐食部の電位差 $\Delta E_{mac}(V)$ は式(1)で表せる。

$$\Delta E_{mac} = R_s \times I_{mac} \quad (1)$$

ここに R_s : 腐食部・非腐食部間コンクリート内の電気抵抗 (Ω), I_{mac} : マクロセル電流 (μA) である。

ここで、コンクリート中の鉄筋がマクロセル腐食を生じている場合、腐食部と非腐食部の鉄筋は、コンクリート中のイオンが移動し、電流が流れることで回路を形成している。そのため、コンクリート中のイオンの移動のしやすさは、マクロセル腐食を理解する上で重要であり、イオンの移動のしやすさはコンクリート内の電気抵抗と密接に関係していると考えられている⁹⁾。イオンの移動のしやすさは、イオンの移動度や、空隙構造、飽和度等が影響していると考えられる。

2.2 実験系の構築

2.2.1 かぶりコンクリート模擬試験

マクロセル腐食を生じている場合の、かぶりコンクリートが電気化学測定結果に与える影響を把握するための実験系を説明する。既往の研究⁹⁾より、コンクリート中鉄筋の周囲が細孔溶液で満たされると仮定すると、コンクリート中の鉄筋は図-3A の実験系で模擬することができる。ここで、マクロセル腐食は1本の鉄筋で、

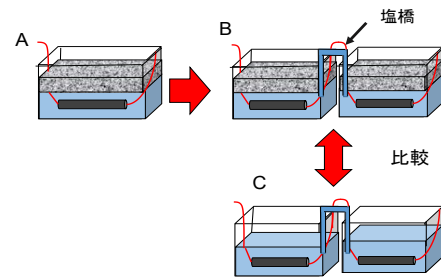


図-3 マクロセル腐食を模擬した試験体形成の経緯

アノード反応が生じる位置とカソード反応が生じる位置が異なる。そのため、図-3A を用いてマクロセル腐食を再現するには、アノード反応が生じる位置とカソード反応が生じる位置の2種類の図-3A が必要である。そこで、2種類の図-3A を用いて、図-3B のように各鉄筋を導線で導通し、溶液間を塩橋で繋ぐことでマクロセルを模擬した電気回路を形成させた。ここで塩橋とは、KCl 等の飽和水溶液を寒天などでゲル化し、ガラス管に満たした器具である⁹⁾。塩橋は、溶液抵抗が小さいことや、異なる溶液で回路を形成させると生じる液間電位差を小さくすることができるため、腐食部・非腐食部間で生じる電圧降下を小さくできる。マクロセル腐食を模擬した実験系で、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定量的に把握するため、かぶりコンクリートを設置した場合(図-3B)と設置しない場合(図-3C)の測定結果を比較した。

2.2.2 腐食部・非腐食部間コンクリート模擬試験

腐食部・非腐食部間コンクリートがマクロセル腐食に与える影響を把握するための実験系を説明する。図-4の左のように $100 \times 150 \times 600 \text{mm}$ のコンクリート試験体の2か所に $80 \times 120 \times 170 \text{mm}$ の穴をあけ、その穴に異なる種類の溶液を満たし、鉄筋から延ばした導線で繋げて電気回路を形成させることでマクロセル腐食を模擬した。なお、図-4の左図について、試験体内部に鉄筋が設置していることが理解しやすいように示しており、実際に楕円形の穴が空いている実験系ではない。図-4の左の実験系と図-3Cのかぶりコンクリート設置なしの実験

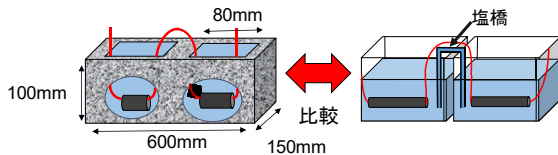


図-4 腐食部・非腐食部間コンクリート模擬試験

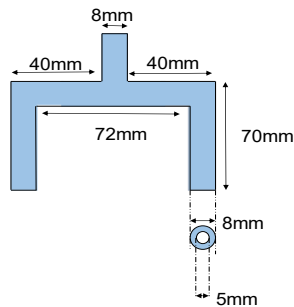


図-5 塩橋形状・寸法

系を比較することで、腐食部・非腐食部間コンクリートがマクロセル腐食に与える影響を検討した。

2.3 実験系の妥当性の検討

2.3.1 塩橋本数の検討

塩橋は液間抵抗が小さく、またイオンが移動しやすいため、コンクリートよりも腐食部・非腐食部間で生じる電位差を小さくできる。本実験で用いた塩橋寸法を図-5に示す。ここでは、最も電位差を小さくする塩橋の本数を実験的に検討した。

飽和水酸化カルシウム水溶液（以下、飽和 CH 溶液）（非腐食部）と、飽和 CH 溶液に NaCl (1.2, 2.0, 4.0kg/m³) を混入（腐食部）した2つの溶液中に鉄筋を設置して、溶液間を Na₂SO₄ ゲルで作成した塩橋で繋ぎ、腐食部・非腐食部間を導線で導通させることで回路を形成させた。この時、塩橋は最初1本入れ、24時間ごとに1本ずつ追加して腐食部・非腐食部の電位差が変化しなくなるまで続けた。1本追加ごとに1時間後、24時間後にテスターを用いて自然電位を測定した。

腐食部・非腐食部の自然電位の変化を図-6～図-8に示す。図-6から NaCl 濃度 1.2kg/m³ では、塩橋1本時点での腐食部・非腐食部間の電位差は 199mV となった。ここから塩橋を1本ずつ追加していくと、5本の時に電位差は 53mV となり、5本目以降ではほぼ同程度の電位差となった。次に、図-7の NaCl 濃度 2.0kg/m³ では、塩橋5本目以降は 90mV 程度で推移した。さらに図-8の NaCl 濃度 4.0kg/m³ では、5本目以降の電位差は 120mV で推移した。これらの結果から、本研究の範囲内では塩橋を5本以上設置することで、可能な限り電位差を小さくできることが明らかとなった。以上から本研究では、使用する塩橋の本数を5本としてかぶりコンクリート模擬試験、

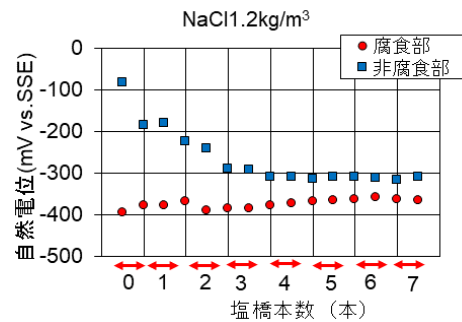


図-6 NaCl 濃度 1.2kg/m³

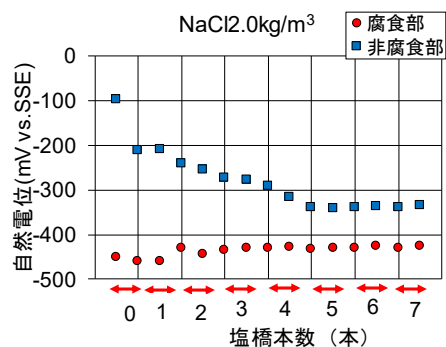


図-7 NaCl 濃度 2.0kg/m³

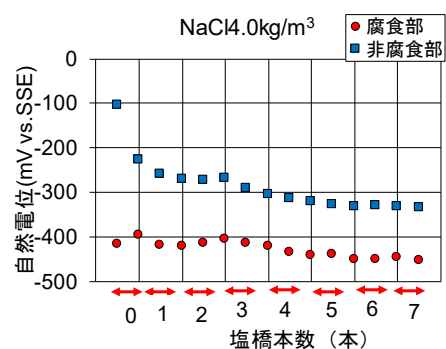


図-8 NaCl 濃度 4.0kg/m³

腐食部・非腐食部間コンクリート模擬試験を検討した。

2.3.2 ミクロセル腐食からマクロセル腐食に変化した時の腐食部、非腐食部の分極量

提案した実験系で、マクロセル腐食が生じていることを確認するため、表-1に NaCl 濃度 1.2kg/m³ で腐食部と非腐食部を塩橋、コンクリート厚さ 4cm, 8cm で回路を形成した場合の、回路形成前から回路形成 24h 後の腐食部・非腐食部の自然電位の変化量を示す。表-1から、ミクロセル腐食からマクロセル腐食へと腐食形態が変化することで、自然電位は腐食部で 4～20mV、非腐食部で 139～197mV 卑化する結果となった。ここで、図-2の分極曲線を見ると、理論的には腐食部の自然電位は、マクロセル腐食に腐食形態が変化することで貴化すると考えられており、今回の結果とは異なる。この原因として、

腐食進行に伴い溶液中の溶存酸素濃度が低下したことが挙げられる。ここで、鉄筋の自然電位(V)は、式(2)のネルンストの式によってあらわされる。

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_o}{a_R} \quad (2)$$

ここに E° : 標準電極電位(V), R: 気体定数(8.314J/mol·K), T: 絶対温度(K), n: 電子の係数(-), F: ファラデー定数(96500C/mol), a: 濃度(mol/L), oは酸化体, Rは還元体)である。式(2)から、酸化体である溶存酸素濃度の濃度が低下すると自然電位が卑化することが示される。

ここで、回路形成前の溶存酸素濃度と、回路形成 24h 後の溶存酸素濃度を表-2 に示す。表-2 から、腐食部・非腐食部間を塩橋で介した場合、回路形成前は溶存酸素濃度が 8.9g/L であるのに対し、回路形成 24h 後は 5.69g/L となり、溶存酸素濃度は実験中の腐食進行により低下している。溶存酸素濃度の低下は、腐食部・非腐食部間 4cm, 8cm でも同様に得られた。この結果から、マイクロセル腐食からマクロセル腐食へと腐食形態が変化した時、溶存酸素が消費されたことで、腐食部の自然電位がわずかに卑化したと考えられる。

腐食部・非腐食部間に流れるマクロセル電流を測定した。その結果、腐食部・非腐食部間が塩橋、4cm, 8cm のマクロセル電流はそれぞれ 122, 118, 78 μ A を示した。この結果から、本実験系でマクロセル腐食は再現できていると考えられる。また、本実験系で使用する模擬試験は、すべて溶液を用いた試験であるため、溶存酸素濃度の傾向は各模擬試験で同じであるといえる。しかし、溶存酸素濃度の変化量は腐食部・非腐食部間の要素によって変化しているため、かぶりコンクリートが電気化学測定結果に与える影響や、腐食部・非腐食部間コンクリートがマクロセル腐食に与える影響を正確に把握するため

表-1 ミクロセル腐食からマクロセル腐食に変化した時の自然電位の変化量

腐食部・非腐食部間要素	腐食部	非腐食部
塩橋	-10	-197
4cm	-20	-139
8cm	-4	-149

表-2 回路形成前後の腐食部の溶存酸素濃度の変化

測定時期	溶液中の溶存酸素濃度(g/L)		
	塩橋	4cm	8cm
腐食部・非腐食部間要素			
回路形成前	8.9	8.9	8.9
回路形成 24h 後	5.69	5.21	4.38

には、溶存酸素濃度の変化量も同程度に制御することが望ましいと考えられ、今後の検討が必要である。今回は、溶存酸素濃度による影響を無視して考察を進める。

2.4 実験水準, 測定方法

2.4.1 実験水準

かぶりコンクリート模擬試験, 腐食部・非腐食部間コンクリート模擬試験で、マクロセル腐食が生じやすい環境を模擬するために、各モデルの腐食部, 非腐食部に使用する鉄筋の面積比を 1:3 とした⁶⁾。鉄筋は、 ϕ 16mm の丸鋼 (SUM23) を用いた。また、鉄筋の成分を表-3 に示した。各モデルの溶液は細孔溶液を模擬するため、飽和 CH 溶液とし、腐食部のみに NaCl を 1.2, 2.0, 4.0kg/m³ 混入させた。また、コンクリート版の細孔溶液に含まれる自由塩化物イオン濃度と溶液に含まれる自由塩化物イオン濃度の差による液間電位差の影響を排除するため、腐食部のかぶりコンクリート模擬試験で使用するコンクリート版にも NaCl を混入した。ここで、セメントは塩化物イオンを固定するため、溶液と同量の NaCl 濃度を添加しても鉄筋腐食に影響を与える自由塩化物イオン濃度が異なる。そこで本研究では、コンクリートの全塩化物イオン濃度と自由塩化物イオン濃度の関係⁷⁾を用いて、溶液中とコンクリート中の自由塩化物イオン濃度が等しくなるように、コンクリートの製造時に混入させる NaCl 濃度を調整した。溶液中、コンクリート版それぞれに混入させた NaCl 濃度、調整後の自由塩化物イオン濃度を表-4 に示す。例えば、表-4 で、溶液中に 1.2kg/m³, コンクリート中に 3.41kg/m³ の NaCl を添加することで、どちらも自由塩化物イオン濃度が 0.73kg/m³ となる。かぶりコンクリート模擬試験では、かぶりの厚さを 2cm, 腐食部・非腐食部間コンクリート模擬試験では、腐食部・非腐食部間コンクリート幅を 4cm, 8cm とした。

2.4.2 測定時期, 測定方法

2.3.1 の検討結果から、溶液間に設置する塩橋を 5 本として、かぶりコンクリート模擬試験, 腐食部・非腐食部間コンクリート模擬試験を検討した。かぶりコンクリート模擬試験, 腐食部・非腐食部間コンクリート模擬試験のいずれの場合も、測定時期はマクロセル回路を形成させてから 24 時間後 (以下、回路形成 24h 後) とした。測定項目は、自然電位とマクロセル電流とした。自然電位はテスター (入力抵抗 100M Ω) を用いて測定した。照合電極には、銀塩化銀電極を使用した。マクロセル電流は、腐食部・非腐食部間の導線と無抵抗電流計を接続して測定した。

表-3 鉄筋の化学成分(% \times 100)

C	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
8	103	7	32	11	6	22

表-4 混入 NaCl 濃度と自由 Cl 濃度

混入させた NaCl 濃度(kg/m ³)		自由 Cl 濃度 (kg/m ³)
溶液中	コンクリート中	
1.2	3.41	0.73
2.0	5.10	1.21
4.0	8.19	2.43

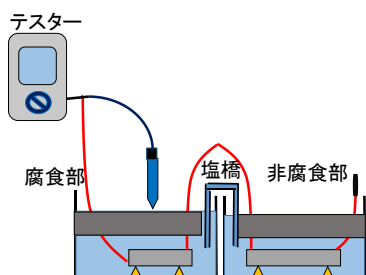


図-9 かぶりコンクリート模擬試験の測定方法 (かぶりあり)

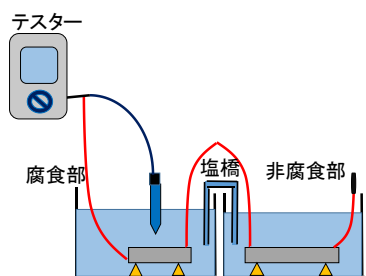


図-10 かぶりコンクリート模擬試験の測定方法 (かぶりなし)

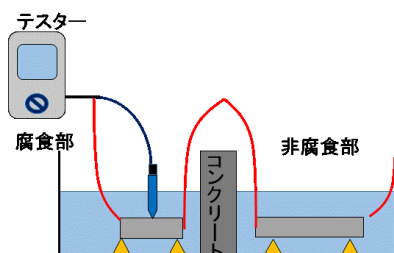


図-11 腐食部・非腐食部間コンクリート模擬試験の測定方法 (コンクリートあり)

測定方法は、かぶりコンクリート模擬試験は、図-9のように、かぶりコンクリートを介して腐食部の鉄筋の自然電位を測定した。その後、設置したかぶりコンクリートを取り除き、図-10のようにかぶりコンクリートを介さない状態での腐食部の自然電位を測定し、かぶりコンクリートを介した時の自然電位と、かぶりコンクリートを介さない時の自然電位の差からかぶりコンクリートにより生じる電位差を求めた。

一方、腐食部・非腐食部間コンクリート模擬試験は、図-11のように、腐食部・非腐食部間にコンクリートを介

表-5 かぶりが自然電位に与える影響

NaCl 濃度 (kg/m ³)	1.2		2.0		4.0	
	腐食	非腐食	腐食	非腐食	腐食	非腐食
かぶりあり (-mV vs.SSE)	344	240	363	247	366	261
かぶりなし (-mV vs.SSE)	363	270	385	283	388	292
電位差(mV)	19	30	22	36	22	31

して腐食部の自然電位を測定した。その後、非腐食部に対しても同様に自然電位を測定した。図-11のコンクリートで介した時の測定で得られた自然電位と図-10の塩橋で介した時の自然電位を比較した。

3. 実験結果

3.1 かぶりコンクリートが自然電位に与える影響

表-5に NaCl 濃度 1.2, 2.0, 4.0kg/m³での、かぶりコンクリートの有無によって生じる電位差を示す。電位差は、回路形成 24h 後のかぶり 2cm の自然電位から、かぶりなしの自然電位を差し引いた結果である。これらの結果から、腐食部は非腐食部と比較して、かぶりコンクリートが電位差に与える影響が小さい。これは、腐食部に含まれる塩化物イオンにより吸湿性のある塩化カルシウムが生成されたことが原因と考えられる。既往の研究⁴⁾でも、かぶりコンクリートが塩化物イオンを含む場合、自然電位の測定結果に及ぼす影響が小さくなることが報告されており、同様な測定結果の傾向となった。

3.2 腐食部・非腐食部間コンクリートが自然電位に与える影響

表-6に各 NaCl 濃度での回路形成 24h 後の腐食部・非腐食部をコンクリート厚さ 8cm, 4cm, 塩橋で回路を形成した時の腐食部・非腐食部の電位差を示す。腐食部・非腐食部間の要素として、NaCl 濃度 1.2, 4.0kg/m³では、塩橋<4cm<8cmの順に、NaCl 濃度 2.0kg/m³では 4cm<塩橋<8cmの順に電位差が大きくなった。この結果となった原因として、腐食部・非腐食部間のイオンの移動のしやすさが影響していると考えられる。

はじめに、イオンの移動度について着目する。一般に、陽イオンと陰イオンの移動度の違いは電位差を生じさせることが知られている。これは、電位差が移動しやすいイオンの移動を助け、逆に移動しにくいイオンの移動を助けることで、陽イオンと陰イオンの移動速度を同等と

表一六 腐食部・非腐食部間の要素が腐食部・非腐食部の電位差に与える影響

非腐食-腐食(mV vs.SSE)			
NaCl 濃度	1.2	2.0	4.0
塩橋	54	105	95
4cm	92	92	113
8cm	116	152	224

表一八 移動度の影響把握試験

非腐食部-腐食部(mV vs.SSE)		
	Na ₂ SO ₄ ゲル	CH ゲル
回路形成 24h 後	54	117

する役目を担っているためである⁸⁾。塩橋では、Na⁺とSO₄²⁻がイオンの移動を担い、コンクリート中では、主にCa²⁺とOH⁻がイオンの移動を担っている⁸⁾。表一七の各イオンの移動度の値⁹⁾から、塩橋よりもコンクリートの方が陽イオンと陰イオンの移動度の差が大きいことが確認できる。そのため、NaCl 濃度 1.2, 4.0kg/m³の測定結果のように、腐食部・非腐食部間がコンクリートの場合の方が、電位差が大きくなったと考えられる。

腐食部・非腐食部間の電位差が、陽イオンと陰イオンの移動度の差によることを確認するため、Na₂SO₄ゲルで満たした塩橋とCHゲルで満たした塩橋を比較した。同モル濃度(0.141mol/L)のNa₂SO₄とCHを用いてそれぞれ塩橋を作製し、図一三Aの溶液試験に設置した。この時、腐食部にはNaClを1.2kg/m³混入させ、2.4.2と同様に測定した。回路形成24h後の結果を表一八に示す。表一八から腐食部・非腐食部間の電位差は、Na₂SO₄ゲルで54mV、CHゲルで117mVとなった。ここで、表一八から、Na⁺とSO₄²⁻の移動度差が3.10×10⁻⁸m²/Vs、であるのに対し、Ca²⁺とOH⁻の移動度の差が14.33×10⁻⁸m²/Vsであることが確認できる。この結果から、実験的にも陽イオンと陰イオンの移動度の差が腐食部・非腐食部の電位差に影響を与えていることが実験的に明らかとなった。

しかし、NaCl濃度2.0kg/m³では腐食部・非腐食部間の電位差は4cm<塩橋<8cmの順であり、イオンの移動度だけでは、結果を説明できないことがわかる。移動のしやすさに影響を与える要因については今後さらなる検討が必要である。

4. まとめ

(1) 塩橋を用いて、かぶりコンクリートが自然電位測定の測定誤差に与える影響と、腐食部・非腐食部間コンクリートがマクロセル腐食に与える影響を把握するための実験系を構築した。

表一七 各イオンの移動度(25°C水中)⁹⁾

陽イオンの種類	移動度(m ² /Vs)	陰イオンの種類	移動度(m ² /Vs)
Na ⁺	5.19×10 ⁻⁸	SO ₄ ²⁻	8.29×10 ⁻⁸
Ca ²⁺	6.17×10 ⁻⁸	OH ⁻	20.5×10 ⁻⁸

- (2) かぶりコンクリートを介すことで、腐食部では19~22mV、非腐食部では30~36mVの電位差を生じる。塩化物イオンを含む場合、かぶりコンクリートが自然電位に与える影響が小さくなる。
- (3) 腐食部・非腐食部間に塩橋を用いて、イオンの移動度が腐食部と非腐食部間の電位差に与える影響を検討した結果、陽イオンと陰イオンの移動度の差が小さい方が、電位差が小さくなることが分かった。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：物理的解釈に基づく電気化学測定手法の体系化に関する研究委員会，2015.9
- 2) 独立行政法人土木研究所：塩害環境下にあるコンクリート中鉄筋のマクロセル腐食形成機構，2009.1
- 3) 斯波明宏，樋口正典，藤田学，辻幸和：かぶりコンクリートの性状が電気化学的鉄筋腐食測定法に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.745-750，2007
- 4) 染谷望，加藤佳孝，星芳直，板垣昌幸：かぶりコンクリートの状況に応じた自然電位による鉄筋腐食の評価手法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2157-2162，2016
- 5) 大塚利行，加納健司，桑畑進：ベーシック電気化学，化学同人，p42，2002
- 6) 村上拓，ナナヤッカラオミンダ，加藤佳孝，魚本健人：カソード領域がマクロセル腐食速度に及ぼす影響，東京大学生産技術研究所，研究速報 62 巻 4 号，2010
- 7) 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
- 8) 大塚利行，加納健司，桑畑進：ベーシック電気化学，化学同人，p61，2002
- 9) 野田稲吉：無機材料科学-I，標準応用科学講座 24，コロナ社，1997