

海水練りコンクリート中鉄筋への電気防食の適用について

濱田, 秀則
九州大学大学院工学研究院 : 博士(工学)

福永, 隆之
九州大学大学院工学研究院

山本, 大介
大分工業高等専門学校

大谷, 俊介
株式会社ナカボーテック

<https://hdl.handle.net/2324/4794210>

出版情報 : 防錆管理. 65 (10), pp.371-377, 2021-10-01. Japan Association of Corrosion Control
バージョン :
権利関係 :



海水練りコンクリート中鉄筋への電気防食の適用について

濱 田 秀 則*

Hidenori HAMADA

山 本 大 介**

Daisuke YAMAMOTO

福 永 隆 之*

Takayuki FUKUNAGA

大 谷 俊 介***

Shunsuke OTANI

世界気象機構によると、2025年までに世界の人口の3分の2にあたる人々が飲み水の確保さえ難しくなると危惧されている。コンクリートの製造においても今後は積極的な海水の使用が求められている。本検討は、海水で練り混ぜたコンクリート中の鉄筋を電気防食で防食することを想定した検討であり、これまでに鉄筋周囲の環境改善効果が明らかとなっている。

キーワード：海水練りコンクリート、鉄筋腐食、電気防食、環境改善効果、シラス、高炉スラグ微粉末

1. はじめに

世界気象機構（WMO）によると、昨今の爆発的な人口増加、開発途上国の工業化・生活の質的な向上により、現在の水の消費量は50年前の約3倍になっていると言われている。そのため、2025年までに世界の人口の3分の2にあたる人々が飲み水の確保さえ難しくなると危惧されている¹⁾。このような『水不足時代』の到来に備えて、生きるために不可欠な淡水の確保のための検討をそれぞれの分野で実施しておくことが求められている。コンクリートの製造においては年間数十億トンの淡水を消費しており、淡水の使用を少しでも減らすために積極的に海水を使用していくことが一つの解決策となる。

現在のコンクリートに関する諸規準では、海水で鉄筋コンクリートもしくはプレストレストコンクリートを製造することは禁じられている。これは海水中の塩化物イオンにより鉄筋の腐食が誘発されるためである。本検討は、海水で練り混ぜたコンクリート中の鉄筋を電気防食で防食することを想定した実験的検討である。まだ継続中ではあるが、これまでの実験データよりカソード分極

による防食効果に加えて、鉄筋周囲の環境改善による腐食抑制効果も得られることが明らかとなってきたのでこれまでの結果を報告する。本研究は九州大学と(株)ナカボーテックの協力研究として実施しており、実験結果は九州大学の修士論文及び卒業論文として順次蓄積している^{2)~4)}。また、本報告は昨年度の大谷らによる報告⁵⁾の続編であるとともに、2021年度の防錆技術大会において発表した内容⁶⁾をさらに拡充したものである。

2. 水問題についての補足説明

毎年洪水に見舞われるようになった我が国において「水不足」を意識する機会は少ない。しかし、水問題は洪水のみではなく、将来的に確実視されている「世界的な水不足」である。1984年から2015年のわずか30年間で、9万平方キロメートルの地表の水域が消失したとも言われている。「Virtual Water」という概念がある。ロンドン大学のアラン名誉教授の提唱によるが、食料を輸入するということは間接的に水を輸入しているに等しい、という考え方である。トウモロコシ1kgを生産するためには1800ℓの水を要し、小麦1kgには2000ℓ、米1kgには4000ℓ、牛肉1kgには実に20000ℓの水が

* 九州大学大学院 工学研究院（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744）博士（工学）

Kyushu University (744, Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan) Dr. Eng.

** 大分工業高等専門学校（〒870-0152 大分県大分市大字牧1666）博士（工学）

Oita National College of Technology (Maki 1666, Oita-shi, Oita, 870-0152, Japan) Dr. Eng.

*** 株式会社ナカボーテック（〒362-0052 埼玉県上尾市中新井417-16）博士（工学）、防錆管理士

Nakabohtec Corrosion Protecting Co., Ltd. (417-16, Nakaarai, Ageo-shi, Saitama, 362-0052, Japan) Dr. Eng., Corrosion Control Engineer

消費されている、すなわち、これらの生産物を輸入することは水を輸入することに等しい、という考え方である。この考え方によれば、日本は毎年約 800 億 m^3 の水を輸入しているに等しく、この量はわが国における年間の水の実消費量と同等であるとの試算結果もある。日本はすでに水不足の状態にあるとも言えるのである。20 世紀の戦争が石油をめぐる戦いであつたとすれば、21 世紀の戦争は水をめぐる戦いになる、との予見もある。水問題はすでに逼迫していると考えられるべきなのである。

3. 海水で練り混ぜた既存の実構造物の事例（長崎県宇久長崎鼻灯台）

長崎県宇久長崎鼻灯台は離島において練混ぜ水に海水を用いて施工された特殊な建造物であり、建設は昭和 34 年である。セメントとして高炉セメント B 種を用いたことが記録に残されている。施工当時と現在の状況を写真 1 に示す。施工から 60 年以上が経過しても、コンクリート表面におけるモルタル層の激しい剥離やその他の異状は認められず、総じて健全な状態を保っている。台のコンクリート部分は塗装をしていないが、灯台本体のコンクリートには白色の塗装が施されている。おそらく、灯台本体の内部空間に貴重な機器が置かれているため、念を入れて塗装を施し耐久性向上を図ったものと想像できる。結果として、塗装の塗膜により海水練りコンクリートの長期の耐久性を確保できたものと考えられる⁷⁾。

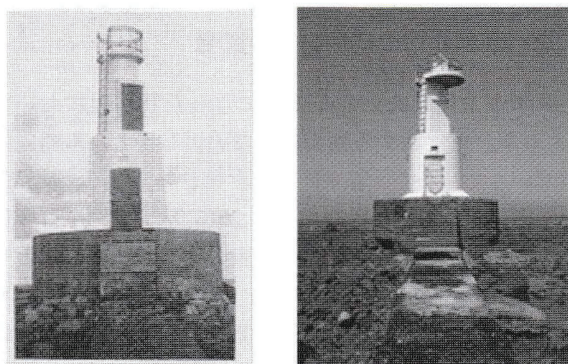


写真1 長崎県宇久長崎鼻灯台（左：建設直後、右：現在の状況）

4. 海水練りコンクリートの材齢 25 年時の強度特性

材齢 25 年が経過した海水練り（SW）と水道水練り（TW）のコンクリート円柱供試体（ $\phi 150 \times 300 \text{ mm}$ ）の試験結果を紹介する⁸⁾。写真 2 に供試体の外観性状を示す。

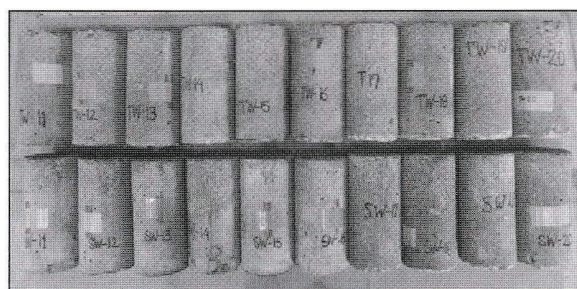


写真2 材齢25年のコンクリート供試体

コンクリートの製造は 1988 年であり、セメントとして普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は 60%、単位水量は 165 kg/m^3 、スランプは海水練りが 8.5 cm、水道水練りが 6.5 cm、空気量はいずれも 3.2～3.3% であった。打設後 24 時間で脱型し、材齢 28 日まで 20°C の水中養生を行った。その後、タンク内での海水浸せきを実施した。その際、タンクから蒸発した水を海水で補給したため、タンク内の海水の塩分濃度は、最終的にはほぼ飽和の状態となった。タンク内での海水浸せきは 1992 年で終了し、その後は実験室内での気中乾燥を継続し、2014 年に強度試験などの物理的性状試験を実施した。

表 1 に試験結果を示すが、材齢 28 日においても、材齢 25 年においても、海水練りの方が水道水練りよりも圧縮強度は大きくなった。水道水練りの圧縮強度に対する海水練りの圧縮強度の比率は、材齢 28 日において 1.14、材齢 25 年において 1.08 であり、長期材齢において幾分低下した。また、初期材齢時の圧縮強度に対して、25 年時の圧縮強度は水道水練りにおいて 1.45、海水練りにおいて 1.37 となり、水道水練りの方が大きくなった。一方で、コンクリート中の塩化物イオン含有量は、海水練りで 23.2 kg/m^3 、水道水練りで 18.7 kg/m^3 であり、25 年時においても海水練りの差がそのまま残っている。

表 1 試験結果

試験項目	材齢28日		材齢25年	
	水道水練り	海水練り	水道水練り	海水練り
圧縮強度 (MPa)	33.2	37.9	48.2	51.9
静弾性係数 (GPa)	23.9	23.6	32.6	31.5
引張強度 (MPa)	2.5	2.7	3.9	3.7
塩化物イオン含有量 (kg/m^3)	—	—	18.7	23.2

る。なお、これらの値は、セメントに対する質量%で表示すると、8.4%、6.8%となり、鉄筋の発錆限界量とされる 1.2 kg/m^3 、0.4% を大きく超える量である。

海水で練り混ぜることにより導入される塩化物イオン、及び硬化後に海水浸せきにより侵入する塩化物イオンは、長期材齢においても、コンクリートの物理的特性、すなわち強度特性、変形特性を低下させることはない結論づけることができる。

5. 海水練りコンクリート中の鉄筋に対する電気防食の適用

5.1 実験シリーズI：陽極からの距離と防食効果の関係の検討

鉄筋コンクリート構造物に外部電源（線状陽極方式）の電気防食を適用する場合、一般的には陽極の取り付け間隔が 300 mm 以下であれば防食効果を得ることができる。本実験では海水練りコンクリート中の鉄筋に対し打設後初期の段階から電気防食を適用した場合のその防食効果を明確にすることを目的としている。

5.1.1 実験概要

図1に供試体の形状・寸法を示す。鉄筋の本数によりB3（3本）、B5（5本）、B9（9本）の3種類がある。各供試体の中央の鉄筋（ $\phi 19 \text{ mm}$ ）から 25 mm 離れた位置に1本のリボンメッシュ陽極材を設置した。なお、電気防食を適用しない無防食供試体（B3-NCP）も製作した。セメントとして普通ポルトランドセメント（OPC 密度： 3.16 g/cm^3 ）、混和材として高炉スラグ微粉末（BFS 密度： 3.02 g/cm^3 ）、粗骨材として碎石、細骨材として海砂を使用した。また、練混ぜ水として天然海水を使用した。コンクリートの配合を表2に示す。なお、混和剤としてAE剤と減水剤を併用した。コンクリート打設後は7日間の海水湿布養生、さらに7日間の気中養生を行い、その後、腐食促進のために 40°C の高湿度環境に静置した。なお、材齢 500 日以降においては、 40°C での3日乾燥と4日間の高湿度環境を繰り返した。本実験ではB3においてコンクリート面積あたり 1 mA/m^2 に相当する電流量である $37.5 \mu\text{A}$ を初期電流とし、B5、B9に対しても同じ電流量を材齢 28 日から通電した。なお、

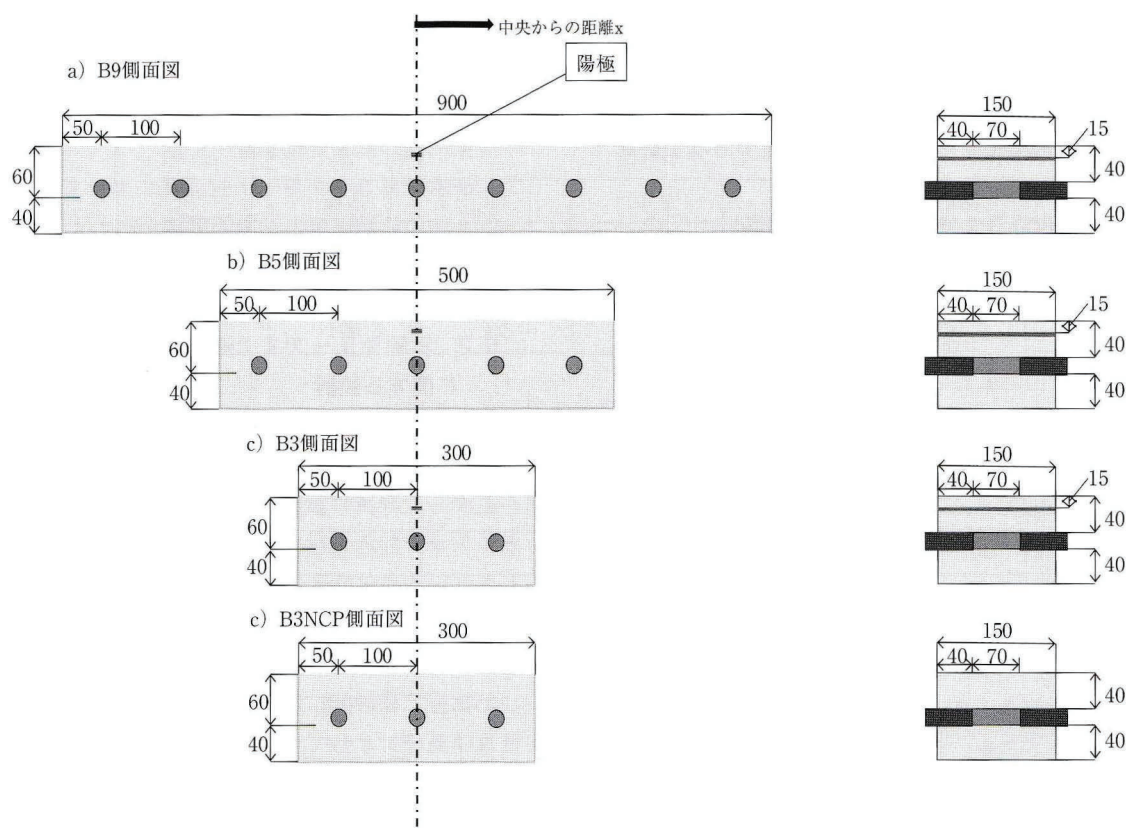


図1 供試体の形状及び寸法 (mm)

表2 コンクリートの配合 (実験シリーズI)

配合名	W/B	単位量 (kg/m^3)				
		海水	OPC	BFS	細骨材	粗骨材
高炉	50%	196	196	196	802	999

隣接する鉄筋同志はリード線で接続している。

5.1.2 測定結果及び考察

無防食の供試体においては、初期の段階で鉄筋間にマクロセル腐食電流が発生した。その電流の方向は一定ではなく変動しながら時間の経過とともに減少し、材齢250日程度ではほぼ零となった。無防食供試体の自然電位の経時変化を図2に示すが、海水で練混ぜた場合でも鉄筋の自然電位はおおよそ+40 mV程度まで貴化し、最終的には-75 mVで安定化した。防食供試体B9の防食電流の経時変化を図3に示す。なお、データは、中央の鉄筋以外は両側2本の鉄筋の平均値である。なお、材齢300日を境にして0 mmの鉄筋への流入電流が増加しているが、これは初期設定電流の37.5 μ A自体が増加したものと考えられる。同じ供試体B9のインスタントオフ電位(E_{io})及び24時間オフ電位(E_{off})の経時変化を図4に示す。この図より、供試体B9のオフ電位も貴化する傾向を示していることがわかるが、材齢600日を過ぎた時点でインスタントオフ電位、オフ電位ともに卑化に転じた。インスタントオフ電位は、防食電流が大きい鉄筋ほど卑となる傾向を示し、インスタントオフ電位とオフ電位の差として計算される復極量(図5)も防食電流の大きな鉄筋ほど大きくなった。復極量より判断すると、中心から両側200 mmの計400 mmの範囲が1本の陽極から十分な防食電流を流すことができる範囲であると判断された。

5.1.3 材齢600日までの実験結果の総括

1) 陽極から近い鉄筋ほど流入する防食電流は大きな

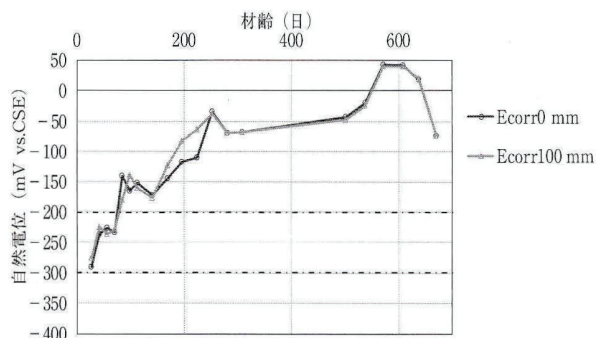


図2 無防食供試体(B3-NCP)の自然電位の経時変化

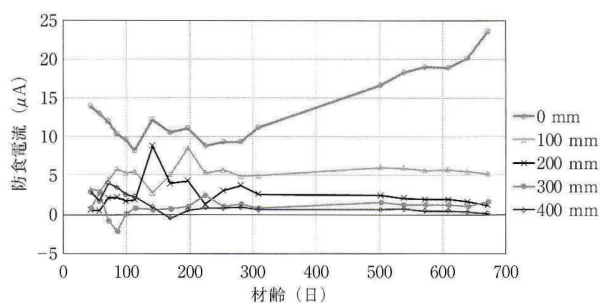


図3 供試体B9の防食電流の経時変化

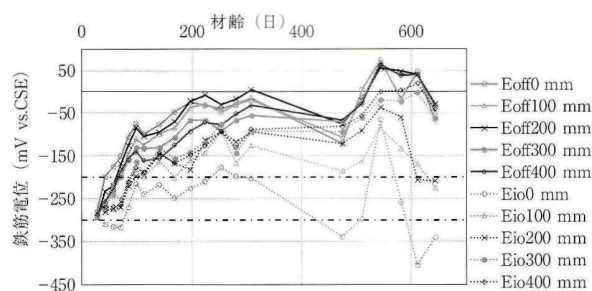


図4 防食供試体B9のインスタントオフ電位及びオフ電位の経時変化

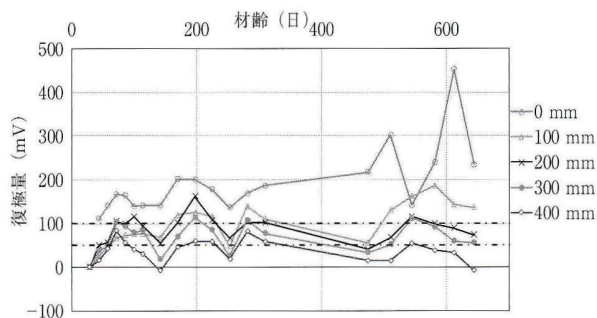


図5 防食供試体B9の復極量の経時変化

る。

- 2) 新設時のコンクリート中の鉄筋電位は電気防食の有無に関わらず貴化する。
- 3) 海水練りコンクリート打設後において、コンクリート中の鉄筋周辺の不動態環境が向上する。
- 4) 電気防食を適用することにより、無防食よりもさらに50 mV程度自然電位は貴化する。

5.2 実験シリーズⅡ：混和材としてのシラスの効果に関する検討

5.2.1 シラスの概要

シラスとは火山噴出物の一種であり、南九州に大量に存在する火砕流堆積物の総称である。約3万年前に始良カルデラで起きた巨大噴火により入戸火砕流が発生したとされ、この火砕流の噴出量は約200 km³に達したと見積もられている⁹⁾。この入戸火砕流は鹿児島県広域に分布し、その堆積量は750億m³にも上る¹⁰⁾。シラスは乱した状態では砂状になることから、コンクリート用細骨材及び混和材としての利用に関する研究がこれまでになされている^{11), 12)}。本実験は、シラスを混和材として使用した海水練りコンクリート中の鋼材の腐食性状及び電気防食の適用性について検討するものである。

5.2.2 実験概要

供試体の形状・寸法を図6に示す。セメントとして、普通ポルトランドセメント(配合N)、混和材として高炉スラグ微粉末4000(配合B)もしくは吉田シラス(配合S)を使用した。なお、粗骨材として石灰石、細骨材として海砂、練混ぜ水として天然海水を使用した。コン

クリートの配合を表3に示す。なお、高炉スラグ微粉末のセメント置換率は50%、シラスのセメント置換率は20%である。また、混和剤としてAE剤と減水剤を併用した。コンクリート打設後7日間の海水湿布養生を行い、さらに7日間の気中養生を行った後に40℃の高湿度環境に静置した。また、一部の供試体については腐食環境として3日間の乾燥、4日間の40℃高湿度環境の繰返しサイクルも実施した。電気防食の適用に際しては、安定的に十分な防食を施すため、通電開始時点で100 mVの电位シフトが得られる電流値を初期防食電流として設定し、その後逐次調整を行った。なお、各配合には無通電の供試体(NC、BC、SC)もある。表4に供試体の分

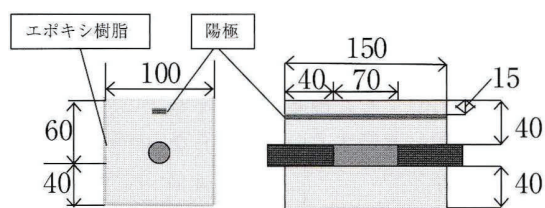


図6 供試体の形状・寸法 (mm)

表3 各供試体のコンクリート配合 (実験シリーズII)

配合名	W/B	単位量 (kg/m ³)					
		水	結合材			骨材	
		海水	OPC	BFS	シラス	細骨材	粗骨材
普通 (N)	50%	196	391	—	—	800	997
高炉 (B)		196	196	196	—	802	999
シラス (S)		196	313	—	78	791	985

表4 供試体の分類とその表記

	電気防食あり	電気防食なし
高湿度環境	N、B、S	NC、BC、SC
乾燥・湿潤環境	SS	SSC

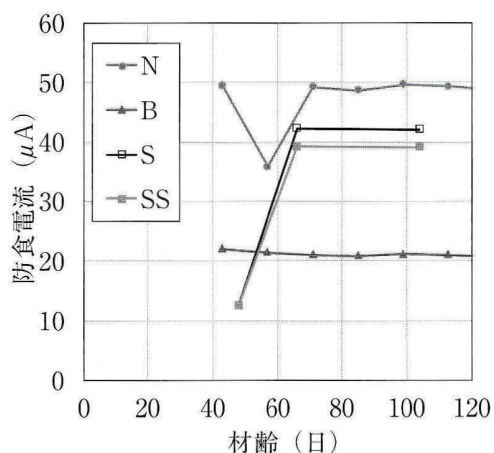


図7 防食電流の経時変化

類及び個々の表記を示す。

5.2.3 実験結果及び考察

図7に防食電流、図8に通電電圧の材齢120日までの経時変化を示す。防食電流は高炉スラグ (B) で最も小さく、シラス (S、SS)、OPC (N) の順に大きくなったが、通電電圧は材料によらずほぼ同程度となった。

図9に自然電位、図10にインスタントオフ電位の経時変化を示す。自然電位は全ての供試体で電気防食の有無に関わらず貴化する傾向を示した。これはコンクリートの水和反応の進行に伴い鉄筋の不動態化が進行しているためと考えられ、また、通電を行ったもので行っていないものを比べると、通電を行った方がより電位は貴化する傾向を示した。これは新設時から電気防食を行うことによって鉄筋周囲の環境が改善されることを示している。なお、この傾向は4章で示した先行研究と同様の結果である。材齢100日時点における自然電位は、シラスを用いたもの (S) は普通 (N)、高炉スラグ微粉末を用いたもの (B) に比べて低くなる傾向を示しているが、これはシラスの反応速度が遅く、また、そのボゾラン反応によりコンクリート内部のpHが低下したためと考え

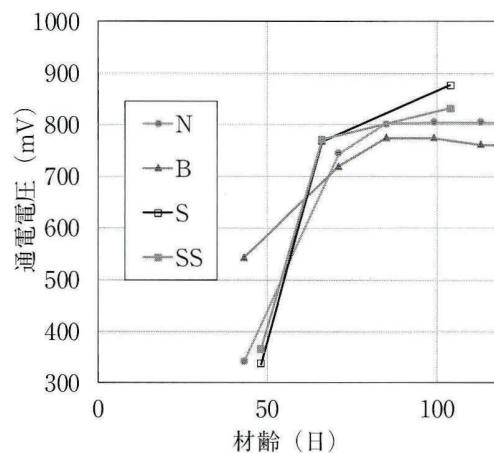


図8 通電電圧の経時変化

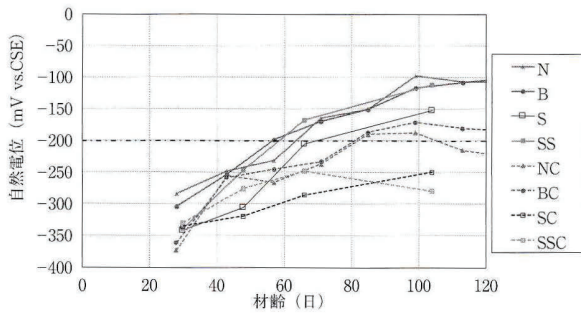


図9 自然電位の経時変化

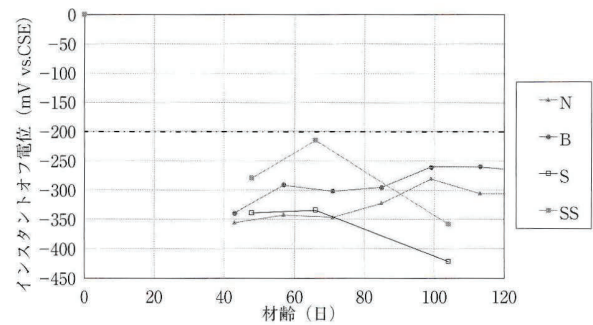


図10 インスタントオフ電位の経時変化

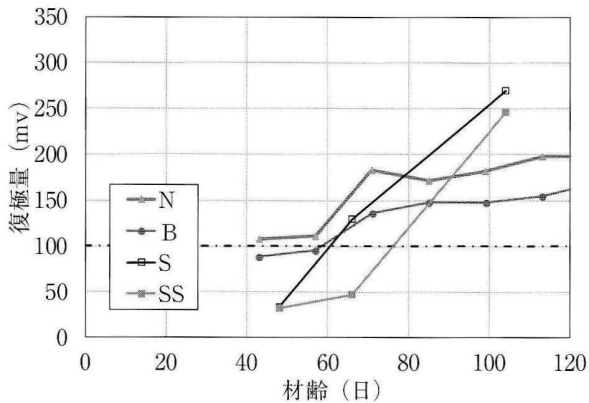


図11 復極量の経時変化

られる。なお、復極量（図11）は初期において100 mV以下を示すものもあったが、その後、材齢100日時点ではすべての供試体について100 mV以上となった。

5.2.4 材齢120日までの実験結果の総括

- 1) 電気防食の有無に関わらず鉄筋の電位は時間の経過とともに貴化する傾向を示す。
- 2) 高炉スラグ微粉末を用いた場合、普通ポルトランドセメント及びシラスに比べて、100 mVの復極量を得るために必要な電流量は小さくなる。
- 3) シラスを混合した場合、防食電流と通電電圧ともに高炉スラグと普通ポルトランドセメントの中間的な値となったことから、海水練りコンクリートにシラスを適用できる可能性が示された。

6. おわりに

今なおタブーとされているコンクリートの製造に海水を用いることは技術的には十分可能であると言える。ただし、製造方法を誤ると短期間で劣化が進展し、耐久性が損なわれる可能性が極めて高くなる。海水練りコンクリート中の鉄筋の腐食を防止するために取り得る対策として、

- 1) 低水セメント比の配合としかつ鉱物質混和材を混入する、
- 2) 鉄筋表面の事前（打設前）セメントペーストコー

ティングの実施、

- 3) コンクリート表面被覆による酸素拡散の防止、
- 4) 電気防食の適用による鉄筋腐食抑制、
- 5) 非腐食性緊張材の使用、

などが現時点で考え得る対策である。これらの対策の効果を定量的に評価するためのさらなるデータの蓄積が必要である。

本研究は、この中で電気防食の効果を定量的に明らかにすることを目的としている。さらに、データの蓄積を行い、電気防食の適正な適用方法を示していく予定である。

謝辞

本実験はSabrina Harahapさん（元九州大学大学院、現インドネシア防衛大学）が開始し、吉田幸司さん（元九州大学、現株式会社オリエンタルコンサルタンツ）が引き継ぎ、さらに甲斐雅比呂さん（元九州大学、現五洋建設株式会社）が継続したものである。ここに、Sabrinaさん、吉田さん、甲斐さんに心より感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) WMO: Assessment of Water Resources and Water Availability in the World, 1997.
- 2) Sabrina Harahap: A Study on Corrosion Behavior of Steel Reinforcement in Seawater-Mixed Concrete and Application of Corrosion Prevention: Corrosion Inhibitor and Cathodic Prevention, 九州大学修士学位論文、2019年9月。
- 3) 吉田幸司：新設の海水練りコンクリートに対する電気防食の適用に関する研究、九州大学工学部卒業論文、2020年3月。
- 4) 甲斐雅比呂：異なる結合材を用いた海水練りコンクリート中の鋼材の腐食性状及び電気防食の適用に関する研究、九州大学工学部卒業論文、2021年3月。
- 5) 大谷俊介、吉田幸司、サブリナ・ハラハップ、山本大介、濱田秀則：海水練りコンクリート構造物に対する電気防食の運用に関する研究 ―試験開始から約250日までの結果―、防錆管理/2020-11、p.404～410。

- 6) 濱田秀則、福永隆之、甲斐雅比呂、山本大介、大谷俊介：海水練りコンクリート中鉄筋への電気防食の適用に関する基礎的研究、第41回防錆防食技術発表大会、講演予稿集、2021年7月、p.105～110。
- 7) 日本コンクリート工学会：コンクリート分野における海水有効利用に関する研究委員会報告書、2014.9。
- 8) ADIWIJAYA: A Fundamental Study on Seawater-mixed Concrete Related to Strength, Carbonation and Alkali-silica Reaction (強度発現性・中性化抵抗性・アルカリシリカ反応性に着目した海水練りコンクリートの性状に関する基礎的研究)、九州大学博士学位論文、2015年9月。
https://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/opac_download_md/1543974/

eng2500.pdf

- 9) 井村隆介：南九州の巨大噴火と環境変化、日本生態学会誌、No.66、pp.707～714、2016。
- 10) 横山勝三：シラス学 九州南部の巨大火砕流堆積物、古今書院、pp.177、2000。
- 11) 例えば、武若耕司、松本 進、川俣孝治：しらすのコンクリート用細骨材への利用に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9、No.1、pp.7～12、1987。
- 12) 福永隆之：シラスを建設材料に利用した際の反応性と活用方法に関する基礎的研究、鹿児島大学工学部研究報告、vol.60、2018。

受理日：令和3年9月6日

防 錆 防 食 用 語 解 説

アノード支配

Anodic control

その環境における金属表面の電気化学反応のうち、アノード反応が反応速度を支配していることを言う。

電気化学反応は還元反応であるカソード反応と、酸化反応であるアノード反応の平衡反応で表される。腐食反応の場合、カソード反応とアノード反応は異なる化学反応で構成される。例えば中性水溶液中の鉄の腐食の場合、アノード反応は鉄の腐食（溶解）反応、カソード反応は溶存酸素の還元反応である。その腐食速度は両者の反応速度が釣り合っている速度すなわち電流で表される。中性水溶液中の鉄の腐食反応はカソード反応が反応速度を支配している。一方、中性水溶液中ではSUS316のようなステンレス鋼はほとんど腐食しないが、これはステンレス鋼表面の不動態被膜によりアノード反応である鉄の腐食反応が抑えられているためである。また、濃硫酸中の鉄も表面に不動態皮膜ができて腐食速度が抑えられる。このように腐食速度をアノード反応が律速している状態をアノード支配と呼ぶ。

● 関連用語：カソード支配、不活性態、不動態

(日本防蝕工業(株) 田代 賢吉)