

論文 練混ぜ水に海水を用いたコンクリートの干満帯における長期耐久性

審良 善和^{*1}・山路 徹^{*2}・小林 浩之^{*3}・濱田 秀則^{*4}

要旨：本研究は、練混ぜ水に海水を用いたコンクリートの干満帯における長期耐久性を評価するために、干満帯に 26 年間暴露した供試体を用い、圧縮強度、塩化物イオン濃度分布および鉄筋腐食について検討を行った。暴露 26 年までの結果では、いずれのコンクリートも材齢 28 日の圧縮強度を大きく下回るものではなく、初期と同程度またはそれ以上の状態を保持していると考えられた。また、干満帯のような外来塩化物イオンの浸透量が大きく、また、コンクリートが高飽水率になる環境下にある鉄筋の腐食は、練混ぜ水に海水を用いた場合も、水道水を用いた場合と大きな差はないと考えられた。

キーワード：練混ぜ水、海水、圧縮強度、鉄筋腐食、海洋環境

1. はじめに

海水中に含まれる塩化物イオンは、鉄筋の腐食を引き起こす要因となり、鉄筋コンクリート構造物の早期耐久性低下が懸念される。コンクリート標準示方書¹⁾では、コンクリート製造時の練混ぜ水は、上水道水、JSCE-B 101 または JIS A 5308 附属書 3 に適合したものを標準とし、海水は一般に練混ぜ水として使用してはならないとしている。これは、塩害による鉄筋腐食に伴う耐久性低下が主たる要因であると思われる。

一方で、練混ぜ水に海水を用いたコンクリート(以下、海水コンクリート)について、過去に多くの報告がある(例えば 2) 3) 4)。また、近年、海水コンクリートの検討事例が報告されている(例えば 5) 6)。練混ぜ時にコンクリート中に混入される塩化物イオン(以下、内在塩化物イオン)と外部環境からコンクリート中に浸透する塩化物イオン(以下、外来塩化物イオン)による内部鉄筋の腐食に関しては、陸上構造物などの外来塩化物イオンの浸透が少ない環境下での内在塩化物イオンが構造物の耐久性におよぼす影響は大きいものの、長期間海水の影響を受ける港湾構造物などの外来塩化物イオンが多い環境での内在塩化物イオンの影響は小さいとの報告がある³⁾。その一方で、かぶり小さい場合の鉄筋の孔食深さは、水道水を用いたコンクリート(以下、水道水コンクリート)に比べ海水コンクリートの方が大きいとの報告もある⁴⁾。これは、かぶりの影響が大きいと考えられるが、いずれにしても、海洋環境のような外来塩化物イオンの浸透が多い環境下での内在塩化物イオンが耐久性に及ぼす影響は十分に把握できていないのが現状である。

また、コンクリート中鉄筋の腐食速度はコンクリート中の酸素の拡散速度に依存すると考えられ^{例え 7)}、海水

中や干満帯など浸漬率の高い構造物の場合は、鉄筋への酸素の供給が減少するので腐食が抑制される傾向にあると推察される。この場合、内在塩化物イオンの影響はより小さくなることが予想される。

そこで、本研究では、セメントとして普通ポルトランドセメント、高炉セメント A 種、B 種、C 種およびフライアッシュセメント B 種を用い、また、練混ぜ水として海水および水道水を用いたコンクリート供試体を海洋環境下(干満帯)に 26 年間暴露した供試体を用いて、圧縮強度⁸⁾およびコンクリート中の塩化物イオン濃度および鉄筋腐食を調査することで、干満帯における海水コンクリートの長期耐久性について評価することを試みた。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体の種類およびコンクリートの配合を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(N)、高炉セメント A 種(BA)、B 種(BB)、C 種(BC)およびフライアッシュセメント B 種(FB)を用いた。練混ぜ水は水道水および自然海水を用いた。細骨材は川砂(表乾密度 2.64g/cm³, 吸水率 1.82%)を用い、粗骨材は川砂利(表乾密度 2.76 g/cm³, 吸水率 1.10%)を用いた。最大粗骨材寸法は 20mm である。また、混和剤として、AE 減水剤および AE 剤を用いた。W/C は 0.45, 0.55 の 2 種類である。目標スランプは 8±1cm, 目標空気量は 4±1%とした。

供試体は、図-1 に示すように φ150×300 mm の円柱に、かぶり 2cm, 4cm および 7cm の位置に丸鋼(φ9mm)を埋設したものをを用いた。なお、いずれの鉄筋も、円柱上下面からの塩化物イオンの影響を考慮して、鉄筋端部

*1 (独) 港湾空港技術研究所 材料研究チーム 研究官 博士(工学) (正会員)

*2 (独) 港湾空港技術研究所 材料研究チーム リーダー 博士(工学) (正会員)

*3 (独) 港湾空港技術研究所 材料研究チーム 依頼研修員 工修(正会員)

*4 九州大学大学院工学研究院 教授(前(独) 港湾空港技術研究所) 博士(工学) (正会員)

のかぶりを6cmとした。

2.2 暴露環境

(独) 港湾空港技術研究所内の干満帯を模擬した水槽内に供試体を暴露した。実海水を使用した暴露水槽で、1日に2回干満(潮位差1.5m)が繰り返される環境である。供試体は、L.W.L.+1.0mの位置に設置した。海水浸漬時間が約5時間と屋外乾燥時間が約7時間の繰り返し環境となる。したがって、供試体はあまり乾燥しない、高湿潤状態にあるコンクリートとなる。

2.3 測定項目

(1) 圧縮強度

圧縮強度の測定は、材齢28日および15年時の調査では、 $\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ の供試体を用いて、JIS A 1108に準拠して実施した。材齢26年時の調査では、図-1に示す円柱供試体上部(鉄筋のない部分)から $\phi 25\text{mm} \times 50\text{mm}$ の小径コアを4本採取し、圧縮強度試験を実施した⁸⁾。

(2) コンクリートの飽水率

コンクリートの飽水率の測定は、コンクリート中の含水状態を変化させないように試料片を採取し、試料質量、絶乾質量および飽和質量を測定することで求めた。

(3) 塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度の測定は、供試体側面中央部付近から中心方向に試料を切り出し、JIS A 1154に準拠してコンクリート中の全塩化物イオン濃度を測定した。したがって、得られる塩化物イオン濃度分布は、円柱の中心軸方向への分布となる。

(4) 鉄筋腐食

供試体を解体する前に、カソードおよびアノード分極曲線の測定を行った。鉄筋との導通は、供試体上部60mm程度を切断し、鉄筋端部を露出させて結線した。供試体を海水中に浸漬し、供試体側面に設置したステンレス板を対極として、また、作用極を鉄筋表面全体として測定した。挿引速度は20mV/minである。なお、得られた分極曲線は、極間抵抗を測定しiR補正した。

また、実際の腐食の状態を確認するために、供試体から鉄筋を取り出し、腐食面積率の測定を行った。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度

図-2に圧縮強度の経時変化を、図-3に水道水コンクリートの28日強度を1.0とした時の強度比を示す。いずれの供試体も暴露26年までの結果では、材齢28日の圧縮強度を大きく下回るものはなく、長期暴露後のコンクリートの強度品質は、初期(材齢28日)と同程度またはそれ以上の状態を保持していると推察される。

圧縮強度の経時変化は、使用するセメントの種類や

表-1 供試体の種類およびコンクリートの配合

No.	セメント	練混ぜ水	W/C	単位量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
N-45-T	N	水道水	0.45	162	360	738	1110
N-55-T			0.55	166	302	826	1056
N-45-S		海水	0.45	165	367	732	1102
N-55-S			0.55	168	305	823	1051
BA-45-T	BA	水道水	0.45	160	356	756	1091
BA-55-T			0.55	162	295	812	1081
BA-45-S		海水	0.45	160	356	756	1091
BA-55-S			0.55	162	295	812	1081
BB-45-T	BB	水道水	0.45	160	355	736	1108
BB-55-T			0.55	162	295	793	1099
BB-45-S		海水	0.45	162	360	733	1103
BB-55-S			0.55	164	298	789	1094
BC-45-T	BC	水道水	0.45	162	360	714	1120
BC-55-T			0.55	164	298	789	1094
BC-45-S		海水	0.45	164	364	710	1114
BC-55-S			0.55	166	302	767	1107
FB-45-T	FB	水道水	0.45	158	351	738	1110
FB-55-T			0.55	160	291	792	1097
FB-45-S		海水	0.45	160	356	733	1103
FB-55-S			0.55	162	295	790	1096

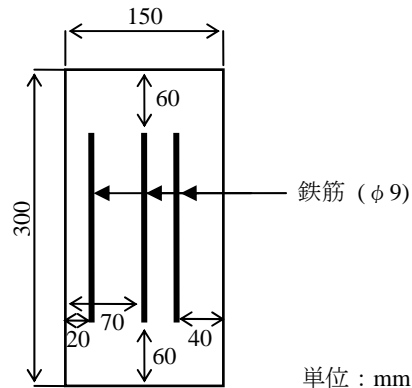


図-1 供試体の形状

W/Cによって異なる傾向を示した。Nの場合については、海水コンクリートおよび水道水コンクリート共に、初期の強度を保持している傾向にある。海水コンクリートの場合には、海水練りによる初期の強度増進が明らかに認められ、その後、強度は安定しているようである。BBの場合は、海水コンクリートおよび水道水コンクリート共に同等の強度で、同様な経時変化を示している。このことから、練混ぜ水の違いによる圧縮強度への影響は小さいと考えられる。FBに関しては、水道水コンクリートと海水コンクリートは、同様な経時変化を示すものの、特に、W/C0.55のコンクリートにおいて、海水コンクリートの初期強度の増加が大きく、その性能を保持しているように思われる。一方で、W/C0.45については、水道水コンクリートとほぼ同様な傾向を示しており、海水に

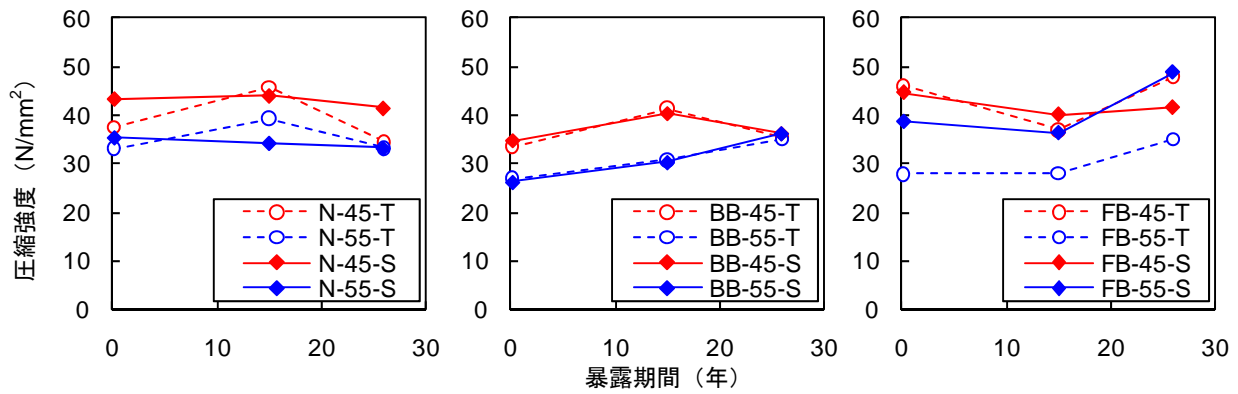


図-2 圧縮強度の経時変化

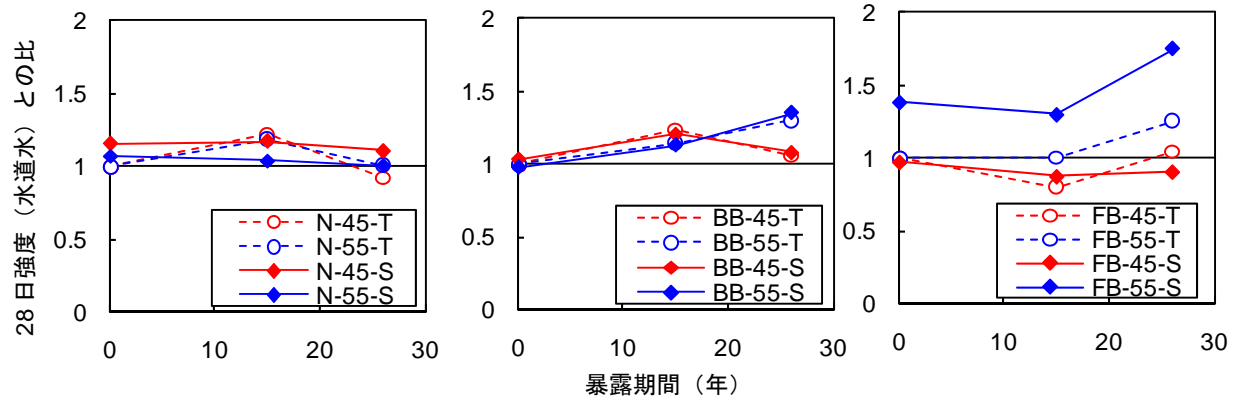


図-3 水道水を用いたコンクリートの28日強度との強度比の経時変化

よる強度増進の効果は明確に現れていない。

以上の結果から、練混ぜ水に海水を用いることによる強度増加のメカニズム等について現時点では不明確な点が残るものの、少なくとも長期的な強度変化において海水が悪影響を及ぼすことはないと考えられる。

3.2 塩化物イオン濃度

図-4に暴露26年時のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を示す。また、円柱座標系を用いて算出した⁹⁾水道水コンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (D_{ap}) および表面塩化物イオン濃度 (C_0) を示す。海水コンクリートは初期塩化物イオン濃度が不明のため算出してない。N55 および FB55 の塩化物イオンは、内部までほぼ一定の濃度で分布しており、定常状態にあると思われる。一方で、高炉セメントを用いたコンクリートの場合には、暴露26年時においても定常状態に至っておらず、コンクリート内部に塩化物イオンが浸透している状態にあり、塩化物イオン浸透抵抗性はNやFBに比べて非常に優れていると考えられる。特に、スラグ置換率が大きくなるにしたがって、塩化物イオン濃度は減少しており、スラグの効果が伺える。この傾向は、海水コンクリートおよび水道水コンクリート共に同様であった。このことから、塩化物イオン拡散に及ぼす影響としては、使用するセメントの影響が大きく、海水の影響は小さいと思われる。

しかしながら、海水の塩化物イオン濃度が 19,000ppm

程度であると考えた場合、練混ぜ時に供給される塩化物イオンは 3kg/m^3 程度になると推察される。この初期塩化物イオン濃度の影響を受け、水道水コンクリートに比べ塩化物イオン濃度は高い分布になることが分かる。

3.3 鉄筋腐食

(1) 腐食面積率

図-5に暴露26年時の鉄筋腐食面積率とかぶりの関係を示す。なお、BA55S, BB55S および FB の供試体には、腐食によると考えられる $0.1\text{mm}\sim 0.3\text{mm}$ 程度のひび割れが確認された。全ての供試体において、長期暴露の結果であるが、腐食面積率は30%以下となった。ただし、腐食発生部は程度の違いはあるものの孔食が進んでおり、長期にわたり腐食が生じていたと推察される。特に、ひび割れが確認された供試体の断面減少は著しく、ひび割れ発生以降に急激に腐食が進行したと思われる。

腐食面積率とかぶりの関係については、いずれの供試体もかぶりの増加に伴って腐食面積率が減少する傾向を示した。これは、外来塩化物イオンによる鉄筋位置の塩化物イオン濃度の増加が影響していると考えられる。また、かぶりの違いによる酸素濃度の違いも考えられるが、これについては後述する。

図-6に、ひび割れが生じた供試体を除く、同じ配合、同じかぶりの海水コンクリートと水道水コンクリートの腐食面積率を比較した結果を示す。ばらつきが大きい結果であるが、海水コンクリートと水道水コンクリート中

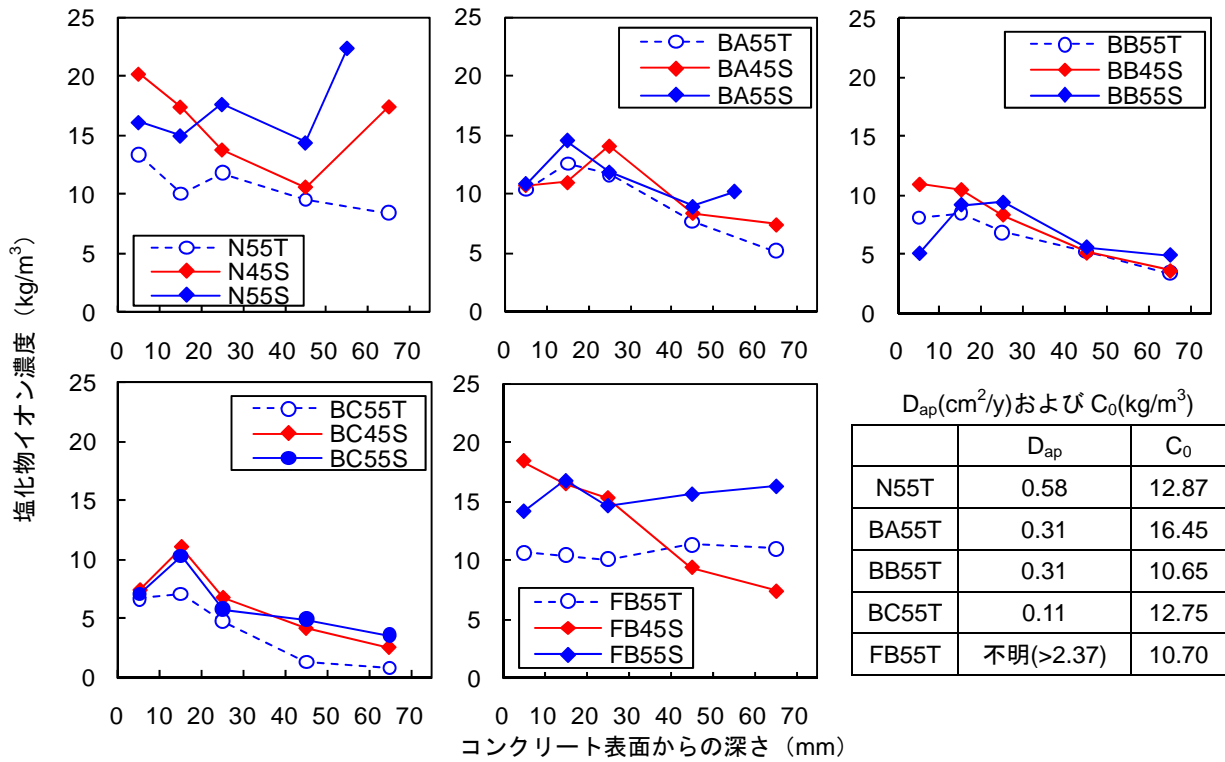


図-4 暴露26年時の全塩化物イオン濃度分布

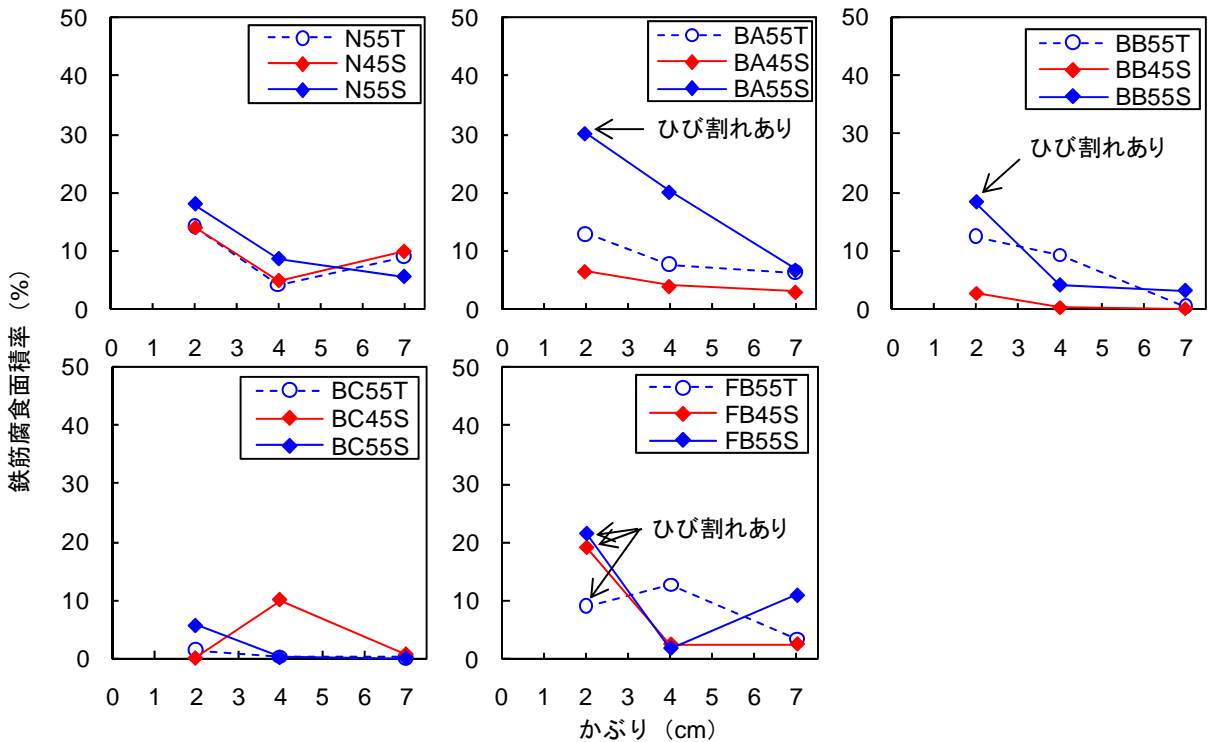


図-5 暴露26年時の鉄筋腐食面積率とかぶりの関係

鉄筋の腐食面積率は、同程度か海水コンクリートの方が若干大きくなる程度であった。この結果は、外部から多量に塩化物イオンが供給される環境においては、海水コンクリートと水道水コンクリートで、鉄筋の腐食に大きな差がないことを示している。この理由として、図-7に示すようにコンクリートの飽水率が高いために、酸素供給量が少ないことが影響していると考えられる。

(2) 塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係

図-8に鉄筋位置の塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係を示す。同じ塩化物イオン濃度下における腐食面積率では、かぶりの違いによる明確な差は認められなかった。干満帯のような高飽水率の環境下では、かぶり鉄筋腐食に及ぼす影響は小さくなると考えられる。また、いずれの場合も、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が4.0～

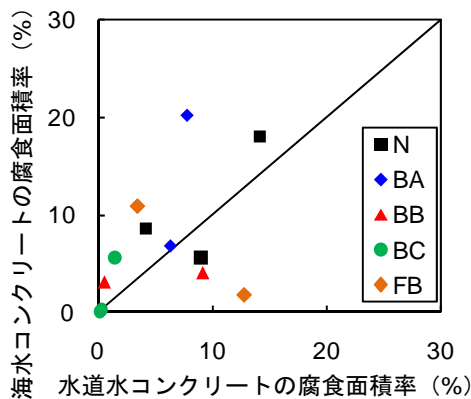


図-6 海水コンクリートと水道水コンクリートの腐食面積率の関係

5.0kg/m³ から腐食面積率が增加する傾向を示した。4.0kg/m³ 以下の状況でも、腐食発生限界塩化物イオン濃度を超える塩化物イオンが存在した場合、鉄筋は腐食環境にあったと思われるが、この結果からは、高い飽水率となるコンクリートの場合、塩化物イオン濃度が 4.0～5.0kg/m³ から塩害による鉄筋腐食が顕在化すると想定される。したがって、海水コンクリートの初期塩化物イオン濃度が 3.0kg/m³ 程度とすると、外来塩化物イオンが浸透するまでは腐食はあまり進行していなかったと考えられる。このことは、図-6 で示した海水コンクリートと水道水コンクリートの腐食に大きな差はなかったことの一要因になると推察される。

(3) 干満帯における腐食傾向

暴露直後に測定した分極曲線の結果の一例を図-9 に示す。塩化物イオン濃度がほぼ一定の定常状態にあると考えられる N-55-S については、かぶりに関係なく、ほぼ同じ分極曲線が得られた。これは、異なるかぶりであっても、腐食は同じ速度で進行していたと考えられる。一方、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が異なる鉄筋の分極曲線について BA-55-T に示す。酸素の拡散領域のカソード分極曲線はほぼ一致した。その中で、かぶりが小さくなる（塩化物イオン濃度が大きくなる）にしたがってアノード分極曲線が卑側に移行し、それに伴って鉄筋自然電

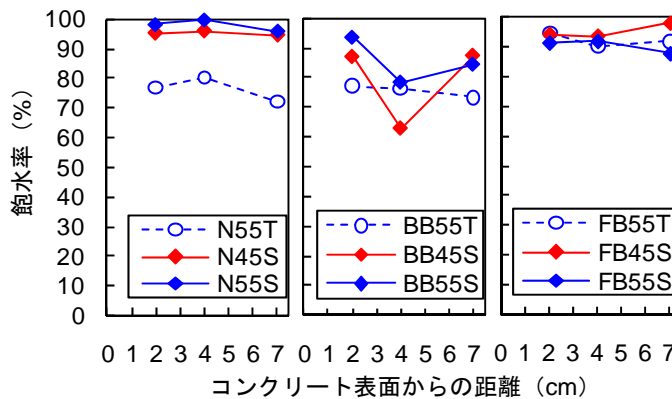


図-7 コンクリートの飽水率

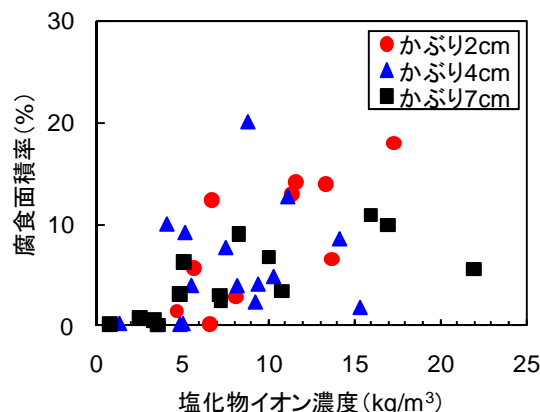


図-8 鉄筋位置の塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係

位が卑化し、分極曲線から求まる腐食速度¹⁰⁾も大きくなった。これらのことから、干満帯のような高い飽水率のコンクリート中の鉄筋は、かぶりが 2～7cm の範囲では、それぞれの鉄筋位置の鋼材表面における酸素供給は概ね同程度で、鉄筋位置の塩化物イオン濃度の増加に伴うアノード分極曲線の変化によって腐食速度が定まると考えられる。ただし、ひび割れが発生した場合に関しては、BB-55-S のように、ひび割れ部からの酸素供給によって、カソード分極曲線は大きく異なり、腐食速度もそれに伴って非常に大きくなる。

海水コンクリートと水道水コンクリートの分極曲線の違いについて図-10 に示す。概ね同様な分極曲線である

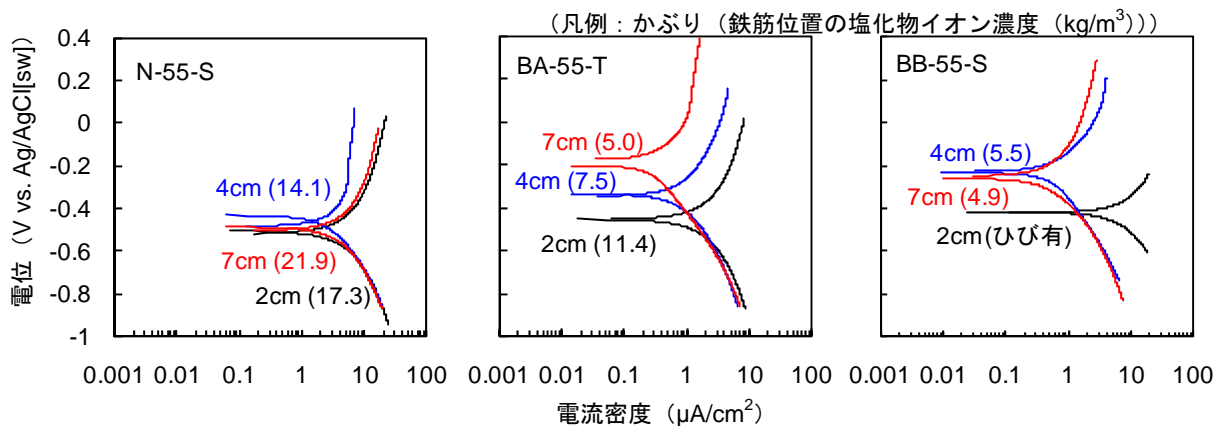


図-9 分極曲線の一例

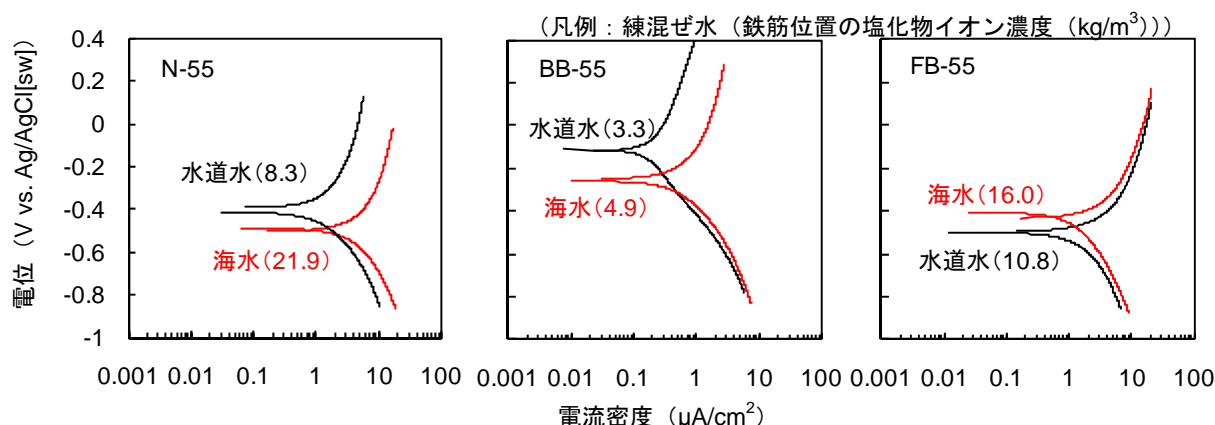


図-10 分極曲線 (かぶり 7cm)

と考えられるが、N-55の海水コンクリートのカソード分極曲線は、若干電流密度が大きくなる方向に移動しており、腐食が大きくなる傾向にあることが分かる。一方で、BBおよびFBのカソード分極曲線は、練混ぜ水の違いによる影響がほとんど認められない。コンクリート中の細孔構造など詳細な検討を行っていないため不明な点はあるが、練混ぜ水に海水を用いることによる腐食速度の変化は、高炉スラグやフライアッシュを混合させた方が小さいと推察される。

以上の結果から、海水コンクリートは内在塩化物イオンとして初期に混入される塩化物イオン濃度は 3.0kg/m^3 程度であり、また、塩害による腐食の進行が $4.0\sim 5.0\text{kg/m}^3$ から顕在化し、それ以上の塩化物イオン濃度下での腐食進行は水道水コンクリートと同程度であることを考えると、干満帯や海中のようなコンクリートが高飽水率になるような環境下に海水コンクリートを適用する場合は、塩化物イオンの浸透抵抗性を高め、また、十分なかぶりを確保することで、耐久性を確保することができると考えられる。

4. まとめ

本研究では、練混ぜ水に海水を用いたコンクリートの干満帯における長期耐久性について検討を行った。まとめを以下に示す。

1. 暴露 26 年までの結果では、材齢 28 日の圧縮強度を大きく下回るものではなく、長期暴露後のコンクリートの強度品質は、初期と同程度またはそれ以上の状態を保持していると考えられる。少なくとも暴露 26 年までは長期的な強度変化において海水が悪影響を及ぼすことはないと考えられる。
2. 干満帯のような外来塩化物イオンの浸透量が大きく、また、高い飽水率となるコンクリート中の鉄筋の腐食は、海水コンクリートと水道水コンクリートに大きな差はないと考えられる。
3. 干満帯や海中のようなコンクリートが高飽水率に

なるような環境にある鉄筋のひび割れ発生までの腐食速度は、かぶりの影響は小さく、鉄筋位置の塩化物イオン濃度の影響が非常に大きいと考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書 [施工編]，p.44，2007
- 2) 森好生，大即信明，下沢治：海水練りコンクリートの耐海水性試験（10 年経過報告），港湾技研資料，No.378，1981 年 6 月
- 3) 福手勤，山本邦夫，濱田秀則：海水を練混ぜ水とした海洋コンクリートの耐久性に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol.29，No.3，pp.57-93，1990.9
- 4) Mohammed, T. U., Yamaji, T., Aoyama, T., Hamada, H.: Marine Durability of 15-Year Old Concrete Specimens Made With Ordinary Portland, Slag, and Fly Ash Cements, ACI SP 199-30, Vol.2, pp.541-560, 2001
- 5) 竹田宣典，石関嘉一，青木茂，入矢桂史郎：海水および海砂を使用したコンクリート（人工岩塩層）の開発，コンクリート工学，Vol.49，No.12，pp.，2011.12
- 6) 海水と海砂を用いた高充填性コンクリート，日経コンストラクション，p.31，2011 年 11 月
- 7) 例えば，審良善和，山路徹，小林浩之：電気化学的測定による鉄筋腐食と塩化物イオン濃度の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol, No., pp., 2011.
- 8) 山路徹，審良善和，小林浩之，濱田秀則：海洋環境下における高炉およびフライアッシュセメントを用いたコンクリートの長期強度特性，混和材の積極利用のためのシンポジウム論文集，pp.133-138，2011
- 9) 審良善和，濱田秀則，大即信明，Tarek. U. M.：円柱供試体側面から浸透した塩化物イオンの拡散係数の算出方法について，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.613-618，2005.7
- 10) 電気化学協会編：若い技術者のための電気化学，丸善，pp.110-124，1983.3