

# 委員会報告 コンクリート分野における海水の有効利用研究委員会報告書

大即 信明<sup>\*1</sup>・濱田 秀則<sup>\*2</sup>・竹田 宣典<sup>\*3</sup>・今本 啓一<sup>\*4</sup>・山路 徹<sup>\*5</sup>・羽瀨 貴士<sup>\*6</sup>・西田 孝弘<sup>\*7</sup>

**要旨:** 本委員会では、練混ぜ水や養生水などへの海水の適用に関する知見を収集し、その問題点と改善策について実験、文献調査を含む検討を行い、さらに製造方法、施工方法に関する海水の利用技術についてもヒアリングや文献調査等に基づく検討を行った。これらを基に、課題や利用可能性についての提案を行った。

**キーワード:** 海水の有効利用、練混ぜ水、養生水、事例調査、物性評価、性能向上、製造・施工方法

## 1. はじめに

資源の有効利用が求められており、水資源に関して、人口増、急激な都市化の進展により、2050年には世界の飲用水が困窮すると予測されている。コンクリート分野では、練混ぜ水、養生水、清掃水などに年間数十億トンの淡水が消費されているが、地球上に豊富にある海水は鉄筋コンクリートへの使用は認められてない。コンクリート分野において、積極的に海水を使用することができれば、水資源を有効に活用できると考えられる。

本委員会では、次の3項目を目的としている。すなわち、①練混ぜ水や養生水などへの海水の適用に関する知見を収集し、その問題点と改善策について実験、文献調査を含む検討を行なうこと、②製造方法、施工方法に関する海水の利用技術についてもヒアリングや文献調査による基づく検討を行うこと、および③これら①、②の結果をまとめ、検討して、海水の有効利用に関する可能性を含む種々の提案を行うこと、の3項目である。

本委員会では、上記の目的を達成するために、以下の5つのWG, すなわち事例調査WG(WG1), 物性調査WG(WG2), 性能向上WG(WG3), 製造施工WG(WG4) および英文化WG(WG5)に分かれて、活動を行い、全体委員会などにおいて総合的に取りまとめを行った。本委員会構成員をTable 1に示す。また、各WGの活動を以下に示す。

WG1では、海水、未洗浄海砂を用いたコンクリート構造物の事例調査(構造物調査、文献調査)を行った。WG2では、練混ぜ水や養生水に海水を使用したコンクリートの物性評価を実験あるいは文献調査によって行った。WG3では、海水を使用することによるコンクリートの性能向上効果および補強材の防錆対策に関する知見を文献調査によって検討した。WG4では、上記の成果等を踏まえて、海水使用コンクリートの製造・施工方法とその優位性・留意点について検討した。上記の4つのWGの成果を総合的に検討し、海水利用の問題点や委員会報告書をまとめ、利用可能性に関する種々の提案を行った。また、WG5で

Table 1 List of committee members

委員長 : 大即信明 (東京工業大学)
副委員長: 濱田秀則 (九州大学)
幹事 : 山路徹 (港湾空港技術研究所) 竹田宣典 (大林組) 羽瀨貴士 (東亜建設工業) 今本啓一 (東京理科大学) 西田孝弘 (東京工業大学)
<b>WG1: 海水, 未洗浄海砂を用いたコンクリート構造物の事例調査</b> 濱田秀則 (主査), 大即信明, 今本啓一, 西田孝弘 太田達見 (清水建設), 片野啓三郎 (大林組), 古賀一八 (福岡大学), 斎藤豪 (新潟大学), 澤田巧 (五洋建設), 舟橋政司 (前田建設工業), 檀康弘 (日鉄住金高炉セメント)
<b>WG2: 練混ぜ水, 養生水に海水を使用したコンクリートの物性</b> 山路徹 (主査), 大即信明, 竹田宣典, 西田孝弘 審良善和 (東洋建設), 石川嘉崇 (電源開発), 斎藤豪 (新潟大学), 檀康弘 (日鉄住金高炉セメント), 馬場勇介 (BASF ジャパン)
<b>WG3: 海水使用コンクリートの性能向上および補強材の検討</b> 竹田宣典 (主査), 大即信明, 西田孝弘 檀康弘 (日鉄住金高炉セメント), 福留和人 (石川工業高等専門学校), 松尾栄治 (九州産業大学), 田所裕 (新日鐵住金ステンレス)
<b>WG4: 海水使用コンクリートの製造・施工方法の検討</b> 羽瀨貴士 (主査), 大即信明, 西田孝弘 鹿毛忠継 (国土技術政策総合研究所), 片野啓三郎 (大林組), 福留和人 (石川工業高等専門学校), 皆川浩 (東北大学), 渡辺博志 (土木研究所)
<b>英文化 WG: 委員会報告の英訳</b> 大即信明 (主査), 西田孝弘, 澤田巧 (五洋建設), 斎藤豪 (新潟大学), 馬場勇介 (BASF ジャパン), 審良善和 (東洋建設), 片野啓三郎 (大林組)
<b>国内通信委員</b> 佐川康貴 (九州大学), 田所裕 (新日鐵住金ステンレス), 松田浩 (長崎大学), 山口明伸 (鹿児島大学), 山田義智 (琉球大学)
<b>海外通信委員</b> Ronaldo S. Gallardo (フィリピン), Md. Tarek Uddin (バングラデシュ), Gary Ong (シンガポール), Muhammad Wihardi Tjaronge (インドネシア), Nurazuwa Binti Md Noor (マレーシア), Hwa Kian Chai (マレーシア), Miren Etxeberria (スペイン), Kamran M. Nemati (アメリカ)

は委員会報告書の英訳を実施した。

\*1 東京工業大学大学院教授 工博 (正会員)  
\*3 (株)大林組 技術研究所 博(工) (正会員)  
\*5 (独)港湾空港技術研究所 工博 (正会員)  
\*7 東京工業大学大学院助教 博(工) (正会員)

\*2 九州大学大学院教授 工博 (正会員)  
\*4 東京理科大学 工学部 工博 (正会員)  
\*6 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター 博(工) (正会員)

## 2. 海水・未洗浄海砂を用いたコンクリート構造物の事例調査

本章では、海水・未洗浄海砂を用いたコンクリート構造物の事例調査（構造物の調査・規準類の調査）の結果をまとめた。

### 2.1 調査の概要

海水を練混ぜ水として用いることは現在ではタブーとも言えるが、過去においては地理的な制約で淡水の入手が困難な地域で海水を利用して建設された構造物も多い。これらの構造物の中には現在でも健全な状態で供用されているものもあり、多くの示唆を与えてくれる。一方で、未洗浄の海砂を安易に用いたために激しい塩害が生じた構造物・建築物もあり、技術的に正しく使用する必要性も既存の構造物は示唆している。ここでは、既往の構造物、文献、基準・規準、海外事情を調査し、海水を利用する視点で得られる知見および教訓を集めるため、以下の3項目の調査を行った。

- (1) 事例の調査（よい事例、悪い事例、海外調査）
- (2) 規準類の調査（過去の示方書、海外）
- (3) 海水使用に関する既往の見解の調査

すなわち、(1)では、海水あるいは未洗浄海砂を用いて造られた構造物の事例調査として、長崎県宇久島灯台

(Fig. 1)、沖ノ鳥島における露岩根固コンクリート、海水練りモルタルを用いたプレパックドコンクリート港湾構造物、鳥取県田後港のプレパックドコンクリート

(Fig. 2)、長崎県軍艦島（端島）のコンクリート建築物およびコンクリート護岸、沖縄における海砂使用コンクリート建築物、ビキニ島における第2次世界大戦中に製造された海水練りコンクリート、について実地調査あるいは文献調査を行った。また、(2)では、海水使用に関する過去の規準の調査として、土木関連の規準、建築関連の規準、海外の規準、およびコンクリート製造におけるCIの利用技術の調査を行った。さらに、(3)の海水使用に関する既往の見解の調査として、海水で練り混ぜたコンクリートで建設された灯台の事例、Neville博士の海水練りに関する見解、赤塚雄三博士の海水練りに関する見解、および国内外での海水練りの意識調査を行った。

### 2.2 実構造物の調査結果

現存する海水練りコンクリートの灯台は、施工から60年以上が経過しても、コンクリート表面には異状は認められず健全な状態を保っていることを確認した(Fig. 1)。

沖ノ鳥島における施工記録では、水中コンクリートに海水を使用しても材料や装置に特段の配慮は必要なく、特殊水中コンクリートの性能（強度や施工性）が変化することもなく、強度や凝結時間の変化、流動性の損失等に関して特に問題はなかったことを把握した。



Fig.1 Ukushima lighthouse (Nagasaki prefecture)  
-Concrete structure mixed with seawater-



Fig.2 Tajiri port (Tottori prefecture)  
-Pre-packed Concrete structure mixed with seawater-

沖ノ鳥島における施工記録では、水中コンクリートに海水を使用しても材料や装置に特段の配慮は必要なく、特殊水中コンクリートの性能（強度や施工性）が変化することもなく、強度や凝結時間の変化、流動性の損失等に関して特に問題はなかったことを把握した。

海水を用いてプレパックドコンクリートを製造することに関して、海水を使用しても施工作业ならびに施工後のコンクリートに異常な点が認められなかったこと、また汚濁されていない海水が淡水と比較してとくに悪いという条件もなかった。一方で、海水を使用する場合には注入モルタルの凝結時間が短くなり、膨張率も増加するので、注入作業の施工管理上とくにこの点に注意を払う必要があったことが把握できた。

軍艦島の建築物の調査では、海水を練混ぜ水に使用したという確証は得られていないが、海水を使用した可能

性は示唆された。さらに、大幅に塩化物イオンが存在しているにもかかわらず鉄筋腐食が進行していなかった箇所もあり、塩分量と腐食の関係についてさらに検討を進める余地があることも示された。また、軍艦島の護岸に用いられているコンクリートの調査からも、海水を練混ぜ水に使用したという確証は得られていないが、海水を使用した可能性は示唆された。我が国において、外洋上の厳しい海洋条件においてコンクリート護岸がこれだけの長期間供用されてきた事例は少なく、護岸のおもな変状もコンクリートのひび割れ、護岸自体の前傾や破損護岸と岩盤との境界部の空隙、背面土砂の沈下・吸出しなどであり、コンクリートの劣化に起因するものではないことが明らかとなった。

沖縄県において未洗浄海砂を用いて塩害が発生した建築物の調査から、未洗浄または洗浄が不十分な海砂が使用された建築物においては、比較的かぶり厚さが少ない部位から鉄筋腐食に伴うひび割れやかぶりコンクリートの剥離・剥落が生じていることが明らかとなった。しかし、コンクリートの水セメント比など調（配）合の条件と鉄筋腐食との関係については明確に示すことはできなかった。

ビキニ島における第2次世界大戦中に製造された海水練りコンクリートの調査から、適切な配合であれば、サンゴ骨材と海水を使用したコンクリートにおいても長期強度が発現することが示された。一方で、外部環境、コンクリートのかぶり、および表面のひび割れが早期の劣化に大きな影響を及ぼしていたことから、環境作用適切に把握し、材料・施工が適切であれば、海水で練混ぜたコンクリートでも長期耐久性を有することが示唆された。

### 2.3 基準・規準の調査結果

土木学会コンクリート標準示方書の記述の変遷から、示方書においては海水を鉄筋コンクリート用コンクリートの練混ぜ水に使用してはならないことが原則となっているが、寒中コンクリートにおける記述からは、品質が確かめられた場合については無筋コンクリートに対しては海水の使用を認め得る可能性が示唆された。

建築分野（JASS5）において塩分に関連する規制が初めて示されたのは1933年であり、海水使用の禁止が明記された。この規制がその後の細骨材の塩分含有量の規制およびコンクリート中の塩分含有量の総量規制に繋がる。一般的に、塩分に関する規制は建築関連の規準の方が土木関連の規準よりも厳しいように思われる。これは、建築物の方が土木構造物よりも総じてかぶりが薄く、水セメント比も大きくなる傾向にあることとも関連しているものと推察された。

塩化物に関する海外の規準の調査から、塩化物量の規制値は各国によって大きく異なり、無筋のコンクリート

に対しても規制値を設けている国もある。海水練りコンクリートの場合、コンクリート体積当たりの塩化物イオン量は約 $3\text{kg/m}^3$ となり、現状では何れの国の規制値も超える。したがって、海水練りコンクリートを鉄筋コンクリートで使用するためには、これらの規制値との摺り合わせが必要となるものと思われた。

### 2.4 海水使用に関する既往の知見の調査結果

離島に建設される灯台は海水練りの構造物も多く存在し、現存する構造物から以下に示すような多くの知見・教訓を得ることができる。

- ・ 数十年の長期に渡ってほとんど異常を生じていない事例も多く、無筋コンクリートに使用するのに不都合はない。
- ・ 密実なコンクリートとするため、セメント量を多くする必要がある。
- ・ 鉄筋コンクリートにおいては、十分な耐久力を持つものもあれば、破壊の起こったものもある。この要因として、かぶり不足や貧配合、施工上の欠陥なども指摘されている。十分な配慮（水密性を高めるために富配合とするなど）を行い、かぶりを十分に確保し、施工を丁寧に行うことで海水の使用を禁じるほどの理由は無い。
- ・ 海水を用いて養生する場合について、配合と施工が良好な場合には、脱わくまでの期間を長くすることや、海水を浴びせて湿らせるという養生について、特に弊害はない。

なお、当時は普通ポルトランドセメントが多く使用されていたが、海岸に建設される構造物に対しては混合セメントが適していると当時既に認識されていたため、灯台の建設においては高炉セメントが利用されている事例も比較的多いようである。

また、Neville 博士と赤塚博士の海水練りに関する見解を再確認した。Neville 博士の基本的な考えは、海水をコンクリートの練り混ぜ水として使用してはならない、というものである。ただし、二つの例外を除いて、とされている。二つの例外とは、供用期間中にコンクリートが完全に乾燥した状態に置かれること、二つ目として、コンクリートが海水中あるいは完全に浸せきされた状態に置かれること、の二つの場合である。この場合に限り、海水を練り混ぜ水として使用することは可能であるとの見解を示している。無筋コンクリートに関してはこの限りではない、と最後に記述されている。一方、赤塚博士の見解は以下のようなものである。すなわち、練り混ぜに海水を使用することは奨励できないが、絶対に禁じなければならない理由もない。設計や施工において、かぶりを十分にとり、とくに水密的な配合とし、さらに打込みをさいしても十分に締固める、などの相当の注意と対策が必

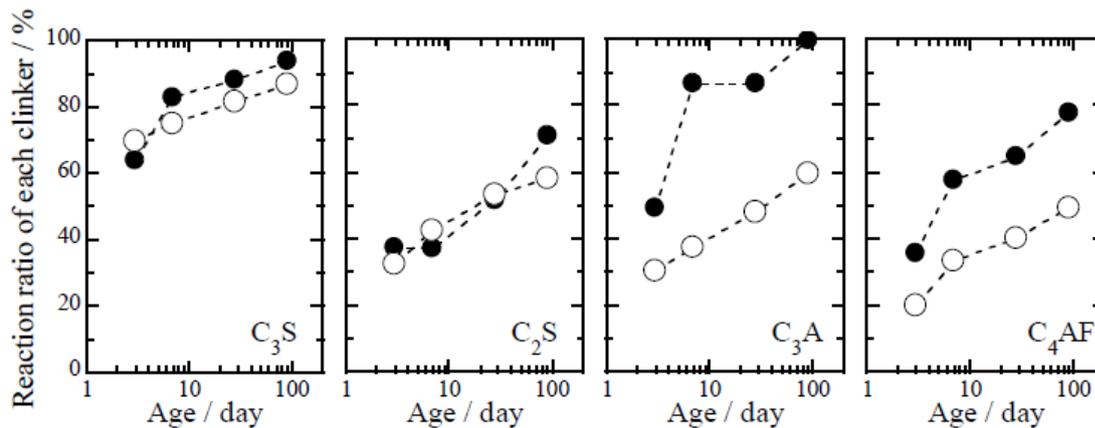


Fig. 3. Reaction ratio of each clinker in OPC paste specimens. ● : DW, ○ : SW <sup>1)</sup>

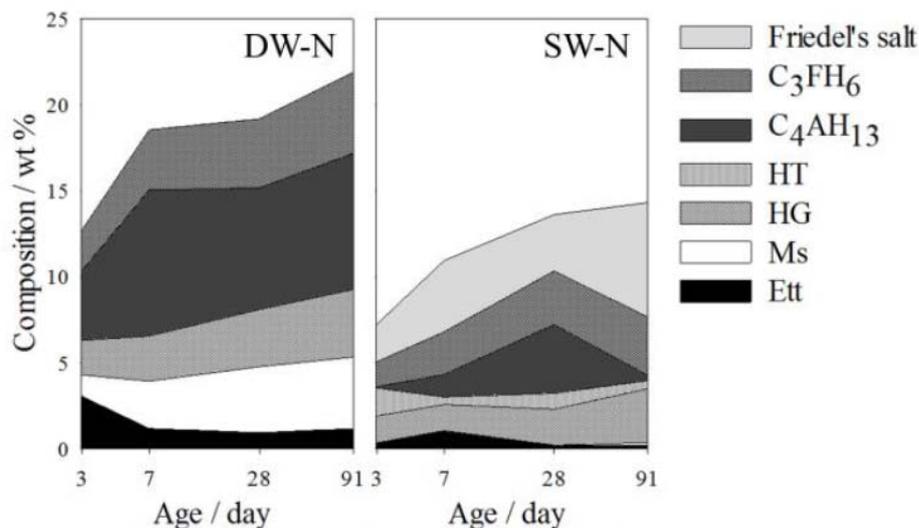


Fig. 4. Phase constitutions of Alumina-Ferrite hydrates in OPC paste specimens. <sup>1)</sup>

要である。実際問題として、淡水の運搬に大きな費用を投ずるよりも、むしろ上述の諸点に注意して、施工をより入念に行う方が賢明である、というものである。

## 2.5 調査の総括

以上示した調査の結果を以下のように総括する。すなわち、現在では、海水をコンクリート製造に用いることはタブー視されているが、過去の経験から海水を利用しても性能上問題ないコンクリート構造物を建設することは可能である。ただし、正しい技術で製造することが最重要であり、これまでの経験と知見を十分に整理し、海水使用のための技術の体系化および設計のための指針の整備が望まれる。

## 3. 練混ぜ水、養生水に海水を使用したコンクリートの物性

本章では、練混ぜ水、養生水に海水を使用したコンクリートの物性について、既往の知見をまとめた。

### 3.1 セメントの水和反応機構に及ぼす海水の影響

練り混ぜ水に海水を使用した場合の OPC、BFS および FA の反応機構について、各構成鉱物反応率の経時変化や、水和生成物の相組成の経時変化を調べることで、以下の新たな知見を得た。

- 1) 練混ぜ水として海水を使用した場合の各クリンカー反応率についての実験結果<sup>1)</sup>をFig. 3に示す。蒸留水の場合と比較して材齢初期におけるシリケート相（主にC<sub>3</sub>S）の反応を促進する一方、材齢後期における反応を停滞させる傾向にある。また間隙相であるC<sub>3</sub>AおよびC<sub>4</sub>AFの反応は、シリケート相であるC<sub>3</sub>SおよびC<sub>2</sub>Sの反応性状と比較して、材齢初期から海水の影響を顕著に受けて反応が停滞し、その後の反応も大きく停滞する。
- 2) 相組成の変化についての実験結果<sup>1)</sup>をFig. 4に示す。練混ぜ水として蒸留水を使用した場合、材齢経過に伴いエトリンガイトからモノサルフェートへの転化が生じているのに対し、海水を使用した場合は、材齢経過後エトリンガイトやモノサルフェートが

生成せず、Friedel氏塩が最も多く生成する。

- 3) 混和材を用いた場合の各種クリンカーの反応率、相組成および細孔構造の変化や各々の関係については、おおむね、普通ポルトランドセメントのみを用いた配合と同様の傾向を示す<sup>1)</sup>。ただし、BFSの場合は、間隙相の反応、特にC<sub>3</sub>Aの反応率は普通ポルトランドセメントの場合と比較して増大し、置換率の増大と伴にその傾向は顕著となる。FAの海水練りによる影響は、BFSの場合と比較して差は小さいものの、BFSと同様、反応率が增大する。

### 3.2 海水を使用したコンクリートの物性

海水を使用したコンクリートに関する以下の物性について、既往の知見をまとめた。

#### (1) フレッシュ特性

海水を用いることで、淡水と比較して流動性は同等あるいは低下するという報告が多い。また、混和剤の種類によっては、海水中の無機イオンの影響により、分散性が低下する場合がある。

#### (2) 硬化特性

材齢初期においては強度発現が促進され、材齢後期になると強度発現が停滞するという報告が多い。

### 3.3 混和材と海水を使用したコンクリートの物性

混和材と海水を使用したコンクリートの物性について、既往の知見をまとめた。

#### (1) 高炉スラグ微粉末

フレッシュコンクリートについては、海水の影響は小さい。硬化特性については、OPCの場合と同様、若材齢時の強度発現が増加する。長期材齢についても、水道水練りの場合に比べて強度発現が増加する傾向にある。

#### (2) フライアッシュ

海水の成分がフライアッシュの硬化促進作用を有していることが多くの知見により示されている。特に、フライアッシュ置換率が高くなるほど、硬化促進作用は大きくなる。なお、海水中の成分として、主にNaClが寄与していることが確認されている。

### 3.4 養生水として海水を使用した際の特性

既往の知見も少なく、その特性については明らかとなっていないが、顕著な悪影響が生じるといった事例は報告されていない。

### 3.5 まとめ

練混ぜ水に海水を使用したコンクリートの物性について、これまで多数の報告から、材齢初期においては強度発現が促進され、材齢後期になると強度発現が停滞することが報告されている。本章では、セメントの水和反応機構に及ぼす海水の影響について、各構成鉱物反応率の経時変化や、水和生成物の相組成の経時変化を調べ、これらの知見をまとめた。

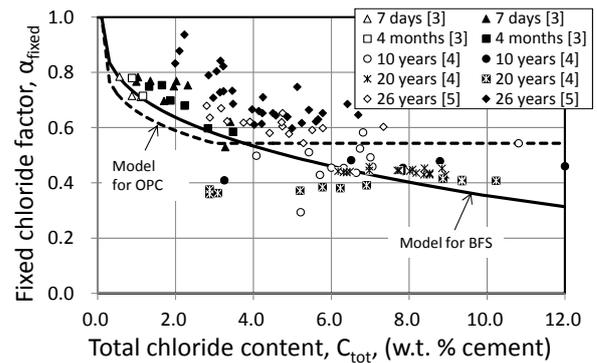


Fig. 5 Relationship between Fixed chloride factor and total chloride content in seawater mixed concrete exposed for 10 and 20 years

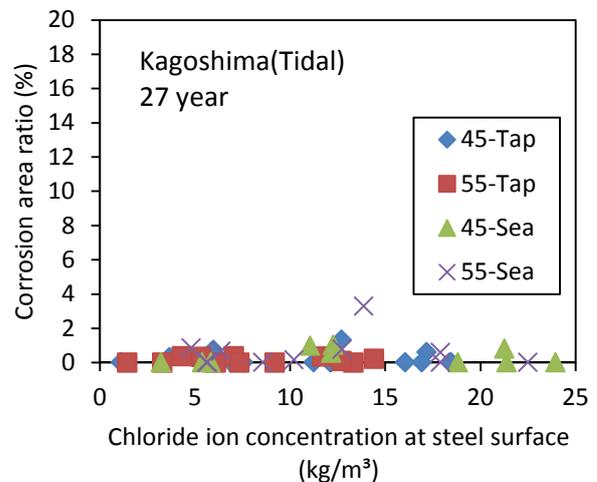


Fig. 6 Relationship between chloride ion concentration at the steel surface and corrosion area ratio

## 4. 海水を使用したコンクリートの耐久性

本章では、練混ぜ水に海水を使用したコンクリートの耐久性について、既往の知見をまとめた。

### 4.1 塩害

#### (1) 塩化物イオンの移動

練混ぜ水に海水を用いても、塩化物イオンの移動に対して大きな影響を及ぼさないという知見が多い。塩化物イオンの固定化性状についても、練混ぜ水の影響は明確ではなかった。結果の一例をFig. 5に示す。両者の固定化性状に大きな差異は確認されず、練混ぜ水が長期的な塩化物イオンの固定化に及ぼす影響は小さいと考えられる。

#### (2) 鉄筋腐食

練混ぜ水に海水を用いた場合、陸上環境、海洋環境(海中部を除く)においては、水道水の場合と比較して、鉄筋腐食の進行を促進させると考えられる。ただし、その腐食の進行速度については、コンクリートの品質、環境によって変化する。一方、海中部のように酸素供給が少

ない環境においては、鉄筋腐食の進行は非常に穏やかであり、練混ぜ水に海水を用いたことによる影響はほとんどないことが確認されている。Fig. 6 に干満環境（ただし、ほぼ常時湿潤している環境）にコンクリート試験体を暴露した際の結果の一例を示す<sup>2)</sup>。練混ぜ水が海水であっても、ほとんど鉄筋に腐食が生じていない。

#### 4.2 耐海水性

耐海水性に関して、練混ぜ水に海水を用いても、大きな影響はないという報告が多い。Fig. 7 に、海洋環境下に長期間暴露させた際の圧縮強度の変化を示す<sup>3)</sup>。練混ぜ水による差は見られない。

#### 4.3 中性化

中性化に関して、練混ぜ水に海水を用いても、大きな影響はないという報告が多い。

#### 4.4 凍害

凍害に関して、練混ぜ水に海水を用いると、凍害の進行を促進させる傾向があるという報告が多い。ただし、空気量を適切に確保すれば、凍害の進行を抑制することができることが確認されている。

#### 4.5 アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応に関して、練混ぜ水に海水を使用することで反応が促進される可能性があるが、この点については明瞭な知見は得られなかった。

#### 4.6 まとめ

練混ぜ水に海水を使用したコンクリートの耐久性に

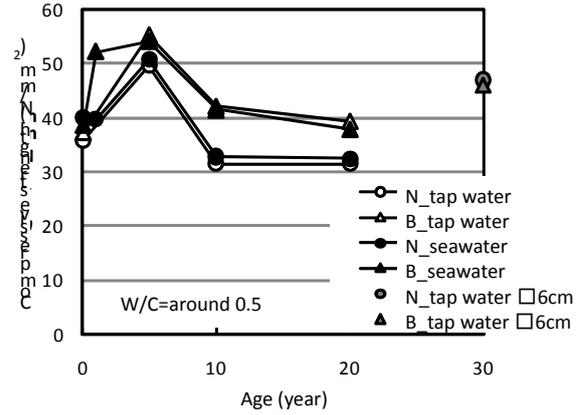


Fig. 7 Compressive strength

ついて、鉄筋腐食、凍害については、練混ぜ水に海水を使用することによるデメリットが確認された。ただし、鉄筋腐食については、使用するセメント、配合や適用環境を考慮することで、鉄筋腐食の進行を抑制可能であることも確認された。凍害については、適切に空気量を確保することで、凍害の進行を抑制可能であることが確認された。

練混ぜ水に海水を使用したコンクリートの耐久性については、海水を使用しているからといって直ちに耐久性を損ねるというのではなく、対象環境を考慮し、使用するコンクリートの品質を適切に選定することで、所要の耐久性能を確保することができると考えられる。

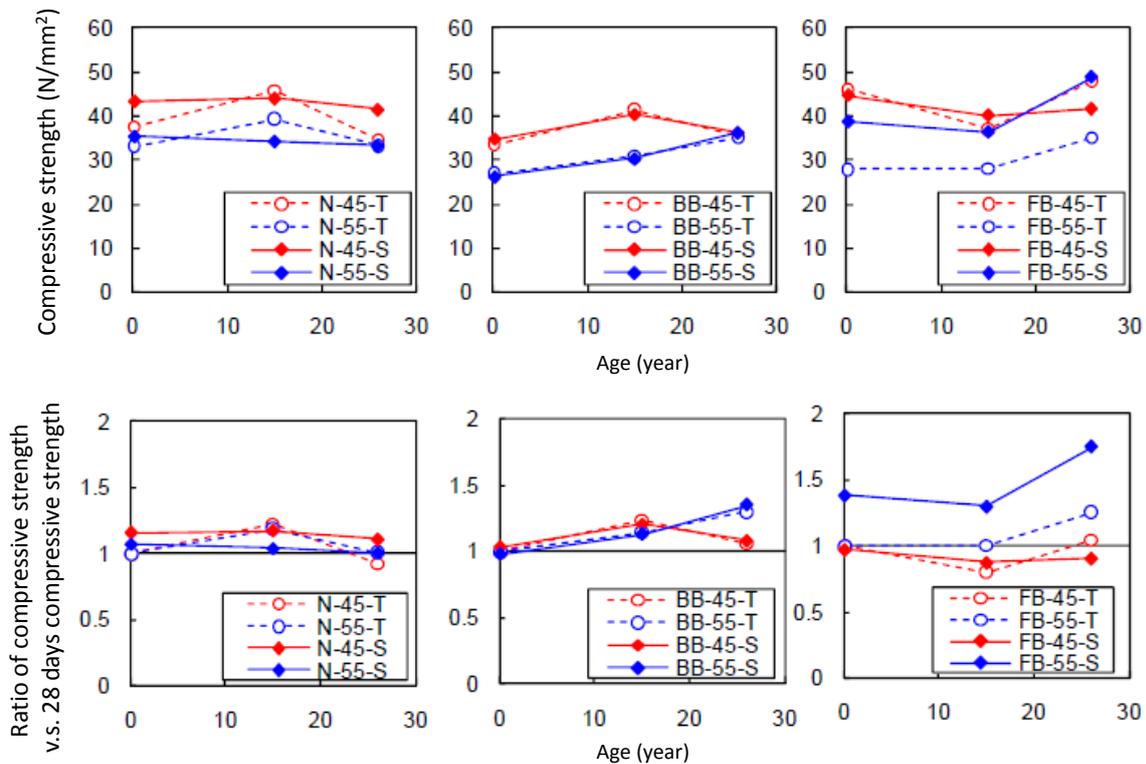


Fig. 8 Change of compressive strength of concrete mixed with seawater<sup>5)</sup>

## 5. 海水利用によるコンクリートの性能向上および補強材の防錆対策

本章では、練混ぜ水として海水を用いた場合のコンクリートの性能向上効果、防錆剤のコンクリートへの影響と防錆効果、各種の補強材の適用性に関して既往の知見をまとめた。

### 5.1 海水利用によるコンクリートの性能向上効果

練混ぜ水として海水を用いたコンクリートの圧縮強度は、真水を用いた場合と比較して増加するとした報告が多い。海水を使用した場合、特に初期材齢における強度増加の割合が著しいが、Fig. 8 に示すように、20年以上海洋環境下において暴露した場合においても、真水を用いた場合と同等であったとする報告が多い<sup>4),5)</sup>。これらより、練混ぜ水として、海水を用いた場合においても、長期的な強度への影響は少ないと考えられる。

最近では、海水を用いたコンクリートに亜硝酸カルシウムを添加することにより、初期および材齢1年の圧縮強度が真水を用いた場合に比べて増加するとした報告や、海水の使用により、自己充填コンクリートの初期強度を増加させることができたとする報告<sup>6)</sup>がある。

また、結合材として高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いた場合、ポルトランドセメントのみを用いた場合に比べて、真水使用に対する海水（あるいは塩水）使用による圧縮強度の増加割合が大きくなる傾向がある。

その他の性能向上効果として、海水を使用することによって、真水使用のコンクリートに比べて、透水係数が減少したとする報告(Fig. 9)<sup>7)</sup>、乾燥収縮量が減少したとする報告、平均細孔径が減少したとする報告もある。

適切な施工を行うことが前提であるが、海水を使用することによって、混和材を使用し初期強度発現の遅いコンクリートの強度発現の改善、プレキャスト製品の脱型時期の早期化、水密性を要する構造物の水密性向上に寄与することが可能と考えられる。

### 5.2 海水を利用した場合の防錆剤のコンクリートへの影響と防錆効果

海水を用いたコンクリートに亜硝酸塩系の防錆剤を用いると、凝結時間の遅延、短期強度および長期強度が増加する傾向があり、海水を用いた場合に防錆剤を用いても、凍結融解抵抗性や中性化の進行に及ぼす影響は認められず、鉄筋の防錆効果があることが報告されている。

一方、海洋環境下のコンクリートに亜硝酸塩系の防錆剤を使用する場合、長期的に亜硝酸イオンが溶出する傾向が見られ、防錆効果に影響を与える可能性があることから、長期的な亜硝酸イオンの溶出特性を考慮する必要がある。

### 5.3 海水を利用したコンクリート中の補強材の検討

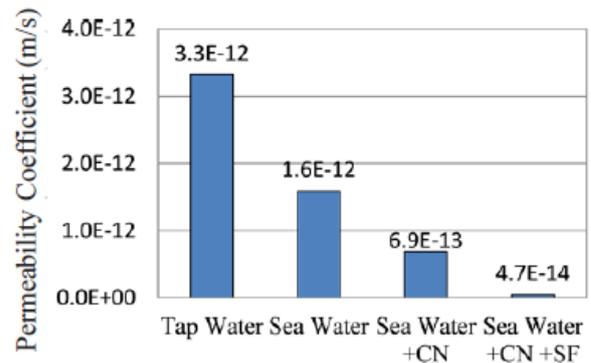


Fig. 9 Water permeability of concrete mixed with seawater<sup>7)</sup>

コンクリート中のステンレス鉄筋やエポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食試験や長期暴露の結果から、海水使用によって初期より含有される量以上の塩化物イオンがコンクリート中に浸透した場合においても、これらの鉄筋に腐食が発生していないことが確認されている<sup>8),9)</sup>。したがって、これらの耐食性に優れた鉄筋を用いることにより、海水を使用したコンクリート中の鉄筋の防食が可能と考えられる。

また、海水を使用したコンクリートに、適用場所を限定することにより、FRP や竹材などの非腐食性の補強材を使用することも可能であると考えられる。

## 6. 海水使用コンクリートの製造・施工方法の検討

本章では、施工事例の調査結果および2章～5章の内容を踏まえて、海水使用コンクリートの製造・施工方法とその優位性・留意点について整理した結果をまとめた。

### 6.1 コンクリート分野における水利用の実態調査

わが国のコンクリート関連分野における水利用の実態を把握し、海水を利用する上での留意点を確認するため、関連先へのヒアリング調査を行った。

#### (1) 製造過程における水利用の実態調査

コンクリートに関してレディーミクストコンクリート工場およびコンクリートミキサー船を、海水を用いたセメント系材料に関して石炭灰硬化体（セメント、石炭灰、各種スラグ、海水の硬化体）の製造プラントおよび固化処理専用船を対象として、水利用の実態を調べた。

コンクリートの製造過程における水の使用量は、大規模なレディーミクストコンクリート工場（出荷量が約20,000m<sup>3</sup>/月）では練混ぜ水として3,500t/月もの水が使用されていた。レディーミクストコンクリート工場では、コンクリート1m<sup>3</sup>を出荷するために使用された水（回収水を除く）は、練混ぜ水で約90～190kg/m<sup>3</sup>、洗浄水で4～11kg/m<sup>3</sup>であった。これは、コンクリートの単位水量を170kg/m<sup>3</sup>と仮定した場合、練混ぜ水の50～100%、洗浄水の2～6%がコンクリートの製造のために新たに使

用されていることを示している。これらのことから、コンクリートの製造過程において、非常に多くの水を新たに使用していることが理解できる。

コンクリート（あるいはセメント系材料）の使用材料として海水を用いる場合、製造設備への影響とその管理上の問題が懸念される点ではある。しかし、これらはおもに腐食や塩分に起因する問題であり、ヒアリング結果では、事前に検討や準備が必要ではあるものの、その対処法が技術的に難しいものではないことが確認できた。

## (2) 施工過程における水利用の実態調査

施工過程において「水」を使用する主な作業には、運搬（トラックアジテータへの散水）、型枠工（木製型枠への散水）、打継ぎ（粗面処理）、養生（湿潤養生）、清掃（鉄筋・型枠、圧送配管内、現場内の清掃等）、場内散水（粉塵対策）などがあると思われる。

これらの作業における水の使用量は現場条件によって異なるものと思われるが、一般的な条件のコンクリート工事においては、養生水として使用される水量が最も多いものと推察される。また、養生水としての利用は垂直面よりも水平面（天端面）に用いられる水量の方が多いと考えられ、たとえば湛水養生の場合に深さ3cm分の水を使うと考えると、 $30\text{kg/m}^2$ の水が必要になる。

ここで、港湾工事のうち、防波堤ケーソンの上部コンクリートに上記の湛水養生を行った場合に必要な水量を試算した。ある港湾において標準的な規模のケーソン（1函あたり幅15m、長さ20m）の上部コンクリート（厚さ2m）を1年あたり5函施工するとした場合、 $30\text{kg/m}^2 \times 15\text{m} \times 20\text{m} \times 5$  函/年 =  $45\text{t}$ /年の水を使用していることになる。この水量は、コンクリート打込み量（ $15\text{m} \times 20\text{m} \times 2\text{m} \times 5$  函/年 =  $3,000\text{m}^3$ /年）に対しては、 $45\text{t}/\text{年} \div 3,000\text{m}^3/\text{年} = 15\text{kg/m}^3$  であり、コンクリートの単位水量（ $170\text{kg/m}^3$ と仮定）の9%に相当する。このように、コンクリート分野における水の使用量として、養生水としての利用も無視できないものである。

## 6.2 海水使用コンクリートの施工方法の事例

海水使用コンクリートの施工事例として、その施工方法や海水練りコンクリート（またはモルタル）が採用になった経緯などを、文献調査等により整理した。

沖ノ鳥島における露岩根固コンクリートでは、真水の供給が難しい離島の海中部に施工されたコンクリートの練混ぜ水に海水が用いられた。海水を使用することにより材料や装置に特段の配慮を行ったとの記録はなかったが、水平打継目の補強鉄筋にはエポキシ樹脂塗装鉄筋が用いられた。

灯台の海水練りコンクリート（鉄筋コンクリート）や海水練りモルタルを用いたプレパックドコンクリート（無筋コンクリート）に関しては、それぞれ昭和27年、

昭和39年までに施工された記録を確認したが、真水の供給および資機材の運搬に困難を伴うような施工条件であったため、海水練りコンクリート（またはモルタル）が積極的に採用された経緯があった。

また、震災によって発生したコンクリートがらの有効利用を目的として製作された海水練りコンクリートブロックの施工事例では、約3ヶ月間の現地プラントによる製造実績で、通常の鋼製の貯水槽および計量設備には腐食を生じたが、バッチミキサは真水で1日1回洗浄したために腐食は生じなかった。

前述の石炭灰硬化体の施工事例のうち、専用プラントが用いられた事例では、配管や計量器には防錆対策が施されたものが用いられ、配管取付け部等に軽微な腐食が発生したものの、大きな問題はなく施工された。一方、既存のレディーミクストコンクリート工場で製造された事例では、海水用の貯水槽や配管を新たに設置したほか、散水車により海水を運搬する必要があったことや、この施工期間中は普通コンクリートの出荷を中止したことなどから、このような製造方法では海水練りのメリットが発揮しにくいことも確認された。

## 6.3 海水使用コンクリートの製造・施工における特徴（留意点と対策）および製造システム

海水使用コンクリートの製造・施工にあたっては、基本的には一般のコンクリートと同様に扱うことができるが、その際に考慮すべき特徴（留意点や必要に応じて取るべき対策）の主なものを以下に示した。

### (1) 材料・配合

海水の主要な成分やその相対的な濃度比については、場所によるばらつき（地域性）や取水深さの影響は少ないが、河口付近では海水濃度が低下する可能性がある。また、沿岸部や閉鎖性の湾内などでは懸濁物について注意が必要である。

セメントや骨材、混和材料、補強材は一般的なものを用いることができる。混合セメントまたは混和材料として高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、亜硝酸カルシウム等を用いることで、強度発現性や耐久性（緻密性）について優位性が期待できる。また、海水を用いても減水効果の低下が小さい塩分含有用混和剤も開発されている。構造物の要求性能や使用環境によっては、ステンレス鉄筋をはじめとする非腐食性補強材も有効である。

### (2) 製造・運搬

製造・運搬設備は海水による腐食が懸念されるため、貯水槽や計量器等は耐腐食性の高いものを使用し、ミキサやアジテータ車のドラム等は真水で洗浄することが望ましい。また、スランプロスや凝結時間が短縮する影響を考慮して、運搬方法や混和剤の種類を検討する必要がある。ポンプ圧送に関しては、通常と同様に施工できる

と考えてよい。

### (3) 打込み・締固め・仕上げ

ブリーディングが少ないことや凝結時間が短いことに留意して施工する。とくに2層以上に分けて打ち込む場合にコールドジョイントが発生しないよう、許容打重ね時間間隔を検討しておく必要がある。

### (4) 養生・継ぎ目

養生や継ぎ目の施工は通常と同様に行えばよい。ただし、温度制御養生（給熱養生など）を行う場合は、発熱速度が大きいことから温度ひび割れが発生しやすい可能性が考えられるので、事前に検討することが望ましい。

海水練りコンクリートのブロック等については、型枠取外し後に海水中に浸漬して養生することで初期の乾燥を防ぐことができ、とくに冬期においては気温よりも高い温度の海水による養生効果も期待できる。

一方、淡水練りコンクリートは、海水を用いて養生すると強度増加することが確認されているので、とくに無筋コンクリートではメリットが大きい。ただし、凍害を受ける環境において海水養生を行うと凍害の進行を早める可能性があるため、なるべく避けるのが望ましい。

### (5) 鉄筋工・型枠工

鉄筋（補強材）と型枠の施工は通常と同様に行えばよい。ただし、鉄筋（補強材）の組立ては、所定のかぶり厚さを確保するように、組立精度などに十分注意する。

エポキシ樹脂塗装鉄筋では、塗装の欠損やピンホール、きず等の有無が生じないように特段の注意が必要である。

### (6) 品質管理

構造物に求められる要求性能を十分に確認し、また海水使用による品質への影響を考慮して立案された施工計画に合わせて、品質管理方法を十分検討しておくことが望ましい。コンクリート中の塩化物イオン量や鉄筋のかぶり厚さの管理は重要である。

### (7) ひび割れ対策

構造物完成後の点検や補修の可能性といった維持管理面を十分考慮したうえで、ひび割れ対策を講じる必要がある。構造物に求められる性能に応じて、ひび割れ幅制御用の鋼材（必要に応じて防食性能の高い鋼材）の使用も検討するとよい。

### (8) 製造システム

海水使用コンクリートの製造は、基本的には通常と同様の方法で行うことができる。沿岸地域や離島における工事では、Fig. 10に示すように、海岸近くに現地プラントを設置して製造することができる。海水は沿岸部よりポンプで汲み上げ、必要に応じてろ過し、貯水槽に保管して用いる。ヒーターやチラーを用いて温度制御を行うこともできる。また、付近から海砂を採取できる場合、除塩しないで細骨材として使用することも可能である。

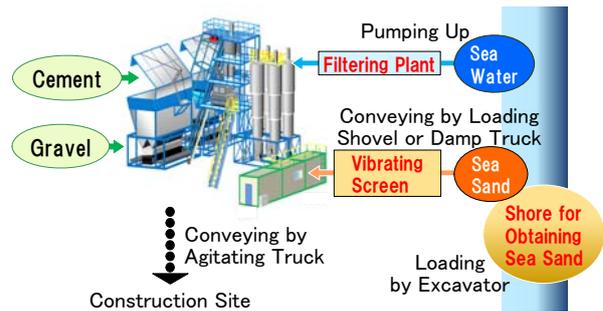


Fig. 10 Example of manufacturing system of concrete mixed with seawater

## 6.4 まとめ

海水使用コンクリートは、コンクリート分野における水資源の有効利用に役立つのはもちろんのこと、使用材料や配合、養生方法などに配慮すればコンクリート品質の向上、さらには施工の効率化も期待できる。たとえば強度発現（とくに初期強度）の増進、コンクリートの緻密化（耐久性向上）、型枠取外し時期の短縮、海水養生や海水浸漬（海水中養生）によるひび割れ抑制と施工効率化などの多くの効果が期待できる。

また、少なくとも無筋コンクリートであれば、練混ぜ水としての海水利用に限らず、木製型枠への散水、打継目の処理、湿潤養生（マット養生や湛水養生、散水養生）などに海水を用いることもできる。

## 7. 全体のまとめと今後の展開

### (1) まとめ

地球規模で淡水の枯渇が進み、将来には飲料水の不足も確実となるので、コンクリートの製造、施工に使用される淡水は限られてくる。したがって、コンクリート技術者としては、「海水を利用できない理由でなく、なんとか利用できる方法を考える。」という態度で淡水の利用を抑える技術を持つことが必要である。

本委員会のこれまでの検討によって、コンクリートの練混ぜ水あるいは養生水への海水の利用は、場合によって、配（調）合、製造、施工などにそれなりの工夫をすれば問題ないし、場合によっては、有利なこともあるということが明らかとなった。すなわち、無筋コンクリートへの適用はほとんど問題ないと考えられ、鉄筋コンクリートに対しても、要求性能を満たすような対応（工夫）がほとんどの場合可能であることが明らかとなった。

もちろん、なんらの工夫もなく、大きな水セメント比で不適切な施工などと海水練りが組み合わされると、顕著な塩害となるので、コンクリートの基本を外すことは論外である。

### (2) 今後の展開

今後展開できる海水利用法について、本委員会で議論

したものを列記する。

- 1) 震災などの災害時における復旧工事への適用や震災がらとの併用
- 2) 沖ノ鳥島などの離島における適用
- 3) 砂漠（特に海岸に隣接した）における適用
- 4) 海洋・海岸構造物の製造・施工における海水中養生の適用

などが考えられる。

本報告書を活用して、種々のコンクリート分野における海水の有効利用を考えていただければ幸いである。

#### 参考文献

- 1) 斎藤豪，菊地道生，多田直央，佐伯竜彦，海水練りセメントペースト供試体の水和反応解析，無機マテリアル，2014（掲載決定）。
- 2) 与那嶺一秀，山路徹，小林浩之，審良善和：異なる干満環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食性状，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.13，pp.77-82，2013
- 3) 福手勤，浜田秀則，山本邦夫：海洋環境に20年間暴露されたコンクリートの耐久性に関する研究，土木学会論文集，No.442，Page.43-52，1992.2
- 4) 大即信明，森好生，関博：海洋環境におけるコンクリート中の塩素に関する一考察，土木学会論文報告集，第332号，pp.107-118，1983.4
- 5) 審良善和，山路徹，小林浩之，濱田秀則：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.820-825，2012.7
- 6) 竹中寛，内藤英晴，羽瀧貴士，清宮理：海水および海砂を用いた自己充てん型コンクリートの基礎特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1912-1917，2012.7
- 7) Keisaburo KATANO, Nobufumi TAKEDA, Properties and Application of Concrete Made with Sea Water and Un-washed Sea Sand, Third international conference on SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES (SCMT3), 2013.8
- 8) 田所裕，佃有射，山路徹，丸屋剛，二羽淳一郎：ステンレス鉄筋のコンクリート中における腐食発生塩化物イオン濃度に関する実験的研究，土木学会論文E，Vol.65，No.4，pp.522-529，2009.11
- 9) 星野富夫，魚本健人，小林一輔：15年間の海洋暴露試験を行ったエポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリート梁の耐久性と防食効果，土木学会論文集，No.592/V-39，pp.107-120，1998.5