九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

# コンクリートの練混ぜ水としての海水の適用性について

濱田，秀則
九州大学大学院工学研究院社会基盤部門

パタ，ダリア
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 ： 博士後期課程

ハラハップ，サブリナ
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 ： 博士前期課程

https://hdl.handle.net/2324/4481583

出版情報：Ziryo-to-Kankyo. 68 (10), pp.274-279, 2019-10-10. Japan Society of Corrosion Engineering
バージョン：
権利関係：© 2019 Japan Society of Corrosion Engineering

KYUSHU UNIVERSITY

第65回材料と環境討論会 講演大会論文

材料と環境，68, 274-279（2019）

論 文

# コンクリートの練混ぜ水としての海水の適用性について

濵田秀則[1)*]，ダリア・パタ[2)]，サブリナ・ハラハップ[3)]

[1)] 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門
[2)] 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 博士後期課程
[3)] 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 博士前期課程

# An Applicability of Seawater as Concrete Mixing Water

Hidenori Hamada[1)*], Dahlia Patah[2)] and Sabrina Harahap[3)]

[1)] *Department of Civil Engineering, Engineering Division, Kyushu University*
[2),3)] *Civil Engineering Course, Engineering Division, Graduate School of Kyushu University*

[*]**責任著者（Corresponding Author）** 〒819-0395 福岡市西区元岡 744（744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan）
E-mail: h-hamada@doc.kyushu-u.ac.jp

In this 21st century, sustainability is an issue of extreme importance for humankind. As regards drinking water, a serious shortage is expected by 2050, when one-third of the world's population is predicted to lack sufficient access to drinking water. In the field of concrete, billions of tons of freshwater is consumed annually for mixing, curing and washing concrete. Seawater is presently not permitted to be used for these purposes. Active use of seawater in the field would contribute to more effective use of freshwater resources.

Based on this social situation, JCI (Japan Concrete Institute) set the committee to research the possibility of seawater usage in concrete production, such as concrete mixing, concrete curing etc. Based on the results, issues surrounding the use of seawater and possible solutions are proposed. In this report, readers are expected to find the committee activities and committee attitude. In Kyushu University, recent several years, a research on concrete characteristics mixed with seawater is continued. In this paper, a discussion on seawater utilization as concrete mixing water based on the research results is also summarized.

Actually, this paper is a summary paper of three presentations by authors, Hamada, Patah, Harahap, in the JSCE conference held in Toyama, 2018 October.

**Key words** : water stress (water crisis), concrete, seawater mixing, steel bar corrosion

## 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・生活の物質的な向上により，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』の到来を必須であると考えると，生きるために不可欠な淡水の確保のための検討を種々の分野が実施することが喫緊の課題である．コンクリートの分野では年間数十億トンの淡水を消費しているものの，現状では海水の使用は極めて少ない．淡水の使用を少しでも減らすために積極的な海水の使用が求められていると言える．この現状を踏まえ，（公社）日本コンクリート工学会において，平成24年度・25年度の2ヵ年にわたり委員会活動を実施して，海水の適用に関する知見を収集しその問題点と改善策を提示した．本稿では，その活動の概要を紹介する．さらに，九州大学においても海水使用コンクリートの基礎的性状に関する実験的検討を行っており，本稿では，そこで得られているデータを示し，コンクリートの海水練混ぜに関する技術の現状およびその可能性について述べる．

なお，本稿は2018年10月に富山市において開催された第65回材料と環境討論会において，著者3名（濵田，パタ，ハラハップ）が発表した内容[2)-4)]をコンパクト化して取り纏めたものである．

## 2. 水問題の本質（バーチャルウォーターの概念）

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かもしれない．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年間に，9万平方キロメートルの地表の水域が地球上から消失したとも言われている．

Virtual Water（バーチャルウオーター）という概念が広く認識されつつある．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1 kgを生産するためには1800 ℓの水を要し，小麦1 kgは2000 ℓ，米1 kgは4000 ℓ，牛肉1 kgは実に20000 ℓを必要とする，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，というのがバーチャルウオーターの考え方である．この考え方によれば，日本は毎年約800億$m^3$のバーチャルウォーターを輸入していることになり，この量はわが国における年間の実消費量とほぼ同じ量になるとの試算結果がある．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ったとすれば，

第65回材料と環境討論会（富山，2018年）で発表

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るべきなのである．

## 3. JCI（日本コンクリート工学会）の委員会活動で得られた知見 [5),6)]

### 3.1 委員会活動の概要

5 つの WG（事例調査 WG，物性調査 WG，性能向上 WG，製造施工 WG および英文化 WG）に分かれて活動を行った．歴史的にも著名な長崎県軍艦島の建物および防波堤などにおける海水利用の可能性についても検討し，その他の海水使用構造物の劣化状況調査なども行った．各 WG の成果を総合的に整理して，海水利用の問題点，克服すべき課題および利用可能性を示した．ここでは，詳細については割愛する．

### 3.2 委員会活動の成果の総括と基本姿勢

委員会での知見を以下のように総括する．すなわち，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適切な工夫をすれば問題はなく，場合によっては，むしろ有利になる．現状でも無筋コンクリートへの適用は問題ない．コンクリートへの海水利用の基本的姿勢は『なんとかできる方法を考える．“Where there's a will, there's a way.”』である．もちろん，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ると顕著な塩害が生じることも十分に認識しておかなくてはならない．

## 4. 海水で練り混ぜた既存の実構造物の事例

### 4.1 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されている．施工当時と現在の状況を Fig. 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．特徴として，台の部分は塗装をしていないが，灯台本体の部分は白色の塗装が施されていることである．おそらく，灯台本体の内部は空間があり，そこに貴重な機器が置かれているために念を入れて塗装を施して，耐久性向上を図ったものと想像できる．結果として，塗装を施すことで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推察される．

### 4.2 長崎県端島（軍艦島）のコンクリート構造物群

端島（軍艦島）は 1890 年～1974 年の間，三菱の主力炭鉱として開発され，1916 年以降 RC 構造物の建設が開始された（Fig. 2 参照）．この RC 構造物群は現在，文化財・観光資源として注目されているが，無人島となってから風化・劣化が著しく進んでいる．このように劣化した構造物が現存することは極めて珍しく，材料学的にも貴重な遺産である．いくつかの研究グループがコンクリートの調査を実施しているが，目視調査および個別の建物から抜き取ったコアの塩化物イオン量に関する詳細分析の結果から，練混ぜ水として海水を使用した可能性が大きいことが示されている．かなり多量の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多く，これはコンクリートの品質および局所的水分環境等が影響を及ぼしているものと推察される．

軍艦島の構造物について非常に興味ある現象は，島に炭鉱作業員およびその家族が在住している間は構造物も健全な状態に保たれていたものの，住民が島を去ってしまうと瞬く間に廃墟に化してしまったということである．その他の多くの構造物でも見られる現象であり，まるで島とその中の構造物が生きているようにも感じられる．勝手な想像に過ぎないが，構造物を健全な状態に維持する何か目に見えない働きがあるようにも思われて興味深い．

## 5. 海水練りコンクリートの材齢 25 年時の強度特性 [7)]

### 5.1 材齢 25 年時の供試体の状況

この節では，材齢 25 年が経過した海水練り（SW）と水

Fig. 1 Condition of Lighthouse.
(left: Just after Construction, right: Present)

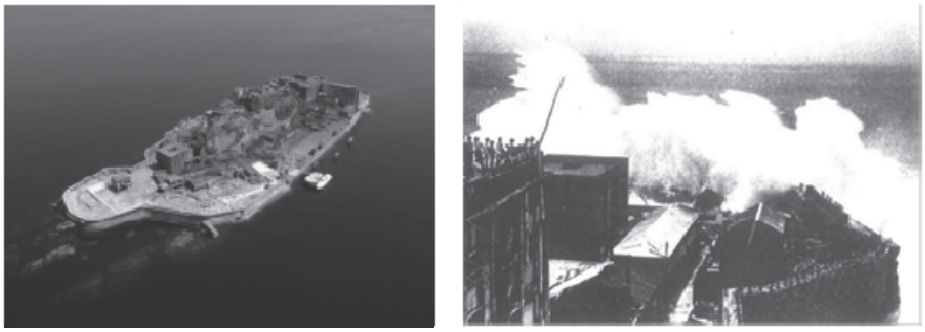

Fig. 2 Gunkanjima-island (Right: under very strong wave).

道水練り(TW)コンクリートの$\phi$150×300 mm円柱試験体の試験結果を述べる．Fig. 3に供試体の外観性状を示す．また，Table 1にコンクリートの配合を示す．

コンクリートの製造は1988年に実施した．打設後24時間で脱型し，材齢28日まで20℃の水中養生を行った．その後，タンク内での海水浸せきも実施しているが，その際，タンクから蒸発した水を海水で補給したため，タンク内の海水中の塩分濃度は，最終的にはほぼ飽和の状態となった．25年間の供試体の暴露(保管)状態の推移をFig. 4に示す．

25年時に実施した試験は，圧縮強度試験，静弾性係数試験，割裂引張試験，動弾性係数試験，超音波伝搬速度試験，塩分含有量試験，細孔径分布試験である．圧縮強度試験，弾性係数試験，引張強度試験はそれぞれJIS A 1108：2006，JIS A 1149：2010，JIS A 1113：2006に準拠して，各試験3体の試験体を用いた．また，超音波伝搬速度試験，動弾性係数試験および塩分含有量試験は，JIS A 1127：2010，ASTM C 597-02，JIS A 1154：2003に準拠して行った．なお，細孔径分布試験は水銀圧入式で行い，各試料3回の計測を行った．

### 5.2 材齢25年時の試験結果

Table 2に試験結果を総括して示す．この表よりわかるとおり，材齢28日においても，材齢25年時においても，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．この結果は，他の試験結果とも一致するものである．これより，25年という長期材齢においても，塩分がコンクリート強度を増進させることがわかった．水道水練りの圧縮強度に対する，海水練りの圧縮強度の増進比率は，材齢28日において14％，材齢25年において8％であり，長期材齢において幾分低下することもわかった．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45％，海水練りにおいて37％の増進率となり，増進率は水道水練りの方が大きくなった．

細孔量について見てみると，海水練りにおいて大きく減少していることがわかる．一方で，引張強度，静弾性係数，超音波伝搬速度，動弾性係数は，材齢25年時において，海水練りの方が水道水練りよりもわずかに小さいことがわかる．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23.22 kg/m$^3$，水道水練りで18.73 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ことがわかった．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．

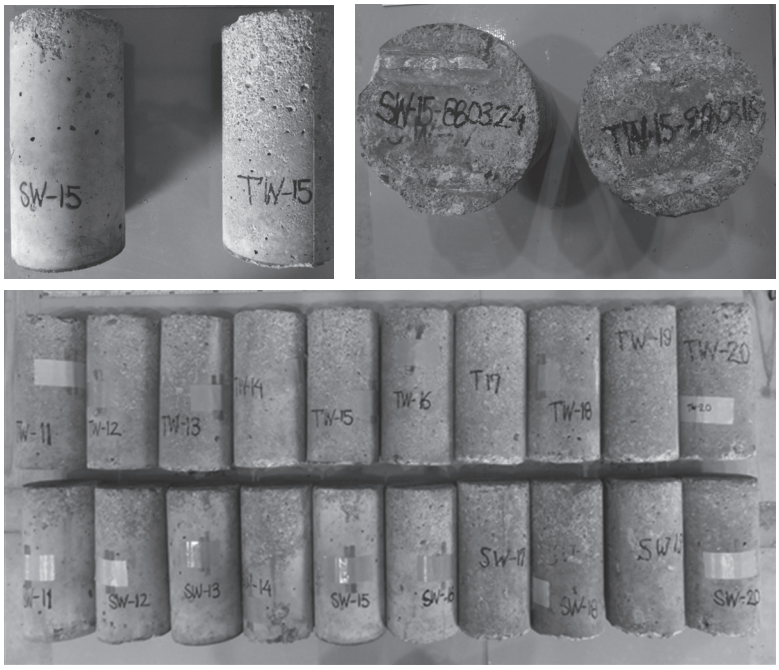


Fig. 3 Specimens at the age of 25 years.

Table 1 Mix Proportion of Concrete.

| Mixing water | $G_{max}$ | W/C (%) | s/a (%) | Unit Weight (kg/m$^3$) | | | | | | Slump (cm) | Air Content (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | W | OPC | G | S | WR | AE | | |
| Tap-water | 20 | 60 | 46 | 165 | 275 | 1,020 | 852 | 5.5 | 1.0 | 6.5 | 3.3 |
| Sea-water | 20 | 60 | 46 | 165 | 275 | 1,020 | 852 | 5.5 | 1.0 | 8.5 | 3.2 |

Concrete Casting in 1988

→ After de-moulding, water curing for 28days

→At 28days, initial data was taken (Compressive strength,

→ Tensile strength, Static Modulus of elasticity)

→ Air exposure in the laboratory, during 2years (1988～1990)

→ Seawater exposure in 80℃, during 1.5years (1990～1991)

→ Seawater exposure in 20℃, during 1year (1991～1992)

→ Air exposure in the laboratory, during 22years (1992～2014)

→ Tested at the age of 25years (2014)

Fig. 4 Specimen History during 25 years (1988～2014).

Table 2 Test Results at the age of 25 years.

| Test item | 28 days (initial data) | | 25 years | |
|---|---|---|---|---|
| | Tapwater mixing | Seawater mixing | Tapwater mixing | Seawater mixing |
| Compressive strength $f'_c$ (MPa) | 33.18 | 37.93 | 48.18 | 51.87 |
| Static modulus of elasticity $E_c$ (GPa) | 23.93 | 23.58 | 32.63 | 31.54 |
| Tensile strength $f'_t$ (MPa) | 2.47 | 2.67 | 3.88 | 3.69 |
| Pore volume $P$ (%) | -- | -- | 14.32 | 10.87 |
| Ultra sonic velocity V (km/sec) | -- | -- | 4.59 | 4.30 |
| Dynamic modulus of elasticity $E_d$ (GPa) | -- | -- | 38.76 | 35.70 |
| Chloride content $Cl^-$ (kg/m$^3$) | -- | -- | 18.73 | 23.22 |

### 5.3 材齢25年試験から得られた結論

海水で練り混ぜることにより導入される塩化物イオン，および硬化後に海水浸漬により導入される塩化物イオンは，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と結論づけることができる．

## 6. 海水で練り混ぜたコンクリート中の鉄筋の腐食性状について

海水で練り混ぜたコンクリート中の鉄筋の腐食についてはこれまでにも複数の研究者の研究成果[5),6)]が報告されている．しかし，これらの研究においては，コンクリート用材料，コンクリートの暴露環境なども実験条件も多岐にわたり，統一した見解が示されるまでには至っていないのが実状である．ここでは，本稿の著者のハラハップとパタが報告した実験結果[3),4)]を簡潔に示す．

### 6.1 コンクリート製造後6年間の鉄筋表面の不動態の状態の推移

普通ポルトランドセメントを使用して製造した海水練りコンクリート中の鉄筋の不動態の状態を経時的に調査している．製造後6年時までの調査結果をTable 3に示す．不動態の状態はアノード分極曲線より判定するものであり，グレード1から5までの5段階で評価する[8)]．グレード5が最も評価が高くほぼ完全な不動態が存在する状態を示し，グレード1が最も評価が低くほぼ完全に不動態が破壊されている状態を示す．その中間のグレー

Table 3 Time-dependent change of the Grade of Passivity of steel bars in seawater mixed concrete.

| Specimen | The age of concrete (year) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 0.5 | 1.5 | 2 | 3 | 4 | 5.5 | 6 |
| | The Grade of Passivity | | | | | | | |
| (I) N40 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | - | 3 |
| (II) N40 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| (I) N50 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | - | 2 | 2 |
| (II) N50 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| (I) N60 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| (II) N60 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 |

N : mixed with Ordinary Portland Cement

40、50、60 : water to cement ration of concrete （%）

Ⅰ : mixed with tap water, Ⅱ : mixed with seawater

ド2から4は，2，3，4の順序で不動態の状態はよくなっていくことを意味する．なお，コンクリート試験体の保管条件は，海水浸漬と気中乾燥を繰り返す乾湿繰り返しである．

Table 3より，その時間的推移に練混ぜ水の影響はほとんど認められず，いずれの練混ぜ水の場合にも共通の特徴として，試験体の製造直後は不動態の状態がさほど良くないものの，時間の経過とともに不動態の状態がよくなる傾向を示すことである．しかし，5年が経過すると不動態の状態が悪くなる傾向に転じる．これは，コンクリート外部から浸入してくる海水が鉄筋の表面に到達し，海水に含まれる塩分の影響により，鉄筋表面の不動態の破壊が開始したものと考えられる．いずれにしても，本実験の範囲内では，海水練りと水道水練りでコンクリート中の鉄筋の腐食状態に大きな違いは認められなかった．

なお，ここでは具体的なデータを示すのは割愛するが，パタの実験では，鉱物質混和材を混入することで普通ポルトランドセメントのみを用いて製造したコンクリートよりも，コンクリート中の鉄筋の腐食発生限界塩分濃度がかなり大きくなることが示されている．パタの実験は海水を用いてはおらず，NaCl水溶液を練混ぜ水として用いているので，ハラハップの実験と直接的な比較はできないかもしれないが，鉱物質混和材の適正な使用が海水練りコンクリート中の鉄筋の腐食抵抗性の向上に大きな効果を有することが示されている．

### 6.2 海水練りコンクリート中の鉄筋の腐食評価・防食に関する現時点での総括

これまでの多くの実験結果を考察すると，海水練りコンクリート中の鉄筋の腐食がさほど進行しない場合とかなり激しく腐食するという相反する実験データが存在する．コンクリート用の材料，コンクリートの配合設計，コンクリート構造の構造細目，コンクリートの置かれる環境条件などの複数の要因の影響を受けているものと考えられ，これらの要因の影響を定量的に把握することで，海水練りコンクリート中の鉄筋の腐食抵抗性を設計することができ，その結果として海水練りコンクリート構造物の長期耐久性を設計できるものと考えらえる．

海水でコンクリート構造物を設計・施工することは決して無理なことではないのである．

## 参 考 文 献


1) WMO: Assessment of Water Resources and Water Availability in the World, (1997).
2) H. Hamada, N. Otsuki and N. Takeda, Proc. 65th Jpn. Conf. Materials and Environments, JSCE, pp.27-30.
3) S. Harahap, A. Dasar, H. Hamada, Y. Sagawa and D. Yamamoto, Proc. 65th Jpn. Conf. Materials and Environments, JSCE, pp.5-8 (2018).
4) D. Patah, H. Hamada, Y. Sagawa and D. Yamamoto, Proc. 65th Jpn. Conf. Materials and Environments, JSCE, pp.9-12 (2018).
5) 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.
6) Japan Concrete Institute: JCI Technical Committee Report on the Use of Seawater in Concrete, (2015).
7) 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，九州大学学位論文，2015年9月．https://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/opac_download_md/1543974/eng2500.pdf
8) N. Otsuki, Report of Port and Harbor Research Institute, pp.127-134 (1985).


(Manuscript received July 15, 2019;
in final form September 19, 2019)

## 要　　旨

世界気象機構(WMO)によると，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．コンクリート分野では年間数十億トンの淡水を消費しているものの，現状では海水の使用は極めて少ない．淡水使用を少しでも減らすために積極的な海水の使用が求められていると言える．この現状を踏まえ，(公社)日本コンクリート工学会は，平成24年度・25年度の2ヵ年の委員会活動を実施して，海水の適用に関する知見を収集しその問題点と改善策を提示した．本稿では，その活動の概要を紹介する．さらに，九州大学においても海水使用コンクリートの基礎的性状に関する実験的検討を行っており，本稿では，そこで得られているデータを示し，コンクリートの海水練混ぜに関する技術の現状およびその可能性について言及する．

なお，本稿は2018年10月に富山市において開催された第65回材料と環境討論会において，著者3名(濵田，パタ，ハラハップ)が発表した内容をコンパクト化して取り纏めたものである．


**キーワード**　水不足(水危機)，コンクリート，海水練混ぜ，鉄筋腐食