

海水および海砂を用いた自己充填型 コンクリートの実用化に関する基礎的研究

酒井 貴洋¹・山路 徹²・清宮 理³

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: Takahiro.Sakai@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 構造研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail: yamaji-t@pari.go.jp

³フェロー会員 早稲田大学 創造理工学部 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail: k9036@waseda.jp

海水を練混ぜ水として用いたコンクリートの初期強度増進効果について淡水の場合と比較した結果、NaClによってC₃Sの初期水和反応が促進されること、また海水を用いないものに比べ硬化体組織が緻密となる現象が確認され、海水の主成分であるNaClの影響が支配的と考えられた。また、海水・海砂が使用可能かつ優れた流動性と適度な粘性を付与する新規混和剤を開発し、フレッシュ性状および硬化コンクリート特性を確認した。その結果、優れた流動性と適度な材料分離抵抗性を有する自己充填型コンクリートが製造でき、上水道水や陸砂を用いた自己充填型コンクリートと同等以上の基礎特性を示した。乾燥収縮ひずみは上水道水や陸砂を用いたものと同様である一方で、水和反応に伴う温度上昇速度が速くなり熱膨張係数がやや増大する傾向が認められた。

Key Words : sea water, sea sand, self-compacting concrete, superplasticizer, initial strength

1. はじめに

国内外の離島や沿岸部での港湾工事においては、過酷な施工環境である場合や、陸上や海上のアクセスが悪く、上水道水や骨材などの材料調達や建設労働者の確保が困難な場合がある。また、先般の大震災のように、陸・海路の輸送手段が大きな被害を受けた沿岸地域においては、緊急復旧工事に要する材料の調達や作業員の確保が課題となる。このような条件下でコンクリートを製造・施工する場合、できるかぎり施工場所の近傍で調達可能な海水や未洗浄の海砂などの材料を使用すること、コンクリートの構成材料の種類を最小限に抑え、容易に製造できること、また、自己充填性を有するコンクリートを使用し、締固め作業を省力化することで施工速度を向上することなどが求められる。

構成材料のうち、練混ぜ水として海水を用いたコンクリート（以下、海水練りコンクリート）については、従来から多くの研究がなされており^{1),2),3),4)}、最近では公益社団法人日本コンクリート工学会において「コンクリート分野における海水の有効利用に関する研究委員会」が組織され検討が進められた⁵⁾。海水練りコンクリートの

強度および流動性に与えるメカニズムの解明やこれらの影響の程度については未解明の部分が多く、また製造や施工効率の向上についても考慮する場合、海水や海砂を使用することに加え、より少ない構成材料でコンクリートに自己充填性を付与することが有効と考えられる。しかしながら、従来の高流動コンクリートは、粘性が高くポンプ圧送時の負荷が増加すること、仕上げ作業が困難になること、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの混和材や増粘剤を添加するため、構成材料の種類が多くなることなどの課題を抱えている。また、材料に海水や海砂を用いた場合は、高い流動性を発揮しにくい傾向がある。これは、練混ぜ水に海水を使用する場合、海水中に含まれる無機イオン（主に塩化物イオン）が混和剤の分散性に影響を及ぼす⁶⁾ことで、コンクリートに優れた流動性を付与することが困難であるなどの課題があったことも一因として挙げられる。

一方で低粘性な高流動コンクリート用混和剤として、既に増粘剤一液型高性能AE減水剤⁷⁾（以下、既存混和剤と称す）が開発されている。この混和剤は、ポリカルボン酸エーテル化合物と増粘性高分子化合物の複合体であり、混和材や増粘剤などの複数の材料を併用せずに、コ

ンクリートに優れた流動性を付与できるという特長を有する。しかしながら、塩分を多量に含有する海水や海砂と併用した場合にはコンクリートの流動性が発揮しにくくなり、所要の流動性を付与するため混和剤を過剰に添加する必要があった。混和剤の過剰な添加は、コンクリートの製造コストの増大を招き、コンクリートの凝結時間を遅延させるなどの弊害をもたらす。さらに、海水を用いた場合の化学混和剤の影響についても必ずしも明らかではないことから、この最適な添加量についても検討の余地が残されている。

そこで本研究では、まず2.で、古くから報告されている海水を用いた場合の初期強度増進効果等の現象の基礎的なメカニズムを理解するために、普通ポルトランドセメントによるセメント硬化体を対象に、海水の成分等が水和反応 - 空隙構造 - 圧縮強度の相互関係に及ぼす影響について詳細に検討した。また、3.では、海水を用いた自己充填型コンクリートの実用化技術の確立を目的に、既存混和剤に対してセメント粒子の分散性を向上するための改良を加えるとともに、海水や海砂と併用した場合でもコンクリートの流動性低下が少ない増粘剤一液型高性能AE減水剤開発の検討を行った。本章では、海洋環境下で広く使用される高炉セメントB種を対象に検討を行った。4.ではこの混和剤を用いた自己充填型コンクリートのフレッシュおよび硬化コンクリートの諸特性を確認し、2.で得られた結果を基に考察を行い、最後に5.において本研究で得られた知見を総括した。

2. 海水練りコンクリートの初期強度増進効果

海水をコンクリートの練混ぜ水として使用した場合、海水中に含まれる NaCl によって凝結が促進されるという傾向が報告されている¹⁾。特に初期材齢（材齢7日）における強度増進が期待され普通セメントを用いた場合、最大で2割程度増進するが、長期材齢（28日、91日）における強度は淡水を用いた同配合のコンクリートに比べて強度低下もしくは同程度という結果も報告されている。

本章では、海水練りコンクリートに特有の現象である初期強度の増進効果および流動性に関して実験的検討を行い、過去の知見を参考として要因の考察を行った。

(1) 実験概要

a) セメントペーストの水和発熱速度

海水に含有する各成分がセメントの初期水和反応に及ぼす影響を検討するため、セメントペーストの水和発熱速度の測定を行った。使用セメントには市販の普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）を用いた。既往の研究⁸⁾では、混和材を用いた場合の各種クリンカーの反応率、相組成および微細構造の変化や各々の関係につい

表-1 試験水準

No.	種類 (記号)	試薬の添加量 (g/l)		
		添加量	Cl ⁻	Na ⁺
1	無添加 (PL)	-	-	-
2	NaCl	24.53	14.88	9.65
3	MgCl ₂	19.98	14.88	-
4	CaCl ₂	23.29	14.88	-
5	KCl	31.29	14.88	-
6	Na ₂ SO ₄	29.81	-	9.65

表-2 人工海水の主成分と濃度

化合物	濃度 (g/l)
NaCl	24.53
MgCl ₂	5.2
Na ₂ SO ₄	4.09
CaCl ₂	1.16
KCl	0.695
NaHCO ₃	0.201
KBr	0.101
H ₃ BO ₃	0.027
SrCl ₂	0.025
NaF	0.003

て、普通ポルトランドセメントのみを用いた配合と概ね同様の傾向を示すことが報告されている。このため、普通ポルトランドセメントを用いることで、混合セメントにおける傾向の把握も大凡可能と考えた。

測定にはコンダクションカロリメータを用い、セメントペーストの水セメント比 (W/C) は45.0%、反応温度は20.0℃とした。試験水準を表-1に示す。試薬には、海水の主成分であるNaCl、MgCl₂、CaCl₂、KClおよびNa₂SO₄のそれぞれを用いた。なお、海水の主成分のうち、約70%はNaClであることから、海水がセメントの水和反応や硬化性状に及ぼす影響は、このNaClが支配的であると考えられる。既往の研究⁹⁾においても、練混ぜ水としてNaCl溶液を使用した場合、海水を使用した場合と同様の、極めて特徴的なセメント相組成の挙動（材齢経過後エトリング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）を示すことが報告されている。そこで本研究ではNaClを主軸とし、海水と同濃度に調整した系について検討を行った。一方、その他の海水に含有される成分（参考：表-2）については、含有量も少ないことから、その濃度領域でそれぞれ検討を行ったとしてもNaClによる支配的な挙動を大きく変化させる影響を示すとは考えにくい。そこで、ここではMgCl₂、CaCl₂、KCl、Na₂SO₄の4成分をとりあげ、セメントの水和反応に及ぼす各種イオン (Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻)

の影響を明らかにすることに目的を絞り、検討を行った。

NaClの添加量は、ASTM D 1141 - 98 (2003) 「Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water」(表-2)⁹⁾を参考にし、24.53 g/練混ぜ水 1Lとした。また、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺といった陽イオンが諸性状に及ぼす影響を検討するため、NaClと同量のCl量となる様、MgCl₂、CaCl₂、KClをそれぞれ添加した系について実施した。さらに、Cl⁻やSO₄²⁻などの陰イオンが諸性状に及ぼす影響についても検討するため、NaClと同量のNa⁺量となる様にNa₂SO₄を添加した系についても併せて実施した。

b) モルタルのフレッシュ性状および硬化性状

海水に含有する各成分がモルタルのフレッシュ性状、水和反応および硬化性状に及ぼす影響について検討を行った。

使用材料として、セメントには市販の普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)を、細骨材には大井川水系陸砂(密度:2.58g/cm³)を用いた。モルタル配合条件は、W/C=45%、S/C=2.2とし、試験水準は表-1と同様の条件とした。練混ぜはJIS R 5201: 2015「セメントの物理試験方法」に準じて行い、何れの条件でもエントラップトエアの影響を排除するため、ポリアルキレングリコール誘導体を主成分とする空気量調整剤を用い、空気量を2.0%以下に調整した。また、材料の温度を調整し、モルタルの練上がり温度を20±2℃とした。

モルタルのフロー測定は、JIS R 5201: 2015「セメントの物理試験方法」12 フロー試験に準じて行い、圧縮強度は、φ5 × 10 cmの円柱供試体を所定材齢まで養生して、JSCE-G 505-2013「円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法(案)」に準じて測定した。なお養生条件は20℃での封かん養生とし、試験材齢は1, 3, 7および25日とした。

空隙構造は水銀圧入式ポロシメータを用いて測定した細孔径分布により評価した。細孔径の測定範囲は0.003~200μmである。材齢3日および25日まで20℃で封かん養生したφ5 × 10 cmの円柱供試体を、2.5~5.0mmに粉砕し、アセトンで水和停止した後、D 乾燥を14日間施した試料を試験に供した。また、水和反応の評価を目的に、モルタルの強熱減量を測定した。材齢3日および25日まで20℃で封かん養生したφ5 × 10 cmの円柱供試体を、大量のアセトンと混合して粉砕して水和を停止させた。105℃で24時間乾燥させたのち、目開き150μmの篩を全通するまで粉砕して測定用の試料(1g, 2個)とした。強熱減量は、マッフル炉にて600℃で30分間保持した際の減量により求めた。

(2) セメントペーストの水和発熱速度

水和発熱速度の測定結果を図-1 および図-2 に示す。本

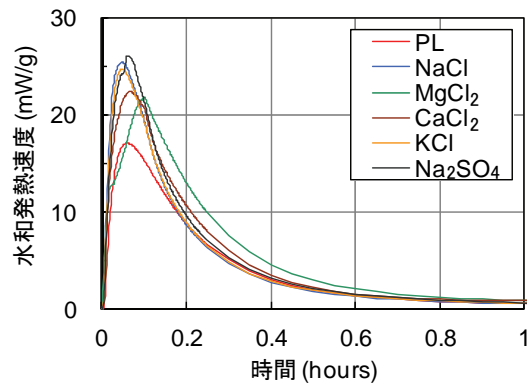


図-1 水和発熱速度 (材齢1時間まで)

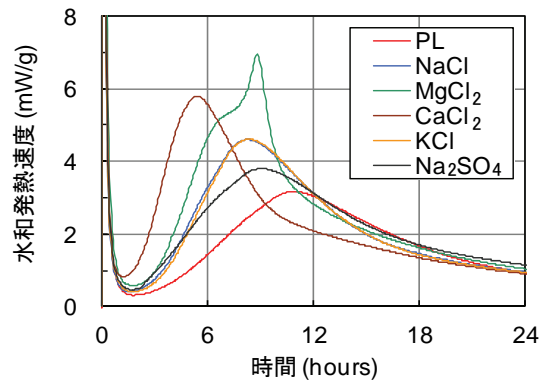


図-2 水和発熱速度 (材齢24時間まで)

章で基準としたNaClを海水と同濃度に調整した系では、無添加PLと比較して、注水後の反応が停滞している誘導期が短縮し、その後の発熱速度が加速的に高まる加速期への移行が早まっている。また、加速期から減速期に移行する発熱速度が最大となるピークの時間が早まり、また、ピーク時の発熱速度も高くなっている。このピークはポルトランドセメントの主要構成化合物のうち最も多く含まれるC₃Sの反応によるものである。よって、NaClによってC₃Sの初期水和反応が促進されるといえる。また、NaClとKClは同様な傾向を示し、アルカリ金属であるNa⁺、K⁺がセメントの初期水和反応に及ぼす影響には優位な差は認められなかった。一方、アルカリ土類金属であるMg²⁺、Ca²⁺の系では、さらに誘導期が短縮し、加速期への移行やピークの時間が早まり、また、ピーク時の発熱速度もさらに高くなっている。この傾向はとくにCa²⁺で顕著であった。これは、Ca²⁺がセメントの水和を促進するとの既往の研究¹⁰⁾と傾向が一致するものである。また、Mg²⁺では第2ピークの付近のエトリングイトからモノサルフェートへの転移が大きくなるような傾向が認められた。Na₂SO₄の場合は、PLよりは水和が促進されるが、基準としたNaClよりもその傾向は緩やかであり、Cl⁻の方がSO₄²⁻よりもセメントの初期水和を促進する傾向にあった。一方、セメント液相中および水和物固相内中のイオンの移動のしやすさを表す指標、

いわゆる極限モル伝導率からみた場合、この値がやや大きい SO_4^{2-} の方が Cl^- よりも若干セメントの水和を促進する効果が高いとの報告¹¹⁾もある。また、本研究の条件では、 Cl^- 1モルに対して SO_4^{2-} 1/2モルを比較しており、両者のモル数が異なる。実際にはこうしたモル数の違いも考慮したうえで水和速度への影響を議論する必要がある。

(3) モルタルのフレッシュ性状および硬化性状

a) モルタルのフロー

モルタルのフロー試験結果を図-3に示す。本章ではポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤などの化学混和剤を使用しない条件での試験結果である。PLのフロー205mmに対し、NaClを海水と同濃度に調整した系では201mmであり、その影響は認められなかった。また、その他の系についても197~204mmの範囲にあり同様の傾向であった。海水がフローやスランプなどの流動性に及ぼす影響については古くから研究が行われている。セメントの種類、骨材の種類、混和剤の有無、試験方法によってもやや傾向は異なるが、一般的には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若干低下する傾向にあること、化学混和剤を使用した条件では流動性が低下することなどが報告されている。本研究でも、化学混和剤を使用しない系において、海水と同等のNaCl濃度で

は流動性が低下しないこと、また、同様に Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} の影響も認められないことが明らかとなった。

b) モルタルの圧縮強度

モルタルの圧縮強度試験結果を図-4に示す。NaClのケースではPLと比較して、材齢1日で62%、材齢3日で32%圧縮強度が増大し、初期材齢ほどセメントの水和が促進される傾向が認められた。一方、材齢の進行に伴い、その増大率は低下し、材齢7日で3%、材齢25日では-0.7%となった。材齢の進行に伴い増大率が低下する傾向は、絶対値は異なるものの、高炉セメントB種を使用し、かつコンクリートの条件で実施した後述の図-27 a)でも認められている。また、池部¹²⁾、明石ら¹³⁾、竹田ら¹⁴⁾の既往の研究においても、普通ポルトランドセメントを用いた条件では、材齢3日までの圧縮強度は、海水を用いた場合の方が淡水よりも大きくなるが、材齢7日では淡水と海水による差異はほとんどなくなり、材齢28日では両者は同程度か、淡水の方が若干大きい値を示すと報告されている。NaClとKClの比較では、図-2に示す初期水和の段階や材齢1日目までは Na^+ , K^+ に差異は認められなかったが、KClの圧縮強度は材齢3~25日において、NaClやPLよりも上回る傾向にあった。また、初期水和発熱量が高かった CaCl_2 については、 Ca^{2+} の効果により材齢25日まで継続して強度が増大したが、 MgCl_2 は材齢7日

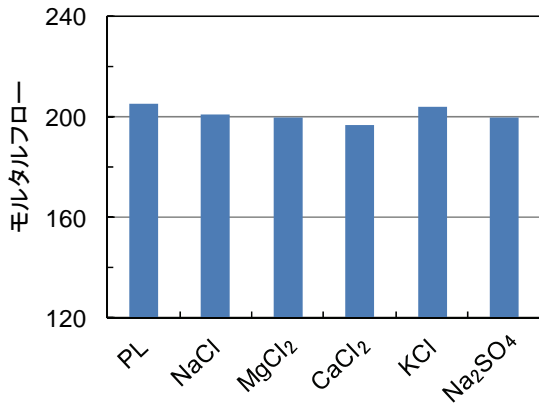


図-3 フロー試験結果

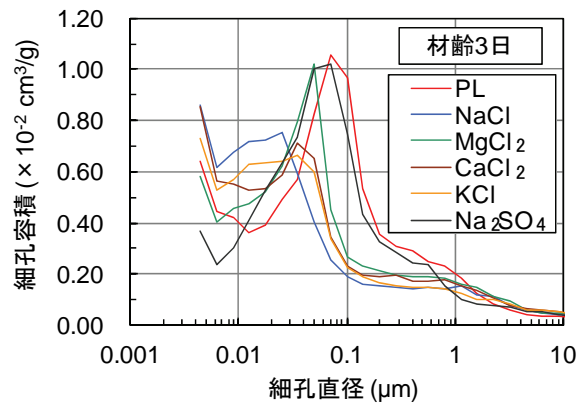


図-5 細孔径分布 (材齢3日)

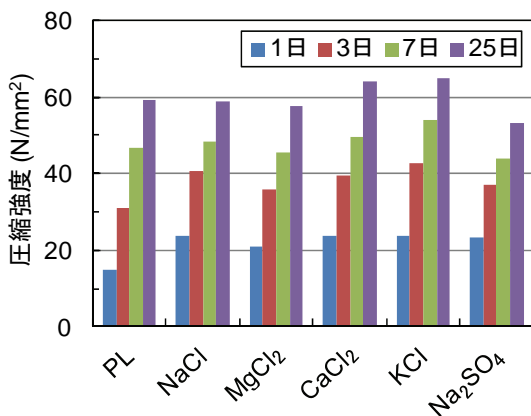


図-4 圧縮強度試験結果

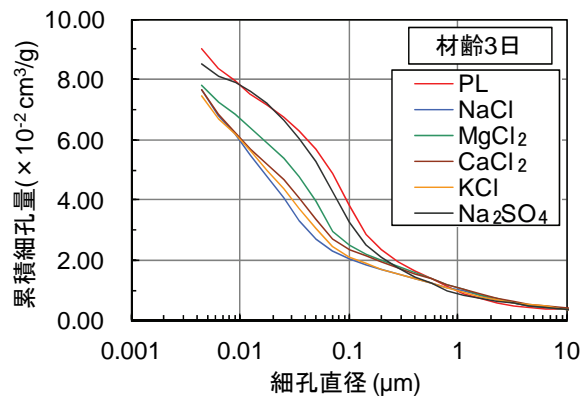


図-6 累積細孔量 (材齢3日)

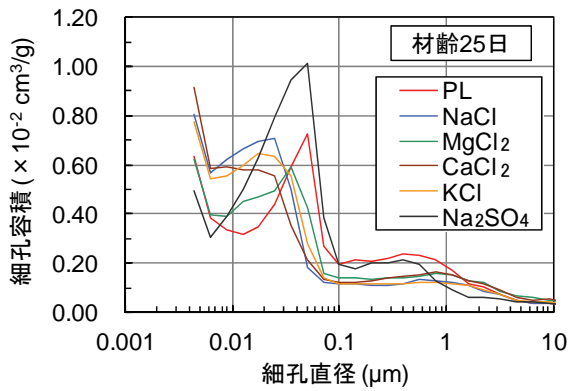


図-7 細孔径分布 (材齢 25 日)

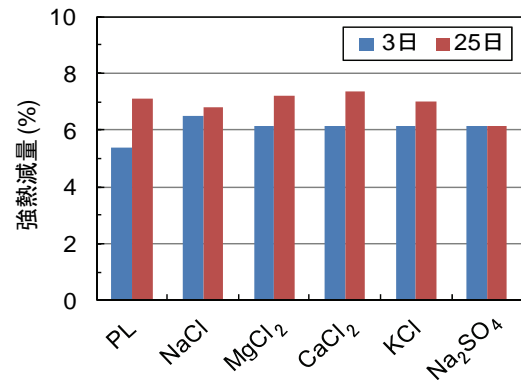


図-9 強熱減量試験結果

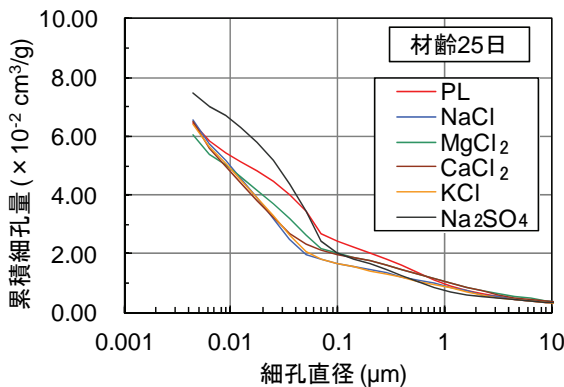


図-8 累積細孔量 (材齢 25 日)

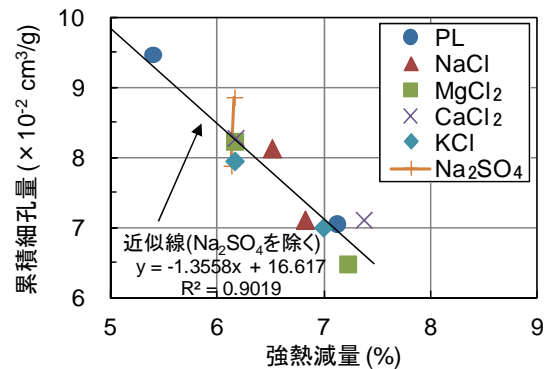


図-10 強熱減量と累積細孔量の関係

以降 PL よりも下回った。Na₂SO₄は、何れの材齢においても NaCl の圧縮強度を下回る傾向にあり、Cl⁻は SO₄²⁻よりも圧縮強度を増大させる効果が高いことが確認できた。

c) モルタルの空隙構造、強熱減量および圧縮強度の関係

図-5 および図-6 にそれぞれ材齢 3 日の細孔径分布および累積細孔量を、図-7 および図-8 にそれぞれ材齢 25 日の細孔径分布および累積細孔量を示す。材齢 3 日においては、NaCl のケースでは、無添加 PL と比較して、ピーク径やピーク高さが細かい側にシフトしており組織が緻密化されている傾向にあった。また、KCl や CaCl₂ についても同様の傾向であった。一方、MgCl₂ および Na₂SO₄ は PL よりもピーク径はやや細かい側にシフトはするが、ピークの高さはさほど変化しておらず、組織がやや粗大なままの状態であった。

材齢 25 日では、材齢 3 日と比較して、NaCl や KCl は若干細かい側にシフトするがその変化は小さい。一方 CaCl₂ や MgCl₂ はそれらよりも変化はやや大きく、とくに MgCl₂ はピーク径やピーク高さが細かい側にシフトした。しかし、Na₂SO₄ はその変化が小さく、組織は粗大化したままであった。図-9 に強熱減量の試験結果を、またこれまでに得た圧縮強度、空隙構造および強熱減量のそ

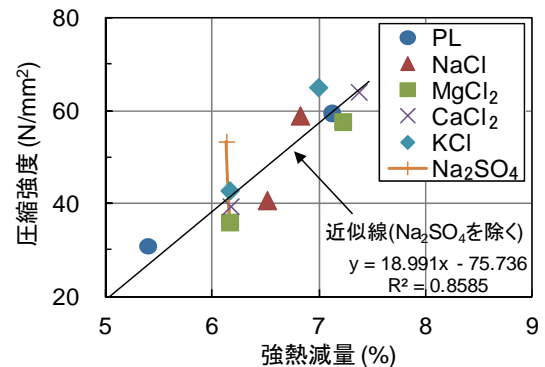


図-11 強熱減量と圧縮強度の関係

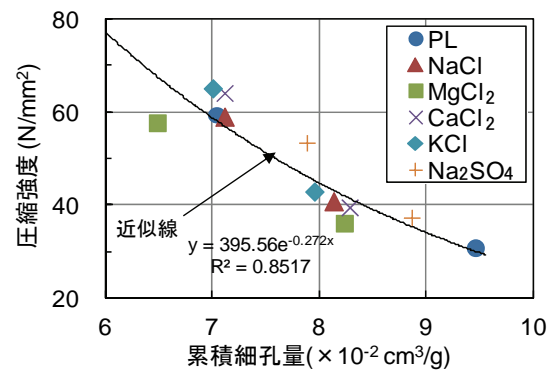


図-12 累積細孔量と圧縮強度の関係

それぞれの関係性を整理するため、**図-10** に強熱減量と累積細孔量の関係、**図-11** に強熱減量と圧縮強度の関係をそれぞれ示す。**図-10** により、 Na_2SO_4 を除く条件においては、強熱減量の増大つまりセメントの水和の進行に伴い、組織が緻密化され累積細孔量が減少する傾向にあり、両者には線形的な関係が認められた。また、強熱減量と圧縮強度にも、決定係数 R^2 はそれ程高くないが、相関性が認められた (**図-11**)。 **図-12** に累積細孔量と圧縮強度の関係を整理した結果を示す。一般的にセメント系材料の細孔容積と圧縮強度の関係は、Ryshkewitch 式¹⁵⁾で表せることが報告されている¹⁶⁾。

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-bp) \quad (1)$$

ここに、

σ : 圧縮強度

σ_0 : 空隙がゼロの時の圧縮強度

p : 空隙率

b : 実験定数

そこで**図中**には、この式(1)を用い、空隙率 p を累積細孔量として読み換え、圧縮強度との関係を回帰した結果を併記した。 MgCl_2 の値が近似線からやや外れており、空隙は緻密化されているものの、それに見合う圧縮強度が得られていなかったが、それ以外のケースについては両者には概ね相関関係が認められた。一般に海水中の MgCl_2 は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応して水溶性の CaCl_2 を生成し、コンクリートを多孔質にする作用を持つことが知られている。また一般的に、こうした空隙率と圧縮強度の関係は、累積細孔量よりも 50nm 以上のマクロポアの容積と高い相関性を示すことが知られている¹⁶⁾。しかし本研究では**図-13** に示すように 50nm 以上の細孔容積と圧縮強度の相関性は低く、むしろ**図-12** の累積細孔量の方が高い相関性を示した。**図-14** に強熱減量、累積細孔量および圧縮強度の関係を示す。これは、**図-10** に示した強熱減量と累積細孔量の関係に、さらに三軸目として、圧縮強度を円 (バブル) の大きさで示し、三者の関係を視覚的に整理したものである。 Na_2SO_4 を除く条件においては、強熱減量の増大により累積細孔量が減少し、これに伴い**図中の右下**ほど、高い圧縮強度を示した。これは、セメントの水和反応の進行によって空隙が緻密化され、圧縮強度が発現するとの一般的なメカニズムと挙動が一致するものである。著者らは、海水がセメントの水和反応や硬化性状に及ぼす影響は、その主成分のうち約 70% を占める NaCl が支配的であると考えており、海水を用いた場合でもこの結果と同様に、一般的なメカニズムと相違しないものと推察された。また、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ についても、本研究の範囲内ではこのメカニズムに大きな影響を与えないと考えられた。一方、 Na_2SO_4 は材齢が経過しても強熱減量の値は変化していない。一般的に強熱減量

(結合水量) の値は実質的にセメントの水和の程度を表わしていることから^{17),18),19)}、セメントの水和が進行していないことが伺えた。ただし、何らかの生成鉱物によって累積細孔量が若干減少し、それに伴い圧縮強度は増加する傾向にあった。一般的に SO_4^{2-} は外部から侵入した場合、膨張性の鉱物を二次的に生成し硬化体組織を破壊する可能性があることが知られている²⁰⁾。**図-12** に示した SO_4^{2-} の累積細孔量と圧縮強度の関係は、Ryshkewitch の近似線の近辺に位置しており、空隙を埋めた生成鉱物は圧縮強度に寄与しているとともに、少なくとも圧縮強度は材齢に伴って増大していることから、組織は破壊されていないと考えられた。ただし、 SO_4^{2-} はセメントの水和を停止させ、**図-7** に示すような粗大な空隙構造を形成したまま、組織の緻密化を阻害することから、負の影響を与えているといえる。しかし、実際の海水中の SO_4^{2-} は、本研究で検討した量の 1/7 程度しか含有していないことから、これがセメントの水和反応や硬化性状に及ぼす影響は極めて小さいと考えられる。

以上より、海水の主成分である NaCl によって、セメントの水和反応が促進され、組織が緻密化されることでセメント硬化体の圧縮強度が増進することがわかった。また、 Ca^{2+} 、 K^+ も水和を促進し組織を緻密化する効果はあるものの、海水中の含有量は極微量であるため、海水による初期強度増進効果は、 NaCl の影響が支配的であると考えられた。

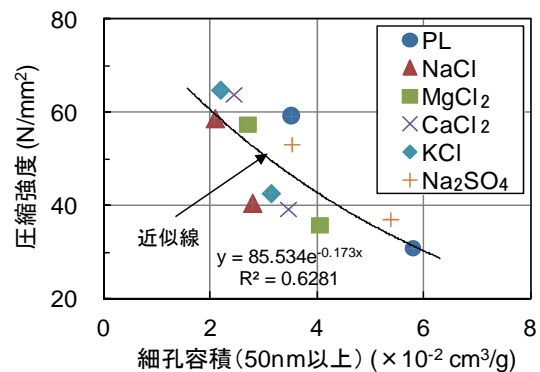


図-13 50nm 以上の細孔容積と圧縮強度の関係

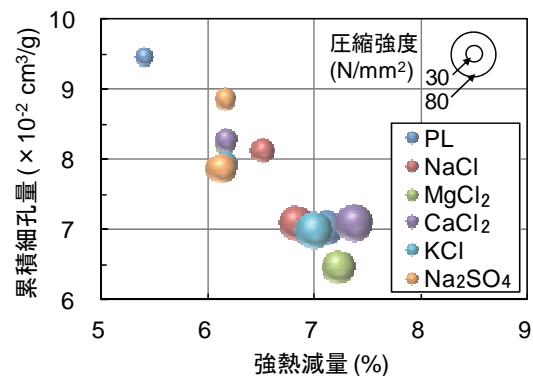


図-14 強熱減量、累積細孔量および圧縮強度の関係

表-3 使用材料

材料名	記号	種類	物理的・化学的性質
練混ぜ水	W1	上水道水	-
	W2	海水 [相模湾産, (茅ヶ崎海岸)]	密度1.025g/cm ³ 塩化物イオン1.80% 硫酸イオン0.23%
セメント	N	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³
	BB	高炉セメントB種	密度3.04g/cm ³
細骨材	S1	陸砂 (大井川水系)	表乾密度2.60g/cm ³ 吸水率1.86%, 粗粒率2.66
	S2	海砂 (沖縄県東村新川沖産, 未除塩)	表乾密度2.66g/cm ³ 粗粒率2.37, 塩化物イオン0.187%
粗骨材	G	硬質砂岩砕石(東京都青梅産)	表乾密度2.66g/cm ³ 最大寸法20mm
混和剤	SP1	ポリカルボン酸エーテル化合物	
	SP2	ポリカルボン酸エーテル化合物と	
	SP1*	増粘性高分子化合物の複合体	
	SP2*	増粘性高分子化合物の複合体	

表-4 海水の成分

密度 [20°C] (g/cm ³)	pH [20°C]	固形分濃度 [105°C, 3hr] (%)			
1.025	8.0	3.48			
各種イオンの含有量(%)					
Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺
1.80	0.23	1.08	0.03	0.05	0.12

3. 自己充填型コンクリート用混和剤の検討

2.より, 海水を用いることによる初期強度増進の要因として, NaClの影響が支配的であることが確認された. また流動性に関しては, 化学混和剤なしの条件では特に影響を受けないことが確認されたが, 既往の検討より, 化学混和剤に対しては海水中の無機イオンの影響を受けやすいことが知られている²¹⁾.

本検討では, 化学混和剤の使用によって流動性を高め充填性能を向上させることを主目的とし, この際の化学混和剤に及ぼす海水の影響を検討した上で, 海水と併用した場合でもコンクリートの流動性低下が少ない化学構造を有するポリマーを主成分とする増粘剤一液型高性能AE減水剤(以下, 新規混和剤と称す)の開発を行った^{6),22)}.

(1) 使用材料および試験方法

使用材料を表-3に, また海水の成分を表-4に示す. 練混ぜ水に用いた海水は相模湾で採水したものであり, 海水中に質量比で1.80%(18.5g/L)の塩化物イオンを含有していた. 海水の塩分濃度は採取場所によって様ではないことが知られているが, 塩化物イオン濃度の参考値としては, 海洋観測指針(気象庁編)で示される約19.9g/Lや, 表-2の人工海水の19.8g/Lなどがある. 本研究で用いた海水はこれらの値よりもやや小さい値ではあるが, 採取場所によるばらつき等を考慮した場合, 一般的な海水の塩化物イオンの範囲内にあると考えられる.

海水がコンクリートの流動性に及ぼす影響を確認する

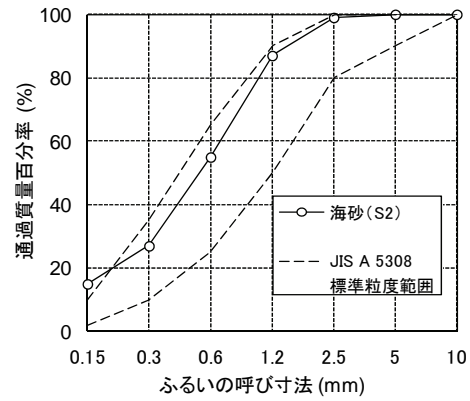


図-15 海砂の粒度分布曲線

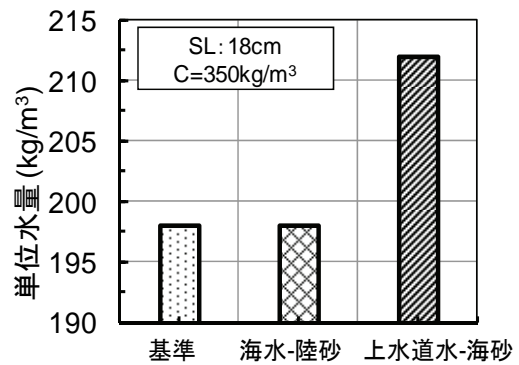


図-16 スランプ18cmを得る単位水量

ため, ポリカルボン酸系混和剤を使用しないケースと使用するケースについて検討を行った. 混和剤を使用しないケースでは, 上水道水-陸砂(基準), 海水-陸砂, 上水道水-海砂(海砂は未除塩)の各材料を組み合わせた条件で, 練上り時のスランプが18.0±1.0cmとなる単位水量を比較した. セメントは普通ポルトランドセメント(N)を使用し, 単位量は350kg/m³とした. 混和剤を使用するケースでは, 細骨材に陸砂を用い, 上水道水または海水を使用した条件で, 混和剤(SP1)の使用量を確認した. 海砂の粒度分布曲線を図-15に示す. 目標スランプは21.0±2.0cmとし, 配合はW/C=45.0%, 単位水量170kg/m³, セメントは普通ポルトランドセメント(N)および高炉セメントB種(BB)の2種類とした. スランプ試験はJIS A 1101: 2015「コンクリートのスランプ試験方法」に準じて実施した.

(2) 海水がコンクリートの流動性に及ぼす影響

混和剤を使用しない条件におけるスランプ18cmを得るために必要な単位水量を図-16に示す. 基準と海水-陸砂を比較した場合, スランプ18cmを得るための単位水量はほぼ同量であり, 混和剤を使用しない条件下では, 海水による特に影響は認められず, 2.におけるモルタルの結果と同様な傾向を示した. なお, 上水道水-海砂を

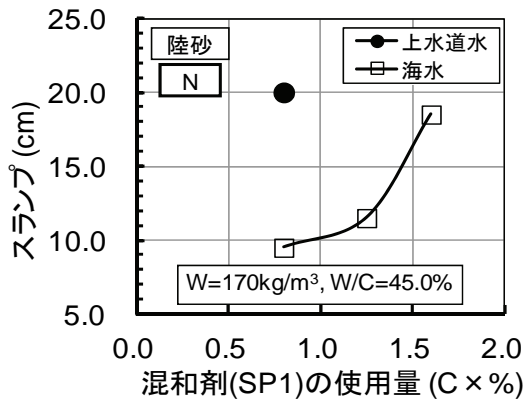


図-17 混和剤使用量とスランプの関係 (N)

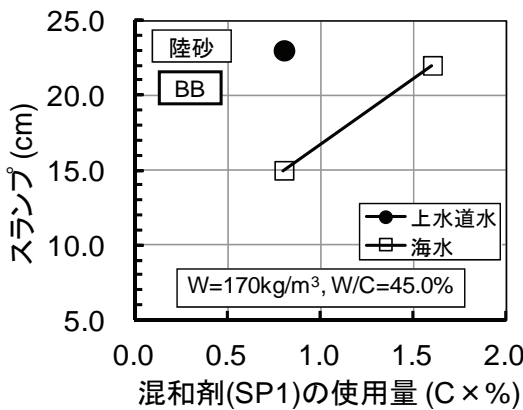


図-18 混和剤使用量とスランプの関係 (BB)

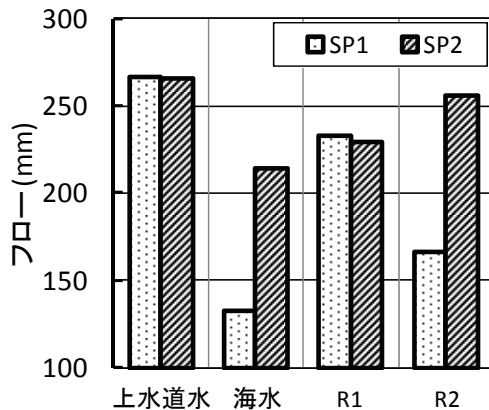


図-19 練混ぜ水の種類による流動性との関係

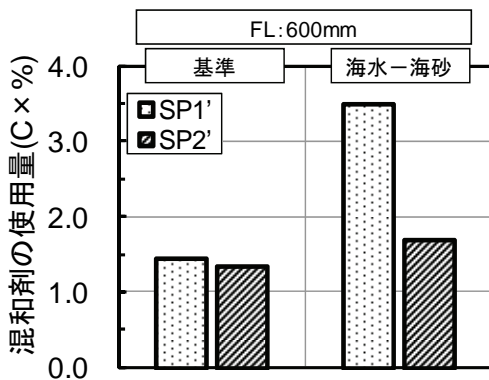


図-20 練混ぜ水の種類による流動性との関係

使用した場合の単位水量は、基準や海水-陸砂を使用した場合より 14kg/m^3 程度増大した。これは海砂の粗粒率が陸砂と比べて小さいことによるものと推察された。混和剤の使用量とスランプの関係を図-17、図-18 に示す。Nを用いたケースにおいて、上水道水を使用した場合、SP1は $C \times 0.8\%$ の使用量でスランプ 20.0cm であったのに対し、海水を使用し同一の使用量とした場合においては 10cm 以上スランプが低下した。さらに、使用量を $C \times 1.6\%$ にした場合でも、スランプは 18.5cm であった。また、BBを用いたケースでは、総じてスランプはNを用いたケースより大きくなったが、海水の影響はNを用いたケースと同様の傾向であった。

(3) 海水の成分が混和剤の分散性に及ぼす影響

ポリカルボン酸系混和剤の分散性は、液相中の無機イオンの影響を受けやすいことが知られている¹⁸⁾。そこで、海水に由来する硫酸イオン (SO_4^{2-}) や塩化物イオン (Cl^-) がポリカルボン酸系混和剤の分散性に及ぼす影響を検討するとともに、海水を用いた場合でも分散性が低下しにくい混和剤について検討を行った。配合は $W/C=30.0\%$ のセメントペーストとし、セメントには高炉セメントB種 (BB)、練混ぜ水には上水道水および海水、 SO_4^{2-} と Cl^- を海水と同濃度に調製した溶液 (R1, R2) をそれぞれ用いた。混和剤は、SP1 および海水の影響を受けにくい化学構造を有するものとして新たに検討した SP2²³⁾ を用いた。混和剤使用量は、何れも $C \times 0.5\%$ とし、 $\phi 50 \times 50\text{mm}$ の塩ビ管に充填しフローにより流動性を評価した。

練混ぜ水の種類による流動性との関係を図-19 に示す。上水道水を使用した場合は、SP1 および SP2 の流動性は同等であったのに対し、海水を使用した場合は、いずれの SP も流動性が低下し、SP1 は SP2 よりさらに低下することが認められた。R1 を使用した場合は、いずれの SP も流動性の低下は同程度であり、 SO_4^{2-} の影響度合いに相違は認められなかった。一方、R2 を使用した場合は、SP1 の流動性は大きく低下したが、SP2 の低下は小さかった。本研究では、 SO_4^{2-} が分散性に及ぼす影響は認められるものの、 Cl^- の方がより大きく影響を及ぼす可能性が示唆されたことから、海水・海砂を使用する場合には Cl^- の影響が小さい SP2 の使用が有効であると判断した。

(4) 自己充填型コンクリート用混和剤の分散性の評価

SP1 と SP2 をそれぞれベースとして増粘剤²⁴⁾を一液混合した自己充填型コンクリート用高性能 AE 減水剤 (増粘剤一液タイプ) (SP1', SP2'²³⁾) を用いて、海水-海砂を組み合わせた条件下での高流動コンクリートの分散性を評価した。評価は表-5 に示す配合を用いて、スランプフロー $600\text{mm} \pm 50\text{mm}$ が得られる混和剤の使用量を上水道水-陸砂 (基準) の条件と比較した。各配合条件の混

和剤使用量を図-20 に示す。SP1'の目標スランプフローを得る使用量は、基準の配合と海水-海砂の配合を比較して約 2.2 倍増加したのに対し、SP2'の使用量はわずか 1.2 倍程度であった。SP2' は基準および海水-海砂の配合において使用量は大きく変動せずに優れた流動性を確保できることが認められた。

4. 自己充填型コンクリートの諸性状

3.において、海水と併用した場合でもコンクリートの流動性低下が少ない新規混和剤について述べた。本章ではこの新規混和剤を用いたコンクリートの基本的性状（フレッシュ性状、力学特性、乾燥収縮特性および熱特性）について実験的検討を行った^{22),25)}。

(1) 配合および使用材料

コンクリートの配合を表-6 に示す。配合は練混ぜ水に上水道水 (W1) , 細骨材に陸砂 (S1) を使用した基本配合 (基準) に加え、練混ぜ水に海水 (W2) , 細骨材に未洗浄の海砂 (S2) を使用した配合 (海水-海砂) と、練混ぜ水に海水、細骨材に陸砂を使用した配合 (海水-陸砂) の3水準とし、それぞれ標準温度 (20°C) と高温 (35°C) の環境条件下で試験を行った。コンクリートの水セメント比は 45% , 単位粗骨材絶対容積は 0.330m³/m³で一定とし、スランプフローが 600±50mm の範囲になるよう、単位水量および混和剤の添加率を調整した。また、35°Cの高温環境の場合、全ての配合で時間経過に伴い流動性が急激に低下したため、一部の配合 (SW-SS) では、既存のポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とした流動性保持剤²⁶⁾を併用し、流動性の経時保持性の改善効果について検討を行った。各配合の塩

表-5 高流動コンクリートの配合

記号	材料の種類			目標スランプフロー (mm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位粗骨材絶対容積 (m ³ /m ³)	単位水量 (kg/m ³)
	セメント	水	細骨材						
基準	BB	上水道水 (W1)	陸砂 (S1)	600±50	4.5±1.5	45.0	49.7	0.330	175
海水-海砂	BB	海水 (W2)	海砂 (S2)				48.4	0.330	185

表-6 コンクリートの配合

記号	目標スランプフロー (mm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位粗骨材絶対容積 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)						混和剤		環境温度 (°C)	塩化物イオン量 (kg/m ³)
						W1	W2	C	S1	S2	G	Ad1 (C×%)	Ad2 (C×%)		
基準	600	4.5	45	49.7	0.330	175	—	389	848	—	878	1.45	—	20	0.05
海水-海砂				48.4		—	185	411	—	825	878	1.75	—	20	
海水-陸砂				49.7		—	175	389	848	—	878	1.65	—	20	
												1.00*	35	4.90	
												—	35	3.20	

※スランプフロー試験, U形充填試験のみ

化物イオン量 (理論値) は、表中に併記したとおりである。コンクリートの使用材料を表-7 に示す。海砂は除塩処理を施していない状態のものを使用しており、塩化物イオン量は質量比で 0.187%であった。

(2) 試験項目および方法

コンクリートの試験項目の一覧を表-8 に示す。スランプフローは、練混ぜ完了後に試験を行った後、試料を静置した状態で、最長 90 分まで 500mm 到達時間 (T₅₀₀) および停止時間 (T_{stop}) の経時変化を確認した。また、硬化性状 (圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数) を確認する供試体は、材齢 1 日まで練混ぜ時と同じ温度環境下で封かん養生を行った後に脱型し、その後も同じ温度の水中において所定の材齢まで養生を行った。

乾燥収縮用の試験体は、材齢 1 日まで 20°Cの環境下で

表-7 使用材料

材料名	記号	種類	物理的・化学的性質
練混ぜ水	W1	上水道水	
	W2	海水 (相模湾、茅ヶ崎海岸)	表-4参照
セメント	C	高炉セメントB種	密度3.04g/cm ³
細骨材	S1	陸砂 (大井川水系)	表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率1.86%, 粗粒率2.66
	S2	海砂 (東村新川沖産、除塩前)	表乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率2.00%, 粗粒率2.37, 塩化物イオン量0.187%
粗骨材	G	硬質砂岩砕石 (青梅産)	表乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率0.58%, 最大寸法20mm
混和剤	Ad1	塩分含有用増粘剤-液型高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物の複合体
	Ad2	流動性保持剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物

表-8 試験項目および方法

試験項目	試験方法	試験条件等
スランプフロー・時間	JIS A 1150	測定時期:練混ぜ完了後0, 30, 60, 90分 フロー時間:500mmフロー到達時, フロー停止時
充填高さ・時間	JSCE-F511	流動障害:R2 充填時間:充填停止時
ブリーディング	JIS A 1123	
加圧ブリーディング	JSCE-F502	
凝結時間	JIS A 1147	
圧縮強度	JIS A 1108	養生条件: 標準水中養生 試験材齢: 1, 3, 7, 28, 91日
割裂引張強度	JIS A 1113	養生条件: 同上
静弾性係数	JIS A 1149	試験材齢: 7, 28, 91日
長さ・質量変化率	JIS A 1129	基長・乾燥開始材齢: 7日 養生条件: 標準水中養生 (材齢1~7日)
乾燥収縮ひずみ (拘束)	JIS A 1151	試験体数: 3体/配合
断熱温度上昇量		断熱熱量計による 試験体容量: 5L/配合 測定期間: 材齢0~21日
熱膨張係数		埋込み型ひずみ計による 試験体寸法: φ100×200mm 雰囲気温度: 20~60°C (最大4サイクル)

封かん養生を行った後に脱型し、標準水中養生を行った。乾燥収縮用の試験体は材齢7日に基長を測定し、ダイヤルゲージ法により長さ変化率を測定した。ひび割れ抵抗性を確認するための拘束供試体は型枠を脱型する材齢7日まで上面の湿布養生を行い、脱型後、拘束形鋼に設置したワイヤストレインゲージにより、コンクリートに生じるひずみを計測した。

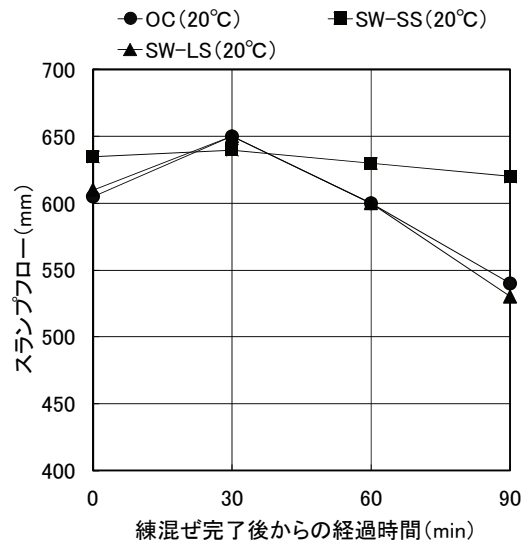
断熱温度上昇量については、約5Lの試料をセットした断熱容器の周囲の空気を加熱追従する断熱熱量計を使用して測定した。コンクリートの混練直後に試料を断熱容器にセットし、ただちに測定を開始し、温度上昇が認められなくなる材齢21日まで測定を行った。

熱膨張係数については、コンクリートをφ100×200mmの型枠に打ち込み、中心部に埋込み型ひずみ計を設置して測定した。コンクリートの打込み後、ただちに周囲の気温を20℃から60℃まで変化させることで、試料に温度上昇降下サイクルを最大4サイクルまで与えた。上昇・降下は各々1.5日をかけ、60℃または20℃に達する毎に1.0日の恒温期間を設けた。

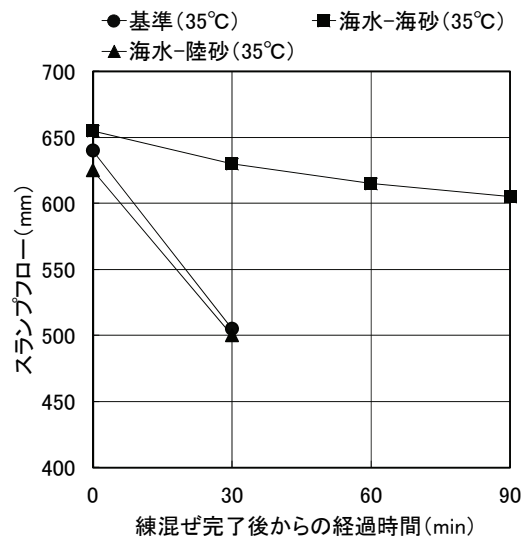
(3) フレッシュコンクリートの性状

a) 流動性

練混ぜ完了後からの経過時間とスランプフローの関係を図-21に示す。20℃と35℃の何れの環境においても、全ての配合で練混ぜ完了後のスランプフローが600mm以上となり、優れた流動性を有することが認められた。20℃の環境においては、その後海水と海砂を使用した配合(海水-海砂)で90分、上水道水-陸砂(基準)と海水と陸砂を使用した配合(海水-陸砂)で60分程度まではスランプフローの目標値(600±50mm)を維持することができた。海水と海砂を使用した配合(海水-海砂)が、時間の経過に伴うスランプフローの低下が他の配合に比べて小さいのは、本研究で使用した海砂の粗粒率が小さく、他の配合に比べて単位水量や単位セメント量を多くする必要があり、結果的に単位容積当りの混和剤の添加量が最も多くなったことが要因と考えられる。一方、35℃の高温環境においては、練混ぜ完了後30分でスランプフローが大きく低下する傾向を示したが、流動性保持剤を添加した海水と海砂を使用した配合(海水-海砂)は90分間目標値を満足しており、高温環境下においても、流動性保持剤を併用することでコンクリートの流動性を長時間にわたって維持できることが明らかとなった。練混ぜ完了後の500mmフロー到達時間と停止時間を図-22に示す。本研究で検討した配合については、20℃と35℃の何れの環境においても結果にほとんど差はみられず、500mmフロー到達時間は3~5秒程度、フロー停止時間は30~40秒程度であった。これらの結果を図に併記した従来の増粘剤系高流動コンクリート(既往の実験結果⁷⁾)



(a) 環境温度：20℃



(b) 環境温度：35℃

図-21 経過時間とスランプフローの関係

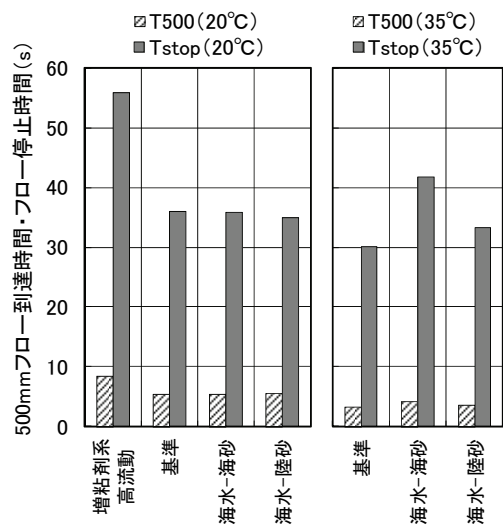


図-22 スランプフロー時間

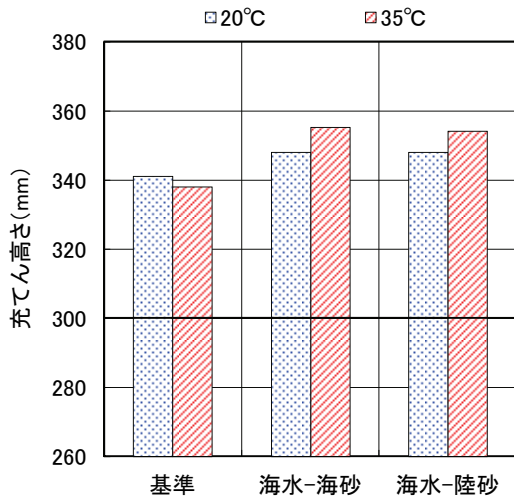


図-23 充填高さ

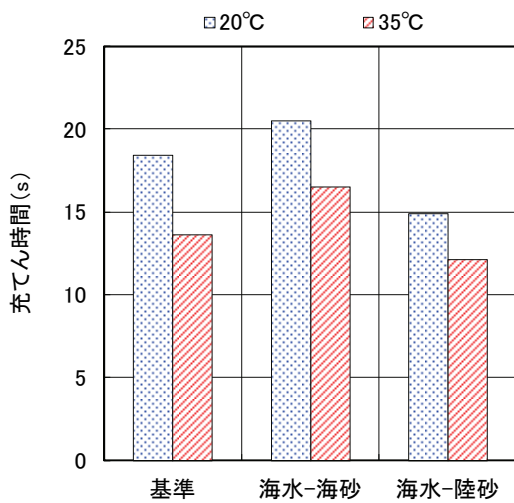


図-24 充填時間

と比較すると、500mm フロー到達時間、フロー停止時間はともに早まり、特にフロー停止時間については20秒程度短縮した。コンクリートの流動時間の短縮は、打込みに要する時間の削減に繋がるため、施工効率の向上の観点からは有利であるといえる。

b) 自己充填性

U形充填試験における、充填高さおよび充填時間を図-23、図-24に示す。海水や海砂を用いた配合を含む全ての配合で充填高さは300mm以上の値を示し、高流動コンクリートの配合設計・施工指針(土木学会)²⁷⁾のランク2相当の自己充填性を有することが認められた。また、35°Cの環境の場合、20°Cの環境に比べて充填時間が短く、海水-海砂および海水-陸砂では充填高さが大きくなっているが、これは図-22に示すように、環境温度の上昇に伴いコンクリートの粘性(500mmフロー到達時間)が小さくなったためと推察される。

c) 材料分離抵抗性

本研究で検討した全ての配合で、35°Cの環境においてはブリーディングが確認されなかったが、20°Cの環境に

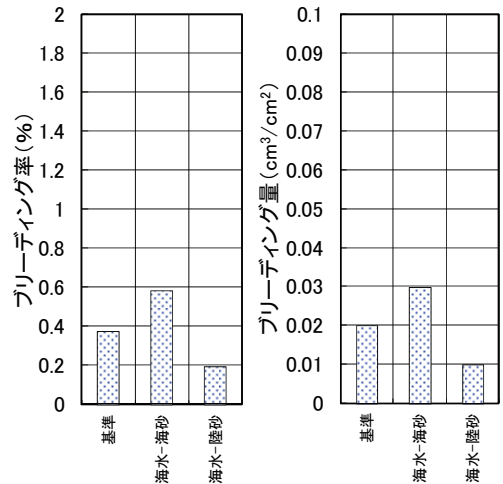


図-25 ブリーディング率・ブリーディング量 (20°C)

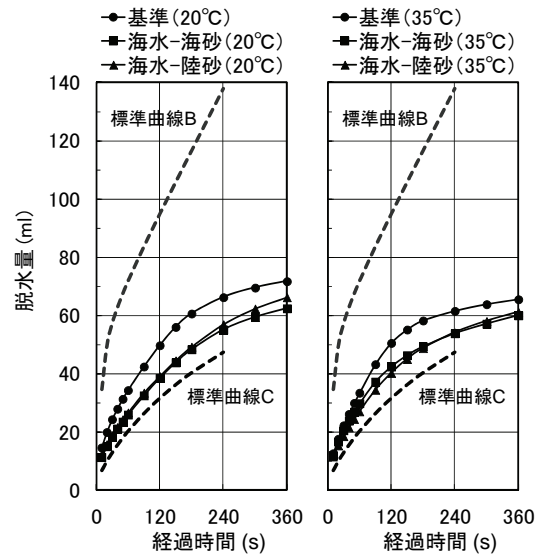


図-26 経過時間と脱水量の関係

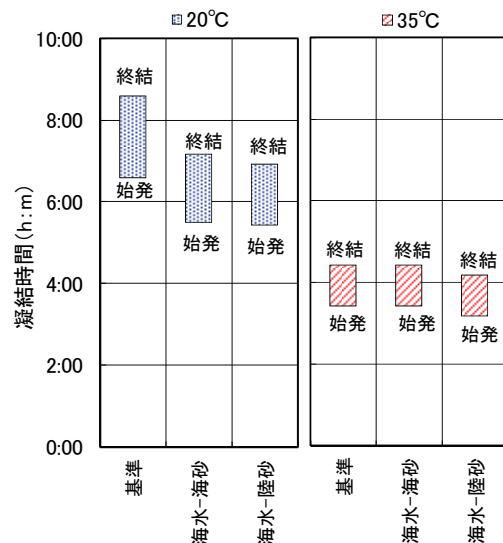


図-27 凝結時間

においては若干認められた。20°Cの環境におけるブリーディング率およびブリーディング量を図-25 に示す。最もブリーディングが多かったのは海水と海砂を使用した配合(海水-海砂)であり、ブリーディング率は0.6%程度、ブリーディング量は $0.03\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度であった。この配合が他の配合に比べてブリーディングが多くなっているのは、単位水量の多いことが要因であると考えられる。

加圧ブリーディング試験における加圧後の経過時間と脱水量の関係を図-26 に示す。20°Cと35°Cの何れの環境においても海水や海砂を使用した配合(海水-海砂、海水-陸砂)は、上水道水-陸砂(基準)に比べて若干単位時間あたりの脱水量が少なくなる傾向を示しているが、ともにコンクリートのポンプ施工指針(土木学会)²⁸⁾の標準曲線BとCの間に入ることから、ポンパビリティは

良好であると判断できる。

従来の自己充填性を有する高流動コンクリートは非常に粘性が大きく、一般的にブリーディングが非常に少ない。そのため、ポンプ圧送時の負荷が増加すること、上面の仕上げ作業が困難になることが課題であったが、本研究における自己充填型コンクリートについては、ポンプ圧送や仕上げ作業が容易となり、施工効率の向上が期待できる。

d) 凝結特性

凝結時間を図-27 に示す。35°Cの環境の場合は、配合の違いによる凝結時間の差異はほとんど認められなかったが、20°Cの環境の場合、海水や海砂を使用した配合(海水-海砂、海水-陸砂)は、上水道水-陸砂(基準)に比べて凝結時間が早まり、始発時間で1時間程度、終結

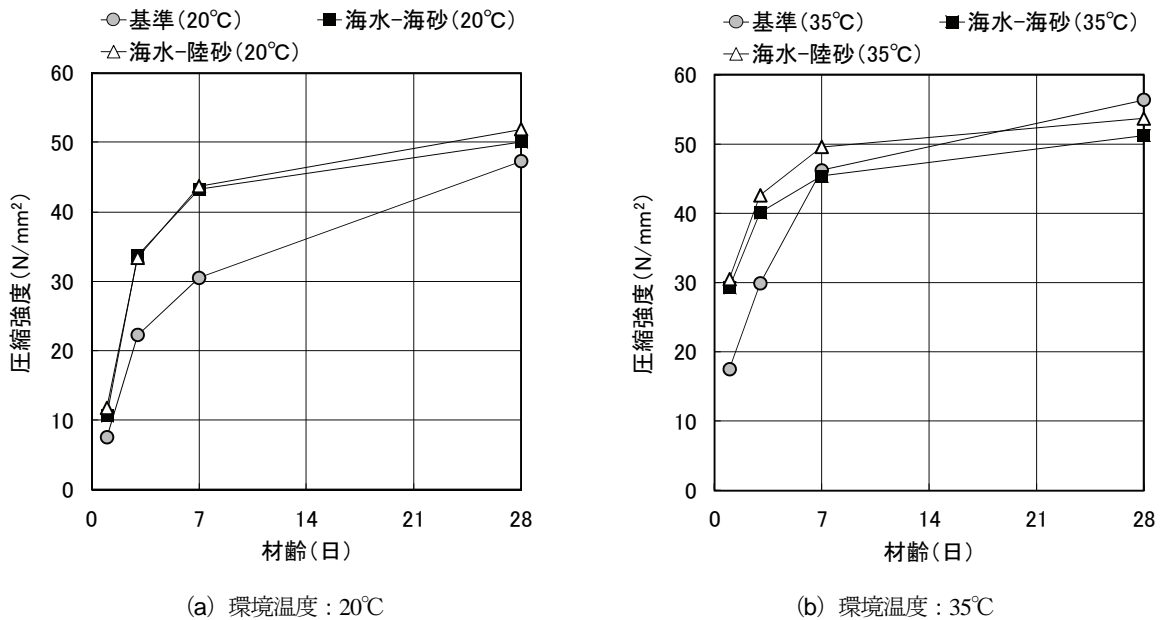


図-28 材齢と圧縮強度の関係

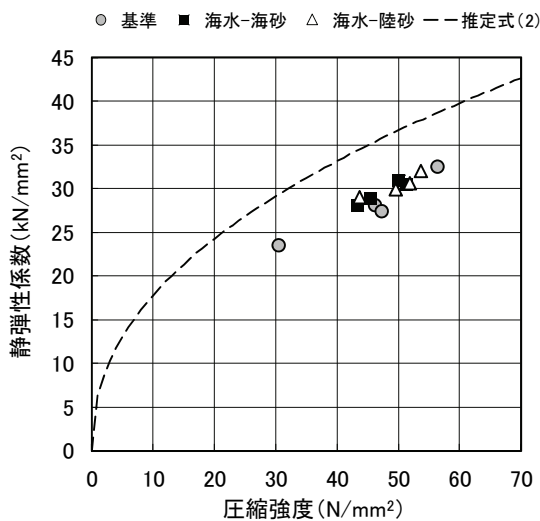


図-29 圧縮強度と静弾性係数の関係

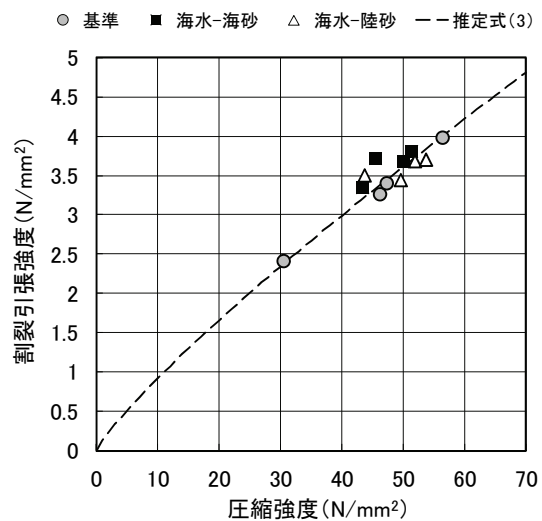


図-30 圧縮強度と割裂引張強度の関係

時間で 1.5 時間程度短縮した。2.においては、普通ポルトランドセメントを用いた系において、海水中の NaCl によって C₃S の初期水和反応が促進される傾向が認められたが、高炉セメント B 種を用いた系においても C₃S の反応が促進され、凝結時間が早まったものと推察される。また、これは、既往の研究¹⁾の傾向と一致した。施工に必要な流動性を確保した上での凝結時間の短縮は、早期脱型などの観点から施工上有利と考えられる。

(4) 硬化コンクリートの性状

a) 強度発現性

材齢と圧縮強度の関係を図-28 に示す。環境温度によって強度発現性は異なるが、海水や海砂を使用した配合(海水-海砂, 海水-陸砂)は上水道水-陸砂(基準)に比べて初期材齢における圧縮強度が大きくなった。両者の圧縮強度の乖離は、20℃の環境の場合は材齢 7 日、35℃の環境の場合は材齢 1 日で最も大きくなり、海水や海砂を使用することで、上水道水-陸砂(基準)の圧縮強度に比べてそれぞれ 4 割あるいは 7 割程度増加する傾向がみられた。なお、いずれの温度の場合も、材齢の経過に伴い圧縮強度の差異は小さくなり、材齢 7~28 日ではほぼ同程度の値を示した。普通ポルトランドセメントを用いた 2. では、海水中の NaCl によってセメントの水和反応が促進され、組織が緻密化されることでセメント硬化体の圧縮強度が増進することが明らかとなった。斎藤らの研究⁸⁾によると、海水を用いた条件で高炉スラグ微粉末を混和した場合、高炉セメント B 種程度の置換率では、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、概ね普通ポルトランドセメントのみを用いた場合と同様の傾向を示すことが報告されている。したがって、図-28 の高炉セメント B 種を用いた系においても、NaCl による水和反応促進および組織の緻密化により初期強度が増進しているものと推察される。

b) 静弾性係数の特性

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-29 に示す。図中に併記した推定式は、圧縮強度の試験結果から、既往の文献 29) に示されている式(2)を用いて算定した。

$$E_e = \alpha \cdot f'_c{}^\beta / 10^3 \quad (2)$$

ここに、

- E_e : 静弾性係数 (kN/mm²)
- f'_c : 圧縮強度 (試験値) (N/mm²)
- α : 6,300, β : 0.45

海水や海砂を使用した配合(海水-海砂, 海水-陸砂)と上水道水-陸砂(基準)に差異はみられず、塩化物イオンの有無による影響は認められなかった。また、本研究における試験結果は、文献 29) の係数を用いた推定式

よりやや小さい値を示した。

c) 割裂引張強度の特性

圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-30 に示す。図中に併記した推定式は、静弾性係数と同様に既往の文献 29) に示されている式(3)を用いて算定した。

$$f_t = \alpha \cdot f'_c{}^\beta \quad (3)$$

ここに、

- f_t : 引張強度 (N/mm²)
- f'_c : 圧縮強度 (試験値) (N/mm²)
- α : 0.13, β : 0.85

圧縮強度と割裂引張強度の関係についても塩化物イオンの有無による影響は認められず、文献 29) の係数を用いた推定式に近似する傾向を示した。

(5) 乾燥収縮特性

a) 乾燥収縮ひずみ

長さ変化率の経時変化を図-31 に、質量変化率と長さ変

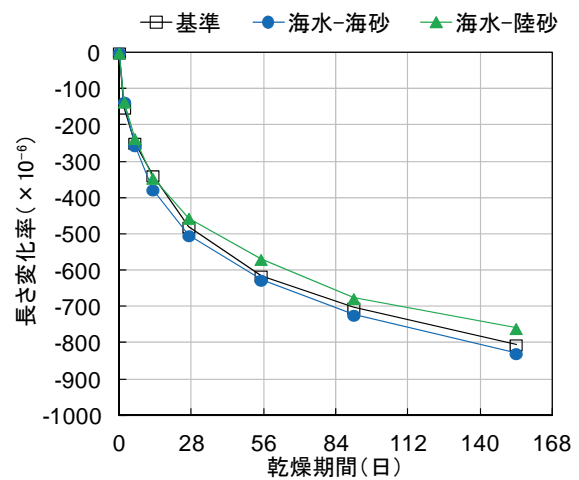


図-31 乾燥期間と長さ変化率の関係

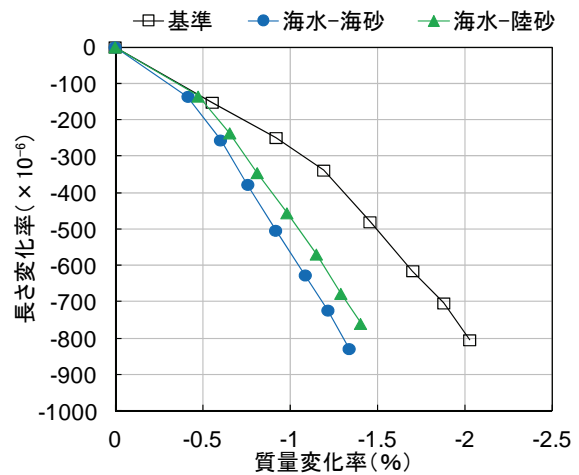


図-32 質量変化率と長さ変化率の関係

化率の関係を図-32に示す.

コンクリートの長さ変化率は、配合の違いによる差異がほとんどみられなかったのに対し、質量変化率は塩分を混入しない配合（基準）に比べ、海水や海砂を使用した配合（海水-海砂、海水-陸砂）のほうが小さくなった。これは塩分の混入に伴ってコンクリートの硬化が促進され、乾燥開始までの間に水和生成物の組織が概ね形成されたために、コンクリート中に含まれる自由水の移動速度が抑制されたことなどが挙げられる。なお、海水や海砂を使用した配合において同一質量変化率に対しての長さ変化率が基準配合よりも大きいのは、2.で明らかになったように、海水の主成分であるNaClによって、セメントの水和反応が促進され、細孔組織が緻密化したことが要因と考えられる³⁰。特に海水-海砂の長さ変化率は混入する塩分が多いために、海水-陸砂のものよりもやや大きめであった。

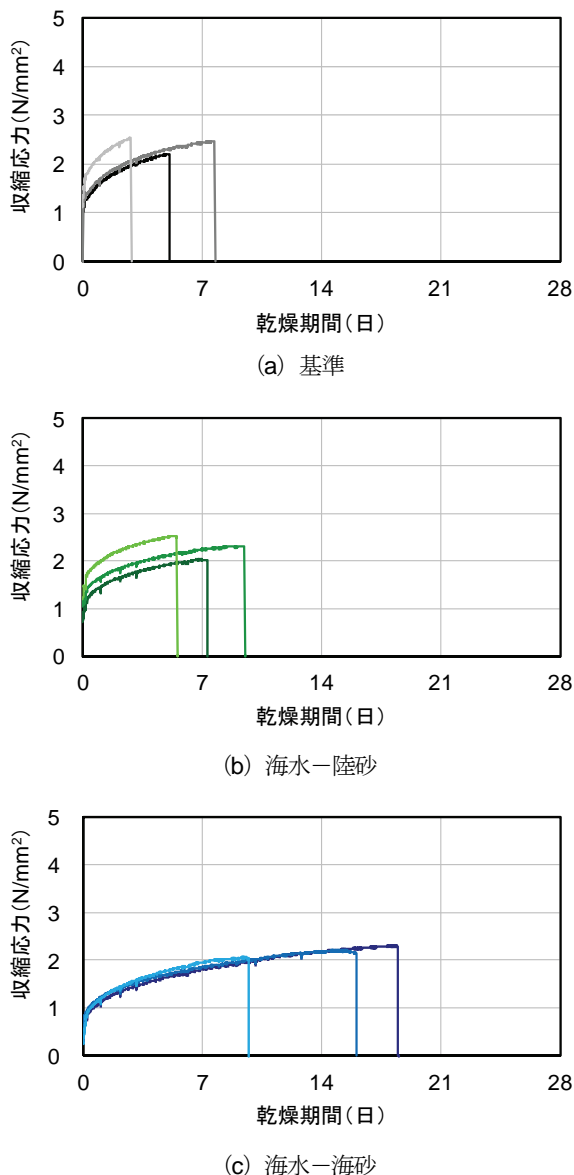


図-33 乾燥期間と収縮応力の関係

b) ひび割れ抵抗性

拘束を受けたコンクリートの乾燥に伴う収縮応力の経時変化を図-33に示す。なお、図中の収縮応力は、ワイヤストレインゲージにより計測した拘束形鋼のひずみから、コンクリートと形鋼にはたらく力のつりあい関係をもとに算定した値である。何れの配合も乾燥開始とともに収縮応力が増加する傾向を示し、それぞれ3体の試験体で若干のばらつきが認められるが、コンクリートには概ね2~2.5N/mm²の収縮応力が作用したあたりでひび割れが発生した（収縮応力が解放されて0N/mm²となった時点）。また、ひび割れは、基準、海水-陸砂、海水-海砂の順に、すなわち海水や海砂を使用した配合のほうが遅くひび割れが発生しており、それぞれ乾燥開始から5, 7, 14日経過した時点で発生した。コンクリートに作用した収縮応力がほぼ同等程度であったにもかかわらず海水や海砂を使用した配合のひび割れが遅く発生しているのは、図-30で述べた初期材齢（材齢14日（乾燥開始7日）前後まで）における割裂引張強度の増加が影響したためであると考えられる。以上の結果より、コンクリートに海水や海砂を使用した場合、乾燥収縮における優位性は認められなかったものの、ひび割れ抵抗性は向上することがわかった。ここで、ひび割れが発生した時点における割裂引張強度に対する収縮応力の比を収縮応力強度比と称し、各配合の収縮応力強度比について比較する。なお、ひび割れが発生した時点の割裂引張強度は、材齢と圧縮強度の関係における材齢7日および28日の試験結果から得られる対数近似式を用いて算定した推定値である。コンクリートの材齢と収縮応力強度比の関係を図-34に示す。本研究で得られた試験結果では、コンクリートにひび割れが生じた時点の収縮応力強度比は0.5~0.8程度であり、併記した既往の知見³¹に比べ、塩分を混入しない配合（基準）の値がやや大きくなったが、海水や海砂を用いた配合は概ね合致する傾向を示した。

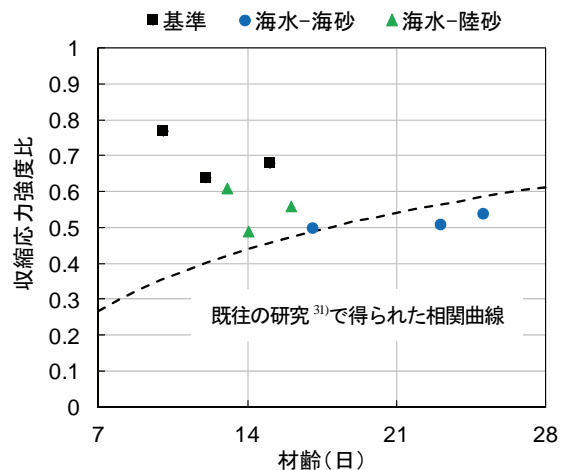


図-34 材齢と収縮応力強度比の関係

(6) コンクリートの熱特性

a) 断熱温度上昇量

材齢と断熱温度上昇量の関係を図-35 に、また断熱温度上昇量に関する回帰式のパラメータを表-9 に示す。断熱温度上昇量に関する回帰式は、コンクリート標準示方書【設計編】(2012 年版)³²⁾に示される式(4)を用いた。各配合の試験時の初期温度は実測値で 22±0.5℃の範囲内であった。同図内には高炉セメント B 種使用、単位セメント量 389kg/m³または 411kg/m³、打込み温度 22℃の場合における文献(24)による推定値を併記した。

$$Q(t) = Q_{\infty} \left(1 - e^{-\gamma(t-t_0)^s} \right) \quad (4)$$

ここに、

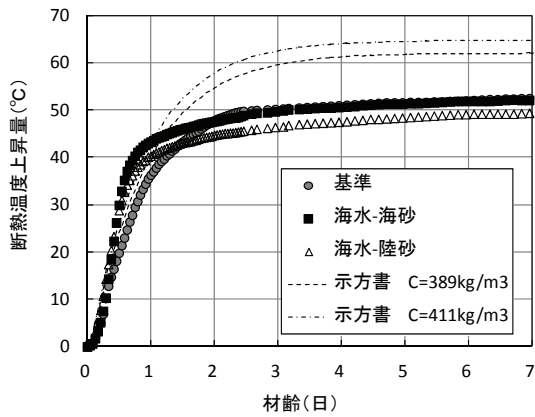


図-35 材齢と断熱温度上昇量の関係

表-9 断熱温度上昇量に関するパラメータ

記号	終局断熱	温度上昇速度		
	温度上昇量	に関するパラメータ		
	Q_{∞} (°C)	γ	s	t_0 (日)
基準	52.5	1.30	0.10	0.125
海水-海砂	52.4	1.70	0.60	0.170
海水-陸砂	50.2	1.55	0.55	0.042

$Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量 (°C)

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C)

γ, s : 温度上昇速度に関するパラメータ

t_0 : 温度上昇の原点 (日)

終局温度上昇量に関しては、全ての配合で 50℃前後であり、推定値よりも 10℃程度下回った。各配合間の差は最大でも 2.5℃であり、海水-陸砂の配合では若干低くなったものの、塩分の含有量による終局断熱温度上昇量の有意な傾向は認められなかった。

断熱温度上昇速度 (温度上昇時の勾配) に関しては、塩分の混入量が多いほど速くなる傾向が認められ、海水を用いることによってセメントの水和が促進される効果が確認された。

b) 熱膨張係数

各配合におけるコンクリート温度とひずみの関係を図-36 に、また図-36 の上昇・下降勾配から算出した熱膨張係数を図-37 に示す。なお、熱膨張係数の算出にあたっては、温度変化が不安定な期間の影響を除外するために、25℃から 55℃までの範囲を対象とした。1 サイクル目の温度上昇時から算出した値は、明らかにコンクリート自体

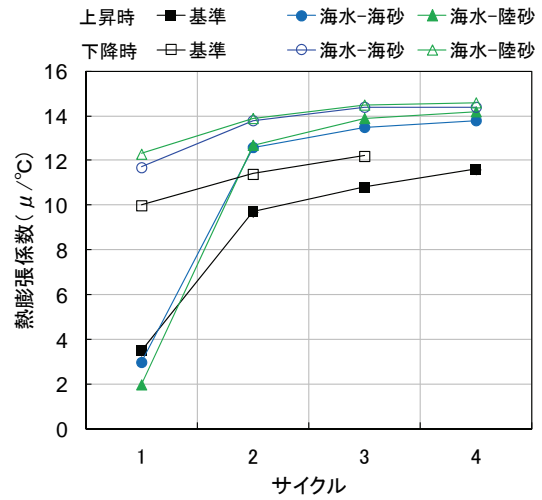
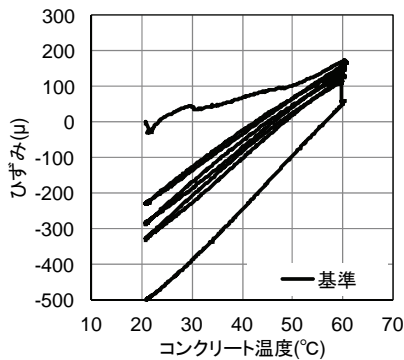
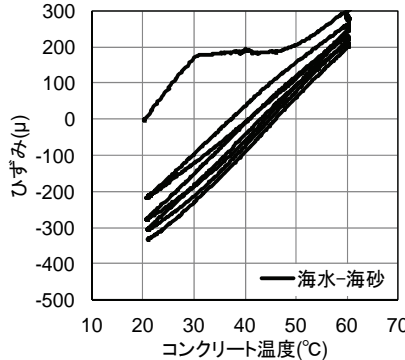


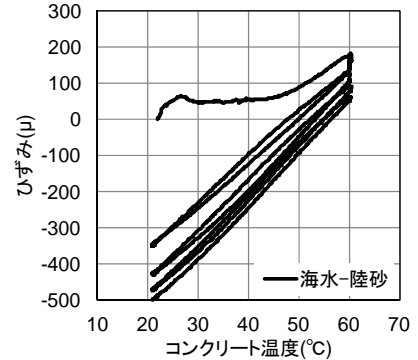
図-37 各サイクルにおける熱膨張係数



(a) 基準



(b) 海水-海砂



(c) 海水-陸砂

図-36 コンクリート温度とひずみの関係

が硬化しておらず、ひずみ計とコンクリートが一体化していない等の影響が含まれていると考えられる。それ以降については、いずれの配合においてもサイクルを重ねる毎に(材齢の経過に伴い)熱膨張係数は大きくなり、概ね2サイクル目(材齢6~9日程度)から値が収束する傾向を示した。塩分を混入しない配合(基準)は、コンクリート標準示方書やJCIひび割れ制御指針に示される値とほぼ同等の値であったものの、海水や海砂を使用した配合(海水-海砂, 海水-陸砂)はそれより大きく、4サイクル目には $14\mu/\text{C}$ という値であった。

今回、海水を用いた場合に熱膨張係数がやや大きくなる傾向であった。2.や図-28の圧縮強度の試験結果から、高炉セメントB種を用いた系においても海水中のNaClによってセメントの水和反応が促進され、組織が緻密化されるものと推察され⁸⁾、空隙が多くなっているとは考えにくい。詳細なメカニズムについては現時点では明らかでないが、ただ、一般的なコンクリートの熱膨張係数の値の範囲から大きく逸脱していないことから、実用上大きな問題はないものとする。

5. まとめ

海水成分がコンクリートの強度や流動性に与える影響を実験的検討により検証し、海水や海砂と併用した場合でもコンクリートの流動性低下が少ない化学構造を有するポリマーを主成分とする新規混和剤開発の検討を行った。また、この新規混和剤を用いたフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの諸特性を確認した結果、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 海水を練混ぜ水として用いた普通ポルトランドセメントによるセメント硬化体の初期強度増進効果は、海水の主成分であるNaClの影響が支配的であり、これによって C_3S の初期水和反応が促進されること、また海水を用いないものと比較して、形成された硬化体組織が緻密となる効果が認められた。
- (2) 化学混和剤を使用しない場合では、海水と同等のNaCl濃度では流動性は低下しないが、ポリカルボン酸系混和剤を使用した海水練りコンクリートでは、無機イオン(特に Cl^- イオン)の影響により流動性が低下する傾向が確認された。
- (3) 高炉セメントB種を用いた場合において、新たに開発した塩分含有増粘剤-液型高性能AE減水剤(新規混和剤)を用いることにより、 Cl^- イオンを多く含む海水や海砂を使用した場合でも、優れた流動性と自己充填性を得ることができる。
- (4) 新規混和剤を用いたコンクリートは、従来の高流動コンクリートに比べて粘性が小さく、適度な材料分離抵抗性を有するため、ポンパビリティが良好で、

打込み作業時の流動速度が速くなり、施工の効率化が期待できる。

- (5) 海水や海砂を用いた場合、上水道水や陸砂を用いた場合に比べて初期材齢(特に3~7日前後)での強度発現性が向上し、圧縮強度、割裂引張強度および曲げ強度が大きくなった。3ヶ月を経過するとこれらの諸量はほぼ同程度となった。
- (6) 圧縮強度と静弾性係数および割裂引張強度の関係では、塩化物イオンの含有に伴う影響は認められなかった。ただし、静弾性係数に関しては既往の推定式よりやや低めの値となった。
- (7) コンクリートの打込み温度が 20°C と 35°C とで各種性状に大きな差異は無く、高温においても所定の性能を保有していた。
- (8) 海水や海砂を使用したコンクリートの乾燥収縮は、上水道水や陸砂を用いたコンクリートと同等であるが、上水道水や陸砂を用いた場合に比べて初期材齢における強度発現性が向上するため、初期ひび割れに対する抵抗性向上が期待できる。
- (9) 海水や海砂を用いた場合、終局温度上昇量は上水道や陸砂を用いた場合と変わらないが、温度上昇速度は早くなった。また、熱膨張係数は上水道水や陸砂を用いた配合に比べて、若干大きくなる可能性がある。

以上の知見より、海水や海砂を使用した自己充填型コンクリートは、無筋コンクリートに適用する場合には各種性状を考慮して有効な活用が期待できるが、塩分を多量に含むことから、鉄筋コンクリートに適用する場合には、エポキシ樹脂塗装鉄筋やステンレス鉄筋を併用するなど耐久性への配慮が必須と考えており、今後の検討課題としたい。

謝辞: 本研究は早稲田大学、国立研究開発法人港湾空港技術研究所、五洋建設(株)、東亜建設工業(株)、東洋建設(株)およびBASFジャパン(株)により共同で実施したものである。研究開発に際し貴重なご意見をいただいた関係各位に対し、深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 柳場重正, 川村満紀, 山田祐定, 高桑二郎: 練り混ぜ水に海水を使用したコンクリートの諸性質について, 材料, Vol. 24, No. 260, pp. 425-431, 1975.5
- 2) 関博, 大即信明, 堀井義一: 海水練りコンクリートならびに残留ひび割れが鉄筋の腐食におよぼす影響について(5年結果報告), 港湾技研資料, No. 237, 1976.6
- 3) 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, 港湾技研資料, No. 378, 1981.6
- 4) 福手勤, 山本邦夫, 濱田秀則: 海水を練り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. 57-94, 1990.9
- 5) 公益社団法人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の有効利用に関する研究委員会報告書, 2014.9
 - 6) 鈴木哲郎, 清宮 理, 山路 徹, 竹中 寛, 酒井貴洋, 田中亮一:海水・海砂を用いた自己充填コンクリート用高性能 AE 減水剤(増粘剤一液タイプ)の開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 67, No. 5, pp. 1181-1182, 2012.9
 - 7) 馬場勇介, 菅俣 匠, 松倉隼人, 矢口 稔:新規な増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を使用した低粘性高流動コンクリートの基本特性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 66, No. 5, pp. 1143-1144, 2011.9
 - 8) 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, *Journal of the Society of Inorganic Materials Japan*, Vol. 21, pp. 231-241, 2014.
 - 9) ASTM D 1141 - 98 (2003) Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water
 - 10) 例えば 笠井順一:セメント化学概論(その4), コンクリート工学, Vol. 22, No. 2, pp. 50-55, 1984.2
 - 11) 笠井芳夫, 坂井悦郎編著:新セメント・コンクリート用混和材料, p.239, 技術書院, 2007.1
 - 12) 池部 緑:各種セメントの淡水, 海水練り比較試験, セメント・コンクリート, No. 146, pp. 16-22, 1959.4
 - 13) 明石外世樹, 山路文夫, 道清吉美, 日高邦彦:海水モルタルの性状に関する基礎的研究, セメント技術年報, Vol. 19, pp. 233-236, 1965.
 - 14) 竹田宣典, 石関嘉一, 青木 茂, 大即信明:海水を使用したコンクリートの強度および水密性の向上効果, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, 第 V 部門, pp. 581-582, 2011.9
 - 15) Ryshkewitch, E.: Compression strength of porous sintered alumina and zirconia, *Jour. of the Amer. Ceramic Society*, Vol. 36, No. 2, 1953.
 - 16) 青木 茂, 三浦律彦, 三浦 尚:高強度連壁コンクリートの非排水三軸加圧下における強度性状, 土木学会論文集, No. 571/V-36, pp. 105-117, 1997.8
 - 17) Copeland, L. E., Kantro, D. L. and Verbeck, G.: Chemistry of Hydration of Portland Cement, *Chemistry of Cement, Proceedings of the Fourth International Symposium*, Washington D. C., pp. 429-465, 1960.
 - 18) 松下哲郎, 平尾 宙, 丸山一平, 野口貴文:リートベルト解析によるセメントの水和反応の定量解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 73, No. 623, pp. 1-8, 2008.1
 - 19) 井上豪, 五十嵐心一:2, 3 の手法により求めたセメントの水和度の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 541-546, 2005.
 - 20) 例えばセメント協会, セメント硬化体研究委員会報告書, pp. 226-232, 2001.5
 - 21) 山田一夫, 羽原俊祐, 本間健一, 須藤俊吉:液相中の硫酸イオン濃度によるポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤の吸着挙動と分散能力の制御, セメント・コンクリート論文集, No. 53, pp. 128-133, 1999.
 - 22) 竹中 寛, 内藤英晴, 羽瀨貴士, 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, 2012.6
 - 23) コンストラクション リサーチ アンド テクノロジー ゲーエムペーハー(松倉隼人, 菅俣匠, 小泉信一, 矢口稔):流動化コンクリートの製造方法, 特開 2014-94846, 2014.5.22
 - 24) 五洋建設株式会社, 東亜建設工業株式会社, 東洋建設株式会社, コンストラクション リサーチ アンド テクノロジー ゲーエムペーハー(清宮 理, 佐野清史, 末岡英二, 内藤英晴, 酒井貴洋, 守分敦郎, 羽瀨貴士, 矢口 稔, 馬場勇介):高塩分含有セメント組成物用添加剤及び高塩分含有セメント組成物, 特開 2013-142051, 2013.7.22
 - 25) 竹中 寛, 酒井貴洋, 山路 徹, 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諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1501-1506, 2013.6
 - 26) Nilotpol Kar and KiatHuat Seow: Enduring concrete: reducing carbon footprints to pave way for concrete sustainability, *35th Conference on Our World in Concrete & Structures*, Singapore, 2010.8
 - 27) 土木学会:高流動コンクリートの配合設計・施工指針 [2012 年版], コンクリートライブラリー136, 2012.
 - 28) 土木学会:コンクリートのポンプ施工指針[2012 年版], コンクリートライブラリー135, 2012.
 - 29) 日本コンクリート工学会:マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 2008.
 - 30) 吉田 行, 尾形 寿, 村中智幸, 小倉 東, 佐竹比呂志:室内試験による混和材を用いた高耐久性コンクリートの工場製品への適用性評価, 寒地土木研究所月報, No. 680, pp. 12-20, 2010.1
 - 31) 大野俊夫, 魚本健人:乾燥収縮ひび割れ発生時の引張伸び能力に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 733-738, 1997.
 - 32) 土木学会:2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2012.

(2015. 7. 3 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON THE PRACTICAL APPLICATION OF SELF-COMPACTING CONCRETE USING SEAWATER AND UNWASHED SEA SAND

Takahiro SAKAI, Toru YAMAJI and Osamu KIYOMIYA

The influence of NaCl on initial strength enhancement effect of concrete using seawater as mixing water is dominant, which is the main component of seawater. The initial hydration of the C_3S is promoted by NaCl. Compared with the case of using tap water, it was confirmed that the formed tissue is denser. Previously, self-compacting concrete using sea water and unwashed sea sand for urgent restoration works as well as for construction work at isolated islands and other similar region where fresh water is not sufficient was developed. In this study, strength, drying shrinkage and thermal properties of concrete with sea water and unwashed sea sand are experimentally examined. It is found that initial strength development increased as compared with the control concrete made of tap water and land sand. Drying shrinkage strain and autogenous shrinkage strain of concrete were almost equal or higher than the control concrete, but the improvement of crack resistance was observed. Furthermore, in regard to the thermal properties, the rate of temperature rise due to the accelerated hydration reaction and the coefficient of thermal expansion was slightly larger. Considering these properties, the proposed concrete can possibly be used for un-reinforced concrete application.