

# 論文 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

竹中 寛<sup>\*1</sup>・酒井 貴洋<sup>\*2</sup>・山路 徹<sup>\*3</sup>・清宮 理<sup>\*4</sup>

**要旨:** 著者らは、海水や未洗浄の海砂を使用した自己充てん型コンクリートを開発し、これまでにフレッシュコンクリートや硬化コンクリートの基礎特性について報告した。本研究では、このコンクリートの基本的な力学特性、乾燥収縮特性および熱特性について実験的に検討を行った。その結果、海水や未洗浄の海砂を使用した自己充てん型コンクリートの乾燥収縮ひずみは、上水道水や陸砂を用いたコンクリートと同等程度であるが、ひび割れ抵抗性は向上することが認められた。一方、熱特性については、水和反応に伴う温度上昇速度が速くなること、熱膨張係数がやや大きくなることが明らかとなった。

**キーワード:** 海水, 海砂, 自己充てん型コンクリート, 乾燥収縮, 断熱温度上昇量, 熱膨張係数

## 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ったり、陸上および海上のアクセスが悪い地域も多く、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、今回の東日本大震災のように、陸・海路など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、自己充てん性の高い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。

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いる<sup>1)5)</sup>。しかしながら、自己充てん性を有する海水練りコンクリートについて検討された事例はほとんどみられない。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し<sup>6)</sup>、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考えられる。

そこで著者らは、海水や海砂を用いた場合でも分散性に及ぼす影響の小さい新たな混和剤、およびそれを用いた、従来の高流動コンクリートに比べて低粘性な特長を有する自己充てん型コンクリートを開発し、これまでフレッシュコンクリートや硬化コンクリートの基礎特性について検討を行ってきた<sup>7)</sup>。本稿では、このコンクリートの基本的な力学特性、乾燥収縮特性および熱特性について、新たな実験的検討から得られた知見を述べる。

## 2. 試験概要

### 2.1 コンクリートの配合および使用材料

コンクリートの配合を表-1に示す。配合は練混ぜ水に海水、細骨材に未洗浄の海砂を使用した配合(SW-SS)と、練混ぜ水に海水、細骨材に陸砂を使用した配合(SW-LS)に加え、比較用である練混ぜ水に上水道水、細骨材に陸砂を使用した配合(TW-LS)の3水準とし、それぞれ20°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0.330m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>で一定とし、スランプフローが650±50mmの範囲となるよう、単位水量および混和剤の添加率を調整した。塩化物イオン量(計算値)は、表中に併記したとおりである。なお、SW-SSの単位水量が他の配合のもの

表-1 コンクリートの配合

No.	記号	スランプフロー [平均] (mm)	空気量 [平均] (%)	U形充てん高さ (障害R2) (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位粗骨材絶対容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						混和剤 Ad <sup>*</sup> (C×%)	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )
								W1	W2	C	S1	S2	G		
1	SW-SS	650	5.0	348	45	48.4	0.330	—	185	411	—	812	878	1.45	4.80
2	SW-LS	645	4.5	348		49.7		—	175	389	848	—	878	1.65	3.13
3	TW-LS	650	4.5	341		49.4		175	—	389	842	—	872	1.45	0.05

※ 表中の値は代表値(試験毎に目標スランプフローとなるよう微調整)

\*1 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 博(工) (正会員)

\*2 五洋建設(株) 東北支店 工事主任 工修 (正会員)

\*3 (独) 港湾空港技術研究所 構造研究領域長 博(工) (正会員)

\*4 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 教授 工博 (正会員)

に比べて多くなっているが、これは、本研究で使用した海砂が未洗浄のものであるため、コンクリート中の塩化物イオン量が多くなったことや、粗粒率が陸砂に比べて小さいことなどが要因と推察される。

コンクリートの使用材料を表-2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、海水中には質量比で1.76%の塩化物イオンを含有していた。なお、海水の成分は表-3に示すとおりである。また、海砂は未洗浄のものを使用し、塩化物イオン量は質量比で0.187%であった。混和剤は、前章で述べた新規混和剤(増粘剤一液型高性能AE減水剤)を使用した。

## 2.2 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-4に示す。硬化コンクリートの特性を確認するための強度用試験体(圧縮強度、割裂引張強度、曲げ強度)および乾燥収縮用の試験体は、材齢1日まで20℃の環境下で封かん養生を行った後に脱型し、標準水中養生を行った。なお、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。また、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。試験体周囲の温度履歴を図-1に示す。

## 3. コンクリートの諸特性

### 3.1 硬化コンクリートの特性

#### (1) 圧縮強度

圧縮強度の材齢に伴う発現性を図-2に示す。海水や海砂を使用した配合(SW-SS, SW-LS)の強度は、材齢91日まで順調に発現することが認められた。また、この2配合の材齢1日における圧縮強度は10N/mm<sup>2</sup>程度と大きく、塩分を混入しない配合(TW-LS)に比べて材齢3, 7日の強度発現が大きい傾向を示した。このような特性は、コンクリート中に塩化ナトリウムが含有されること

表-2 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-3参照
セメント	C	高炉セメントB種	密度3.04g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	陸砂(大井川水系)	表乾密度2.60g/cm <sup>3</sup> , 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2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率2.42%, 粗粒率2.26, 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 <sup>3</sup> , 吸水率0.58%, 最大寸法20mm
混和剤	Ad	塩分含有用増粘剤一液型高性能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

表-3 海水の成分

密度 [20℃] (g/cm <sup>3</sup> )	pH [20℃]	固形分濃度 [105℃, 3hr] (%)			
1.024	8.2	3.96			
各種イオンの含有量(%)					
Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+</sup>	Mg <sup>+</sup>
1.76	0.34	1.08	0.04	0.04	0.12

表-4 試験項目一覧表

試験項目	試験方法	試験条件等
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 試験材齢: 7, 28, 91日
曲げ強度		
静弾性係数	JIS A 1149	
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℃(最大4サイクル)

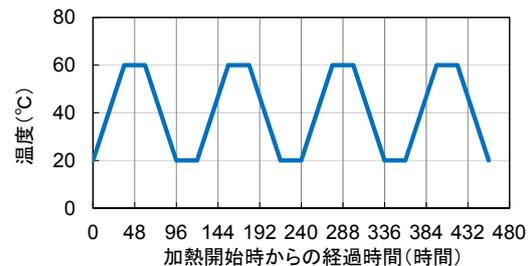


図-1 熱膨張係数測定試験での温度履歴

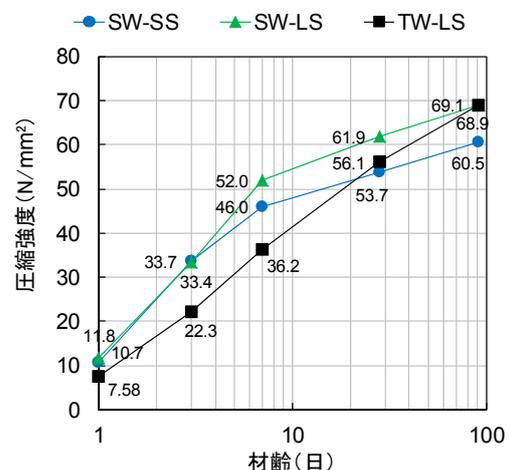


図-2 材齢と圧縮強度の関係

で硬化が促進されるとの既往知見<sup>1)</sup>とも合致する。

### (2) 割裂引張強度

割裂引張強度の材齢に伴う発現性を図-3に示す。圧縮強度と同様に、海水や海砂を使用した配合の初期材齢における強度発現が大きくなり、材齢7日におけるSW-SSやSW-LSの強度は、TW-LSのものに比べて2割以上増加する結果となった。

### (3) 曲げ強度

曲げ強度の材齢に伴う発現性を図-4に示す。SW-SSやSW-LSの曲げ強度は、何れの材齢においてもTW-LSより大きくなっており、圧縮強度や割裂引張強度に比べ、比較的長期の材齢まで強度に差異があることが認められたが、その要因は明らかでない。

### (4) 静弾性係数

材齢に伴う静弾性係数の変化を図-5に示す。前述した強度の傾向と同様、静弾性係数についても海水や海砂を使用した配合のほうが初期材齢における値が大きくなり、その後は材齢の経過に伴ってTW-LSと同等になった。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-6に示す。図中に併記した推定式(JSCE)は、圧縮強度の試験結果から、コンクリート標準示方書に示されている式(1)を用いて

算定した。

$$E_c = \alpha \cdot f'_c{}^\beta / 10^3 \quad (1)$$

ここに、 $E_c$  : 静弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>)

$f'_c$  : 圧縮強度 (試験値) (N/mm<sup>2</sup>)

$\alpha$  : 4,700     $\beta$  : 0.5

両者の関係に配合の違いによる差異はみられず、塩分の有無による影響は認められなかった。なお、本研究における静弾性係数は、JSCEの係数を用いた推定式で算定した値よりやや小さくなる傾向を示した。

## 3.2 コンクリートの乾燥収縮特性

### (1) 乾燥収縮ひずみ

長さ変化率の経時変化を図-7に、質量変化率と長さ変化率の関係を図-8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(TW-LS)に比べ、海水や海砂を使用した配合(SW-SS, SW-LS)のほうが小さくなった。SW-SSやSW-LSの質量変化率が小さい要因としては、塩分の混入に伴い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、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

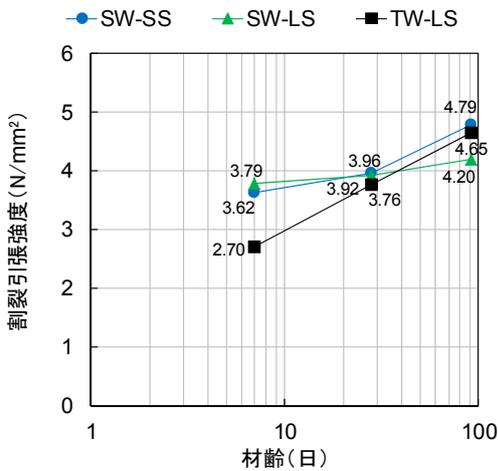


図-3 材齢と割裂引張強度の関係

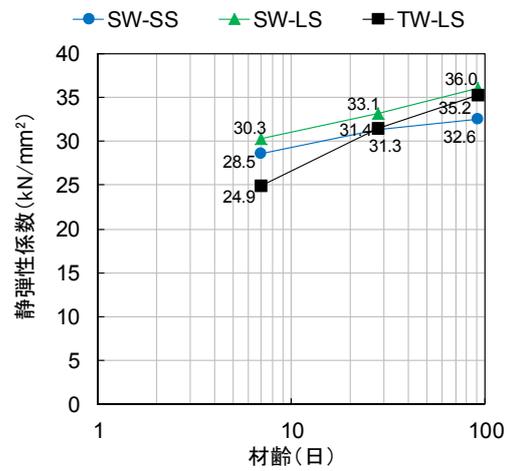


図-5 材齢と静弾性係数の関係

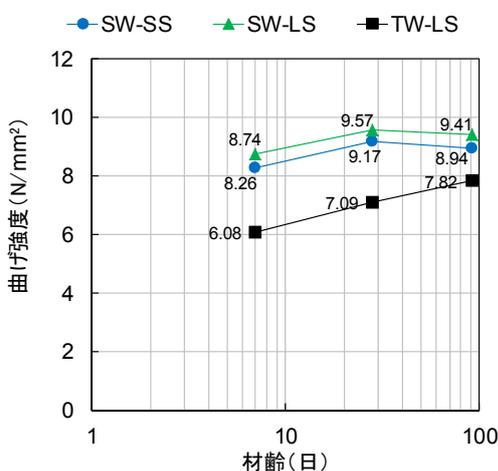


図-4 材齢と曲げ強度の関係

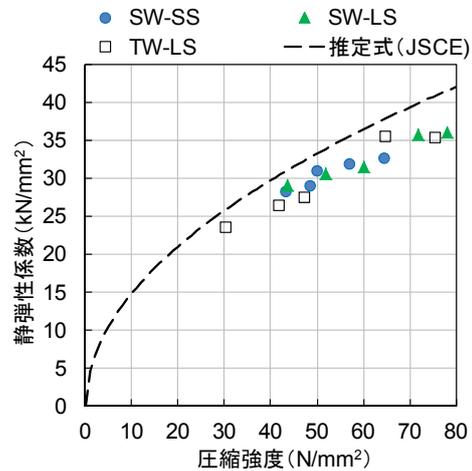


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

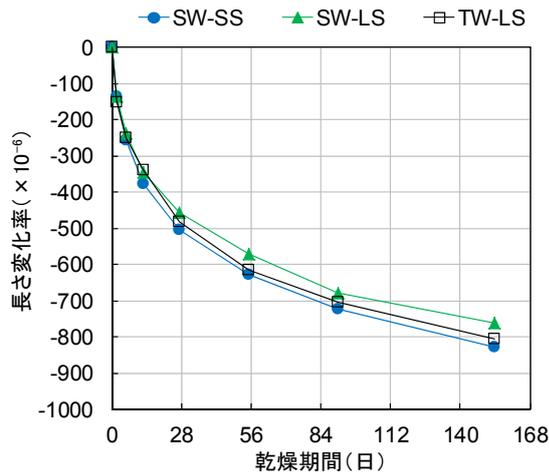


図-7 乾燥期間と長さ変化率の関係

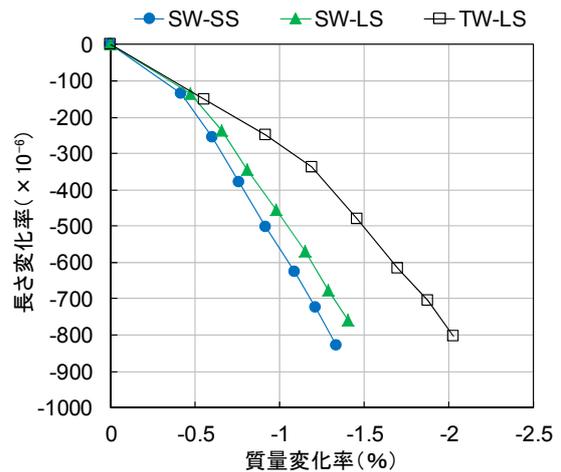


図-8 質量変化率と長さ変化率の関係

お、長さ変化率が質量変化率と同様の傾向を示さなかった要因は明確ではないが、海水や海砂を使用した配合の場合、組織の多孔化<sup>8)</sup>や自己収縮などが起因していることも考えられるため、今後の検討課題とする。

## (2) 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-9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はあるものの、コンクリートに概ね $2\sim 2.5\text{N/mm}^2$ の収縮応力が作用したあたりでひび割れが発生(収縮応力が解放されて $0\text{N/mm}^2$ となった時点)した。また、ひび割れは、TW-LS、SW-LS、SW-SS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発生しており、それぞれ乾燥開始から5、7、14日が経過した時点でひび割れが発生した。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-3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起因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、ひび割れへの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、図-2の材齢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

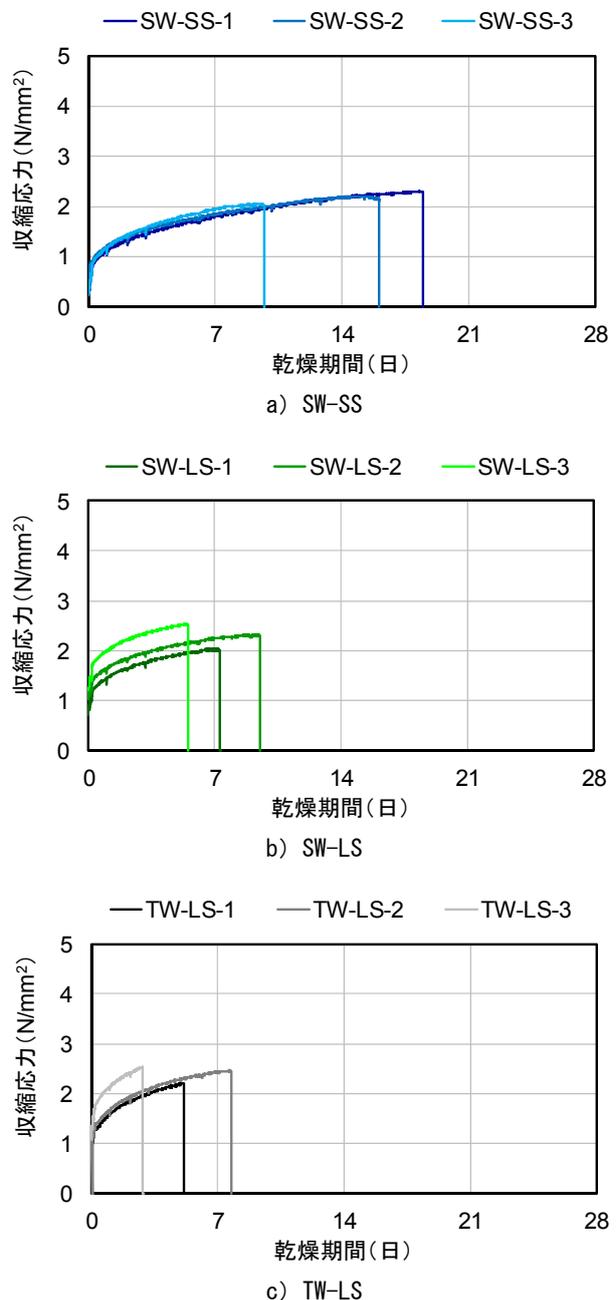


図-9 乾燥期間と収縮応力の関係

と収縮応力強度比の関係を図-10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<sup>9)</sup>に比べ、塩分を混入しない配合(TW-LS)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。

### 3.3 コンクリートの熱特性

#### (1) 断熱温度上昇量

各配合の試験時の初期温度は実測値で $22 \pm 0.5^\circ\text{C}$ の範囲内であった。高炉セメントB種使用、単位セメント量 $389\text{kg/m}^3$ または $411\text{kg/m}^3$ 、打込み温度 $22^\circ\text{C}$ のコンクリート標準示方書、およびJCIひび割れ制御指針による推定値を併記した、材齢と断熱温度上昇量の関係を図-11に示す。

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た。一方、終局温度上昇量に関しては、全ての配合で $50^\circ\text{C}$ 程度であり、推定値よりも $10^\circ\text{C}$ 程度下回った。各配合間の差は最大でも $2.5^\circ\text{C}$ であり、配合SW-LSで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。

#### (2) 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-12に示す。また、図-12の上昇・下降勾配から算出した熱膨張係数を表-5、図-13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、 $25^\circ\text{C}$ から $55^\circ\text{C}$ 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

(TW-LS)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(SW-SS, SW-LS)はそれより大きく、4サイクル目には $14\mu\text{C}$ という値となった。これは、海水や海砂を用いた場合、塩分が混入することによりコンクリートが多孔化する<sup>8)</sup>ことなどが一因と考えられるが、詳細なメカニズムについては、現時点では明らかでない。

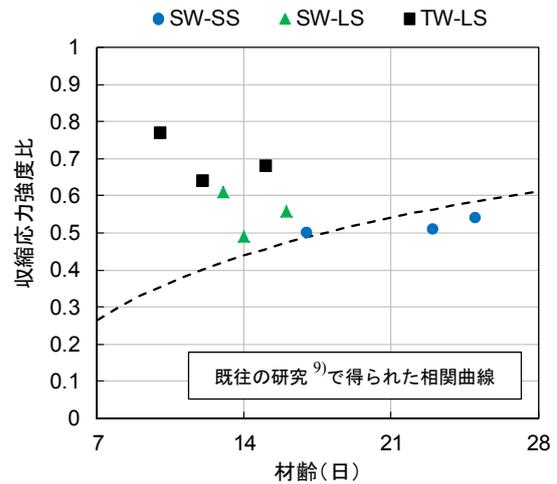


図-10 材齢と収縮応力強度比の関係

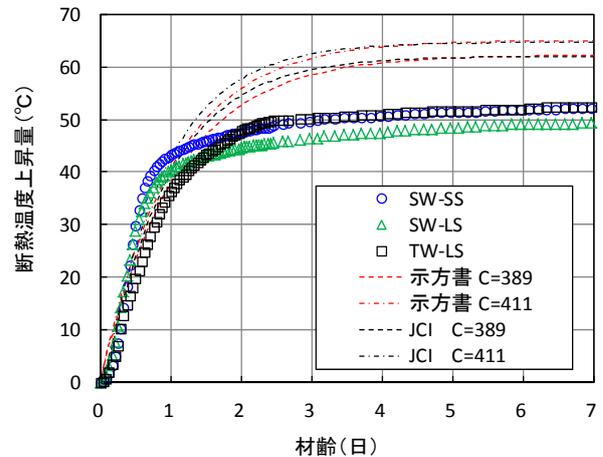


図-11 材齢と断熱温度上昇量の関係

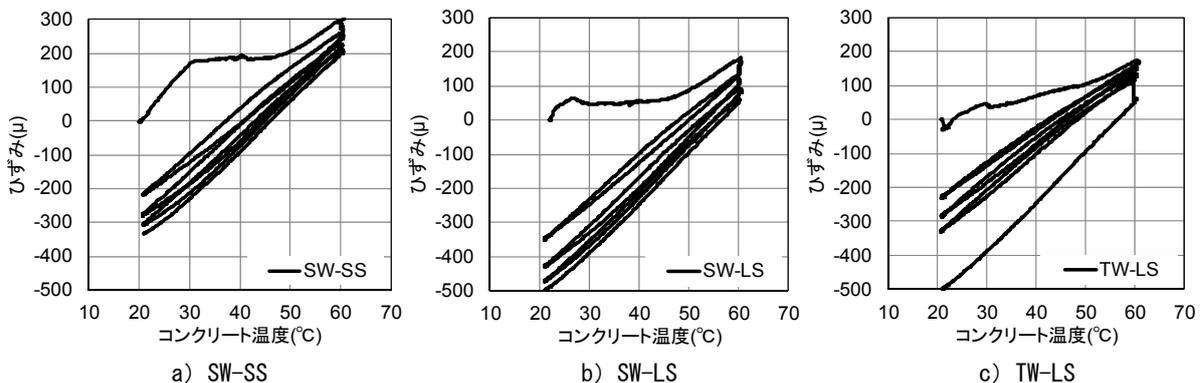


図-12 コンクリート温度とひずみの関係

表-5 熱膨張係数一覧表

サイクル数	SW-SS		SW-LS		TW-LS	
	上昇時	降下時	上昇時	降下時	上昇時	降下時
1	3.0	11.7	2.0	12.3	3.5	10.0
2	12.6	13.8	12.7	13.9	9.7	11.4
3	13.5	14.4	13.9	14.5	10.8	12.2
4	13.8	14.4	14.2	14.6	11.6	-

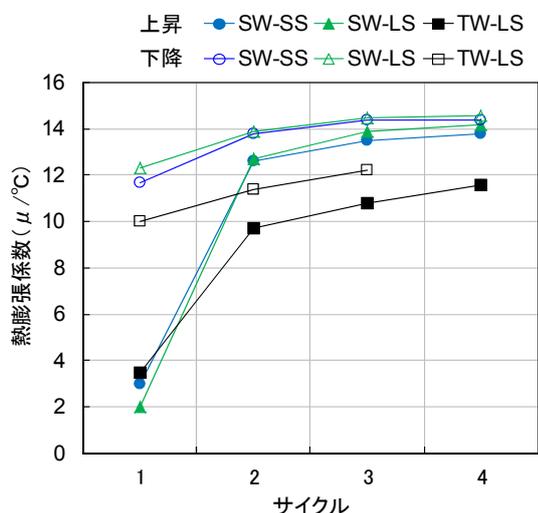


図-13 各サイクルにおける熱膨張係数

#### 4. まとめ

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について検討した結果、以下の事項が明らかとなった。

- (1) コンクリートに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。ただ、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。
- (2) 圧縮強度と静弾性係数および割裂引張強度の関係は、練混ぜ水や骨材の種類を問わず様な相関を示した。静弾性係数に関しては既往の土木学会の推定式よりやや低めの値となった。
- (3) 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った。
- (4) コンクリートに海水や海砂を用いることにより、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、初期ひび割れの発生が抑制された。
- (5) コンクリートに海水や海砂を用いた場合、終局温度上昇量は上水道水や陸砂を用いた場合とほぼ変わらないが、温度上昇速度は早くなった。
- (6) 海水や海砂を使用したコンクリートの熱膨張係数は、上水道水や陸砂を用いたコンクリートに比べて若干

大きくなった。

以上の得られた知見より、海水や海砂を使用した自己充てん型コンクリートは、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。しかし、塩分を多量に含むため、鉄筋コンクリートに適用する場合は、ステンレス鉄筋を併用するなど耐久性への配慮が必要と考えられ、今後の検討課題とする。

なお、本研究は、早稲田大学清宮研究室、(独) 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。

#### 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) 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, 混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム論文集, pp.133-138, 2011.12
- 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) 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
- 8) 水上国男: コンクリート構造物の耐久性シリーズ化学的腐食, 技報堂出版, p.43, 1986
- 9) 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