

# 論文 海水および珊瑚由来の石灰石骨材を用いた自己充填型コンクリートの諸特性

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

**要旨：**著者らは、海水、未洗浄の海砂および特殊混和剤を使用した自己充填型コンクリートを開発し、これまでその諸特性について報告してきた。本研究では、当該コンクリートを遠隔離島で活用することを想定し、現地で採取される珊瑚由来の石灰石骨材を用いたコンクリートの強度特性、収縮特性および熱特性について実験的検討を行った。その結果、珊瑚由来の石灰石骨材を用いたコンクリートは、普通骨材を用いた場合と同等程度の強度発現性を有し、海水の併用に伴う自己収縮の増加が抑制されること、乾燥収縮によるひび割れの発生するまでの期間が延びること、さらに熱膨張係数が小さくなることなどを明らかにした。

**キーワード：**珊瑚骨材、海水、自己収縮、乾燥収縮、断熱温度上昇量、熱膨張係数

## 1. はじめに

本土からのアクセスが悪い国内外の離島においては、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になることが想定される。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て締固め作業を省力化し、施工速度を向上することなどが求められる。

著者らは、上記の要求を満たすべく、従来の高流動コンクリートに比べて粘性の低い、海水と未洗浄の海砂を使用した自己充填型コンクリートを開発・検討してきた。

コンクリートの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）が混和剤の分散性を阻害するため、従来、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ったが、当該コンクリートでは、新たに開発した無機イオンの影響を受けにくい特殊混和剤を用いることで、この課題を改善している<sup>1)</sup>。

ところで、日本本土の南方の遠洋には、珊瑚が化石化した石灰岩を有する多くの離島がある。このような遠隔

離島では、現地で調達できる海水と珊瑚由来の石灰岩から製造する骨材（以下、珊瑚骨材と称する）を、コンクリート用材料として用いることが経済性や製造効率の観点で望ましいと考えられる。また、前述したように、自己充填性を有するコンクリートを使用することで、さらに施工の省力化も図れると期待できるが、これらの材料を組み合わせた自己充填型コンクリートについては、これまでに検討した実績がなかった。

そこで、本研究では、海水および珊瑚骨材を用いた自己充填型コンクリートの諸特性を明らかにすべく、現在、実験的な検討を進めている。本稿では、これまでの検討で得られた知見のうち、当該コンクリートの強度特性、収縮特性および熱特性について報告する。

## 2. 試験概要

### 2.1 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、骨材（細・粗骨材）に珊瑚骨材を用いた配合（SW-CA）に、練混ぜ水と骨材に海水と普通骨材を用いた配合（SW-NA）や上水道水と普通骨材を用いた配合（TW-NA）などの比較配合を加えた3水準とし、20℃の雰囲気で作製した。コンクリートの水セメン

表-1 コンクリートの配合

| No. | 記号    | W/C<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位粗骨<br>材容積<br>(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |          |           |          |            |          |            | 混和剤 (C×%)   |
|-----|-------|------------|------------|--------------------------------------------------|--------------------------|----------|-----------|----------|------------|----------|------------|-------------|
|     |       |            |            |                                                  | 上水<br>TW                 | 海水<br>SW | セメント<br>C | 陸砂<br>NS | 珊瑚砕砂<br>CS | 砕石<br>NG | 珊瑚砕石<br>CG | 特殊混和剤<br>Ad |
| 1   | SW-CA | 45         | 50.8       | 0.315                                            | —                        | 185      | 411       | —        | 845        | —        | 756        | 1.25        |
| 2-1 | SW-NA |            | 49.7       | 0.330                                            | —                        | 175      | 389       | 848      | —          | 878      | —          | 1.65        |
| 2-2 |       |            | 52.0       | 0.315                                            | —                        | 175      | 389       | 880      | —          | 828      | —          | 1.10        |
| 3   | TW-NA |            | 49.7       | 0.330                                            | 175                      | —        | 389       | 848      | —          | 878      | —          | 1.45        |

\*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） 技術研究所 担当部長 博(工)（正会員）

\*3 港湾空港技術研究所 構造研究領域 材料研究グループ長 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）

表－2 コンクリートの使用材料

| 材料名  | 記号 | 種類                      | 物理的・化学的性質                                                        |
|------|----|-------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 練混ぜ水 | TW | 上水道水                    |                                                                  |
|      | SW | 海水（相模湾天然海水）             | 密度1.022～1.025g/cm <sup>3</sup> ，<br>Cl <sup>-</sup> 濃度1.75～1.80% |
| セメント | C  | 高炉セメントB種                | 密度3.04g/cm <sup>3</sup>                                          |
| 細骨材  | NS | 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                      |
|      | CS | 珊瑚砕砂（遠隔離島産）             | 表乾密度2.60g/cm <sup>3</sup> ，吸水率3.30%，粗粒率2.53                      |
| 粗骨材  | NG | 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                     |
|      | CG | 珊瑚砕石（遠隔離島産）             | 表乾密度2.40g/cm <sup>3</sup> ，吸水率5.13%，最大寸法25mm                     |
| 混和剤  | Ad | 塩分含有増粘剤一液型高性能AE減水剤（標準型） | 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                                    |

ト比は45%で一定とし、スランプフローが600±50mm、空気量が4.5±1.5%の範囲となるよう、単位水量、混和剤の添加率および細骨材率を調整した。なお、海水と普通骨材の配合（SW-NA）については、収縮特性を確認するための試験のみ、配合 No.2-1 の細骨材率を若干調整した配合 No.2-2 を用いた。

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、海水中に質量比で1.8%程度の塩化物イオンを含有していた。セメントには高炉セメントB種を、骨材には表－3 に示す珊瑚骨材と普通骨材を用いた。また、混和剤には、本研究で開発した特殊混和剤（塩分含有用の増粘剤一液型高性能AE減水剤）を使用した。

本研究で用いた珊瑚骨材は、遠隔離島で採取した石灰岩を、現地の骨材製造プラントにて破碎・分級したものであり、5mm以下の骨材を細骨材、5～25mmの骨材を粗骨材とした。珊瑚骨材は、写真－1 のように内部に空隙を有するものが多く存在しており、その主成分は炭酸カルシウムである。また、比較用の普通骨材に比べて微粒分量が多い、吸水率が大き、脆い（すりへり減量や破砕値が大き）などの特徴を有しており、骨材粒子間の品質のばらつきも大きかった<sup>2)</sup>。なお、いずれの骨材も事前に十分な吸水を行い、表面水率（珊瑚骨材：+1～2%）から水量を補正して練混ぜを行った。

## 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。強度（圧縮強度、割裂引張強度）および長さ・質量変化率の試験体は、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、長さ・質量変化率の試験体は材齢7日に基長を測定し、ダイヤルゲージ法により測定を行った。また、ひび割れ抵抗性を確認するための拘束試験の供試体は、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ーニングにより、コンクリートに生じるひずみを計測した（写真－2 参照）。断熱温

表－3 骨材の物性値

|                           | 細骨材        |            | 粗骨材        |            |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                           | 珊瑚<br>(砕砂) | 普通<br>(陸砂) | 珊瑚<br>(砕石) | 普通<br>(砕石) |
| 表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.60       | 2.60       | 2.40       | 2.66       |
| 絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.52       | 2.55       | 2.28       | 2.64       |
| 吸水率 (%)                   | 3.30       | 1.86       | 5.13       | 0.58       |
| 粗粒率                       | 2.53       | 2.66       | 6.14       | 6.71       |
| 微粒分量 (%)                  | 14.8       | 1.2        | 3.6        | 0.1        |
| 実積率 (%)                   | 68.1       | 67.8       | 62.5       | 62.8       |
| 安定性損失量 (%)                | 1.6        | 0.9        | 3.3        | 0.9        |
| 粘土塊量 (%)                  | 0.52       | 0.05       | 0.15       | 0.05       |
| 塩化物量 (%)                  | 0.043      | 0          | 0.007      | —          |
| NaCl換算                    |            |            |            |            |
| 軟石質量分率 (%)                | —          | —          | 40.5       | —          |
| すりへり減量 (%)                | —          | —          | 29.4       | 16.4       |
| 破砕値 (%)                   | —          | —          | 36.9       | —          |



写真－1 珊瑚骨材

表－4 試験項目および方法

| 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<br>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<br>試験材齢：7, 28, 91日                |
| 自己収縮        | 埋込型ひずみ計による  | 自己収縮研究委員会報告書(JCI)の試験方法に準拠                 |
| 長さ・質量変化率    | JIS A 1129  | 基長・乾燥開始材齢：7日<br>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<br>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<br>雰囲気温度：20～60℃（最大4サイクル） |



写真－2 拘束試験の状況

度上昇量は、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。コンクリートの練混ぜ直後に試料を断熱容器にセットし、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

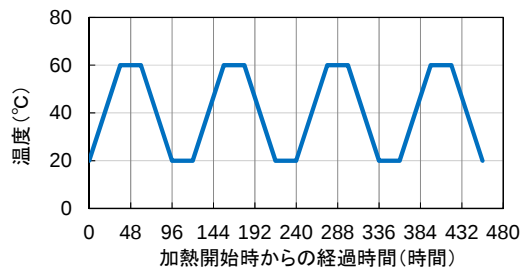


図-1 熱膨張係数試験の温度履歴

定した。コンクリートの打込み後、雰囲気温度を 20℃→60℃→20℃と変化させ、この温度上昇・降下サイクルを最大 4 サイクルまで与えた。なお、上昇・降下はそれぞれ 1.5 日かけて行い、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. 試験結果および考察

#### 3.1 コンクリートの強度特性

コンクリートの材齢と圧縮強度および割裂引張強度の関係を、それぞれ図-2、図-3 に示す。環境温度によって強度発現性は異なるが、海水を用いた配合 (SW-NA, SW-CA) のほうが、骨材の種類を問わず、上水道水を用いた配合 (TW-NA) に比べて初期材齢 (28 日頃まで) の強度が大きくなる傾向を示した。海水を用いてコンクリート製造した場合、塩化ナトリウムなどにより凝結が促進されることが示唆されており<sup>3)</sup>、本研究の結果もそれに符号するものと考えられる。また、関らの研究<sup>4)</sup>によると、形状が悪く実積率の小さな石灰質の骨材を用いたコンクリートは、単位水量の増加や、それに起因するブリーディングの増加により、普通骨材を用いた場合に比べて圧縮強度が低下すると示唆されている。しかしながら、本研究の結果では、珊瑚骨材を用いたコンクリートの圧縮強度が、普通骨材のものに比べて顕著に低下する傾向は認められなかった。これは、上記の文献より骨材の実積率が大きかったこともあるが、適度な粘性を有する当該コンクリートはブリーディングが少なく (ブリーディング率 0.6%以下)、骨材の種類の違いによる影響が表れ難かったことも一因と考えられる。

#### 3.2 コンクリートの収縮特性

##### (1) 自己収縮

コンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を図-4 に示す。普通骨材を用いた場合、海水配合 (SW-NA) の自己収縮ひずみが、上水道水配合 (TW-NA) のものに比べて 200 ( $\times 10^{-6}$ ) 程度大きくなった。これは、練混ぜ水に海水を使用するとセメントの水和反応が促進され、セメントペーストの自己乾燥に伴う体積減少が大きくなったためと推察される。一方、珊瑚骨材を用いた配合 (SW-

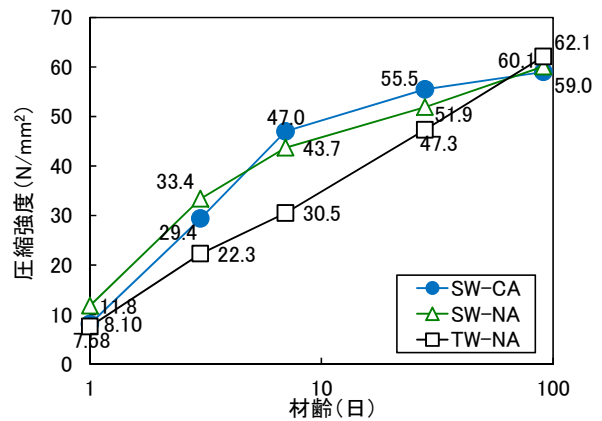


図-2 材齢と圧縮強度の関係

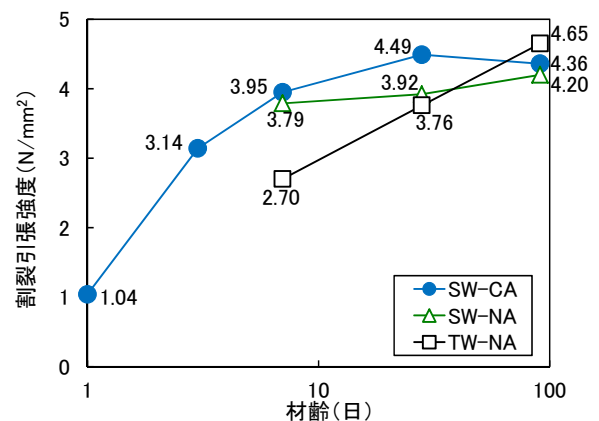


図-3 材齢と割裂引張強度の関係

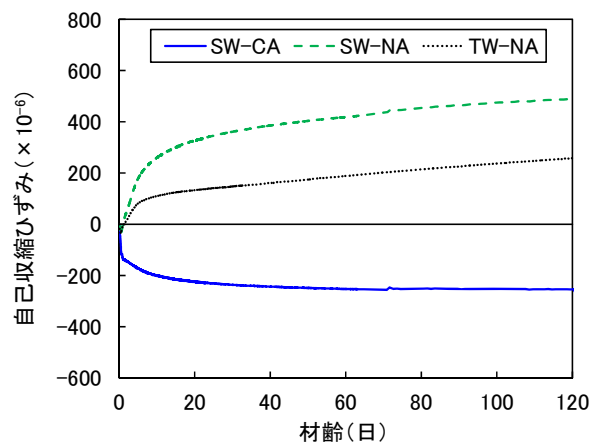


図-4 材齢と自己収縮ひずみの関係

CA) では、同じ海水で練混ぜを行ったにもかかわらず、自己収縮ひずみの値が負となる、すなわち膨張側を推移する傾向を示した。既往の研究<sup>5-7)</sup>によると、珊瑚骨材と同様に内部の空隙が多く、吸水率の大きい人工軽量骨材を用いたコンクリートでは、自己収縮ひずみが膨張側を推移することがある。これは、骨材内部の空隙を満たす水が、セメントの水和が進行する過程で徐々にセメントペーストに滲み出すという内部養生の効果により、ペーストの湿度が相対的に高まることが一因と考察されてい

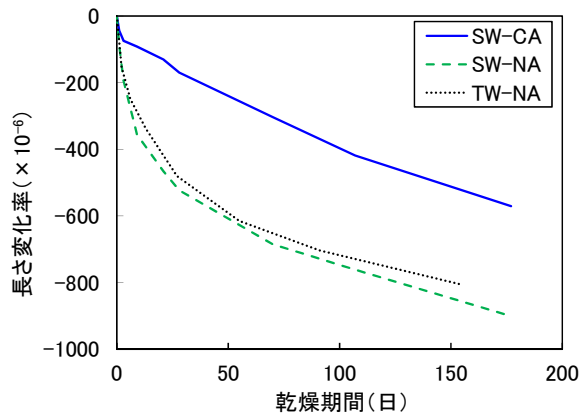


図-5 乾燥期間と長さ変化率の関係

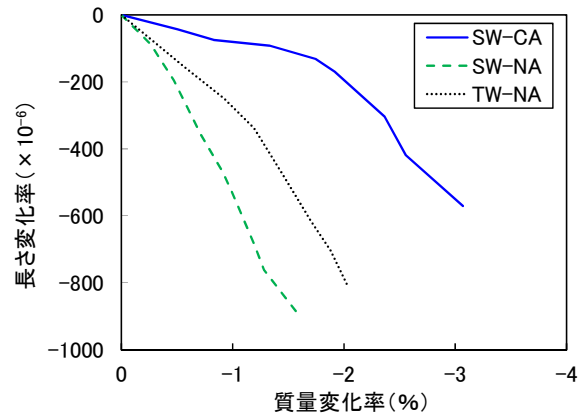


図-6 質量変化率と長さ変化率の関係

る<sup>7)</sup>。珊瑚骨材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみについても、これと同様の現象によるものと考えられ、今後、コンクリート中の骨材に含まれる水の挙動を確認するなど、そのメカニズムを明らかにしたい。

## (2) 乾燥収縮

コンクリートの長さ変化率の経時変化を図-5に、質量変化率と長さ変化率の関係を図-6に示す。これらの図より、珊瑚骨材を用いた配合(SW-CA)は、普通骨材を用いた配合(SW-NA, TW-NA)に比べて質量変化率は大きくなるものの、長さ変化率は小さくなる、すなわち乾燥収縮が抑制されることが示唆された。これは、前述した自己収縮の抑制も一因と考えられるが、山田らの研究<sup>8)</sup>によれば、骨材自体の収縮特性の違いが起因した可能性もあるため、本研究では、乾燥に伴う骨材の収縮特性の確認を試みた。

骨材の収縮特性は、写真-2に示すとおり、径が20mm程度の粗骨材の一部を研磨し、そこへ防水処理を施して設置したワイヤストレーンゲージ(5mm)のひずみで評価した。乾燥収縮ひずみの測定は、骨材を20℃の水中で7日間吸水したときの値を基準として、温度20℃相対湿度60%の雰囲気で行った。その結果、乾燥過程における骨材の乾燥収縮ひずみの変化は図-7に示すとおりとなり、個体間のばらつきはあるものの、珊瑚骨材は、普通骨材に比べて乾燥収縮ひずみの増加量が小さくなる傾向が認められた。この要因は明らかでないが、骨材中の空隙径や岩種の違いが影響したものと推察される。以上の結果より、珊瑚骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮の低減は、セメントペーストの自己収縮の抑制(膨張)に加えて、骨材の収縮が小さいことも複合的に作用して生じた可能性があると考えられる。

## (3) 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-8に示す。なお、収縮応力は、ワイヤスト

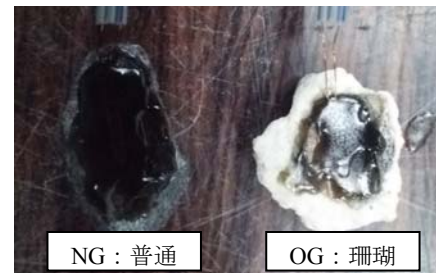


写真-3 骨材の乾燥収縮ひずみの測定

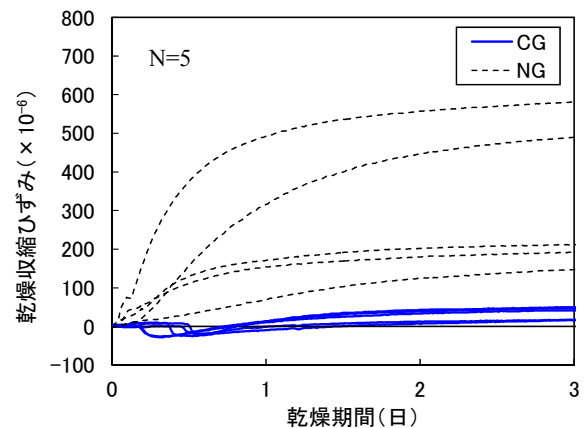
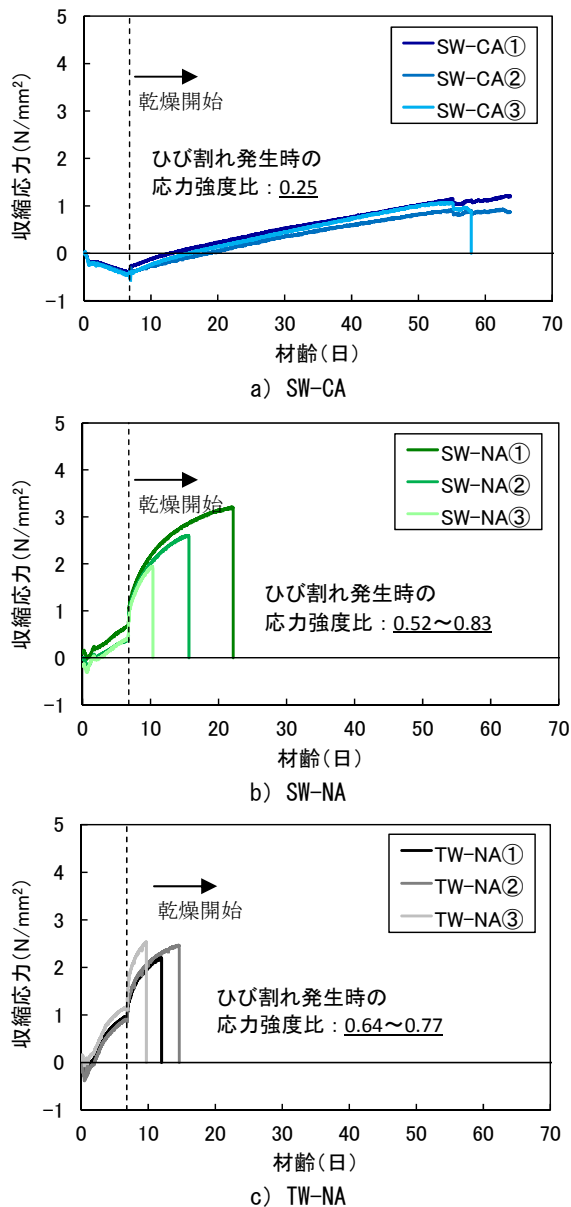


図-7 骨材の乾燥収縮ひずみの経時変化

レー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。普通骨材を用いた場合、上水道水配合(TW-NA)は乾燥開始から3~8日程度で、海水配合(SW-NA)は3~15日程度でそれぞれひび割れが発生(収縮応力が解放されて $0\text{N/mm}^2$ となった時点)し、後者のほうが、若干ひび割れ抵抗性が向上する結果となった。これは、海水で練混ぜたことにより、乾燥開始後の引張強度が大きくなったことが要因と考えられる。一方、珊瑚骨材を用いた配合(SW-CA)は、他の配合に比べてコンクリートに作用する収縮応力が小さく、乾燥開始から51日後、3供試体のうち1体にひび割れが認められた。



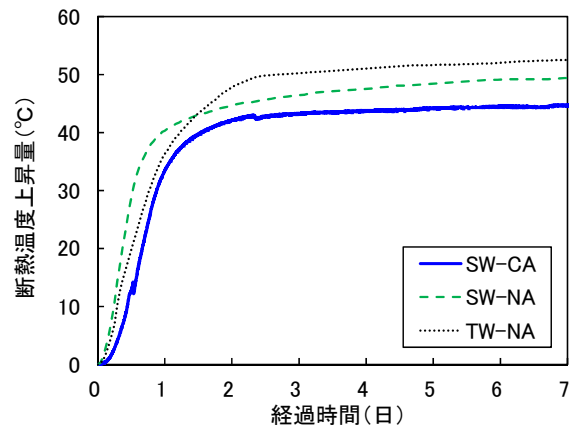
図－8 材齢と乾燥収縮応力の関係

珊瑚骨材を用いた配合の収縮応力の低下については、前述した自己収縮や乾燥収縮の特性からも類推できる結果といえる。また、普通骨材を用いた配合に比べてひび割れの発生までの期間が延びる一方で、収縮応力をひび割れ発生時の割裂引張強度（同環境で封緘養生を行った供試体強度から推定）で除した応力強度比は、普通骨材を用いた配合のそれよりも小さくなった。この要因は明らかでないが、人工軽量骨材を用いたコンクリートは、収縮ひずみが小さくひび割れの発生材齢が延びるが、応力強度比は小さくなる（0.2～0.6）との既往の知見<sup>9)</sup>に類似するものであった。なお、一般的なコンクリートの応力強度比は0.7程度といわれている。

### 3.3 コンクリートの熱特性

#### (1) 断熱温度上昇量

コンクリートの断熱温度上昇量の経時変化を図－9に



図－9 断熱温度上昇量の経時変化

示す。普通骨材を用いた場合、海水配合（SW-NA）の温度の上昇速度（温度上昇時の勾配）が、上水道水配合（TW-NA）に比べて若干速くなる傾向が認められた。この温度の上昇速度の増加は、海水による水和の促進効果が起因したものと考えられる。一方、同じ海水配合でも珊瑚骨材を用いた場合（SW-CA）は、温度の上昇速度が上水道水と普通骨材を用いた配合（TW-NA）よりやや遅く、終局時の温度上昇量がTW-NAより8℃低くなる傾向を示した。この要因は現時点では明らかになっていないが、一般的に、温度上昇量は熱容量（比熱と質量の積）に反比例するといわれており<sup>10)</sup>、普通骨材との密度差が僅かな珊瑚骨材が、人工軽量骨材と同様に比熱が大きいと仮定すると、コンクリートの熱容量が増加して温度上昇量が低下したとも考えられる。今後、骨材の空隙構造や比熱などの物性について確認していきたい。

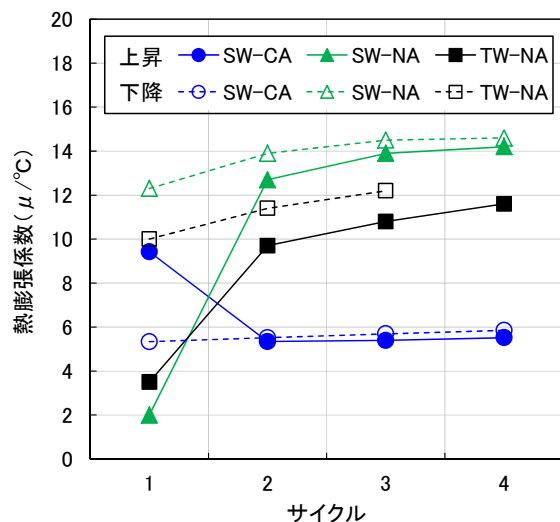
#### (2) 熱膨張係数

各配合のコンクリート温度とひずみの関係を求め、その上昇・下降勾配から算出した熱膨張係数を表－5、図－10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。また、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ため、本研究では、値が概ね安定した2サイクル目以降の結果により評価した。

普通骨材を用いた場合、上水道水配合（TW-NA）の熱膨張係数は10～12  $\mu/\text{°C}$  となり、コンクリート標準示方書等に示される値（高炉B種：12  $\mu/\text{°C}$ ）に近似したのに対し、海水配合（SW-NA）では14  $\mu/\text{°C}$  程度とやや大きな値を示した。一方、同じ海水配合でも珊瑚骨材を用いた場合（SW-CA）は、他の配合に比べて値が大幅に小さくなり、6  $\mu/\text{°C}$  程度であった。既往の文献<sup>10)</sup>によると、人工軽量骨材を用いたコンクリートの熱膨張係数は普通

表－5 熱膨張係数

| サイクル | SW-CA |     | SW-NA |      | TW-NA |      |
|------|-------|-----|-------|------|-------|------|
|      | 上昇時   | 降下時 | 上昇時   | 降下時  | 上昇時   | 降下時  |
| 1    | 9.4   | 5.3 | 2.0   | 12.3 | 3.5   | 10.0 |
| 2    | 5.3   | 5.5 | 12.7  | 13.9 | 9.7   | 11.4 |
| 3    | 5.4   | 5.7 | 13.9  | 14.5 | 10.8  | 12.2 |
| 4    | 5.5   | 5.9 | 14.2  | 14.6 | 11.6  | -    |



図－10 熱膨張係数の推移

骨材のコンクリートに比べて小さく、 $6\sim 9\mu/\text{°C}$ といわれている。本研究で得られた珊瑚骨材の値も人工軽量骨材の値と概ね同等の結果であり、骨材内部の空隙構造が何らかの影響を及ぼしたものと推察される。

#### 4. まとめ

海水および珊瑚由来の石灰石骨材を用いた自己充填型コンクリートの基本性能について検討した結果、以下の事項が明らかとなった。

- (1) コンクリートの強度発現性は、練混ぜ水に海水を用いると早くなり、ブリーディングの少ない本研究の配合の範囲では、珊瑚骨材と普通骨材の差は比較的小さい。
- (2) 練混ぜ水に海水を用いたコンクリートの自己収縮は、上水道水を用いた場合に比べて増加するが、珊瑚骨材を併用することで抑制できる。
- (3) 自己収縮が抑制されることと珊瑚骨材自体の収縮が小さいことに起因し、珊瑚骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮は、普通骨材を用いた場合に比べて小さくなり、ひび割れが発生するまでの期間が長くなる。
- (4) 練混ぜ水に海水を用いた場合、上水道水の場合に比べて水和に伴うコンクリート温度の上昇速度が速くなるが、珊瑚骨材を併用することで抑制でき、本研究の範囲では、終局時の温度上昇量も低減した。
- (5) 練混ぜ水に海水を用いたコンクリートの線膨張係数は、上水道水を用いた場合に比べて若干大きくなるが、

珊瑚骨材を併用することで大幅に低減できる。

本研究は、内閣官房総合海洋政策本部事務局及び国土交通省総合政策局技術政策課により平成26年4月に実施された「遠隔離島における産学官連携型の海洋関連技術開発の公募」で採択されたものであり、国土交通省関東地方整備局のご協力の下、早稲田大学、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)が共同で実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 竹中 寛, 酒井貴洋, 山路 徹, 清宮 理: 海水および珊瑚骨材を用いた自己充填型コンクリートの基本性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1833-1838, 2016.6
- 3) 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
- 4) 関 博, 大即信明: コンクリート用骨材としての沖縄産骨材の特性について, 港湾技研資料, No.240, pp.1-19, 1976.9
- 5) 河野克哉, 岡本亨久, 柴田辰正, 石川雄康: 超軽量骨材を用いたコンクリートの自己収縮ならびに乾燥収縮, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.43-48, 1998.
- 6) 五十嵐心一, 川村満紀, 神崎暁史: 軽量骨材の使用による高強度コンクリートの自己収縮の低減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.399-404, 2002.
- 7) 黒岩秀介, 陣内 浩, 並木 哲, 名和豊春: 人工軽量骨材による高強度コンクリートの自己収縮低減, 大成建設技術センター報, 第46号, 2013.
- 8) 山田 宏, 片平 博, 渡辺博志: 粗骨材の収縮特性の評価に関する検討, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.68, No.1, pp.63-71, 2012.
- 9) 小川亜希子, 今本啓一, 本間敏明, 石川寛範: 軽量コンクリートを用いた構造体デッキプレートスラブの温度及び収縮挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.545-550, 2011.
- 10) 土木学会: 人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル, コンクリート・ライブラリー, 第56号, 1985.5