

珊瑚由来の石灰石骨材が海水練り自己充填型 コンクリートの性質に及ぼす影響

竹中 寛¹・谷口 修²・田中 亮一³・与那嶺 一秀⁴・山路 徹⁵・清宮 理⁶

¹正会員 東洋建設株式会社 美浦研究所 (〒300-0424 茨城県稲敷郡美浦村受領 1033-1)

E-mail: takenaka-hiroshi@toyo-const.co.jp

²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: osamu.taniguchi@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター (〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町 1-3)

E-mail: ryo_tanaka@toa-const.co.jp

⁴正会員 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: yamaji-t@p.mpat.go.jp

⁵正会員 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: yonamine-k@p.mpat.go.jp

⁶正会員 早稲田大学名誉教授 (〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1)

(現 一般財団法人沿岸技術研究センター)

E-mail: kiyomiya@cmit.or.jp

本研究では、遠隔離島で活用するコンクリートを想定し、海水、珊瑚由来の石灰石骨材および特殊混和剤を用いた自己充填型コンクリートの基礎的性質、収縮特性、熱的性質および耐摩耗性について実験的検討を行った。その結果、コンクリート用材料として空隙が多い珊瑚由来の石灰石骨材を用いた場合においても、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を製造することができ、普通骨材を用いた場合と同等程度の強度発現性を有すること、収縮ひずみや熱膨張係数が小さくなることなどを明らかにした。また、水セメント比や単位粗骨材容積を小さく設定すれば、普通骨材と同等の耐摩耗性を確保できることがわかった。

Key Words : seawater, coral aggregate, self-compacting concrete, compressive strength, shrinkage, thermal expansion coefficient, abrasion resistance

1. 序章

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め作業を省力化し、施工効率を向上することなどが求められる。

著者らは、離島等における無筋・鉄筋コンクリート構造物を対象として、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¹⁾。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²⁾。また、鉄筋コンクリート構造物へ適用するにあたっては、耐食性の高いステンレス鉄筋等の併用を想定している¹⁾。

ところで、日本本土の南方には、珊瑚が化石化した石灰岩が多く堆積している。そのような地域の遠隔離島では、現地調達できる海水と珊瑚由来の石灰岩から製造する細・粗骨材（以下、珊瑚骨材と称す）を、コンクリ

一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。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、これまでに検討された実績がない。

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、珊瑚骨材の特徴、それを用いたコンクリートの基礎的性質³⁾、収縮特性⁴⁾、熱的性質および耐摩耗性について実験的検討を行った。本稿では、これらの検討で得られた知見をもとに、珊瑚骨材の物理的性質、形状および空隙構造がコンクリートの諸性状に及ぼす影響について考察する。

2. 珊瑚由来の石灰石骨材の特徴

(1) 物理的性質

本研究で使用した珊瑚骨材は、遠隔離島で採取した石灰岩を、破碎・分級したものであり、5 mm 以下の骨材を細骨材（以下、珊瑚細骨材と称す）、5~25 mm の骨材を粗骨材（以下、珊瑚粗骨材と称す）とした。珊瑚骨材は、一部茶褐色に変色しているものも見受けられたが、ほとんどが白色を呈している。

細骨材と粗骨材の物性値および粒度分布を、それぞれ表-1、図-1 に示す。これらの結果より、珊瑚骨材は、比較用の普通細・粗骨材（以下、普通骨材と称す）に比べて微粒分量が多い、吸水率が大きい、粗骨材が脆い（すりへり減量が多い）などの特徴を有し、また、写真-1 に示すとおり、粗骨材の形状や外観は多様で、内部に空隙を有するものが多く存在していた。

粗骨材の粒子毎の表乾密度と吸水率の関係を図-2 に、それぞれの度数分布を図-3 に示す。これらの図より、珊瑚骨材のほうが普通骨材に比べてばらつきの大きいことが分かり、普通骨材の表乾密度と吸水率の標準偏差がそれぞれ 0.05 g/cm³（平均値：2.65 g/cm³）と 0.19%（平均値：0.45%）であったのに対し、珊瑚骨材では 0.24 g/cm³（平均値：2.29 g/cm³）と 4.24%（平均値：4.70%）であった。なお、これらの試験に供した試料は、表-1 の密度・吸水率試験の試料とは異なり、15 mm 以上の珊瑚骨材と普通骨材をそれぞれ任意に約 200 個ずつ選定し、個々の粒子の表乾状態の気中質量・水中質量、乾燥（105°C、24時間）後の気中質量から算定した。

(2) 成分

蛍光 X 線分析による珊瑚粗骨材の構成成分を図-4 に示す。図より、Ca と O の元素が多く含まれていることから、珊瑚骨材の主成分は炭酸カルシウムであると推定

表-1 骨材の物性値

	細骨材		粗骨材	
	珊瑚 (砕砂)	普通 (陸砂)	珊瑚 (砕石)	普通 (砕石)
表乾密度 (g/cm ³)	2.60	2.60	2.40	2.66
絶乾密度 (g/cm ³)	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 (%) NaCl換算	0.043	0	0.007	—
軟石質量分率 (%)	—	—	40.5	—
すりへり減量 (%)	—	—	29.4	16.4
破碎値 (%)	—	—	36.9	—

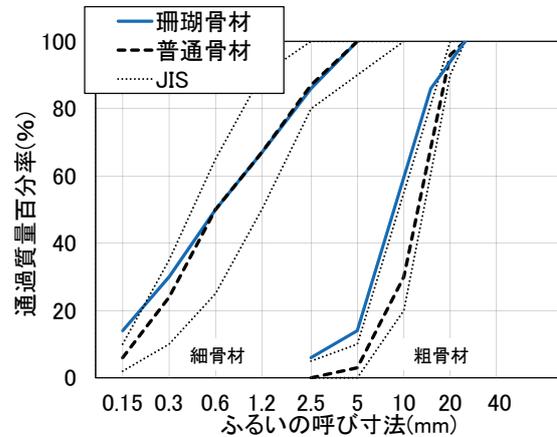


図-1 骨材の粒度分布



写真-1 珊瑚粗骨材

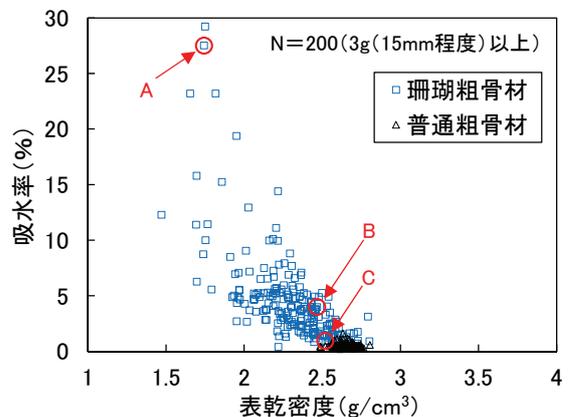


図-2 粗骨材の表乾密度と吸水率の関係

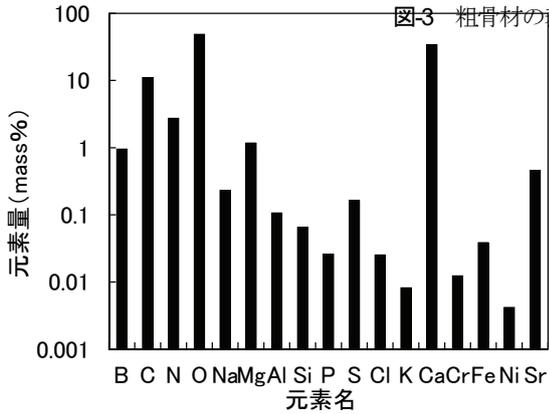
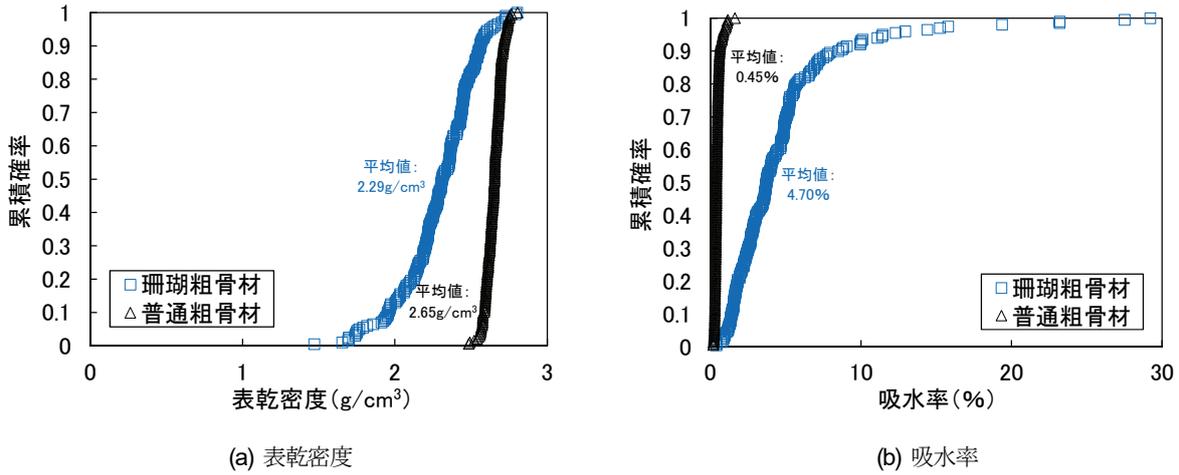


図4 珊瑚粗骨材の構成成分

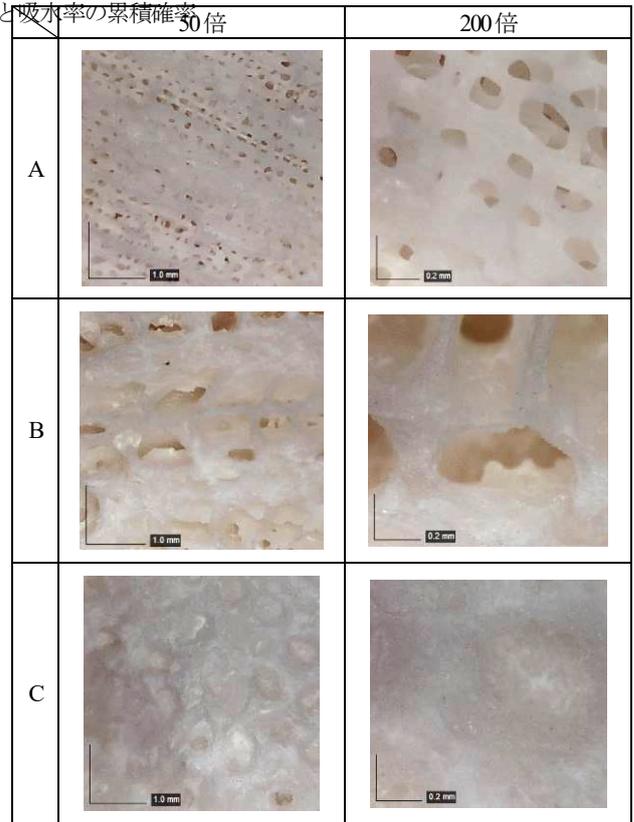


写真2 珊瑚粗骨材の拡大像

される。

(3) 空隙構造

マイクロスコープにより観察した珊瑚粗骨材の拡大像を写真-2 に示す。左端の記号は図-2 に示す A (吸水率 27.5%) , B (吸水率 4.0 %) および C (吸水率 0.9 %) を意味する。骨材 A は、0.1~0.2 mm 程度の空隙が網状に多く存在していたのに対し、骨材 C では、空隙は僅かであった。一方、平均的な品質を有する骨材 B についても、骨材 A と同様に内部に空隙を多く有していたが、0.2~1 mm 程度の比較的大きく不規則な孔が連続的に存在するなど、形態には相違がみられた。

このように、粒子間で空隙構造に違いはあるものの、総じて多くの空隙を有している。内部に空隙を有する骨材の一つとして人工軽量骨材がある。人工軽量骨材には、40 mm 以下の空隙において、一般的な骨材 (砂岩碎石等) では認められないインクボトル空隙 (ボトルネック構造で水分の移動が抑制される空隙) が存在すると報告されている⁹⁾。本研究では、珊瑚骨材におけるインクボトル空隙の有無を確認すべく、既往の文献⁹⁾を参考に水銀漸次繰返し圧入法による試験を行った。試料には 5 mm 程度に粉碎した珊瑚粗骨材を用い、表-2 に示す圧入過程で水銀圧入式ポロシメータにより細孔径分布を測定

表-2 圧入圧力と換算空隙径

過程	圧入圧力 (MPa) [換算空隙直径 (μm)]
1	0.04 [33] → 1 [1.1]
2	0.3 [3.9] → 4 [0.32]
3	0.3 [3.9] → 13 [0.1]
4	0.3 [3.9] → 19 [0.07]
5	0.3 [3.9] → 31 [0.04]
6	0.3 [3.9] → 58 [0.02]

した。

累計空隙曲線を図-5 に示す。(b)は、(a)の圧入曲線の 4 μm における圧入量が 0 となるように曲線を水平移動させたものであり、圧入曲線の重複部が連続空隙、分岐部

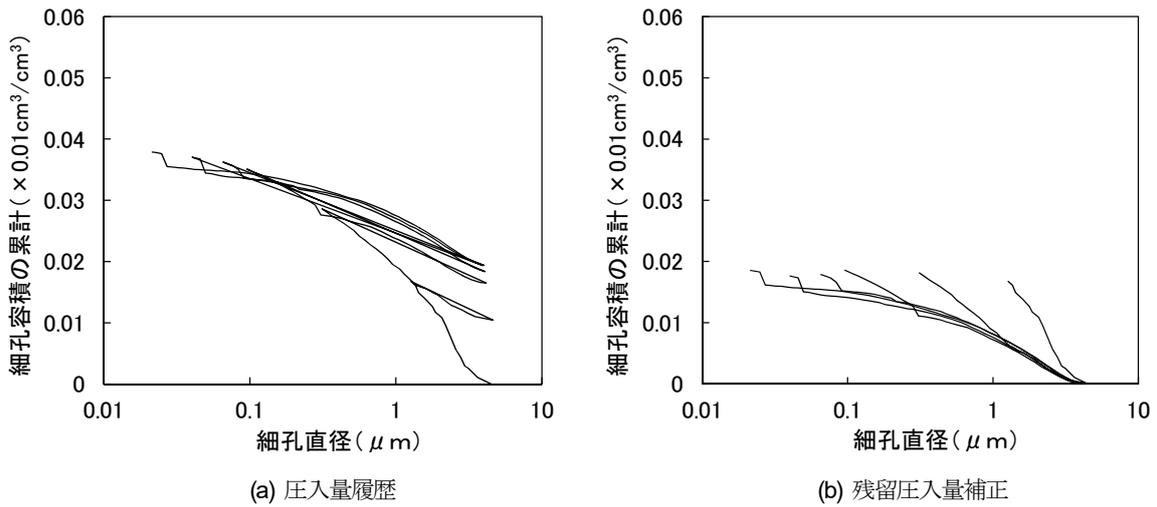


図5 累計空隙曲線

表3 コンクリートの配合

No.	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位粗骨材絶対容積 (m³/m³)	単位量 (kg/m³)								混和剤 (C×%)			環境温度 (°C)	塩化物イオン量 (kg/m³)
					上水 TW	海水 SW	セメント C	普通細骨材 NS	珊瑚細骨材 CS	普通粗骨材 NG	珊瑚粗骨材 CG	Ad1	Ad2	Ad3			
1	SW-CA	45	50.8	0.315	—	185	411	—	845	—	756	1.25	—	—	20	3.71	
												—	1.35	1.00	35		
2	SW-NA	45	49.7	0.330	—	175	389	848	—	878	—	1.65	—	—	20	3.20	
												—	—	—	35		
3	TW-NA	45	49.7	0.330	175	—	389	848	—	878	—	1.45	—	—	20	0.05	
												—	—	—	35		

がインクボトル空隙を意味する。図より、圧入曲線に分岐部が認められ、珊瑚粗骨材にもインクボトル空隙が存在することを示唆する結果となったが、その空隙量(図5(b)の分岐線の上端値)は $0.02 \times 0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ であり、既往の人工軽量骨材の空隙量の1/10程度であった。

以上のように、珊瑚粗骨材には微細なものから粗大なものまで、幅広い径の空隙が多く存在していることが明らかとなった。このような空隙を有する骨材をコンクリートに用いた場合、フレッシュコンクリートでは加圧吸水に伴う性状の変化、硬化コンクリートでは強度の低下や収縮等による体積変化の増加が懸念される。また、骨材空隙の存在による蓄熱の増加に加え、海水に起因したセメントの水和促進により温度ひび割れを助長する恐れがある。さらに、当該コンクリートを海中に没する構造物へ適用することを想定した場合には、耐摩耗性の低下が危惧されることから、これらの特性を把握すべく、次章以降に詳述する検討を行った。

3. コンクリートの基礎的性質

(1) 実験概要

a) 配合および使用材料

コンクリートの配合を表3に示す。配合は、練混ぜ

水に海水、骨材に珊瑚骨材を用いた配合(SW-CA)、練混ぜ水と骨材に海水と普通骨材を用いた配合(SW-NA)、上水道水と普通骨材を用いた配合(TW-NA)の全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%で一定とし、スランプフローが $600 \pm 50 \text{ mm}$ 、空気量が $4.5 \pm 1.5 \%$ の範囲となるよう、単位水量、混和剤の添加率(C×2.0%を上限)および細骨材率を調整した。本研究で用いた珊瑚骨材は、普通骨材に比べて微粒分量が多いことなどが起因して、同じスランプフローとなるための単位水量は、SW-CAが他の2配合に比べて多くなった。また、35°Cの高温環境の場合、時間の経過に伴い流動性が急激に低下したため、流動性の経時保持性を向上すべく、SW-CAでは混和剤を遅延型のものに切り替え、さらに流動性保持剤を併用した。なお、各配合の塩化物イオン量(配合上の計算値)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4に示す。練混ぜ水に用いた海水は相模湾で採水し、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。海水の成分は表5に示すとおりである。セメントは高炉セメントB種とし、骨材には、前章で述べた珊瑚骨材と普通骨材(表1参照)を用いた。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

表4 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)	表-5参照
セメント	C	高炉セメントB種	密度3.04 g/cm ³
細骨材	NS	陸砂(大井川水系)	表-1参照
	CS	珊瑚砕砂(遠隔離島産)	同上
粗骨材	NG	硬質砂岩砕石(青梅産)	同上
	CG	珊瑚砕石(遠隔離島産)	同上
混和剤	Ad1	塩分含有増粘剤-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
	Ad2	同上(遅延型)	同上
	Ad3	流動性保持剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物

表5 海水の成分

密度 [20℃] (g/cm ³)	pH [20℃]	固形分濃度 [105℃, 3hr] (%)			
1.022~1.025	8.0	3.48~3.70			
各種イオンの含有量(%)					
Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
1.75~1.80	0.23~0.26	1.08~1.19	0.03~0.04	0.04~0.05	0.12

表6 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	JIS A 1150	測定時期: 練混ぜ後0, 30, 60, 90分
空気量	JIS A 1128 JIS A 1116	珊瑚骨材の配合は質量法にて測定
充填高さ・時間	JSCE-F 511	流動障害: R2 充填時間: 充填停止時
加圧ブリーディング	JSCE-F 502	
圧縮強度	JIS A 1108	養生条件: 20℃または35℃水中養生 試験材齢: 1, 3, 7, 28日
静弾性係数	JIS A 1149	養生条件: 同上 試験材齢: 7, 28日

補正して練混ぜを行った。混和剤には、特殊混和剤を使用した。また、SW-CA に使用した流動性保持剤は、ポリカルボン酸系のものであり、強い減水効果は示さないものの、流動性の経時保持性に優れるところにその特徴がある。

b) 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6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分まで経時変化を確認した。また、珊瑚骨材は、人工軽量骨材などと同様に⁹⁾、加圧吸水する傾向が認められたため、珊瑚骨材を用いた配合(SW-CA)については圧力法ではなく質量法にて空気量を測定した。圧縮強度試験の供試体は、材齢1日まで練混ぜ時と同じ温度環境下で封緘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。

(2) 実験結果および考察

a) コンクリートの流動性・自己充填性

海水および珊瑚骨材を用いた配合(SW-CA)における、コンクリートの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6に示す。20℃と35℃のいずれの環境においても、90分後までスランプフローの目標

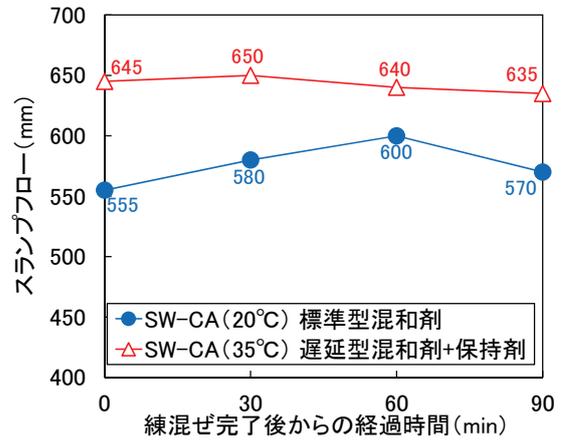


図6 スランプフローの経時変化

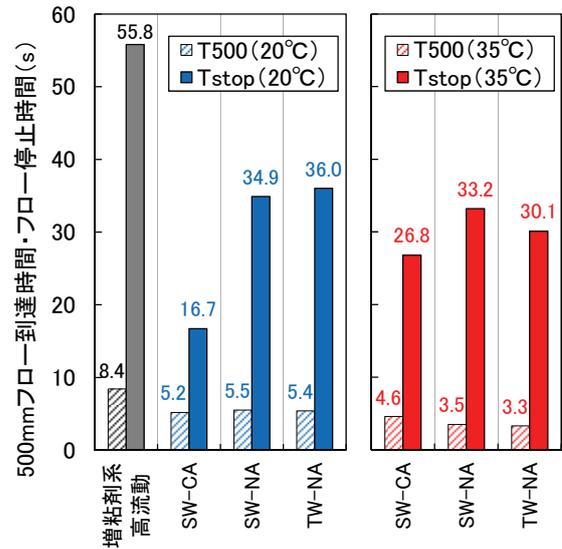


図7 スランプフロー時間

範囲(600±50 mm)を満足した。35℃の高温環境においても、遅延型の混和剤と流動性保持剤を併用すれば、海水や珊瑚骨材を用いた場合でも所要の性能を保持できることがわかった。

練混ぜ完了後の500 mmフロー到達時間(T500)と停止時間(Tstop)を図7に示す。本研究で検討した配合は、20℃と35℃のいずれの環境においても、図に併記した従来の増粘剤系の高流動コンクリート⁷⁾に比べてT500, Tstopが短くなる、すなわち粘性が小さくなる傾向を示した。20℃におけるSW-CAのTstopが他の配合に比べて小さくなっているが、これは、スランプフローが小さかったこと、増粘剤を含有する混和剤の添加量が他に比べて少なく、粘性が低下したことなどが要因と考えられる。

U形充填試験における、コンクリートの充填高さおよび充填時間を図8に示す。全ての配合において充填高さは300 mm以上を示し、自己充填性レベルは、ランク

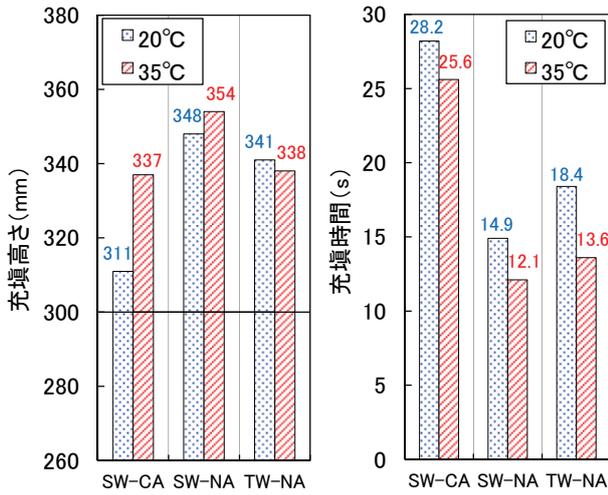


図-8 U形充填高さ・時間

2を満足した。海水および珊瑚骨材を用いた配合 (SW-CA) は、他の配合に比べてモルタルの量が多いにもかかわらず充填高さがやや小さく、充填時間がやや長くなる傾向を示した。これは、前述したようにフローが小さかったこと (20°C) や粘性が低下ことなども一因と考えられるが、珊瑚粗骨材の形状にばらつきが大きく、障害の近傍で閉塞しやすくなっていたことが主要因であると推察される。なお、ほとんどの配合で、20°Cより35°Cのほうが、充填時間が短く、充填高さが大きくなっているが、これは、フローが大きかったこと、環境温度の上昇に伴いコンクリートの粘性が小さくなったことなどが要因と推察される。

b) 加圧時の吸水特性

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-9に示す。普通骨材を用いた配合 (TW-NA, SW-NA) の脱水量は、コンクリートのポンパビリティが良好であると判断される、標準曲線BとCの範囲³⁾内に入ったのに対し、珊瑚骨材を用いた配合 (SW-CA) は、上記の範囲をやや下方に逸する結果となった。これは、内部に空隙 (常圧下で水が満たされにくい空隙など) を有する珊瑚骨材の加圧吸水が影響したためと推察される。既往の研究においても、常圧下で水中浸漬しただけでは珊瑚骨材を飽水状態にすることは困難であり、骨材の加圧吸水によりポンプ圧送性が低下することが示唆されている⁸⁾。本研究のコンクリートは流動性に優れるため、スランプレベルの普通コンクリートに珊瑚骨材を用いる場合に比べれば、ポンパビリティの低下に伴うリスクは小さいと考えられるが、圧送を行う際は、コンクリートが閉塞しないよう配管長や吐出量を調整するなど、留意が必要である。

c) 強度発現性

コンクリートの材齢と圧縮強度の関係を図-10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

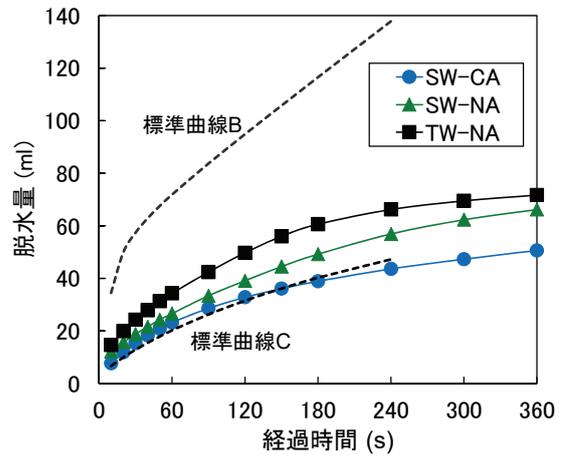


図-9 加圧時の脱水量の経時変化

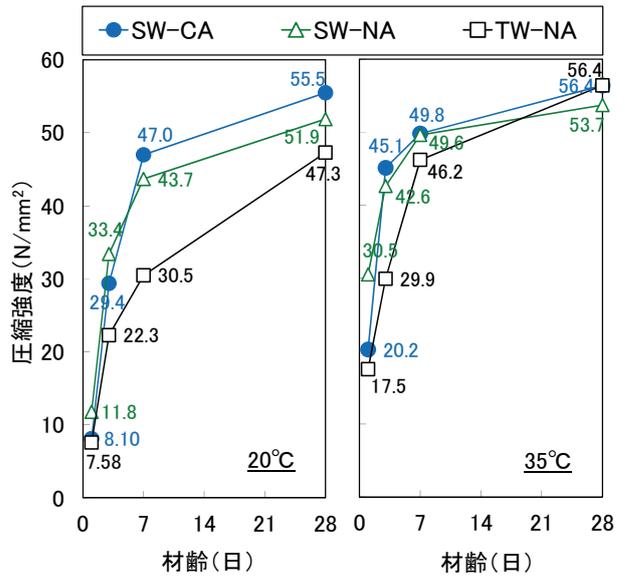


図-10 圧縮強度

配合 (SW-NA, SW-CA) の方が、骨材の種類を問わず、上水道水を用いた配合 (TW-NA) に比べて初期材齢の圧縮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を製造した場合、塩化ナトリウムなどにより硬化が促進されることが既往の研究¹⁹⁾で示唆されており、本研究の結果もそれに符合するものと考えられる。また、海水を用いた配合のうち、35°C環境の珊瑚骨材を用いた配合 (SW-CA) の材齢1日における圧縮強度が、同環境で普通骨材を用いた配合 (SW-NA) に比べて小さくなっている。この要因としては、その後材齢の経過とともに強度が増加し、材齢3日以降ではSW-NAと同等の強度となることから、遅延型の混和剤を用いたことによるコンクリートの硬化遅延と推察される。なお、各材齢の圧縮強度はそれぞれ3本の供試体の平均値を用いている。標準偏差は、普通骨材の配合 (SW-NA, TW-NA) では大 0.8 N/mm²であったのに対し、珊瑚骨材の配合では最大 2.2 N/mm²とやや大きかったが、供試体間の過大なばらつきは認められなかった。

以上のように、本研究の範囲では、珊瑚骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、普通骨材を用いた場合に比べて低下する傾向は認められなかった。既往の文献¹⁰⁾によると、コンクリートの圧縮強度は、モルタルの圧縮強度が粗骨材の圧縮強度に比べて大きい場合、粗骨材の圧縮強度に依存するが、モルタルの圧縮強度が粗骨材の圧縮強度に比べて小さい場合、粗骨材の圧縮強度への依存性は小さいとされている。この文献では、本研究で用いた珊瑚粗骨材と類似の性質を有すると推察される珊瑚礁堆積物粗骨材(碎石)も検討対象としている。この試験結果によると、水結合材比が40%以上の配合では粗骨材の圧縮強度がモルタルの圧縮強度より大きくなるため、珊瑚礁堆積物粗骨材よりも圧縮強度が大きい硬質砂岩粗骨材(碎石)と比較してもコンクリートの圧縮強度としては差異のないことが示されている。本研究で使用した珊瑚粗骨材の圧縮強度は不明であるが、前記文献¹⁰⁾における珊瑚由来の粗骨材(珊瑚れき、珊瑚碎石)の圧縮強度(微小圧縮強度)の平均値が60 N/mm²程度であったこと、本研究の珊瑚粗骨材と同等のすり減り減量となる、他の文献¹¹⁾で用いた石灰質の骨材のそれが40~65 N/mm²程度であったことから、本研究の珊瑚粗骨材もこれらと同程度の圧縮強度を有していたと推察される。このように仮定すると、珊瑚粗骨材の圧縮強度は、水セメント比45%の本研究のモルタル強度(6章で後述)と同程度となるため、粗骨材の種類の違いがコンクリートの圧縮強度に現れにくい領域(粗骨材強度が影響しない上限付近)であったものと考えられる。また、他の文献¹¹⁾では、形状が悪く実積率の小さな石灰質の粗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、普通骨材の粗骨材(以下、普通粗骨材と称す)を用いた場合に比べて強度が低下すると考察されている。しかしながら、本研究の結果では、前述のとおり珊瑚粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度が普通粗骨材のものに比べて低下する傾向は認められなかった。これは、参考文献¹¹⁾で用いた粗骨材に比べ、今回用いた珊瑚粗骨材の実積率が大きかったことも一因と考えられるが、本研究のコンクリートの場合は、混和剤中の増粘剤のはたらきによりブリーディングなどの材料分離が最小限に抑えられ、粗骨材の種類の違いによる影響が現れにくかったことも一因と考えられる。なお、本研究で用いた珊瑚骨材と同様に、吸水率の大きい再生骨材を用いたコンクリートでは、その圧縮強度には細骨材の影響が大きく、収縮には粗骨材の影響が大きくなるという報告¹²⁾もある。

コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を図-11に示す。図中の値は、各配合の材齢7, 28日における全供試体(20℃および35℃環境)の結果であり、同図に併記した計算値は、2017年度制定コンクリート標準示

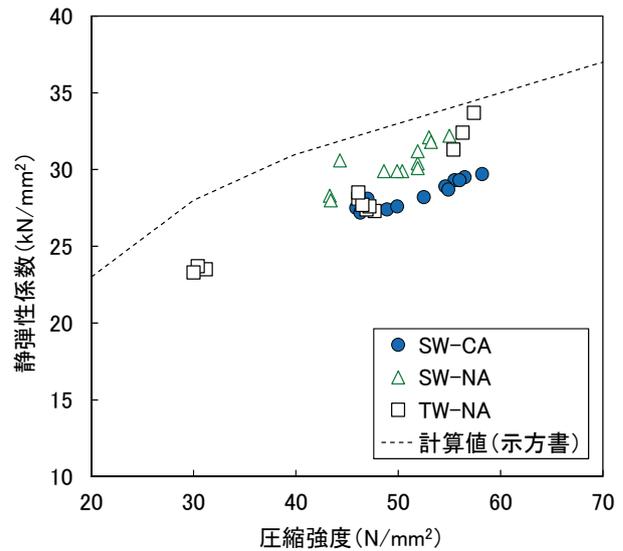


図-11 圧縮強度と静弾性係数の関係

方書【設計編】から算定した値である。図より、ばらつきはあるものの、同じ圧縮強度における静弾性係数は、普通骨材を用いた配合(TW-NA, SW-NA)に比べ、珊瑚骨材を用いた配合(SW-CA)の方が相対的にやや小さくなる傾向が認められた。これは、骨材自体の弾性係数の違いが影響したためと推察される。

4. コンクリートの収縮特性

(1) 実験概要

a) 配合および使用材料

コンクリートは、表-3の環境温度が20℃配合のうち、海水と普通骨材の配合(SW-NA)の単位粗骨材容積を海水と珊瑚骨材の配合(SW-CA)と同量となるように修正した表-7の配合を用いた。なお、使用材料は表-4と同じである。

b) 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。長さ・質量変化率の試験体は、材齢1日まで20℃の環境下で封緘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。

(2) 実験結果および考察

a) 自己収縮

コンクリートのひずみの経時変化を図-12に示す。普

表-7 コンクリートの配合

No.	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位粗骨材容積 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)						混和剤 (C×%)	
					上水 TW	海水 SW	セメント C	普通細骨材 NS	珊瑚細骨材 CS	普通粗骨材 NG	珊瑚粗骨材 CG	Ad1
1	SW-CA	45	50.8	0.315	—	185	411	—	845	—	756	1.25
2	SW-NA		52.0	0.315	—	175	389	880	—	828	—	1.10
3	TW-NA		49.7	0.330	175	—	389	848	—	878	—	1.45

表-8 試験項目および方法

試験項目	試験方法	試験条件等
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 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

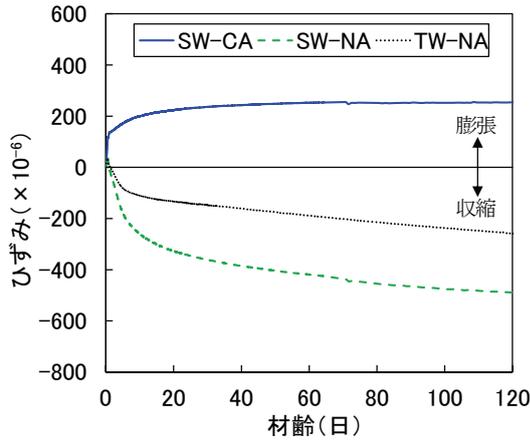


図-12 自己収縮ひずみの経時変化

通骨材を用いた場合、海水配合 (SW-NA) のひずみが、上水道水配合 (TW-NA) のものに比べて $200 (\times 10^6)$ 程度収縮側に増加する傾向を示した。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-CA) では、同じ海水で練混ぜを行ったにもかかわらず、ひずみの値が正となる、すなわち膨張側を推移する傾向を示した。既往の研究¹³⁾¹⁵⁾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し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も考察されている¹⁵⁾。

b) 乾燥収縮

コンクリートの長さ変化率の経時変化を図-13に、質量変化率と長さ変化率の関係を図-14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り、乾燥

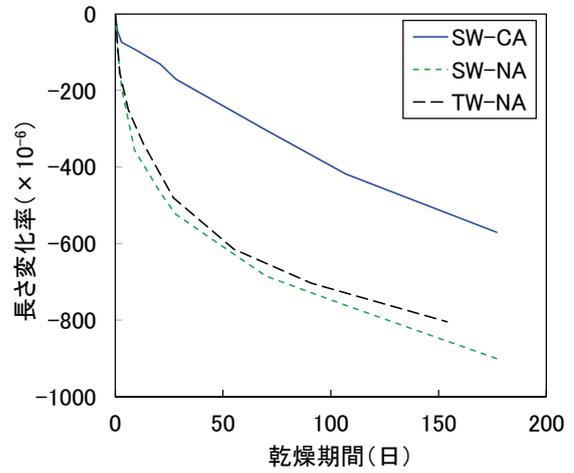


図-13 長さ変化率の経時変化

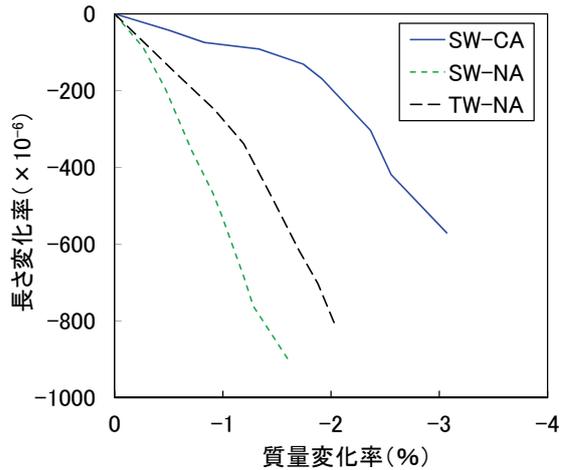
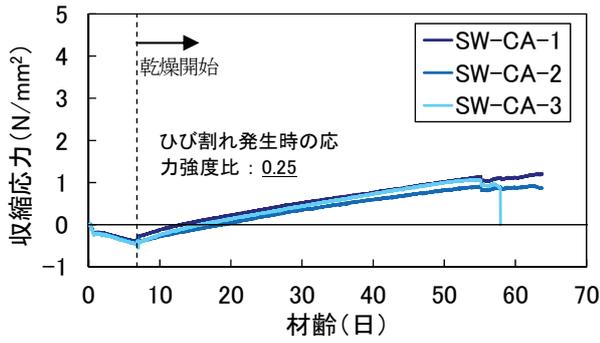


図-14 質量変化率と長さ変化率の関係

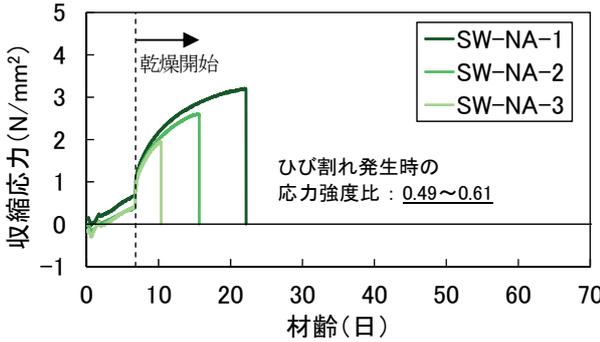
収縮が抑制されることが示唆された。これは、前述の自己収縮の影響も含まれると考えられるが、既往の研究¹⁵⁾によれば、骨材自体の収縮特性の違いが起因した可能性もある。

c) ひび割れ抵抗性

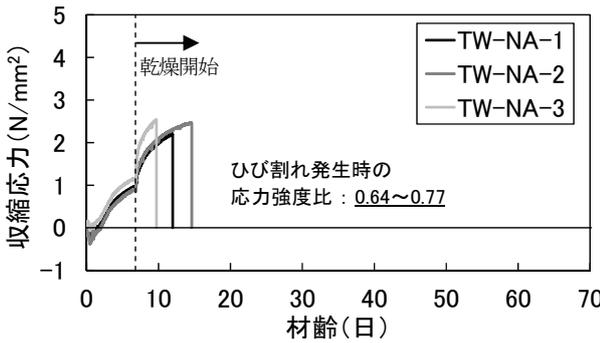
拘束を受けたコンクリートの乾燥に伴う収縮応力の経時変化を図-15に示す。なお、収縮応力は、ワイヤストレーンゲージにより計測した拘束形鋼のひずみから、コンクリートと形鋼にはたらく力のつりあい関係をもとに算定した値である。普通骨材を用いた場合、上水道水配合 (TW-NA) は乾燥開始から3～8日程度で、海水配合 (SW-NA) は3～15日程度でそれぞれひび割れが発生 (収縮応力が解放されて 0 N/mm^2 となった時点) し、後



(a) SW-CA



(b) SW-NA



(c) TW-NA

図-15 材齢と収縮応力の関係

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。一方、珊瑚粗骨材を用いた配合 (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。こ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が小さくなる特性からも想定できる結果といえる。

d) コンクリートの体積変化に関する考察

以上のように、骨材の違いによってコンクリートの体積変化の傾向が大きく異なることが明らかとなった。そこで、本研究ではその要因を推定するため、粗骨材単体の体積変化の挙動と、コンクリート中の骨材近傍の組織について確認を行った。

粗骨材の体積変化は、山田らの研究¹⁶⁾を参考に、径が 20mm 程度、吸水率が平均値程度の粗骨材を対象に、珊瑚粗骨材と普通粗骨材で比較した。写真-3 に示すとおり

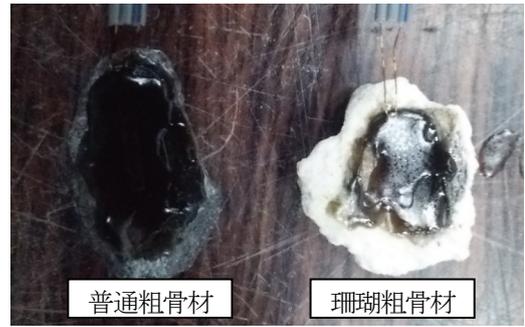


写真-3 粗骨材へのゲージ添付状況

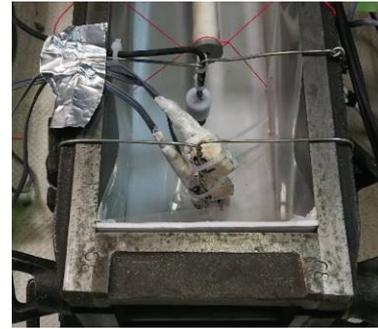
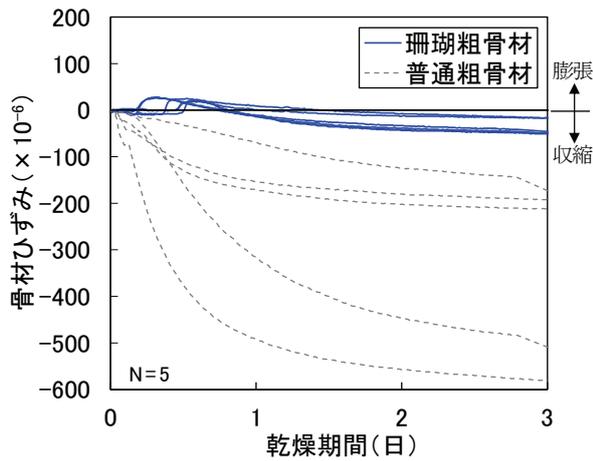


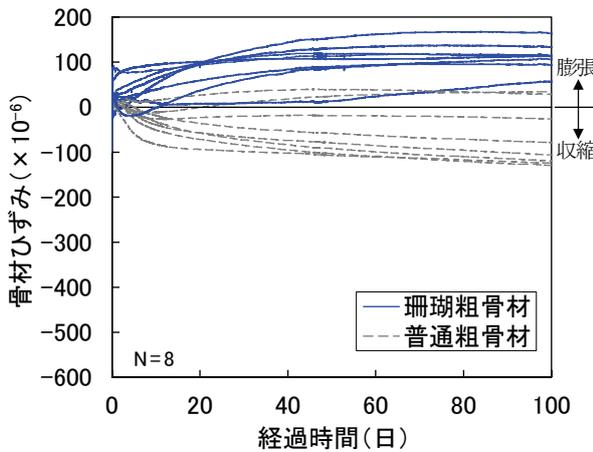
写真-4 粗骨材の設置状況

り、粗骨材の一部を研磨した後、防水処理を施したワイヤストレーンゲージを設置して粗骨材単体のひずみを測定した。これらの粗骨材は、24 時間以上吸水させて表乾状態にした後、20°C60%R.H.の雰囲気乾燥させたものと、自己収縮供試体と同じ方法で作製したコンクリート中に、写真-4 のように設置したものの 2 ケースとした。なお、コンクリートの配合は表-7 の No.1 および No.2 を用いた。

乾燥環境およびコンクリート中における粗骨材のひずみの経時変化を図-16 に示す。珊瑚粗骨材の収縮ひずみは、乾燥環境、コンクリート中のいずれのケースでも普通粗骨材に比べて小さくなる傾向を示し、コンクリート中ではやや膨張側を推移した。これらの傾向は、前述したコンクリートの自己収縮や乾燥収縮の結果に符合するものであり、コンクリートの体積変化の差異は、粗骨材の体積変化の違いが影響していたものと推察される。すなわち、珊瑚粗骨材の体積変化量は普通粗骨材に比べて小さいため、それを用いたコンクリートの体積変化も小さくなるようである。コンクリート中で珊瑚粗骨材が膨張するメカニズムは明らかでないが、例えば、前述のように、人工軽量骨材と同じようなインクボトル空隙を有する細骨材の内部養生効果により、モルタルの湿度が相対的に増加し、この湿度増加が粗骨材の体積変化に影響を与えた可能性が考えられる。なお、上記のコンクリートの供試体について、試験終了後(材齢約 15 週)に内部のコンクリート片を採取して含水率を測定した結果、珊瑚骨材を用いた場合が 6.9%、普通骨材を用いた場合



(a) 乾燥環境



(b) コンクリート中

図-16 骨材ひずみの経時変化

が 5.0 %であり、珊瑚骨材を用いたコンクリートのほうが高かった。

また、上記供試体中の骨材近傍の組織について、走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察を行った。粗骨材と粗骨材の観察像を、それぞれ図-17、図-18 に示す。珊瑚粗骨材の一部に水の出入り等に起因した粗な部分が見受けられたものの、全体的には骨材界面やその近傍の組織に明確な違いは見られず、骨材の種類の違いによる影響は認められなかった。

5. コンクリートの熱的性質

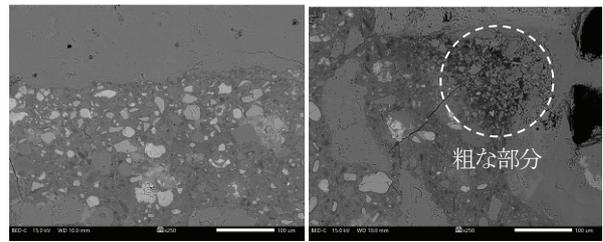
(1) 実験概要

a) 配合および使用材料

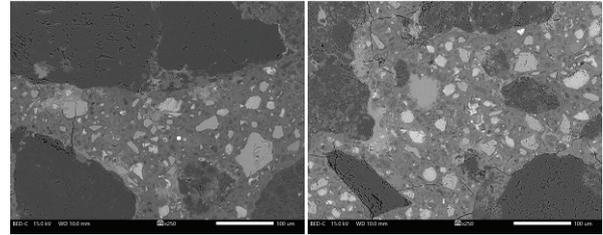
コンクリートの配合は、表-7 の No.1 と 2 の配合を用いた。

b) 試験項目および方法

コンクリートの熱的性質を把握するため、熱膨張係数、熱伝導率、熱拡散率および断熱温度上昇量を確認した。

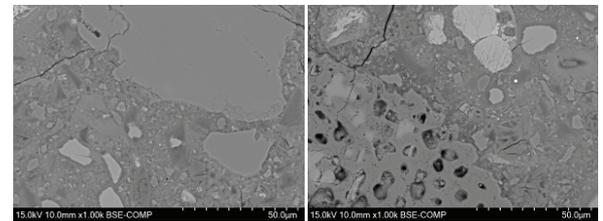


(a) 珊瑚粗骨材 (倍率: ×250)

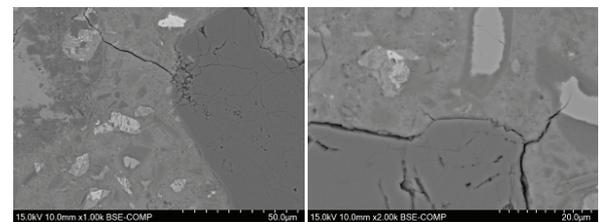


(b) 普通粗骨材 (倍率: ×250)

図-17 粗骨材の観察像



(a) 珊瑚細骨材 (倍率: ×1000)



(b) 普通細骨材 (倍率: ×1000)

図-18 細骨材の観察像

熱膨張係数は、 $\phi 100 \times 200$ mm のコンクリートの中心部に埋込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、雰囲気温度を $20^\circ\text{C} \rightarrow 60^\circ\text{C} \rightarrow 20^\circ\text{C}$ 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°C または 20°C 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-19 に示す。熱伝導率は、 $100 \times 100 \times 400$ mm のコンクリート供試体に加熱線の付いたプローブを押しあて、この時の供試体の温度上昇と時間の関係を演算して、熱伝導率を算出した。1 供試体あたり 10 箇所の測定を行い、その平均値を熱伝導率とした。熱伝導率の測定状況を写真-5 に示す。熱拡散率は、材齢 28 日まで $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体を標準養生した後、 60°C の恒温水槽に移し、供試体中心温度が水温と同一になり供試体内部に温度勾配が生じない状態になった時点で、直ちに 20°C の定常冷水中に移動し、供試体

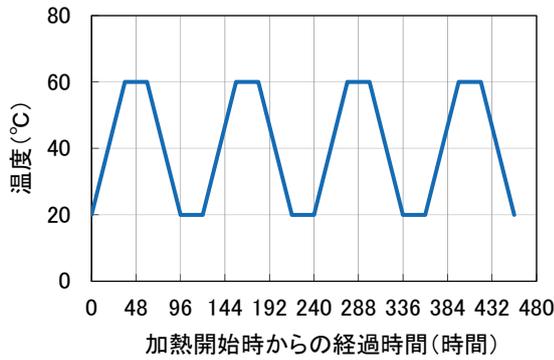


図-19 熱膨張係数試験の温度履歴



写真-5 熱伝導率の測定状況

中心温度及び水槽温度を2分間隔で60分間測定した。測定時間毎に熱拡散率を求め、測定時間20~60分の測定値の平均値を熱拡散率とした。断熱温度上昇量試験については、試験機には空気循環式試験機を使用し、コンクリートを円筒形容器(容積約55 l)に打ち込んだ後、ヒータを制御することでコンクリートを擬似的な断熱状態に保ち、コンクリート中心部の上昇温度が定常状態になるまで測定を行った。

(2) 実験結果および考察

a) 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-9、図-20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°Cから55°C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、埋込型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。普通骨材の配合(SW-NA)の熱膨張係数は14 μ°C程度となり、コンクリート標準示方書等に示される値(高炉B種: 12 μ°C)に比べてやや大きな値を示した。一方、珊瑚骨材の配合(SW-CA)は、SW-NAに比べて値が大幅に小さくなり、6 μ°C程度

表-9 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	-

単位: μ°C

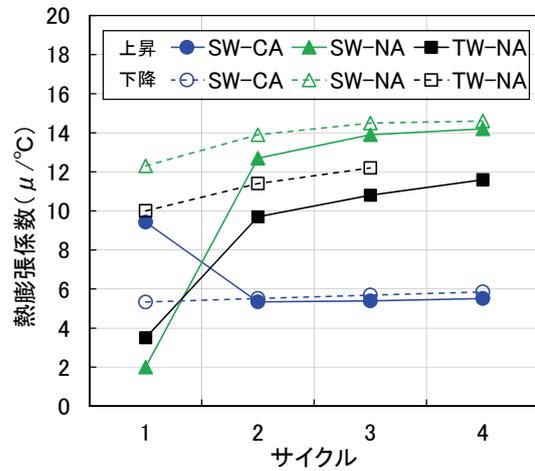


図-20 熱膨張係数の推移

表-10 試験結果一覧

試験項目	SW-CA	SW-NA
熱拡散率 (m/h)	0.00159	-
熱伝導率 (W/mK)	1.29	2.7 ^{**}
密度 (g/cm ³)	2.197	2.282
比熱 (kJ/kgK)	1.3	1.16 ^{**}
断熱温度上昇量	54.4 (1-exp(-1.08t))	53.8 (1-exp(-1.18t))
	C=411kg/m ³	C=386kg/m ³

※コンクリート標準示方書より

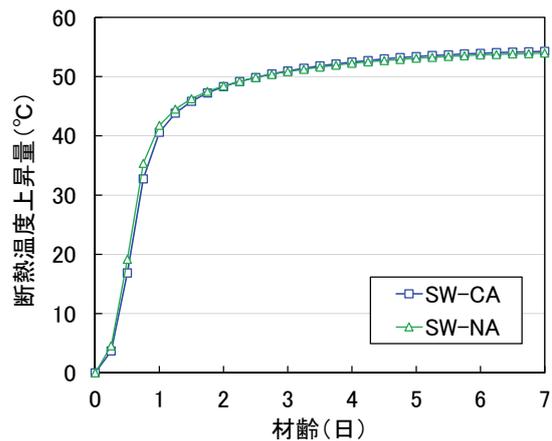


図-21 断熱温度上昇量の経時変化

であった。既往の文献¹⁷⁾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骨材のコンクリートに比べて小さく、6~9 μ°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影響を及ぼしたものと推察される。

表-11 コンクリート・モルタルの配合

記号※1	フロー スランプ (mm, cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	粗骨材 最大寸法 (mm)	単位粗骨 材容積 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)						混和剤 (C×%)			摩耗試 験回数 N	圧縮 強度※2 (N/mm ²)	
							海水 SW	セメント C	普通 細骨材 NS	珊瑚 細骨材 CS	普通 粗骨材 NG	珊瑚 粗骨材 CG	Ad1	Ad4	Ad5			
45-CA-315	600±50	-	45	50.8	25	0.315	185	411		845		756	1.4			2	56.5	
45-NA-315			45	52.0	20	0.315	175	389	880		838		756	1.1		2	51.5	
45-CA-360	15±2.5	4.5±1.5	45	45.1	25	0.360	175	389	764		958		864	0.8		1	50.2	
45-NA-360			45	45.1	20	0.360	175	389	764		958		864	0.7		2	48.3	
50-CA-315			50	52.9	25	0.315	175	350		920		958		756	0.9		1	46.2
50-CA-360			50	46.2	25	0.360	175	350		803		958		864	1.0		1	52.6
50-NA-315			50	52.9	20	0.315	175	350	913		838		864	0.7		1	45.2	
50-NA-360			50	46.2	20	0.360	175	350	797		958		864	0.4		1	45.3	
55-CA-315			55	53.6	25	0.315	175	318		946		958		756	1.7	2	44.8	
55-CA-360			55	47.0	25	0.360	175	318		829		958		864	1.1	3	42.5	
55-NA-315			55	53.6	20	0.315	175	318	939		838		864	1.2	1	37.0		
55-NA-360			55	47.0	20	0.360	175	318	823		958		864	1.0	3	40.0		
45-CA-M	モルタル フロー 200±20	-	45 45-CA-315から粗骨材を除いた配合										0.9		1	65.3		
45-NA-M			45 45-NA-315から粗骨材を除いた配合										0.6		1	58.4		
55-CA-M			55 55-CA-315から粗骨材を除いた配合											1.7	1	49.5		
55-NA-M			55 55-NA-315から粗骨材を除いた配合											1.0	1	35.0		

※1 W/C-骨材種類-単位粗骨材容積, M:モルタル ※2 摩耗試験回数が複数の場合は平均値を示す

b) 熱伝導率, 熱拡散率および比熱

各試験の測定結果を表-10 に示す。珊瑚骨材の配合 (SW-CA) は、コンクリート標準示方書に示されている普通骨材のコンクリートに比べて熱が伝わりにくい特徴を有するようである。

c) 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-21 に示す。珊瑚骨材の配合 (SW-CA) のほうが単位セメントが多いため、温度上昇量の大きくなることが想定されたが、本研究の範囲では、珊瑚骨材の配合 (SW-CA) と普通骨材の配合 (SW-NA) の温度履歴はほぼ同等であった。一般的に、コンクリートの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いる¹⁷⁾。表-10 に示すとおり、SW-CA は SW-NA に比べて比熱が大きく熱容量が大きかったため、これに起因する温度上昇量の低下が、単位セメント量の増加に伴う温度上昇量の増加と相殺し、結果的に断熱温度上昇量が同等になったものと推察される。

以上のように、珊瑚骨材を用いたコンクリートは、普通骨材を用いたコンクリートと同等の断熱温度上昇特性を有し、さらに熱膨張係数が小さくなるため、マスコンクリートに活用する場合は温度応力が低減し、有利になるものと考えられる。

6. コンクリートの耐摩耗性

(1) 実験概要

珊瑚骨材を用いたコンクリートの耐摩耗性を検証するため、表-11 に示す全 16 種類の配合を用いて検討を行った。本章では、前章までの自己充填型コンクリート (表-11 の 45-CA-315, 45-NA-315) の耐摩耗性を評価するにあたり、水セメント比や単位粗骨材容積の妥当性を検証



写真-6 流体エロージョン試験

すべく、水セメント比を 45, 50, 55 % の 3 水準, 単位粗骨材容積を 0.315, 0.360 m³/m³ の 2 水準とし、それぞれ珊瑚骨材と普通骨材を用いて比較した。また、水セメント比が 45, 55 % の一部の配合においては、粗骨材を除いたモルタルについても検討した。コンクリートの材料は、表-4 の材料に加えて、混和剤に高性能 AE 減水剤 (Ad4) や AE 減水剤 (Ad5) も使用した。コンクリートの耐摩耗性は、流体エロージョン試験 (ASTM C1138) に累積すり減り係数により評価した。流体エロージョン試験とは、写真-6 に示すような円筒状の容器の中に φ 300×110 mm の供試体を設置し、砂利を模擬した直径 12.6~25.3 mm の計 70 個の鋼球を水中で回転させ、供試体上面の単位面積あたりのすり減り量 (以下、すり減り係数と称す) を最大 72 時間まで測定するものである。

(2) 実験結果および考察

表-11 に示すとおり、同一水セメント比のコンクリート・モルタルの圧縮強度は、珊瑚骨材を用いた場合のほうが普通骨材に比べて大きくなる傾向を示し、モルタルのほうが顕著であった。これは、骨材表面の形状や水分移動等の影響による界面の付着性能が起因した可能性も考えられるが明らかではない。

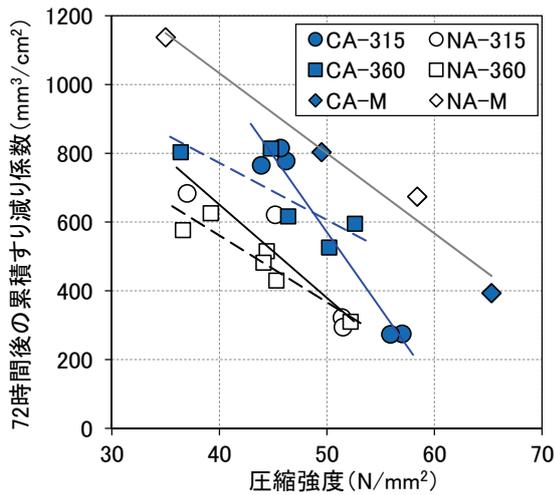


図-22 圧縮強度と累積すり減り係数の関係

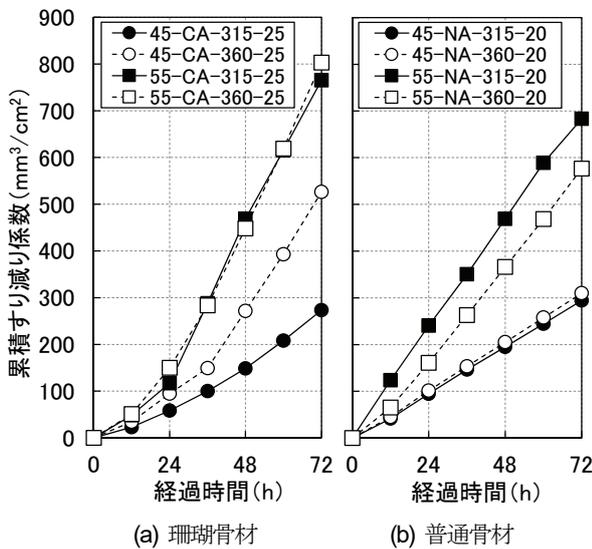


図-23 累積すり減り係数の経時変化

コンクリートの圧縮強度と 72 時間後の累積すり減り係数の関係を図-22 に示す。モルタル (◆◇印) の試験結果に着目すると、前述したとおり、同じ配合でも使用する骨材の種類によって強度差が生じたものの、累積すり減り係数との関係では骨材の種類に因らず高い相関が認められた。一方、コンクリートでは、全体的にモルタルより累積すり減り係数が小さくなる、すなわち耐摩耗性が向上する傾向を示したが、骨材の種類や単位粗骨材容積によって圧縮強度と累積すり減り係数の関係が異なった。コンクリートの耐摩耗性は、珊瑚骨材 (CA) のほうが普通骨材 (NA) に比べて低くなり、珊瑚骨材の脆さが影響する結果となった。コンクリート強度が比較的小さい領域においては、既往の知見¹⁸⁾と同様に、単位粗骨材容積の増加により耐摩耗性の向上が見られたものの、圧縮強度の増加に伴いその差は小さくなった。特に珊瑚骨材の場合は、脆弱な粗骨材の影響が顕著になるようである。

Gvol(m ³ /m ³)		0.315	0.360
W/C 45%	珊瑚骨材 CA		
	普通骨材 NA		
W/C 55%	珊瑚骨材 CA		
	普通骨材 NA		

写真-7 試験終了後の摩耗状況

セメント比 45, 55 %の配合における累積すり減り係数の経時変化を図-23 に、試験終了後 (72 時間後) の摩耗状況を写真-7 に示す。普通骨材 (NA) を用いた場合、いずれもほぼ直線的に累積すり減り係数が増加するのに対し、珊瑚骨材 (CA) を用いた場合には、水セメント比が 55%の配合 (■□印) や 45 %の単位粗骨材容積の大きい配合 (○印) において、勾配が増加する変化点が認められた。これは、表面のモルタルが先行して摩耗した後、脆い珊瑚粗骨材が露出することで摩耗が加速したためと推察され、珊瑚骨材を用いたコンクリートの特徴といえるが、同図に示すとおり、水セメント比や単位粗骨材容積を小さく設定した本研究の自己充填型コンクリート (W/C = 45 %, 単位粗骨材容積 0.315 m³/m³) であれば、普通骨材を用いた場合と同程度の耐摩耗性を確保できると考えられる。

7. 結論

珊瑚由来の石灰石骨材の特徴とそれを用いた海水練りコンクリートの性質について検討した結果、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 珊瑚骨材は内部に多くの空隙を有する構造であり、普通骨材に比べて吸水率が大きく、粒子間のばらつきも大きい。また、その空隙構造は多様であり、人工軽量骨材が有するようなインクボトル空隙も若干確認された。
- (2) 上記のような品質の珊瑚骨材でも、適度な粘性を有する本研究の自己充填型コンクリートへ適用する限

りでは、所要の流動性や間隙通過性を確保できる。ただし、普通骨材を用いた場合に比べて加圧ブリーディング試験における脱水量が少なくなり、骨材の加圧吸水に伴うフレッシュ性状の変化が懸念されるため、コンクリートをポンプ圧送により打ち込む場合は留意が必要である。

- (3) 珊瑚骨材を用いたコンクリートの強度発現性について、圧縮強度は練混ぜ水の種類の違いによる影響が支配的であり、骨材の種類の違いによる影響は少ないが、静弾性係数は普通骨材を用いた場合に比べてやや小さくなる。
- (4) 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。また、乾燥収縮も、普通骨材を用いた場合に比べて小さくなり、拘束が作用したときのひび割れは、発生するまでの期間が長くなる。珊瑚骨材を用いたコンクリートの収縮が普通骨材に比べて小さくなる現象は、珊瑚骨材自体の体積変化の差異が起因している可能性がある。
- (5) 練混ぜ水に海水を用いたコンクリートの熱膨張係数は、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により、人工軽量骨材と同様に小さくなる。また、普通骨材を用いた場合に比べて熱伝導率や熱拡散率は小さく、比熱は若干大きくなるが、断熱温度上昇量については、本研究の範囲では骨材の種類の違いによる明確な差は認められなかった。
- (6) 珊瑚骨材を用いたコンクリートは、普通骨材を用いた場合に比べて耐摩耗性が低下するが、本研究の自己充填型コンクリートの配合条件 (W/C = 45 %, 単位粗骨材容積 0.315 m³/m³) であれば、普通骨材を用いた場合と同程度の性能を確保できる。

謝辞：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。また、本研究の一部で実施した流体エロージョン試験については、秋田大学が保有する試験装置を用いて行ったものである。ここに、試験の実施ならびに評価に際してご協力をいただいた徳重英信教授、高橋良輔准教授に謝意を表す。

参考文献

- 1) 酒井貴洋, 山路 徹, 清宮 理: 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, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.72, No.3, pp.196-213, 2016.
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 竹中 寛, 谷口 修, 山路 徹, 清宮 理: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1567-1572, 2017.6
- 5) 吉田 亮, 小幡雄一郎, 齊藤和秀, 梅原秀哲: インクボトル関係を内包する人工骨材および天然骨材の空隙構造に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.107-112, 2010.6
- 6) 土木学会: コンクリートのポンプ施工指針, コンクリートライブラリー135, 2012.
- 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) 山路 徹, 与那嶺 一秀, 川端 雄一郎: サンゴ骨材を用いたコンクリートの施工性および耐久性に関する検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.71, No.1, pp.394-401, 2017.
- 9) 榎場重正, 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
- 10) 西田孝弘, 大即信明, 鬼塚良介, Wanchai Yodsudjai, 横倉順治: 環太平洋地域の低品質粗骨材を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性に関する研究, 土木学会論文集, No.746/V-61, pp.103-114, 2003.11
- 11) 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
- 12) 新井 暢, 中村成春, 榎田佳寛, 阿部道彦: 再生細骨材コンクリートの強度及び変形性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.1081-1086, 1997.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.

- 17) 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
クリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.709-714，2009.
- 18) 高野智弘，寺田哲美，山中誠：水中環境下のコンクリートならびにモルタルの耐摩耗性について，コン
(Received December 24, 2019)
(Accepted August 18, 2020)

EFFECTS OF LIMESTONE AGGREGATE DERIVED FROM CORALS ON PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE MIXED WITH SEAWATER

Hiroshi TAKENAKA, Osamu TANIGUCHI, Ryoichi TANAKA,
Kazuhide YONAMINE, Toru YAMAJI and Osamu KIYOMIYA

Experimental studies were conducted on fundamental properties, shrinkage properties, thermal properties, and wear properties of self-compacting concrete mixed with seawater and limestone aggregate derived from corals assuming use on isolated islands. As a result, the concrete using this aggregates with many voids had excellent fluidity, moderate segregation resistance, and the same strength development as when using ordinary aggregates. In addition, shrinkage and thermal expansion coefficient were smaller than that of concrete using ordinary aggregate. Furthermore, even when coral aggregate was used, abrasion resistance of concrete equivalent to that when using ordinary aggregate could be secured by setting the water cement ratio and unit coarse aggregate volume small.