

論文 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

竹中 寛^{*1}・酒井 貴洋^{*2}・山路 徹^{*3}・清宮 理^{*4}

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骨材の特性と、それを用いたコンクリートの基本性能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海水や低品質な珊瑚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、上水道水や普通骨材を用いた場合と同等程度の強度発現性を示すことが明らかとなった。

キーワード：珊瑚骨材, 海水, 自己充填型コンクリート, 特殊混和剤

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¹⁾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。

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多く有する離島がある。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。本稿は、これまでの検討で得られた知見のうち、珊瑚骨材の特徴、それを用いたフレッシュコンクリートや硬化コンクリートの基本性能について、普通骨材を用いた過去の検討結果²⁾と比較して考察したものである。

2. 珊瑚骨材

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、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、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おり、**図-1**の蛍光X線分析の試験結果によると、その主成分は炭酸カルシウムであると推定される。JIS等の試験方法に準じて求めた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-2**に示す。これらの結果より、珊瑚骨材は、比較用の普通骨材に比べて微粒分量が多い、吸水率が大きい、粗骨材が脆い（すりへり減量や破碎値が大きい）などの特徴を有し、また、**写真-1**に示す

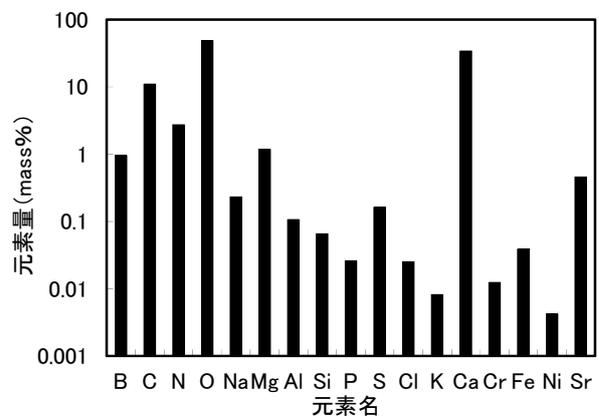


図-1 珊瑚骨材の構成成分

*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 課長 工修 (正会員)

*3 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)

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 (硬質砂 岩砕石)
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
破砕値 (%)	—	—	36.9	—

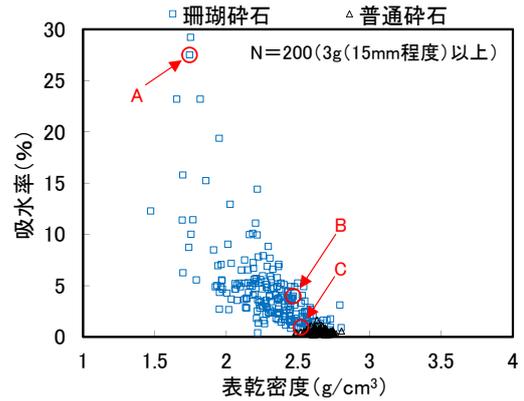


図-3 粗骨材の表乾密度と吸水率の関係

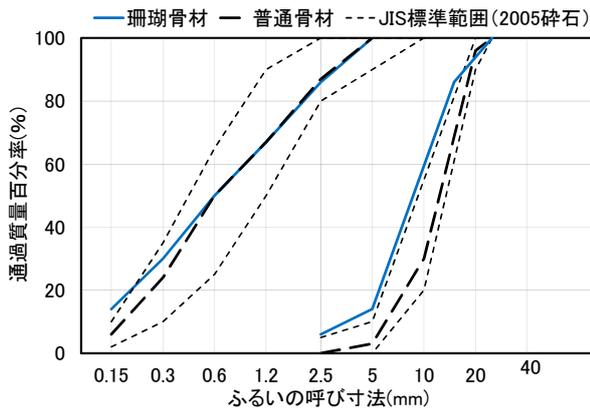


図-2 骨材の粒度分布



写真-1 珊瑚粗骨材

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。なお、粗骨材の粒子間における品質のばらつきは、図-3の表乾密度と吸水率の関係からもわかるように、珊瑚骨材のほうが普通骨材に比べて大きく、普通骨材の表乾密度と吸水率の標準偏差がそれぞれ 0.05g/cm^3 と 0.19% であったのに対し、珊瑚骨材では 0.24g/cm^3 と 4.24% であった。なお、表乾密度と吸水率は、粒径が 15mm 以上の珊瑚骨材と普通骨材をそれぞれ任意に 200 個ずつ選定し、個々の粒子の表乾状態の気中・水中質量、乾燥 ($105^\circ\text{C} \times 24$ 時間) 後の気中質量から算定した。図中の珊瑚骨材 A (吸水率 27.5%)、B (吸水率 4.0%) および C (吸水率 0.9%) の拡大像を写真-2 に示す。骨材 A は、 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 程度の細孔が網状に多く存在していたのに対し、骨材 C では、細孔や空隙は僅

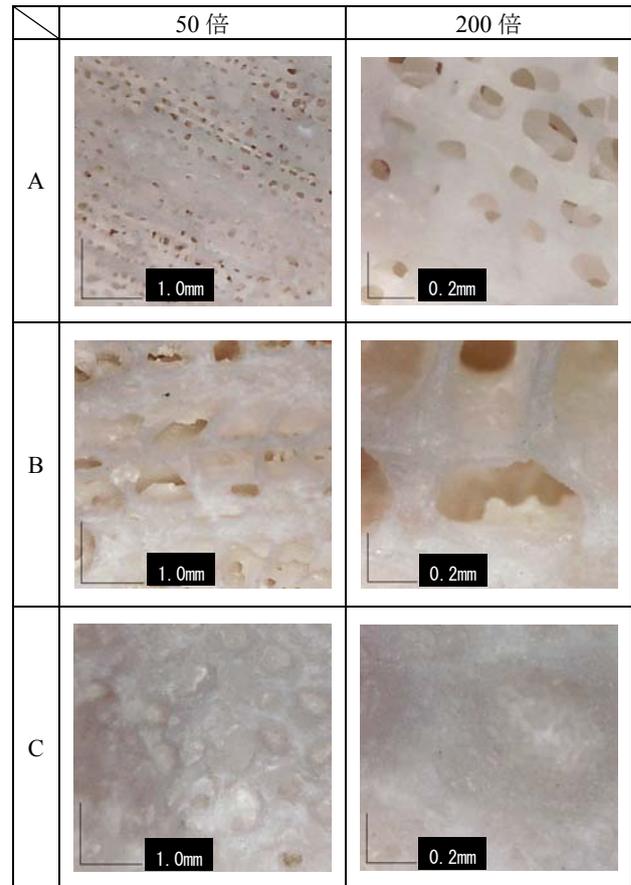


写真-2 珊瑚粗骨材の拡大像

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、 $0.2\sim 1\text{mm}$ 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。骨材 B のような形態の骨材は、細かな空隙を有する骨材 A に比べて保水性が劣り、表乾状態に調整して使用する場合でも、骨材の内部には空気層が残留する可能性がある。

3. 試験概要

3.1 配合および使用材料

コンクリートの配合を表-2 に示す。配合は、練混ぜ

表-2 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 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)						混和剤 (C×%)			環境温度 (°C)	塩化物イオン量 (kg/m ³)	練混ぜ完了後の試験結果		
					上水 TW	海水 SW	セメント C	陸砂 NS	珊瑚砕砂 CS	砕石 NG	珊瑚砕石 CG	Ad1	Ad2			Ad3	フロー (mm)	空気量 (%)
1	SW-CA	45	50.8	0.315	—	185	411	—	845	—	756	1.25	—	—	20	3.71	555	5.8
												—	1.35	1.00			35	645
2	SW-NA	45	49.7	0.330	—	175	389	848	—	878	—	1.65	—	—	20	3.20	610	4.3
																	—	—
3	TW-NA	45	49.7	0.330	175	—	389	848	—	878	—	1.45	—	—	20	0.05	605	4.5
																	—	—

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±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。また、35°Cの高温環境の場合、全ての配合で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（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-3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。海水の成分は表-4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%）から水量を補正して練混ぜを行った。また、一部の配合に使用した流動性保持剤は、本研究において開発したポリカルボン酸系のもので、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。

3.2 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-5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、加圧吸水する傾向が認められた³⁾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。硬化品質（圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度）を確認するための供試体は、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。

表-3 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-4参照
セメント	C	高炉セメントB種	密度3.04g/cm ³
	NS	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
細骨材	CS	珊瑚砕砂（遠隔離島産）	表乾密度2.60g/cm ³ 、吸水率3.30%、粗粒率2.53
	NG	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
粗骨材	CG	珊瑚砕石（遠隔離島産）	表乾密度2.40g/cm ³ 、吸水率5.13%、最大寸法25mm
	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
混和剤	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-4 海水の成分

密度 [20°C] (g/cm ³)	pH [20°C]	固形分濃度 [105°C, 3hr] (%)			
1.022~1.025	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-5 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：練混ぜ後0, 30, 60, 90分 フロー時間：500mm到達時、停止時
空気量	JIS A 1128	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
ブリーディング	JIS A 1123	
加圧ブリーディング	JSCE-F 502	
凝結時間	JIS A 1147	
圧縮強度	JIS A 1108	養生条件：20°Cまたは35°C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
割裂引張強度	JIS A 1113	試験材齢：(1), (3), 7, 28日(SW-CAのみ)

4. コンクリートの基本性能

4.1 フレッシュコンクリート

(1) 流動性

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-4に示す。20°Cと35°C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範囲（600±50mm）を満足した。図に併記したとおり、35°Cの高温環境においては、標準型の混和剤のみで流動性を長時間保持することができなかったが、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

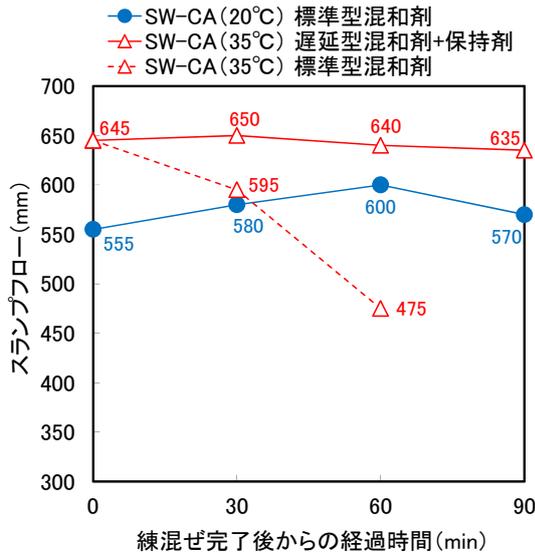


図-4 スランプフローの経時変化

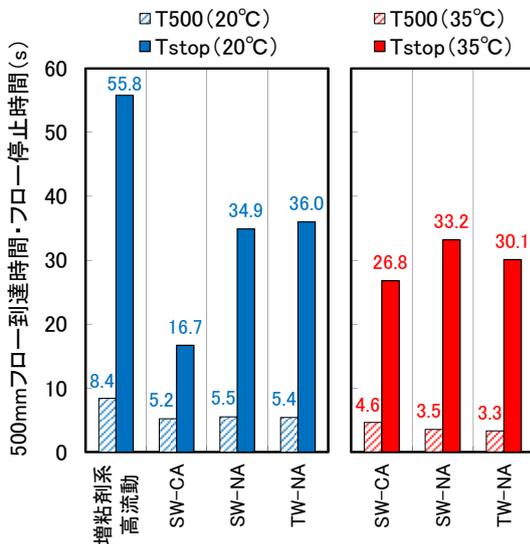


図-5 スランプフロー時間

場合でも所要の性能を保持できることがわかった。なお、品質のばらつきの大きい珊瑚骨材ではあるが、適度な粘性を有する本研究のコンクリートに適用する範囲では、表面水率の補正を確実にすることで普通骨材と同等のフレッシュ性状の再現性が得られることを実証している。

練混ぜ完了後の 500mm フロー到達時間 (T500) と停止時間 (Tstop) を図-5 に示す。本研究で検討した配合は、20°C と 35°C 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⁶⁾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°C 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。

(2) 自己充填性

U 形充填試験における、コンクリートの充填高さおよ

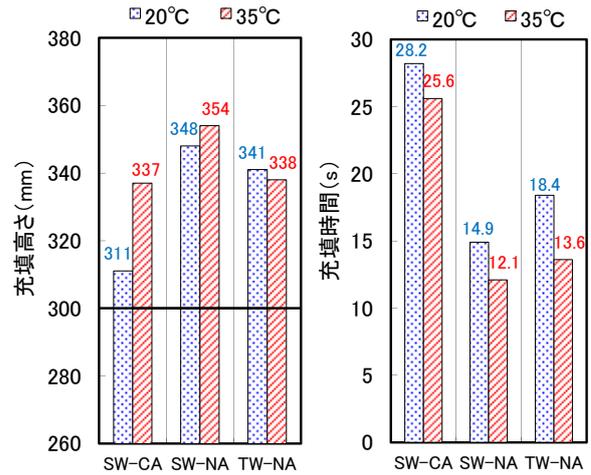


図-6 U 形充填高さ・時間

び充填時間を図-6 に示す。全ての配合において充填高さは 300mm 以上の値を示し、高流動コンクリート施工指針 (土木学会) のランク 2 に相当する自己充填性が認められた。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) や粘性が低下する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、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ためであると推察される。

(3) 材料分離抵抗性

コンクリートのブリーディング率を図-7 に示す。海水および珊瑚骨材を用いた配合 (SW-CA) のみ、35°C の環境でもブリーディングが認められた。これは、遅延型の混和剤を用いたことにより、他の配合に比べ硬化が遅延したためと考えられるが、その量は 0.4% と若干であり、コンクリートの品質に及ぼす影響は小さいといえよう。

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-8 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⁾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 (静水圧中や表乾状態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と推察される。本研究のコンクリートは流動性に優れるため、普通コンクリートに珊瑚骨材を用いる場合に比べるとポンパビリティの低下に伴うリスクは小

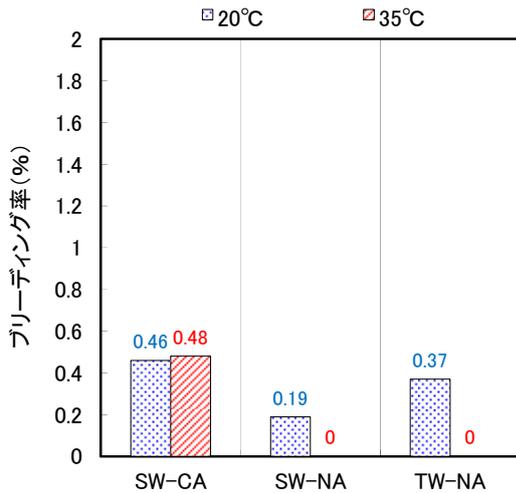


図-7 ブリーディング率

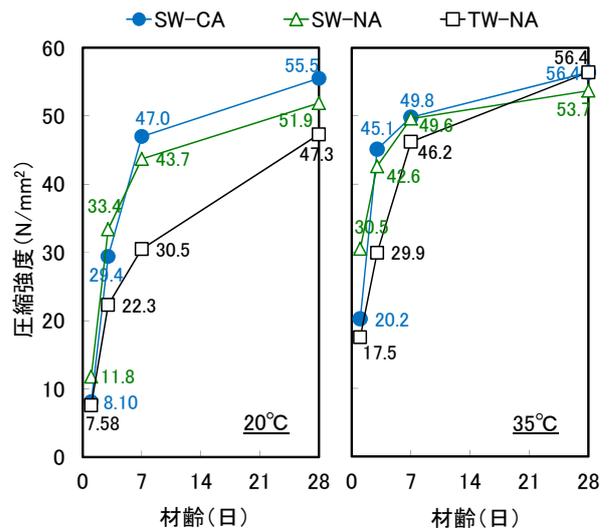


図-9 圧縮強度

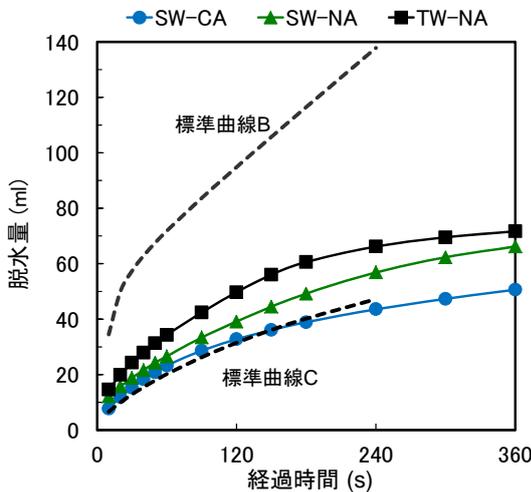


図-8 加圧時の脱水量の経時変化

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の留意が必要である。

4.2 硬化コンクリート

(1) 強度発現性

コンクリートの材齢と圧縮強度の関係を図-9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既往の研究⁵⁾で示唆されており、本研究の結果もそれに符号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。既往の文献⁴⁾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、20°Cと35°Cのいずれの環境でも、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低下する傾向は認められなかった。これは、上記の文献で用いた骨材に比べ、今回用いた珊瑚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、骨材の種類の違いによる影響が表れ難くなったためであると考えられる。

(2) 静弾性係数および割裂引張強度の特性

圧縮強度と静弾性係数および割裂引張強度の関係を、それぞれ図-10、図-11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、それぞれ既往の文献⁶⁾に示されている式(1)、(2)を用いて算定した。

$$E_c = 6.3 \cdot f'_c{}^{0.45} \quad (1)$$

ここに、 E_c : 静弾性係数 (kN/mm²)
 f'_c : 圧縮強度 (試験値) (N/mm²)

$$f_t = 0.13 \cdot f'_c{}^{0.85} \quad (2)$$

ここに、 f_t : 引張強度 (N/mm²)
 f'_c : 圧縮強度 (試験値) (N/mm²)

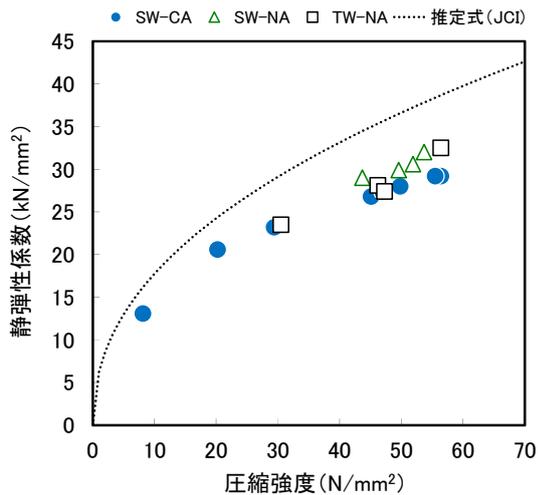


図-10 圧縮強度と静弾性係数の関係

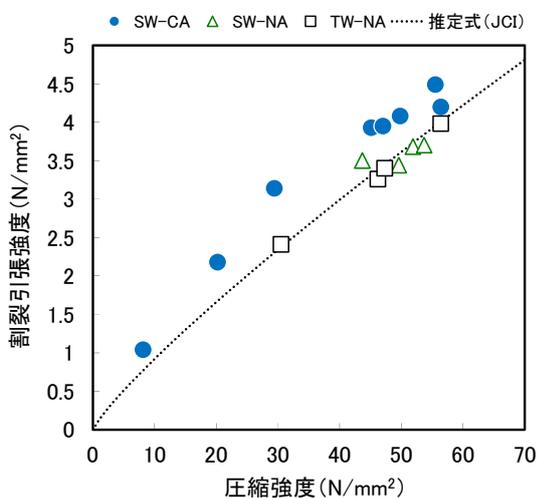


図-11 圧縮強度と割裂引張強度の関係

図示したとおり、静弾性係数と割裂引張強度は、若干のばらつきは見受けられるものの、練混ぜ水や骨材の種類によらず圧縮強度と概ね一様な相関が認められた。なお、本研究の範囲では、静弾性係数の値が推定値に比べてやや小さくなっている。これは、骨材の種類や配合の違いによるばらつきの範囲と考えるが明らかではない。

5. まとめ

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) コンクリートの品質に及ぼす影響が大きいとされていた、形状や品質の悪い珊瑚骨材でも、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、所定の性能が得られる。

- (2) 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) コンクリートの強度発現性について、ブリーディングの少ない本研究の配合の範囲では、練混ぜ水の種類の違いによる影響が支配的であり、骨材の違いによる影響は比較的小さい。
- (4) 静弾性係数と割裂引張強度は、若干のばらつきは見受けられるものの、練混ぜ水や骨材の種類によらず圧縮強度と概ね一様な相関がある。

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㈱、東亜建設工業㈱、東洋建設㈱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, 内藤英晴, 羽瀧貴士, 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
- 3) 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
- 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) 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
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書【設計編】, 2012