

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.59 No.2 Sep 2020

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME,
PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

総目次

1. 珊瑚骨材を用いたコンクリートの海洋構造物への適用可能性に関する検討
西田 孝弘, 山路 徹, 与那嶺 一秀, 谷口 修, 田中 亮一, 竹中 寛, 清宮 理…………… 3
2. 波による地盤を含む護岸の不安定化に関する遠心模型実験
高橋 英紀……………31
3. カルシア改質土と異種材料との境界における摩擦特性
松村 聡, 水谷 崇亮, 森川 嘉之, 赤司 有三, 本田 秀樹, 清水 雅浩……………51
4. 非負制約最小二乗法による高精度な方向スペクトル推定手法および情報量規準に基づく
Spectral partitioning 手法の提案
藤木 峻, 川口 浩二…………… 84

珊瑚骨材を用いたコンクリートの 海洋構造物への適用可能性に関する検討

西田 孝弘*¹・山路 徹*²・与那嶺 一秀*³・
谷口 修*⁴・田中 亮一*⁵・竹中 寛*⁶・清宮 理*⁷

要 旨

日本本土の南方には、珊瑚が化石化した石灰岩（以下、珊瑚骨材と称す）が多く堆積している。そのような地域の遠隔離島では、現地で調達できる海水と珊瑚骨材を、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。ただし、珊瑚骨材は内部に多くの空隙を有する構造であり、普通骨材に比べて品質が劣るとされる。また、自己充填性を有するコンクリートを使用することで、施工の省力化が図れると期待できるが、珊瑚骨材を用いた場合の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。

以上を踏まえ、本研究では、珊瑚骨材を用いたコンクリートの海洋構造物への適用可能性を検討するため、南鳥島で採取した珊瑚骨材の特徴を整理した。また、骨材として珊瑚骨材を、練混ぜ水として海水を使用し、さらに自己充填性を付与したコンクリートを主対象とし、基礎的性質、収縮特性、熱的性質等について実験的検討を行った。一方、沖縄で産出された珊瑚骨材を用いたコンクリートの海洋暴露試験が 1976 年に開始されており、本研究では、長期曝露後の供試体の調査（44 年間経過後）を行い、海水が作用する環境での長期挙動（耐海水性）の評価を行った。

知見を以下に示す。

- 1)自己充填型コンクリートへ適用した際、所要の流動性や間隙通過性を確保できることが確認された。ただし、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。
- 2)硬化後のコンクリートについては、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が確認された。
- 3)海中および干満環境に 40 年以上暴露された後においても、本研究で対象としたコンクリートは圧縮強度の強度増進が確認された。

以上の検討により、珊瑚骨材は内部空隙が多く、低品質な場合もあるが、対象環境の特徴を踏まえ、適切な配合を使用することで、コンクリート用骨材として海洋環境においても十分適用可能なことが示された。

キーワード：海洋コンクリート構造物，珊瑚骨材，圧縮強度，収縮，長期暴露

*1 構造研究領域 材料研究グループ 主任研究官

*2 構造研究領域 領域長

*3 構造研究領域 材料研究グループ 研究官

*4 五洋建設

*5 東亜建設工業

*6 東洋建設

*7 早稲田大学名誉教授

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5013 Fax：046-844-0255 e-mail: nishida-ta@p.mpat.go.jp

Investigation of Applicability of Coral Based Aggregate on Marine Concrete Structures

Takahiro NISHIDA*
Toru YAMAJI**
Kazuhide YONAMINE***
Osamu TANIGUCHI****
Ryoichi TANAKA*****
Hiroshi TAKENAKA*****
Osamu KIYOMIYA*****

Synopsis

In the southern part of the Japanese mainland, many coral limestone rocks have been deposited. In remote islands in such areas, it is desirable to use aggregates manufactured from locally available seawater and coral-derived limestone (hereinafter referred to as "coral aggregates") as concrete materials from the standpoint of economic efficiency and production efficiency. However, the quality of coral aggregate is inferior to that of ordinary aggregate because of the many pores in its structure. In addition, the use of self-filling concrete is expected to save labor in construction, but there has been no study on self-filling concrete using coral aggregate so far.

In this study, the characteristics of coral aggregates collected at Minamitori Island were summarized in order to investigate the applicability of concrete using coral aggregates to marine structures. Coral aggregate was used as the aggregate and seawater was used as the mixing water, and self-filling concrete was investigated experimentally. On the other hand, the marine exposure test of concrete using coral aggregate was started in 1976, and in the present study, the long-term behavior (seawater resistance) of concrete specimens after long-term exposure (after 44 years) was evaluated.

The findings are presented below.

- 1) It was confirmed that the required flowability and pore passability could be ensured when applied to self-filling concrete. However, since there is a concern about the change in freshness of the aggregate due to pressurized water absorption, it is necessary to keep in mind when pouring concrete by pumping.
- 2) It was confirmed that concrete after curing had the same level of strength expression as that of ordinary aggregate, and that the shrinkage strain and thermal expansion coefficient were smaller.
- 3) Even after more than 40 years of exposure to marine and tidal environments, the concrete subjected in this study showed an increase in compressive strength.

The above study shows that coral aggregate has many internal pores and is of low quality in some cases, but it can be sufficiently applied as an aggregate for concrete in the marine environment by using an appropriate formulation based on the characteristics of the target environment.

Key Words: Marine concrete structure, coral aggregate, compressive strength, shrinkage, long term exposure

* Senior Researcher, Materials Group, Structural Division
** Head, Materials Group, Structural Division
*** Researcher, Materials Group, Structural Division
**** Penta Ocean Construction Co., LTD.
***** Toa Corporation
***** Toyo Construction Co., LTD.
***** Professor Emirates, Waseda University
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5013 Fax : +81-46-844-0255 e-mail: nishida-ta@p.mpat.go.jp

目 次

要 旨	3
1. はじめに	6
2. 珊瑚骨材の特徴	6
2.1 物理的特性	6
2.2 化学成分	7
2.3 空隙構造	7
2.4 骨材の圧力吸水特性	8
2.5 まとめ	8
3. 自己充填性を付与したコンクリートの諸特性	9
3.1 はじめに	9
3.2 フレッシュ性状	9
3.3 圧縮強度	11
3.4 耐摩耗性	11
3.5 収縮特性	12
3.6 熱的性質	15
3.7 塩分浸透性	17
3.8 コンクリート梁の力学特性	17
3.9 まとめ	19
4. 海洋環境に長期暴露後のコンクリート特性	20
4.1 はじめに	20
4.2 試験体概要	20
4.3 外観観察	20
4.4 圧縮強度	21
4.5 中性化深さ	26
4.6 まとめ	26
5. おわりに	28
謝辞	29
参考文献	29

1. はじめに

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、建設作業員の確保が困難な場合も多い。コンクリートは地産地消の材料であり、離島においてコンクリートを製造・施工する場合、1) 施工場所の近傍で調達可能な材料を使用すること、2) 施工効率を向上すること、などが求められる。以下、1), 2) について、本報告での検討内容に関連するものを補足説明する。

1) 施工場所の近傍で調達可能な材料を使用

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）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。しかし、珊瑚骨材は内部に多くの空隙を有する構造であり、普通骨材に比べて品質が劣るとされる¹⁾。また、珊瑚骨材を用いたコンクリートを海洋環境下で長期暴露した際のコンクリートの性能については検討事例が少ない。

2) コンクリートの施工効率の向上

離島においては、建設作業員やその宿泊施設の確保が困難な場合があり、施工の効率化・短期化が望まれる。この方策の1つとして、著者らは、自己充填性を有するコンクリートを使用した締固め作業の効率化に着目し、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²⁾。ここで、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。本検討では、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、この課題を改善した²⁾。しかし、珊瑚骨材を使用し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。

以上を踏まえ、本研究では、珊瑚骨材を用いたコンクリートの海洋構造物への適用性を検討するため、南鳥島で採取した珊瑚骨材の特徴を整理した。また、骨材として上記の珊瑚骨材を、練混ぜ水として海水を使用し、さらに自己充填性を付与したコンクリートを主対象とし、このコンクリートの基礎的性質、収縮特性、熱的性質について実験的検討を行った。一方、沖縄で産出された珊瑚骨材を用いたコンクリート（骨材の組合せは4種類）の海洋暴露試験が1976年に開始されている¹⁾。本研究では、長期暴露後の供試体の調査（約44年間暴露）を行い、海水が作用する環境での長期挙動（耐海水性）の評価を行った。

2. 珊瑚骨材の特徴

2.1 物理的特性

本検討で使用した珊瑚骨材は、南鳥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、5～25 mm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、比較用の普通骨材に比べて微粒分量が多い、吸水率が高い、すりへり減量が多い（すなわち粗骨材が脆い）などの特徴を有していた。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。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、15mm以上の珊瑚骨材と普通骨材をそれぞれ任意に

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	—

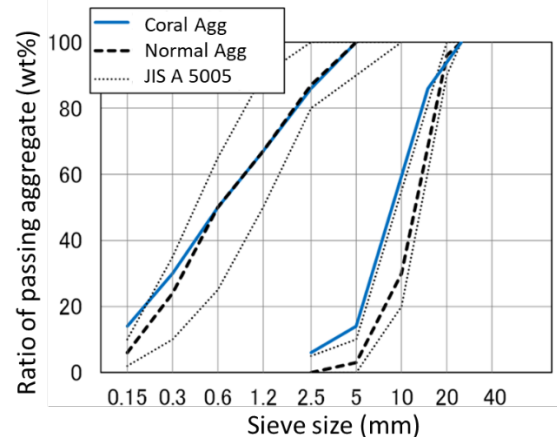


図-1 骨材の粒度分布



写真-1 珊瑚粗骨材の外観

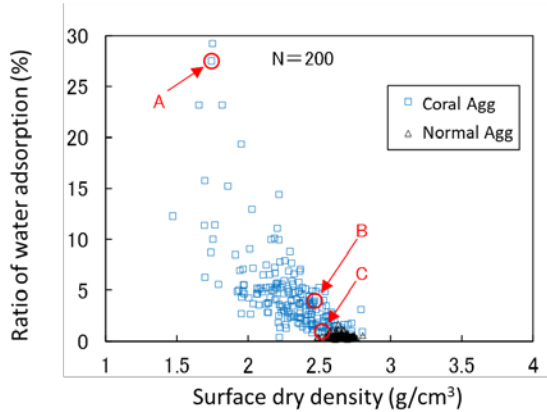


図-2 粗骨材の表乾密度と吸水率の関係

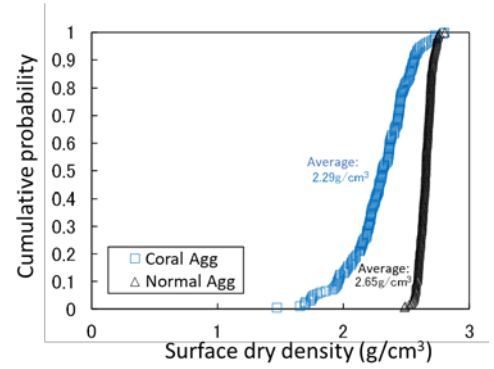
約 200 個ずつ選定し、個々の粒子の表乾状態の気中質量・水中質量、乾燥 (105°C, 24 時間) 後の気中質量から算定した。これらの図より、珊瑚骨材のほうが普通骨材に比べてばらつきの大いことが分かり、普通骨材の表乾密度と吸水率の標準偏差がそれぞれ 0.05g/cm³ (平均値: 2.65 g/cm³) と 0.19% (平均値: 0.45%) であったのに対し、珊瑚骨材では 0.24 g/cm³ (平均値: 2.29 g/cm³) と 4.24% (平均値: 4.70%) であった。

2.2 化学成分

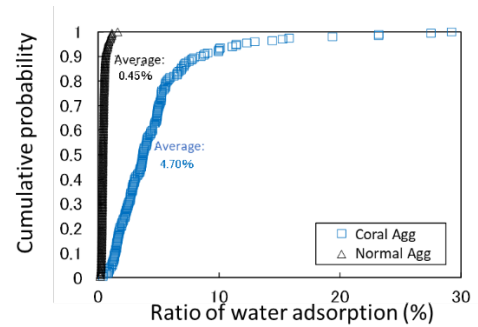
蛍光 X 線分析による珊瑚骨材の構成成分を図-4 に示す。図より、Ca (カルシウム)、O (酸素)、C (炭素) の元素が多く含まれていることから、主成分は炭酸カルシウムであると推定される。これより、一般的な砕石等の骨材よりも石灰石骨材に近い化学特性を有すると考えられる。

2.3 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 に示した珊瑚骨材 A (吸水率 27.5%), B (吸水率 4.0%) および C (吸水率 0.9%) を意味する。表乾密度や吸水率が高かった骨材 A は、0.1~0.2 mm 程度の粗大空隙が網状に多く存在していた。一方、表乾密度および吸水率が平均的な値を示した骨材 B については、骨材 A と同様に内部に粗大空隙を多く有し



a) 表乾密度



b) 吸水率

図-3 粗骨材の表乾密度と吸水率の累積確率

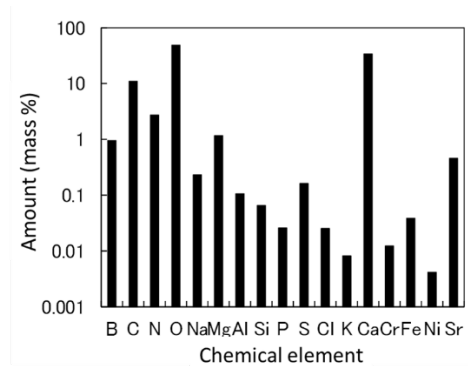


図-4 珊瑚骨材の構成成分

ていたが、0.2~1 mm 程度の比較的大きく不規則な孔であった。さらに、表乾密度および比較的低い骨材 C では、上記の粗大空隙は僅かであった。したがって、珊瑚骨材の場合、同一石灰岩から製造された骨材であっても空隙の形態には相違がみられ、これらの相違が表乾密度や吸水率のばらつき影響していると考えられる。コンクリートを製造する際には、これらの品質の違いがコンクリートのフレッシュ性状および効果性状に及ぼす影響を把握し、品質管理方法を確立することが今後の課題と考えられる。以上のように、珊瑚骨材には微細なものから粗大なもの

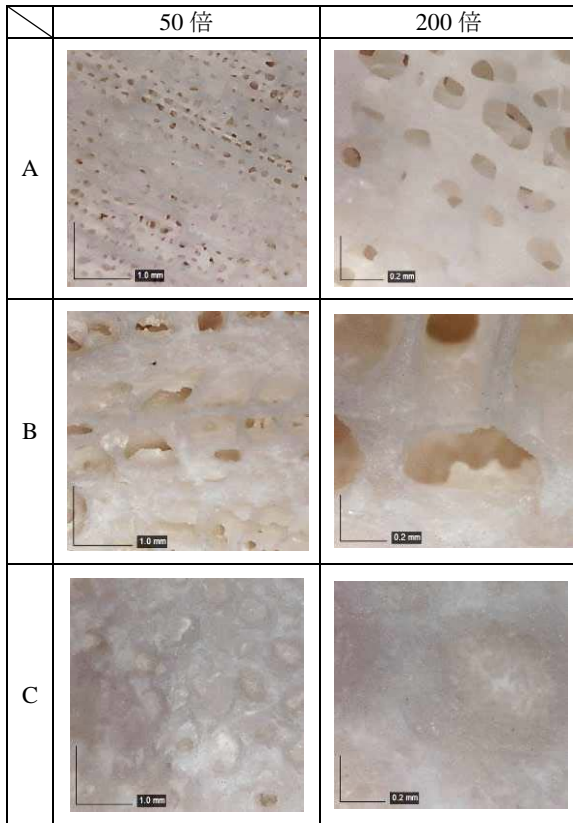


写真-2 珊瑚粗骨材の拡大像

のみで、幅広い径の空隙が多く存在し、これに起因して表乾密度や吸水率に幅を持った骨材であることが認められた。

2.4 骨材の圧力吸水特性

空隙を多数有する骨材として、人工軽量骨材がある。人工軽量骨材は、製造方法や材料により特性が異なるが、例えば絶乾密度が $1.29 \sim 1.70 \text{g/cm}^3$ 程度、吸水率(24時間)が10%程度のものである。これらの人工軽量骨材は、骨材表面が密実な相により覆われたものもあり、JIS A 5005の規定外であっても実用可能なコンクリートが製造可能なことが知られている。この骨材において、例えばポンプ圧送時のように圧力が付加されると、周囲の水が吸水(加圧吸水)されることが報告されている³⁾。この加圧吸水特性について、文献4)では、南鳥島産の骨材(上記とは採取時期が異なる)に対して調べており、以下にその概要を示す。

珊瑚骨材の加圧吸水特性は、0.75MPaの空気圧を加え、加圧による単位骨材質量あたりの吸水量(=加圧前後の容器内の水位差)を計算することにより評価している³⁾。加圧時の吸水率(最大値)を図-5に示す。なお、真空吸水時(アスピレータを用い6時間真空状態にした後、36時間大気圧下で水浸³⁾)の値およびJISの方法(大気圧

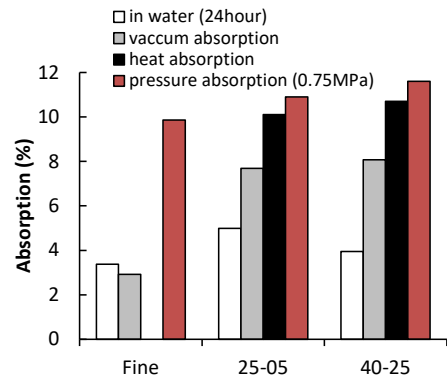


図-5 圧力吸水特性⁴⁾

(0.1MPa)下で24時間水浸)の値も併記している。粒径にかかわらず、大気中で浸漬させて求めた値(JIS法)と比べて非常に大きな値を示していた。

以上の結果より、珊瑚骨材は、粒径にかかわらず、加圧時に吸水され、加圧後に減圧した際には吸水した水が排出されるが、全量は排出されないことが認められた。加圧前と減圧後の吸水率の差(骨材中に蓄積される水量)は、粗骨材40-25で3%程度、粗骨材25-05で2%程度、細骨材で1%強程度であり、粒径が大きくなるほど増加していた²⁾。

2.5 まとめ

今回検討した南鳥島産の珊瑚骨材においては空隙を多数有することが確認された。この傾向は、4章「海洋環境に長期暴露後のコンクリート特性」で使用する沖縄産骨材についても同様であった¹⁾。また、個々の珊瑚骨材において、内部空隙の形態には相違がみられ、これらの相違により表乾密度や吸水率のばらつきが確認された。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の性状の変化、硬化コンクリートの強度の低下、収縮等による体積変化の増加、温度応力の増加および耐摩耗性の低下などが危惧される。また、骨材の圧力吸水特性を調べた結果、加圧環境下でより多くの水を骨材中に留めることが示され、ポンプ圧送時のコンクリートの性状変化が懸念される。そのため、3章では、南鳥島産の珊瑚骨材を使用した自己充填コンクリートを対象として上記の検討を行う。

3. 自己充填性を付与したコンクリートの諸特性

3.1 はじめに

著者らは、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²⁾。しかし、珊瑚骨材を使用し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、南鳥島産の珊瑚骨材、練混ぜ水として海水を使用した場合の、自己充填性を付与したコンクリートを主対象とし、このコンクリートの基礎的性質、収縮特性、熱的性質について実験的検討を行った。また、鉄筋コンクリートへの適用を想定し、コンクリート梁の力学特性についても検討を行った。なお、本検討では、離島でのコンクリート製造を考慮し、基本的に練混ぜ水として海水を利用することを主に検討を行った。

3.2 フレッシュ性状

3.2.1 実験概要

コンクリートの配合を表-2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3種類とし、それぞれ標準温度 (20℃) と高温 (35℃) 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、スランブフローが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 (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、同じスランブフローとなるための単位水量は、SW-CA (185kg/m³) が他の2配合 (175kg/m³) に比べて多くなった。また、35℃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-3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-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。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。

コンクリートの試験項目の一覧を表-5に示す。スランブフローは、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⁴⁾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。

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-5参照
セメント	C	高炉セメントB種	密度3.04g/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-4 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-5 試験項目および方法

試験項目	試験方法	試験条件等
スランブフロー	JIS A 1150	測定時期: 練混ぜ後0, 30, 60, 90分
空気量	JIS A 1128	珊瑚骨材の配合は質量法にて測定
	JIS A 1116	
充填高さ・時間	JSCE-F 511	流動障害: [ランク2] 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

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)	
					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
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		

3.2.2 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

図-6 に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。

図-7 に練混ぜ完了後の500mmフロー到達時間 (T500) と停止時間 (Tstop) を示す。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³⁾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。

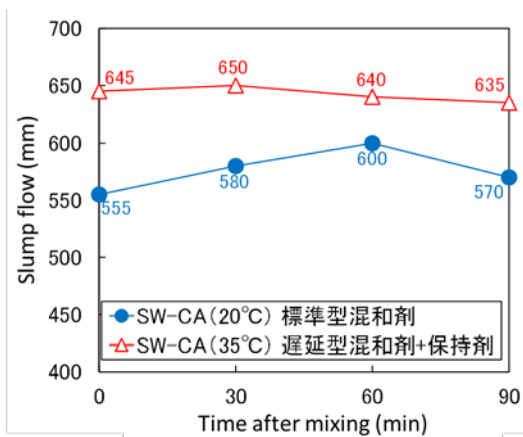


図-6 スランプフローの経時変化

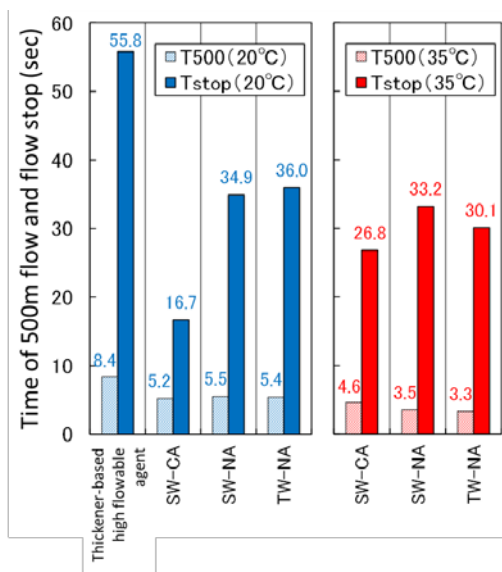


図-7 スランプフロー時間

図-8 に 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 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℃) 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℃より35℃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、元々の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 (コンクリートを圧送する際の管内閉塞の安全度を表す指標) 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、2.4 でも示したように、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の低下することが示唆されている⁴⁾。本検討で用いたコンクリートは流動性に優れるため、ポンプ圧送を使用せずに打設する場合はリスクが小さいと考えられるが、ポンプ圧送を伴う場合はコンクリートが配管を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。

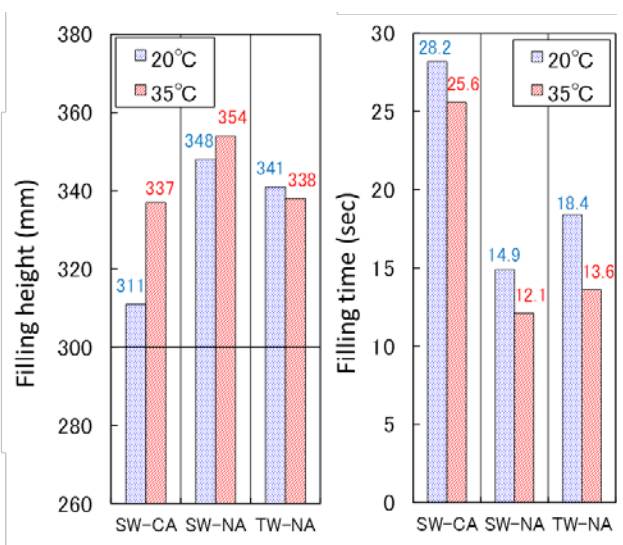


図-8 U 形充填高さ・時間

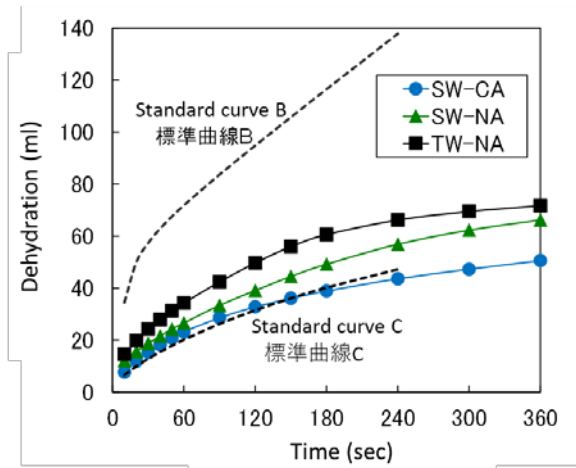


図-9 加圧時の脱水量の経時変化

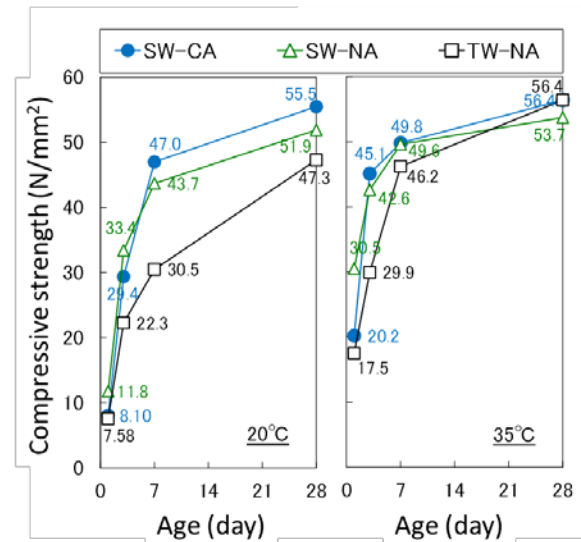


図-10 圧縮強度

3.3 圧縮強度

3.3.1 実験概要

コンクリートの使用材料および配合は3.2と同一である。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。

3.3.2 実験結果および考察

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高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硬化が促進されることが既往の研究⁶⁾で示唆されており、本研究の結果もそれに合致すると考えられる。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)に比べて若干小さくなっている。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。

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⁸⁾では、今回使用した多孔質骨材(珊瑚由来の骨材を含む)を対象として、骨材の強度がコンクリートの強度に及ぼす影響を検討している。中でも、図-11に示すように、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、粗骨材の圧縮強度の依存性は小さく頭打ちになると報告されている。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

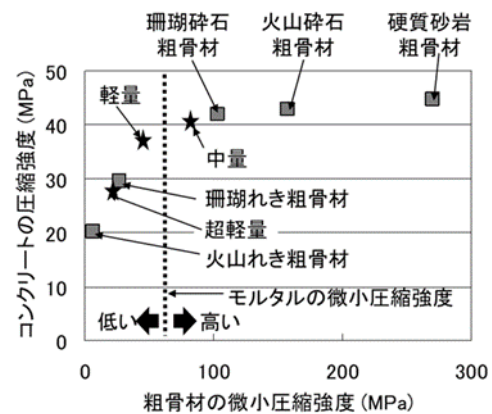


図-11 コンクリートの圧縮強度と粗骨材強度の関係⁸⁾

縮強度としては差異のないことが示されている。本検討で使用した骨材の強度は不明であるが、このことから、使用した珊瑚骨材は、普通骨材と比較して、表乾密度が低く、吸水率が高いが、強度としては水セメント比45%の硬化体部より高く、これにより、骨材の強度の影響によるコンクリートの強度への影響が小さくなったと推察される。また、他の文献⁹⁾では、形状が悪く実積率の低い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、文献⁹⁾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、自己充填コンクリートとして設計されており、混和剤中の増粘剤のはた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にくくなったことも一因と考えられる。

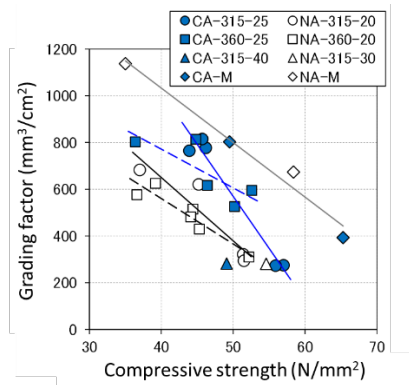


図-12 圧縮強度と累積すり減り係数の関係

3.4 耐摩耗性⁹⁾

3.4.1 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、以下をパラメータとする配合を用いて検討を行った⁹⁾。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、粗骨材の最大寸法の異なるケースや、モルタルのケースについても検討した。なお、水セメント比が45%の配合は、前章までの自己充填型コンクリートを対象としている。コンクリートの材料は、表-3の材料に加えて最大寸法が40mm(表乾密度2.17g/cm³, 吸水率6.02%)の珊瑚粗骨材、30mmの普通粗骨材を使用した。コンクリートの耐摩耗性は、流体エロージョン試験(ASTM C1138)に準じて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、円筒状の容器の中にφ300×110mmの供試体を設置し、砂利を模擬した直径12.6~25.3mm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。

3.4.2 実験結果および考察

図-12に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示す。モルタル(◆◇印)の試験結果に着目すると、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、既往の見解¹⁰⁾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。また、粗骨材最大寸法の違いによる影響について、珊瑚骨材40mm(▲印)は、同じ圧縮強度、単位粗骨材容積の25mm骨材の結果(●印近似線)に比べ累積すり減り係数が小さくなり、同じ水セメント比の25mm骨材の場合と同等の耐摩耗性を有していた。

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すれば、普通骨材と同等の耐摩耗性を確保できると考えられる。

3.5 収縮特性

3.5.1 実験概要

コンクリートは、表-2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-6の配合を用いた。なお、使用材料は表-3と同じである。

表-7にコンクリートの試験項目の一覧を示す。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。

3.5.2 実験結果および考察

a) 自己収縮

図-13にコンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を示す。

表-7 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 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
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

表-6 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	陸砂 NS	珊瑚砕砂 CS	砕石 NG	珊瑚砕石 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

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-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¹¹⁻¹³⁾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も考察されている¹³⁾。

b) 乾燥収縮

図-14 にコンクリートの長さ変化率の経時変化を、図-15 に質量変化率と長さ変化率の関係を示す。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影響も含まれると考えられるが、既往の研究¹³⁾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 (骨材自体の収縮特性については後述する)。

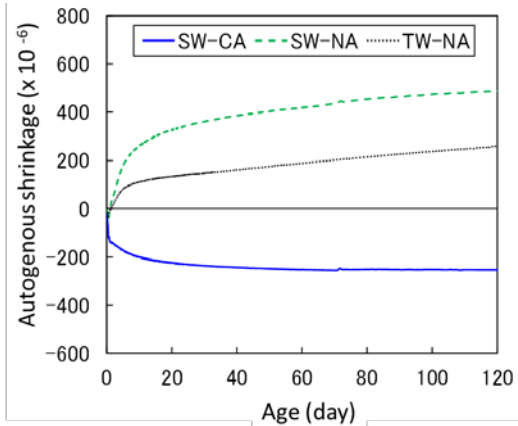


図-13 自己収縮ひずみの経時変化

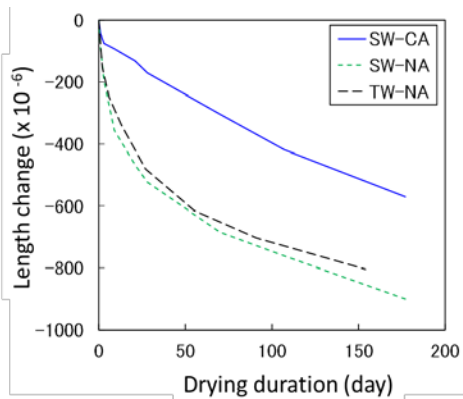


図-14 長さ変化率の経時変化

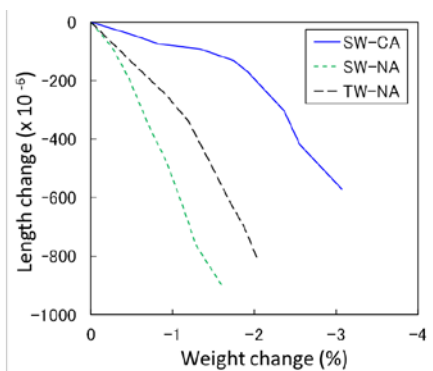
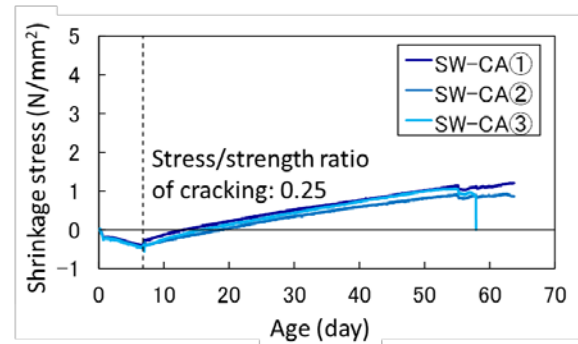
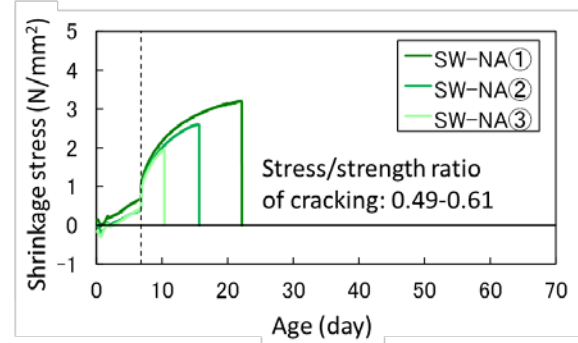


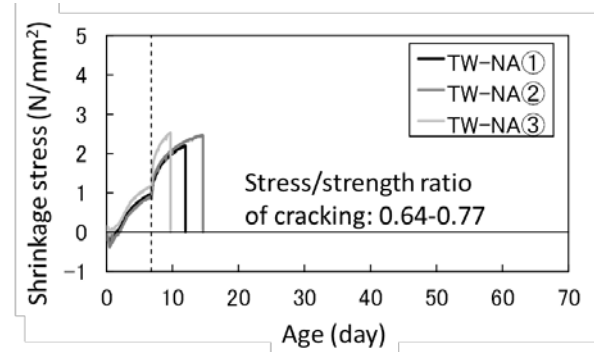
図-15 質量変化率と長さ変化率の関係



a) SW-CA



b) SW-NA



c) TW-NA

図-16 材齢と収縮応力の関係

c) ひび割れ抵抗性

図-16 に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示す。なお、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。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 0N/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。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。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が小さくなる特性からも想定できる結果といえる。

表-8 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]

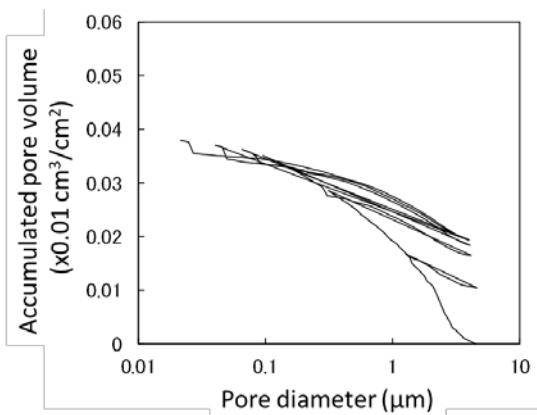


図-17 累計空隙曲線

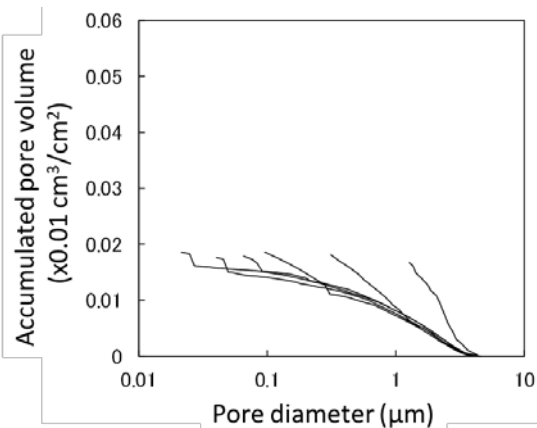


図-18 各圧入段階の累計空隙曲線

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、ここではその要因を推定するため、骨材の空隙構造の評価および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。

2章で示したように、珊瑚骨材は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 nm 以下の空隙において、一般的な骨材 (砂岩砕石等) 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¹⁴⁾。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¹⁴⁾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 程度に粉砕した珊瑚粗骨材を用い、表-8 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した。

図-17 に累計空隙曲線を、図-18 に各圧入段階における累計空隙曲線の比較を示す。図-18 は、図-17 の圧入曲線の $4 \mu\text{m}$ 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-18 の分岐線の上端値) は $0.02 \text{cm}^3/\text{cm}^3$ であり、既往の人工軽量骨材の空隙量に比べると $1/10$ 程度であった。

以上のように、珊瑚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おり、かつインクボトル空隙を

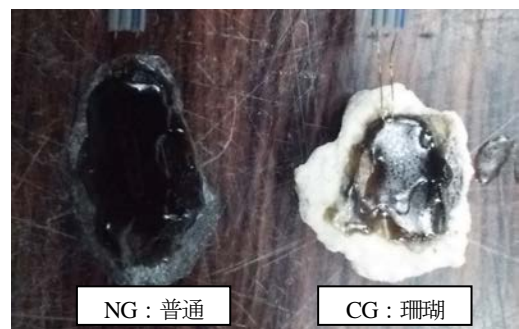
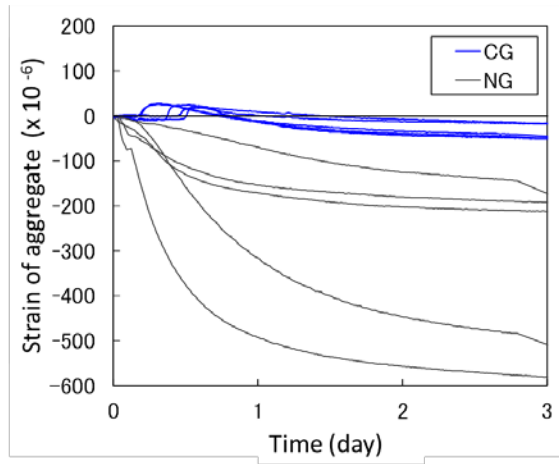


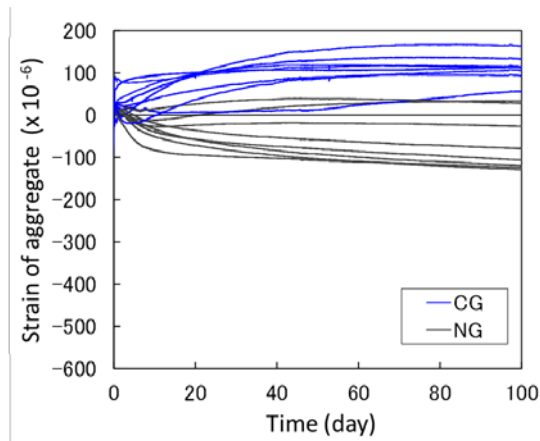
写真-3 骨材のひずみ測定



写真-4 粗骨材の設置状況



a) 乾燥環境



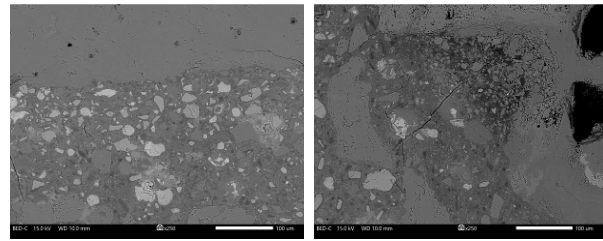
b) コンクリート中

図-19 骨材ひずみの経時変化

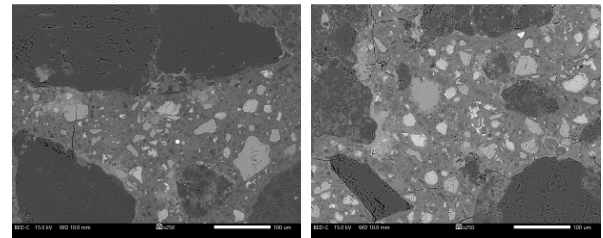
有することが分かった。

骨材の体積変化は、山田らの研究¹⁵⁾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(CG)と普通粗骨材(NG)で比較した。写真-3に示すとおり、骨材の一部を研磨した後、防水処理を施したひずみ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.の雰囲気中で乾燥させたものと、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-6に示した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-19に示す。まず、珊瑚粗骨材の収縮ひずみは、乾燥環境において、普通粗骨材に比べて著しく小さくなる傾向を示した。特に、珊瑚骨材の場合は、乾燥初期において若干膨張する傾向が確認され、その後収縮側へ転じたが、ふつう粗骨材の挙動と比較すると明らかに小さいひずみであった。一方で、コンクリート中でのひずみは、骨材によりばらつきがあるものの、普通骨材のひずみはやや収縮側に推移したのに対し、珊瑚骨材のひずみはやや膨張側に推移した。

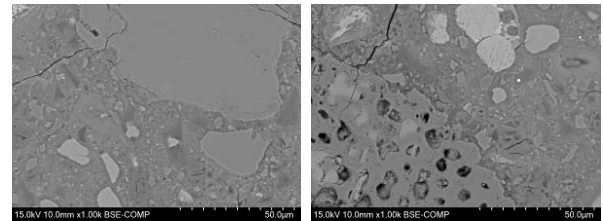


a) 珊瑚粗骨材

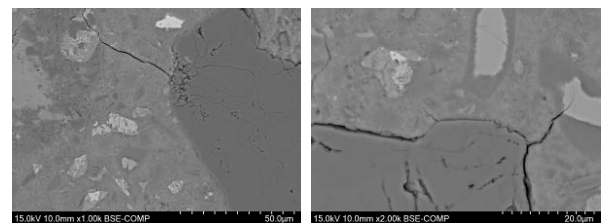


b) 普通粗骨材

図-20 粗骨材の観察像



a) 珊瑚細骨材



b) 普通細骨材

図-21 細骨材の観察像

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合致する。本検討では、粗骨材の挙動についてのみしか評価できず、細骨材の影響を加味した評価が必要であるが、コンクリートの体積変化の差異の一因として、粗骨材の体積変化の違いが影響していたことが考えられる。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、それをを用いたコンクリートの体積変化も小さくなると考えられる。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。普通細・粗骨材と珊瑚細・粗骨材の反射電子像を、それぞれ図-20、図-21 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。

3.6 熱的性質

3.6.1 実験概要

コンクリートの配合は、表-6 の配合を用いた。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。

熱膨張係数は、φ100×200mm のコンクリートの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、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-22 に示す。熱伝導率は、100×100×400mm 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 箇所での測定を行い、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 φ100×200 mm の円柱供試体を標準養生した後、60℃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℃の定常冷水中に移動し、供試体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。

3.6.2 実験結果および考察

a) 熱膨張係数

表-9、図-23 に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。普通骨材の配合 (SW-NA) の熱膨張係数は 14 μ/℃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/℃) 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/℃程度であった。既往の文献¹⁰⁾によると、人工軽

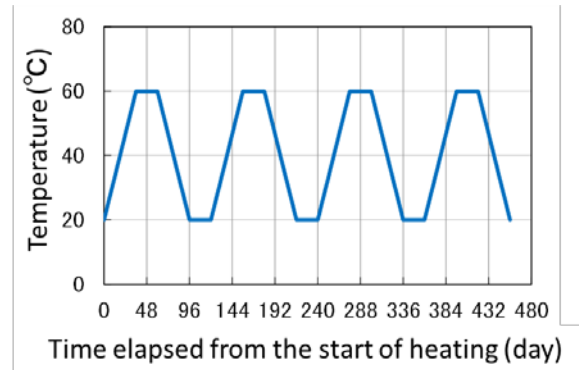


図-22 熱膨張係数試験の温度履歴



写真-5 熱伝導率の測定状況

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	-

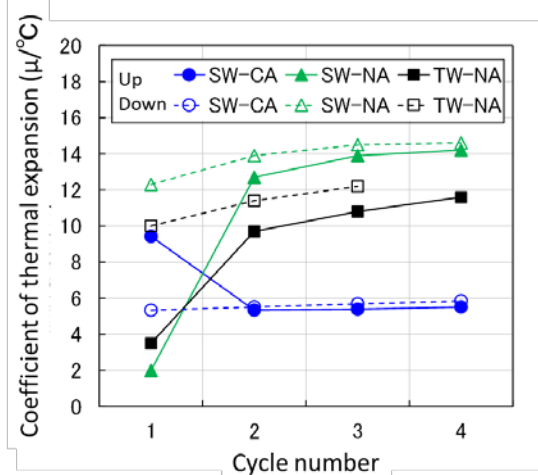


図-23 熱膨張係数の推移

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/℃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。

b) 熱伝導率、熱拡散率および比熱

表-10 に各試験の測定結果を示す。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ことが示唆され

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

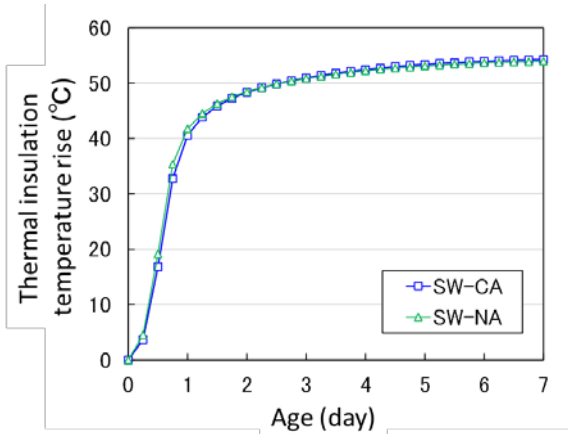


図-24 断熱温度上昇量の経時変化

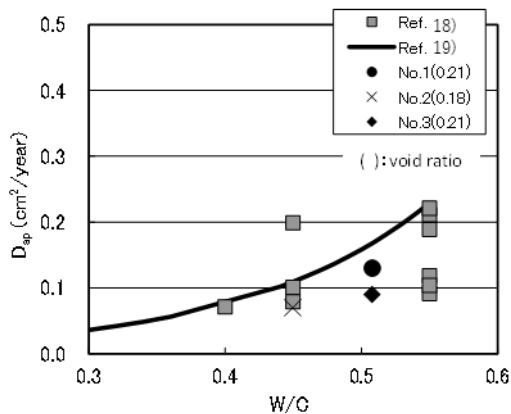


図-25 W/C と D_{ap} の関係¹⁷⁾

た。

c) 断熱温度上昇量

図-24 にコンクリートの断熱温度上昇量の経時変化を示す。珊瑚骨材の配合 (SW-CA) では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¹²⁾。表-10 に示したように、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

表-11 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
			W	C	S1	S2	G1	G2	SP
SW-CA	45.0	50.8	185	411	845	—	756	—	6.17
SW-NA	45.0	52.0	175	389	—	881	—	838	4.28

W: 海水, C: 高炉セメント B 種, S1: 珊瑚細骨材, S2: 普通細骨材,

表-12 骨材の物性

物性	細骨材		粗骨材	
	珊瑚	普通	珊瑚	普通
粗粒率	2.53	2.77	6.14	6.71
微粒分量(%)	14.8	1.5	3.6	0.1
実積率(%)	68.1	69.2	62.5	62.8
表乾密度(g/cm ³)	2.60	2.58	2.40	2.66
吸水率(%)	3.30	2.34	5.13	0.58
すりへり減量(%)	—	—	29.4	16.4
安定性損失率(%)	1.6	0.8	3.3	0.9

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。

3.7 塩分浸透性¹⁷⁾

塩化物イオン濃度分布より求めた見かけの拡散係数 D_{ap} と W/C の関係を図-25 に示す。なお、コンクリートの空隙率、普通骨材を用いたコンクリートの D_{ap} ¹⁸⁾ およびコンクリート標準示方書¹⁹⁾ の D_k も図中に示した。珊瑚骨材は空隙が非常に多いにもかかわらず、珊瑚骨材を用いたコンクリートの D_{ap} は D_k を下回っており、また、普通骨材コンクリートと同程度以下の値を示した。

なお、再生骨材のように空隙の多い(吸水率の大きい)骨材の場合に、塩分浸透抵抗性が改善されるという報告がある²⁰⁾。また、再生骨材の場合に、高炉セメントの使用による塩分浸透抵抗性の改善効果が大きいという報告も多い^{21), 22)}。このように塩分浸透抵抗性が改善された理由としては、骨材内の水による自己養生効果により骨材周辺の遷移帯の組織が改善されたことや高炉セメントの使用が考えられるが今後より微視的な評価が必要と考えられる。

3.8 コンクリート梁の力学特性

3.8.1 実験概要

自己充填性を付与したコンクリートを実際に使用する場合、その力学特性の把握が必要である。また、厳しい塩害環境下において構造部材として利用するには、普通鋼材(炭素鋼)に代わる防食性の高い補強材の利用が必要である。そこで、ここでは、ステンレス鉄筋と海水および珊瑚骨材を用いたコンクリートで構成されたコンクリート梁の曲げ載荷試験を実施し、普通骨材を用いたコンクリート梁と力学特性について比較した。

表-11 にコンクリートの配合を、表-12 に骨材の主な物性値を示す。SW-CA は海水および珊瑚骨材を用いた配合で、SW-NA は海水および普通骨材(大井川水系産陸砂, 青梅産硬質砂岩砕

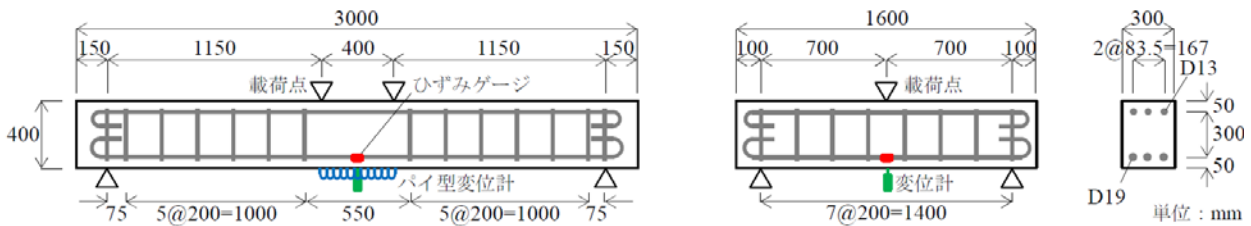


図-26 試験体概要 (左: $a/d=3.3$, 中: $a/d=2.0$, 右: 断面)

表-13 コンクリートの強度特性

配合	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	破壊エネルギー※ (N/mm)
	JIS A 1108	JIS A 1149	JIS A 1113	JCI-S-001-2003
SW-CA	55.4	27.6	4.12	0.135
SW-NA	52.0	29.3	5.87	0.345

※切欠きはりの3点曲げ載荷の荷重-ひび割れ開口変位曲線から算出

表-14 実験値と計算値の比較

配合	曲げ耐力($kN \cdot m$)		せん断耐力(kN)	
	実験値	計算値	実験値	計算値
SW-CA	127.3	112.4	231.2	218.0
SW-NA	132.7	112.2	256.7	218.0

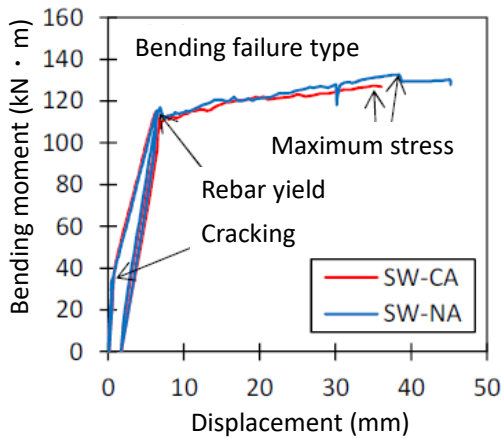
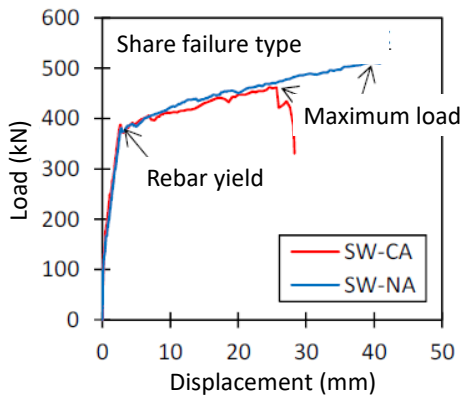


図-27 曲げモーメントと変位の関係



石)を用いた配合とした。水セメント比は 45.0%, 単位粗骨材量は $0.315 m^3/m^3$ で一定とし, スランプフロー $600 \pm 50 mm$, 空気量 $4.5 \pm 1.0%$ となるように, 単位水量および単位混和剤量を調整した。

図-26 に試験体の概要を示す。本検討では, せん断スパン比 a/d の異なる 2 種類の試験体 (曲げ破壊先行型 $a/d=3.3$, せん断破壊先行型 $a/d=2.0$) を各配合 1 体製作し, 曲げ載荷試験を

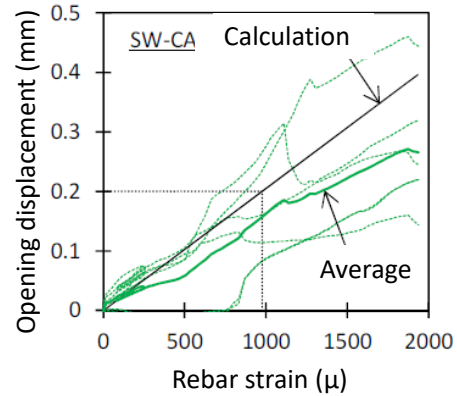


図-29 開口変位と鉄筋ひずみの関係

行った。試験体に用いたステンレス鉄筋 (SUS410-SD345) は, 引張鉄筋に D19 (0.2% 耐力 $387 N/mm^2$), 圧縮鉄筋およびせん断補強鉄筋に D13 (0.2% 耐力 $420 N/mm^2$) とした。載荷試験における計測項目は, 荷重, 梁中央変位, 鉄筋ひずみとした。なお, 曲げ破壊先行型試験体 (図-26 左) においては, 曲げモーメント一定区間の試験体下面にパイ型変位計を設置し, ひび割れの開口変位 (以下, 開口変位) を計測した。

3.8.2 実験結果および考察

表-13 に管理供試体による強度試験結果を示す。なお, 供試体は梁試験体と同じ条件で養生し (型枠脱型材齢 21 日), 強度試験は載荷試験と同日に行った。破壊エネルギーの値から, SW-CA のひび割れ抵抗性は SW-NA に比べて劣ることが確認された。

図-27 に曲げ破壊先行型試験体による曲げモーメントと変位の関係を, 図-28 にせん断破壊先行型試験体による荷重と変位の関係を示す。なお, すべての試験体において, 圧縮縁のコンクリートが圧壊して終局に至った。SW-CA の最大モーメントおよび最大荷重は SW-NA に比べて若干小さく, また最大荷重時の変位量も小さかった。この結果から, SW-CA の変形性能は

SW-NA に比べて劣ると考えられる。しかし、SW-CA と SW-NA は同じような挙動を示しており、珊瑚骨材を用いた場合でも、普通骨材を用いたコンクリート梁と同程度の力学特性を有すると考えられる。なお、载荷中の SW-CA の曲げひび割れや斜めせん断ひび割れは分散して発生し、SW-NA も同様であった。

参考文献 23)の断面破壊の照査式により算定した計算値（設計断面耐力）と実験値の比較を表-14 に示す。実験値は計算値よりも大きい値となっており、既往の計算式により設計断面耐力を算定できることが確認された。

図-29 に曲げ破壊先行型試験体による開口変位と引張鉄筋ひずみの関係（SW-CA）を示す。なお、参考文献 23)の式により算定した曲げひび割れ幅の計算値を図中に併記した。また、設置したパイ型変位計 11 台のうち、引張鉄筋ひずみが 977μ （計算上ひび割れ幅 0.2 mm となるひずみ）に到達するまでに開口変位が計測された 6 台の平均値も併記した。鋼材腐食に対するひび割れ幅の限界値の目安²⁴⁾である $0.2\text{mm}(=0.005c(c:\text{かぶり}))$ 以下においては、若干ばらつきはあるものの、既往の計算式により曲げひび割れ幅を推定できると考えられる。

以上の結果から、珊瑚骨材を用いたコンクリート梁は、普通骨材コンクリート梁とほぼ同程度の力学特性を有していることが確認された。また、設計断面耐力および曲げひび割れ幅の算定にあたっては、既往の計算式を用いることが可能であると考えられる。

3.9 まとめ

南鳥島産の珊瑚骨材および海水を用い、かつ自己充填性を付与した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) 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。

- (2) 本実験の範囲内では、珊瑚骨材による顕著なコンクリートの強度発現性に対する影響は確認されなかった。これは、今回使用した珊瑚骨材の強度が、普通骨材よりは小さいものの、セメントペースト部の強度と比較して同程度あるいは高かったためと推察された。したがって、より高強度のコンクリートを製造する場合あるいは珊瑚骨材の強度が著しく小さい場合においては注意が必要である。
- (3) 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傾向にあった。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。
- (4) 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。
- (5) 珊瑚骨材を用いたコンクリート梁は、普通骨材コンクリート梁とほぼ同程度の力学特性を有していることが確認された。また、設計断面耐力および曲げひび割れ幅の算定にあたっては、既往の計算式を用いることが可能であると考えられる。

なお、耐摩耗性、塩化物イオン抵抗性については、他文献で得られた知見を本文中に整理した。

4. 海洋環境に長期暴露後のコンクリート特性

4.1 はじめに

珊瑚骨材の利用に関して、これまで長期的な耐久性に関する検討は希少である。一方で、沖縄産の珊瑚骨材を用いたコンクリートの海洋暴露試験が1976年より開始されている。本研究では、この試験体の追跡調査（暴露約44年後）を行い、海水が作用する環境での長期挙動（耐海水性）の評価を行った。

4.2 試験体概要

4.2.1 骨材特性

使用された骨材の物理的特性を表-15に示す。供試体で使用された骨材は沖縄産の骨材である。細骨材については、3章で示した南鳥島産の場合と同様、総じて、細骨材の表乾密度は低く、吸水率は高いものであった。特に、普通骨材の吸水率が2.81%であったのに対し、珊瑚細骨材の吸水率は5~7%程度であった。粗骨材については、元の岩石種によって大きく異なり、本部、石垣（古生層石灰岩）の珊瑚粗骨材は普通骨材より表乾密度が高く、吸水率が低い。一方、宮古および中南部（琉球石灰岩）の粗骨材は、表乾密度が低く、吸水率が高い。

4.2.2 配合および供試体形状

表-16に1976年当時に製造された供試体の配合を示す。当時の研究の目的としては、珊瑚骨材（沖縄産）を使用したコンクリートの諸特性に及ぼすセメント量の影響に着目して実施された。このため、セメント量が250, 300, 350kg/m³付近となるように配合選定がなされている。また、目標スランプ12±2cmとなるように配合が選定されている。このため、使用した骨材種類によって異なる水セメント比となっている点に注意が必要である。供試体寸法はφ150mm×300mmであり、表-16の灰色で示した配合を対象として調査を実施し、1配合につき3体ずつの供試体を用いた。

4.2.3 暴露環境、期間

供試体は港湾空港技術研究所の長期暴露試験施設において暴露された。環境としては「海中部」と「干満部」である。海中部は久里浜湾から採取した海水中に浸漬した。また、干満部は1日2回約6時間の海水浸漬および乾燥を繰り返す環境であった。これらの供試体は、44年間（ただし、暴露期間中に2年程度中断期間あり）同環境に暴露されていた。なお、養生に関しては、材齢1日で脱型後に屋外養生との記録があり、初期の養生は十分ではなかった可能性がある。

表-15 沖縄産珊瑚骨材の物理的特性¹⁾

a) 細骨材

表記	種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	実積率 (%)	塩分含有量 (%)
宮古	海砂 (石灰岩)	2.40	6.85	2.86	58.5	0.01
中南部	陸砂 (千枚岩)	2.45	5.78	2.33	52.0	0.00
伊是名	海砂 (石灰岩)	2.45	6.70	1.99	56.9	0.00
石垣	海砂 (石灰岩)	2.40	6.70	2.87	57.2	0.00
普通	川砂	2.58	2.81	2.93	65.3	-

*灰色で示した骨材のみ岩種が石灰岩ではない。

b) 粗骨材

表記	種類	最大寸法 (mm)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	実積率 (%)	安定性損失量 (%)	すりへり減量 (%)
宮古	琉球石灰岩	25	2.46	2.74	7.46	55.6	9.0	28.0
中南部	琉球石灰岩	40	2.41	3.99	7.35	54.8	24.0	29.5
本部	古生層石灰岩	40	2.72	0.12	7.26	56.0	2.0	24.0
石垣	古生層石灰岩	25	2.70	0.54	6.96	55.1	8.2	29.0
普通	川砂利	25	2.69	1.75	6.82	64.3	-	-

表-16 配合

表記(組合せ)	Gmax	セメント	W/C	W	C	S	G
普通 (川砂-川砂利)	25	N	41.4	128	309	592	1333
			46.8	148	316	554	1360
宮古 (宮古島海砂-碎石)	25	N	38.1	131	343	657	1095
			44.5	126	283	643	1073
			54.2	133	245	684	1141
		BB	44.5	126	283	643	1073
伊是名-本部 (伊是名島海砂-本部碎石)	40	N	39.4	139	352	588	1245
			43.4	132	304	618	1287
			56.5	143	253	621	1311
		BB	42.4	138	325	661	1373
石垣 (石垣島海砂-碎石)	25	N	42.2	144	341	638	1191
			47.9	141	294	655	1220
			60.9	148	243	663	1237
中南部 (中南部海砂-碎石)	40	N	62.5	170	272	631	1007

*灰色で示した配合が今回調査で用いた供試体である。

4.3 外観観察

調査を実施するにあたって、目視により外観観察を行った。特に、一部の供試体は写真-6の右に示すように、供試体の端部に欠損がみられた。表-17に端部欠損が顕著な試験体個数の割合を示す。普通骨材を用いた場合、いずれもセメントとして普通ポルトランドセメントが用いられているが、干満部および海中部のいずれに暴露した供試体においても端部に顕著な欠損は確認できなかった。一方で、「宮古」、「伊是名-本部」の骨材を用いた場合、普



写真-6 試験体外観

表-17 端部欠損が顕著な試験体個数の割合

表記(組合せ)	Gmax	セメント	W/C	端部劣化の有無	
				干満	海中
普通 (川砂-川砂利)	25	N	41.4	無(0/3)	無(0/3)
宮古 (宮古島海砂-碎石)	25	N	44.5	1/3	1/3
			54.2	1/3	1/3
伊是名-本部 (伊是名島海砂-本部碎石)	40	N	43.4	1/3	無(0/3)
			56.5	1/3	1/3
		BB	42.4	無(0/3)	1/3

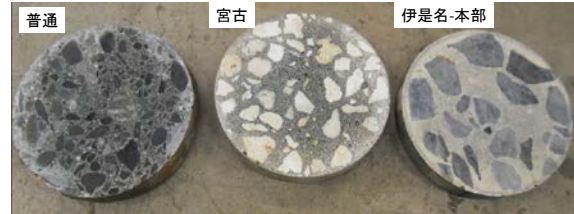
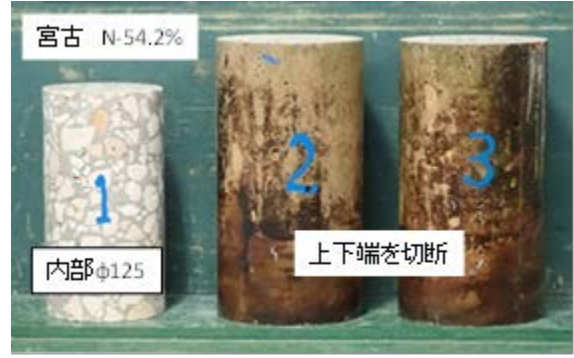


写真-7 切断後の供試体の様子

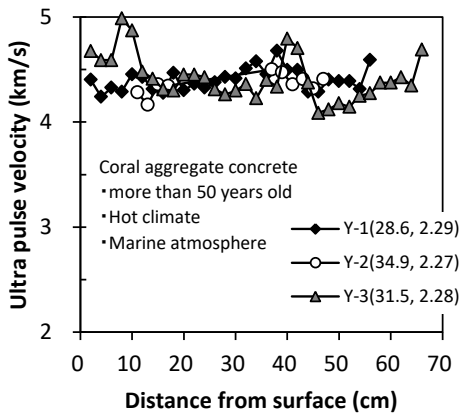


図-30 50年以上経過したコンクリートにおける超音波伝搬速度分布の一例²³⁾

通ポルトランドセメントを用いた場合に、顕著な欠損部が1/3の供試体で認められた。一方、セメントとして高炉セメントを用いた場合、いずれも端部欠損は見られなかった。この原因については、現状不明確であるが、(1)海水の作用による硬化体の変質、(2)暴露期間中の供試体の移動による端部の欠損、(3)セメントや骨材などの使用材料の影響などが考えられ、今後メカニズムの解明が必要である。特に、3.3に示したように、配合によっては、珊瑚骨材を使用したコンクリートの方が普通骨材を使用した場合と比較して、耐摩耗性が若干低下する場合も確認さ

れており、海洋環境で長期間使用する際には注意が必要である。

ここで、南鳥島(熱帯(サバナ気候))の海上大気中で50年以上存在していた、珊瑚骨材を用いたコンクリート構造物において、コンクリート表面から深部方向へ超音波伝搬速度を計測した事例を図-30²³⁾に示す。この結果によると、表層から深さ60cm程度の範囲まで同様な超音波伝搬速度の値を示していた。超音波伝搬速度と弾性係数や強度などの力学的性質の間には正相関があることが知られており、調査対象のコンクリートの力学的性質は表層から内部まで一様であることが推測される。一般に、海水が作用するコンクリートの劣化は、海水が供給される表層から内部に向かい、徐々に進行すると考えられる。上述のように、表層から内部まで超音波伝搬速度が均一ということは、調査対象のコンクリートにおいて、海水が作用することによる変質は、顕著には進行していなかったと推測される。よって、珊瑚骨材を用いたコンクリートの場合においても配合や環境によっては、今回の暴露供試体で見られたような端部での欠損が確認されない場合も考えられ、その原因の特定が必要であると考えられる。

4.4 圧縮強度

4.4.1 端部損傷部の除去

先に示したように、今回使用した供試体は一部の供試体の端部において著しい欠損が確認された。この影響は、

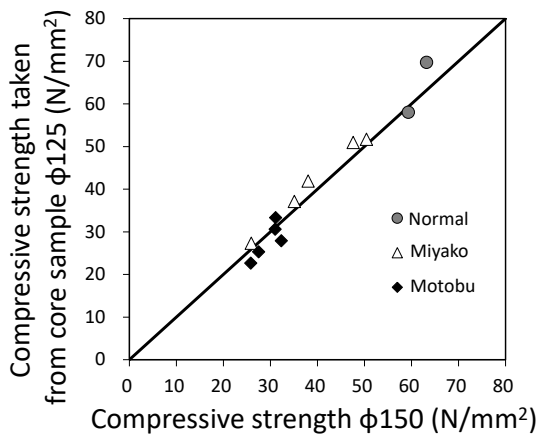


図-31 内部コア強度との比較 (44年暴露後)

外観目視においては確認されなくても、内部で脆弱部が生じている可能性が考えられ、そのままの状態では圧縮強度試験を実施すると適切な評価が困難と考えられた。そのため、圧縮強度試験においては、写真-6に示したような端部での欠損の影響を排除するため、すべての供試体において上下端を20mm程度ずつ切断した後に試験を実施した(写真-7参照)。また、供試体の側面においても、同様な欠損が生じている可能性があるため、一部の供試体においては内部からφ125mmのコアを採取し試験に用いた(写真-7左上参照)。

なお、当時実施された材齢28日の圧縮強度試験では片面、暴露5年および10年経過後の試験では両面にウッドメタル(低溶融度のキャッピング剤)を用いて圧縮強度試験が実施されている。特に暴露5年および10年経過後においては、今回と同様の端部における欠損が懸念されるが、今回実施したような端部の除去は行われていない。

図-31は「端部を切断後、直径150の供試体に対して試験を実施した場合(圧縮強度:φ150と表記)」と「内部から直径125コアを採取した供試体に対し試験を実施した場合(圧縮強度:内部コアφ125と表記)」の結果を比較したものである。これによると、両者の圧縮強度は寸法効果の影響を考慮する必要があるが、概ね同程度であった。一般に寸法効果の影響を考慮すると、小さい供試体(φ125mm)の方が大きい供試体(φ150mm)と比較して、圧縮強度が高くなると考えられる。一方、φ150mmの供試体において、側面のコンクリートが海水の作用を受けて変質し、その影響が圧縮強度に表れた場合、内部からコア採取したφ125mmの供試体の方が高い圧縮強度が得られると考えられる。すなわち、供試体寸法および側面の変質の影響が現れた場合、φ125mmの供試体の方がφ150mmの供試体と比較して、圧縮強度が高くなる傾向となる。しかしながら、図-30の結果を見ると両者の圧縮強度はほぼ同程度であり、本試験においては、寸法効果および側面の変質が圧縮強度に及ぼす影響は小さいと判断できる。また、今回の結果を鑑みると、端部の約20mmの部分を除去することにより適切な圧縮強度が得られていることから、44年間の海洋環境暴露により、供試体の端部に欠損が確認されたが、その範囲は20mm以内の端部のみで生じていると考えられ、その影響範囲は限定的と考えられる。

上記の検討結果を受けて、以下の考察においては、両端部を切断した直径150mmの試験体の圧縮強度について整理する。

4.4.2 圧縮強度の経時変化

図-32に圧縮強度の経時変化を示す。この結果から、何れの暴露環境および骨材種類についても、44年間にわたる全体的な強度増進が確認される。一方で、暴露5年および

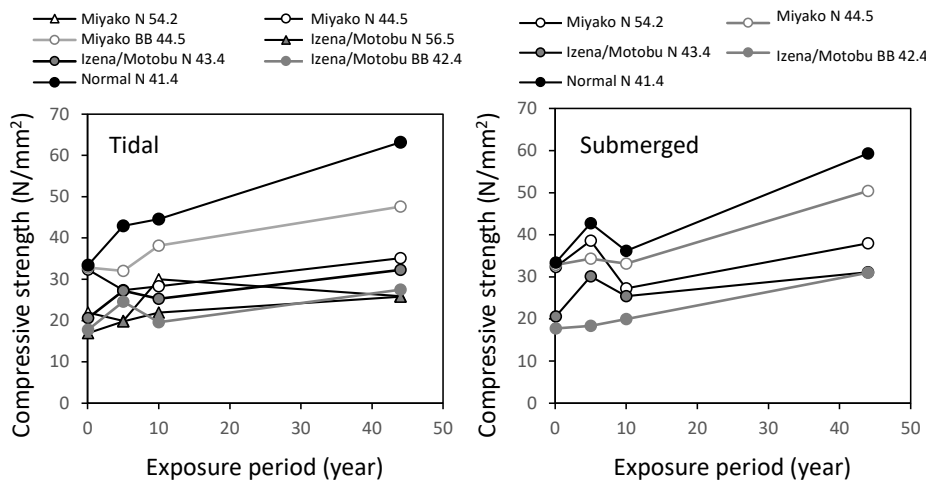


図-32 圧縮強度の経時変化 (φ150mmの場合)

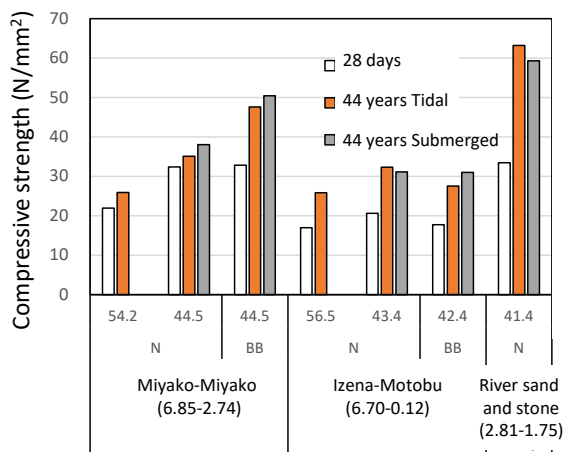


図-33 圧縮強度 (φ150mm の場合)

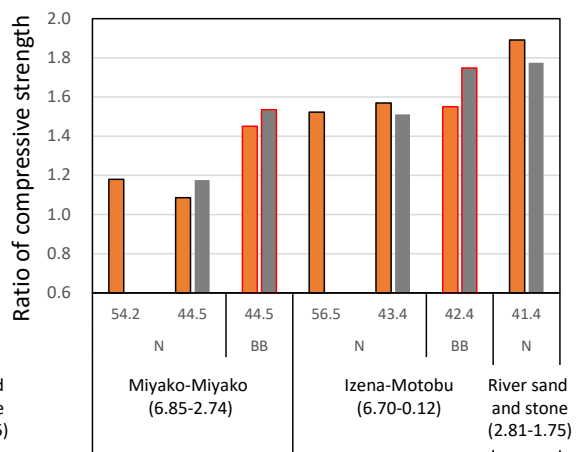


図-34 圧縮強度比 (44年/28日)

び暴露 10 年の圧縮強度に関しては一部の圧縮強度が低下している場合もある。前述したように、過去に実施された供試体の圧縮強度試験においては、端部は切除せずキャッピングにより圧縮試験を実施している。そのため、暴露 5 年および暴露 10 年の圧縮強度の結果には、円柱試験体端部の欠損の影響が含まれている可能性も否定できない。そのため、端部欠損の影響が現れていない材齢 28 日の圧縮強度と今回実施した暴露 44 年経過後の圧縮強度に着目して以下考察を加える。

図-33 に材齢 28 日と暴露 44 年経過後の圧縮強度を、図-34 に両者の圧縮強度比 (44 年/28 日) を示す。この結果、すべての供試体において、44 年間の暴露により強度の増進が確認される。ただし、これらの供試体はセメント種類、水セメント比、骨材種類がそれぞれ異なる。このため、直接的に材料、配合の比較が難しい。それを踏まえた上で、以下に各要因が圧縮強度に及ぼす影響を考察する。

(1) セメント種類の影響

普通骨材の場合は普通ポルトランドセメントのみのため、ここでは珊瑚骨材を使用した場合のみ比較する。普通ポルトランドセメントと高炉セメントを比較すると、44 年間暴露した供試体の圧縮強度は、使用した骨材種類によらず、高炉セメントを使用した方が強度の増進が顕著であった。一般に、混和材を用いたコンクリートでは長期の水和が期待でき、珊瑚骨材を用いた場合も高炉セメントを使用した方が長期的なコンクリートの品質としては有利と考えられる。このことは、4.3 で示したように端部の欠損が高炉セメントを使用した場合に確認されなかったことから言及できる。したがって、長期間の利用を考えた場合、高炉セメントを利用した方が有利と考えられる。

▲ Miyako N 44.5 △ Miyako B 44.5
 ■ Izena/Motobu N 43.4 □ Izena/Motobu BB 42.4
 ● Normal N 41.4

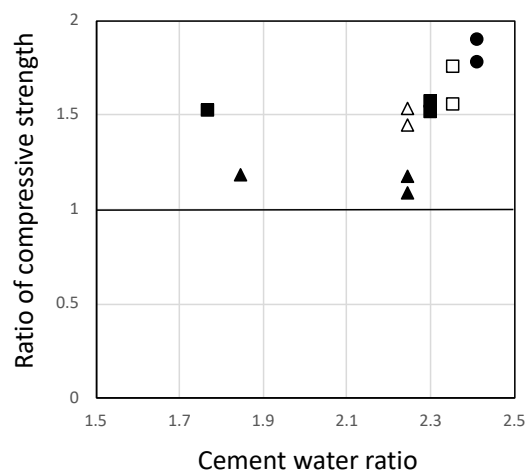


図-35 圧縮強度比とセメント水比の関係

(2) セメント水比の影響

図-35 に圧縮強度比とセメント水比の関係を示す。この結果から、全体的にセメント水比の上昇に伴い、圧縮強度比が高くなる、すなわち長期の強度増進が進むことが伺える。一般に、セメント水比が長期的な強度増進に及ぼす影響は、セメント水比が大きいほうが、強度増進が小さくなると考えられる。これは、セメント水比が高いことで、初期強度発現 (ここでは 28 日強度) が高くなり、強度の値としては高くなるが、増進の幅は抑えられる。しかしながら、今回得られた結果は、上記の傾向と異なった。この理由として、先にも示したように、初期の養生が十分でなかったことが考えられる。これらの供試体は材齢 1 日で脱型後に屋外養生されており、初期養生は十分ではな

った可能性がある。したがって、28 日後の圧縮強度が比較的強く、海洋環境に暴露されたことで、強度の増進が進み、特にその影響が高セメント水比で現れたと推察される。

(3) 骨材強度の影響

骨材種類に着目すると、普通骨材を使用した場合の方が沖縄骨材を使用した場合と比較して強度の増進が顕著である傾向が伺える。この理由の一つとして、骨材強度の影響が考えられる。図-36 に粗骨材強度（コア）と圧縮強度の関係を示す。なお、28 日強度に対し、粗骨材圧縮強度の最大・最小値および平均値を示した。両者には正の相関があることを予想したが、相関は明確でなかった。特に暴露環境によらず、長期間海洋環境に暴露されても強度は 20~30 N/mm² 程度で一定となった。既往の文献⁸⁾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、粗骨材の圧縮強度依に依存するが、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、粗骨材の圧縮強度の依存性は小さく頭打ちになると報告されている。今回の材齢 28 日における圧縮強度に対しては、粗骨材の強度がモルタルの強度より強く、粗骨材の性能は圧縮強度には大きく寄与しないが、材齢が長期になるに伴いモルタル部の強度が増進し、珊瑚骨材よりモルタル骨材の強度が高くなった可能性がある。

これに関して、さらに考察を加えるために、図-37 に材齢 28 日と 44 年経過後の C/W と圧縮強度の関係を示す。材齢 28 日の圧縮強度に関しては、同時期に製作された別の試験体の結果も示した。28 日時点の結果では、養生が十分でない影響が現れている可能性が高く、普通骨材の結果を含め当時（1979 年）のセメントを使用したコンクリートの圧縮強度が報告されているコンクリート専門委員会報告書²⁶⁾の強度よりも低い値を示した。一方で、44 年経過後の結果では、普通骨材を使用したコンクリートは、セメント協会のデータを上回っているが、珊瑚骨材を使用したコンクリートはそれを下回っている。一般に硬質砂岩などの普通骨材の強度は 100 N/mm² を超える。したがって、コンクリートの強度が今回得られているデータの最大である 60 N/mm² 以下の範囲では、粗骨材の強度はモルタルの強度と比較して十分に高く、コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は小さい。しかしながら、図-36 に示したように、珊瑚骨材の強度は、ばらつきはあるものの 50 N/mm² 程度であり、初期の段階では十分に水和が進んでおらず、コンクリートの強度に影響が小さかったものの、長期的な強度増進に伴いモルタル部の強度が上昇した結果、粗骨材の強度がモルタルの強度より低くなり、

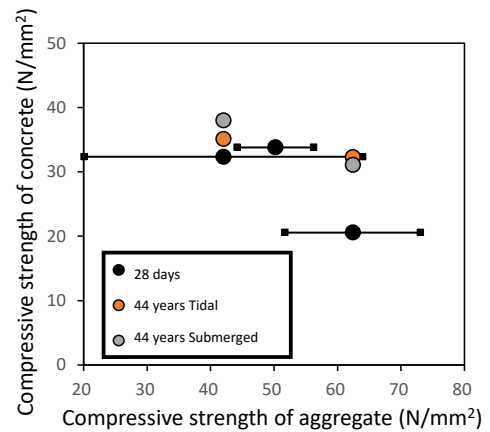


図-36 粗骨材圧縮強度と圧縮強度の関係

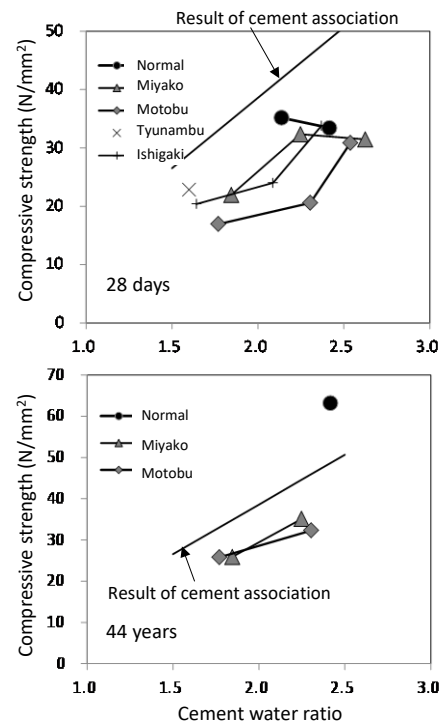


図-37 C/W と圧縮強度の関係

凡例：1979 年セメント協会：当時の試験結果（28 日まで水中養生）

十分な強度増進が得られなかった可能性が考えられる。

なお、今回の骨材同様に、吸水率が大きい再生骨材の場合に、コンクリート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もある²⁷⁾。

(4) 吸水率の影響

図-38 に吸水率とコンクリートの圧縮強度の関係を示す。なお、長期暴露した供試体のうち、W/C が同程度（41.4~44.5%）の結果のみを抽出した。ここで、相対吸水率²⁶⁾とは、骨材容積比を考慮して、対象のコンクリート体

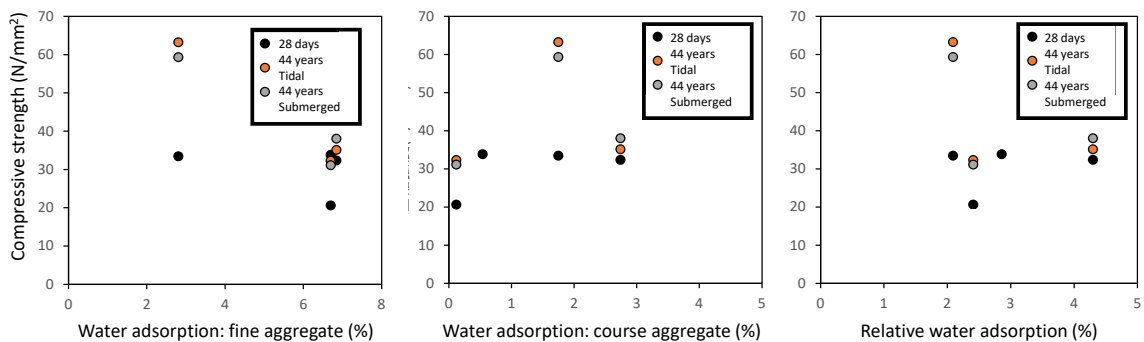


図-38 吸水率とコンクリートの圧縮強度の関係（沖縄）

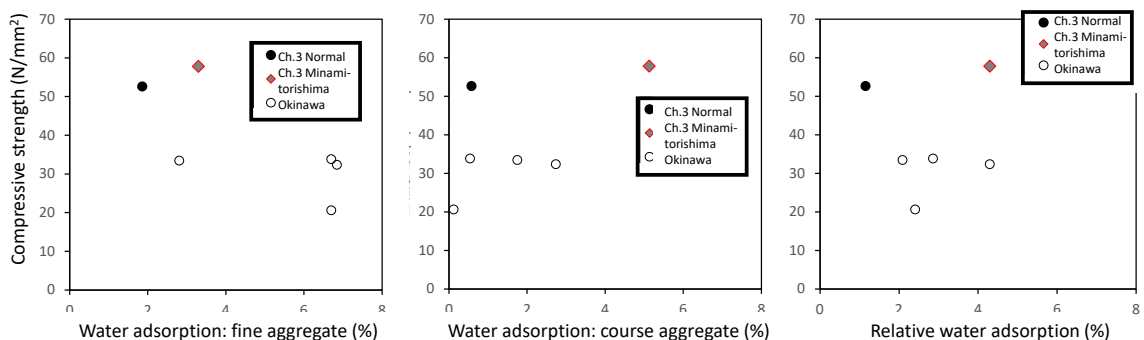


図-39 吸水率と圧縮強度の関係（南鳥島：第3章）

積中にある骨材のすべての吸水率として算定したものである。それぞれの吸水率での評価を比較すると、44年時に関しては「細骨材」の吸水率と圧縮強度の相関が比較的高い。「粗骨材吸水率」、「相対吸水率」に関しては圧縮強度との明確な相関は認められなかった。材齢28日の圧縮強度においては、ばらつきが認められた。この理由は、先にも示したように、初期養生が十分でない影響が現れている可能性もある。

4.4.3 材齢28日での圧縮強度の比較

ここでは、珊瑚骨材の諸要因が圧縮強度に及ぼす影響を整理する。なお、南鳥島から採取された骨材については、長期暴露後の強度データがないため、比較は材齢28日後の圧縮強度で実施した。

(1) 骨材吸水率の影響

図-39に吸水率とコンクリート圧縮強度（28日）の関係を示す（沖縄産骨材の場合は図-38）。沖縄産骨材の場合、細骨材吸水率が大きいと圧縮強度が低下傾向にあったが、南鳥島骨材の場合、3章でも述べたように、吸水率の増加に伴う圧縮強度の低下は大きくは認められなかった。

(2) モルタル強度と28日強度の関係

水セメント比が異なることや、養生条件が異なるため、3章との直接的な比較は難しい。ここで、3章の結果では

強度に細骨材が大きく影響していたため、過去と同じ条件で南鳥島骨材でモルタルを作成し、モルタル強度を測定した。

図-40に細骨材吸水率とモルタル圧縮強度の関係を示す。基本的にセメントの強さおよび規定されている水セメント比が異なるため、過去の結果と今回製作したモルタルの強度が大きく異なった。そのため、モルタル強度でも過去の結果との比較は難しい結果となった。なお、セメント強さについては、1976年当時の普通ポルトランドセメントで41.2 N/mm²であったのに対し、2008年の普通ポルトランドセメントでは、62.8 N/mm²であり、約1.5倍の強度差であった。

図-41にモルタル強度とコンクリートの圧縮強度の関係を示す。材齢28日における両者の関係は、相関関係が認められた。すなわち、コンクリートの強度に与える骨材の影響については、細骨材の影響が大きいことを示唆している。

(3) C/Wと圧縮強度（28日）の関係

図-42にC/Wと圧縮強度（28日）の関係を示す。なお、本図は、図-37に3章（南鳥島）の結果を追記したものである。

これらを比較すると、3章（南鳥島）の結果の方が全体

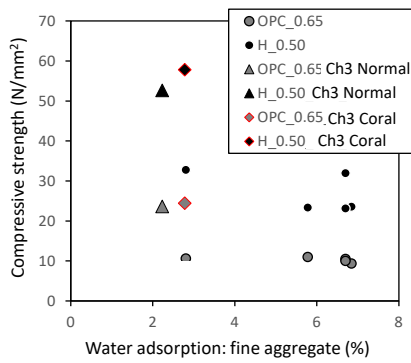


図-40 細骨材吸水率とモルタル圧縮強度の関係

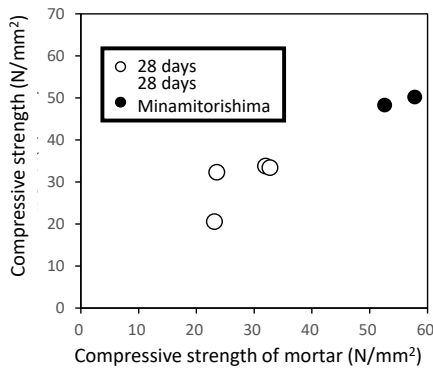


図-41 モルタル圧縮強度と圧縮強度の関係

的に圧縮強度が高い結果となった。これは、先に示したようにセメント強さの影響が大きく表れたためと考えられる。また、沖縄産骨材の強度が低い理由には養生が十分でない影響も含まれていると考える。

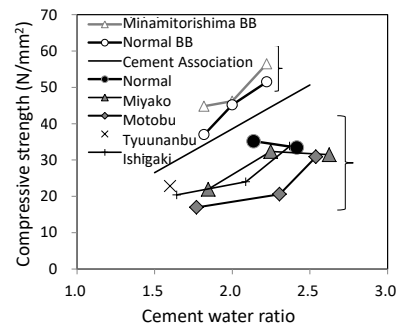


図-42 C/W と圧縮強度の関係 (28 日)

凡例・11979 セメント協会：当時の試験結果

・南鳥島_BB、N_BB：すりへり試験時の結果

4.5 中性化深さ

44 年間海洋環境に暴露し圧縮試験に供した試験体を割裂し、割裂面に対して実施した。

図-43 に 44 年経過時のコンクリートの中性化深さ (最大および平均) を示す。平均値の場合、ゼロの場合も多く、いずれも非常に小さい値であった。骨材の違いについては、この結果においては、「普通」の場合に進行気味に見える。環境の違いについては、明確ではない。干満の環境も、周りに常に藻類などが付着している状態であり、ほぼ海中に近い状態であったと推測される。

文献 28) では、海水が作用する環境での劣化の指標として、「中性化深さ」は、海水中に含まれる劣化因子 Mg や S の浸透深さと相関があるため、中性化深さも劣化指標となりうるとしている。この知見を踏まえると、本試験体の健全な部位については、劣化因子の侵入は非常に少ないと考えられる。なお、劣化が生じた円柱試験体端部については、片面ではなく複数面から劣化因子が侵入しやすくなることから考察の対象から除いた。

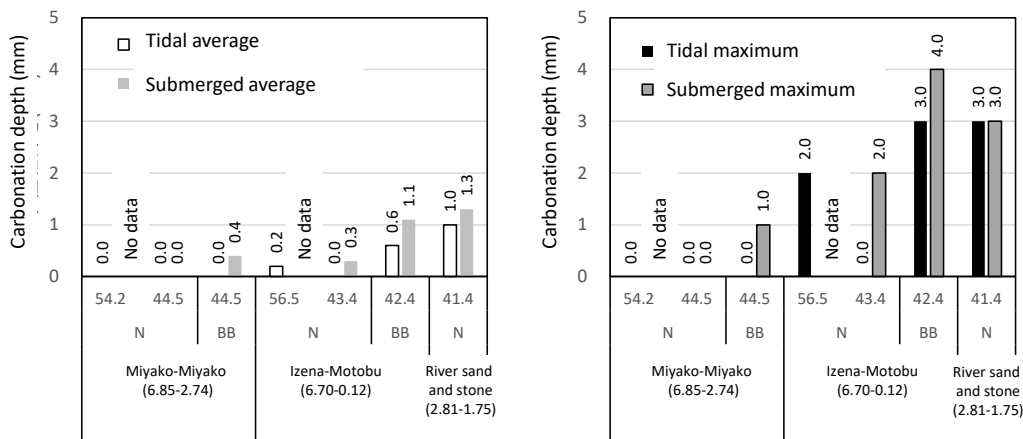


図-43 中性化深さ (44 年暴露経過後)

4.6 まとめ

沖縄産珊瑚骨材を用いたコンクリートを海中環境および干満環境に44年にわたり暴露した試験結果を以下にまとめる。

- (1) W/C=0.41~0.56程度の場合、表乾密度が低く、吸水率の高い珊瑚骨材を使用したコンクリートを用いた場合でも、海中部や干満帯では、長期間にわたり強度増進が確認された。
- (2) 海洋環境に長期間暴露され、セメントの水和反応が進行することにより、モルタル部の強度が増進した場合、骨材品質（特に骨材の圧縮強度）はコンクリートの強度に影響を及ぼす可能性が示唆された。
- (3) 試験実施時の課題として、長期間暴露された円柱供試体に対して圧縮試験を実施する際には、試験体端部は極力取り除く必要があることも改めて確認された。
- (4) 本検討の範囲内においては、44年経過後も中性化の進行は確認されなかった。

5. おわりに

5.1 得られた知見の整理

珊瑚由来の石灰岩から採取した骨材（珊瑚骨材）を用いたコンクリートの各種の特性について以下が確認された。

- (1) 適度な粘性を有する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。
- (2) 珊瑚骨材による顕著なコンクリートの強度発現性に対する影響は確認されなかった。これは、今回使用した珊瑚骨材の強度が、普通骨材よりは小さいものの、セメントペースト部の強度と比較して同程度あるいは高かったためと推察される。ただし、より高強度のコンクリートを製造する場合あるいは珊瑚骨材の強度が著しく小さい場合においては注意が必要である。
- (3) 珊瑚骨材と海水を使用したコンクリートの収縮は、普通骨材を使用した場合と比較して小さくなった。この現象は、比較的多孔質である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。
- (4) W/C=0.41~0.56 程度の場合、表乾密度が低く、吸水率の高い珊瑚骨材を使用したコンクリートを用いた場合でも、海中部や干満帯では、長期間にわたり強度増進が確認された。ただし、長期の水和に伴い、モル

タル部の強度が増進した場合、骨材品質（特に骨材の圧縮強度）はコンクリートの強度に影響を及ぼす可能性がある。

- (5) 本検討の範囲内においては、44年経過後もコンクリートの中性化の進行は確認されなかった。

以上のように、ポンプ圧送時の骨材の吸水および高強度コンクリートへの利用に関しては注意が必要であるものの、硬化後の性状には長期の海洋環境への暴露を含めて、大きな問題は見られなかった。したがって、配合や環境を考慮することにより、珊瑚由来の石灰岩から採取した骨材は利用可能と考えられる。特に、外部環境の変化が著しくない環境（例えば海中等）で使用されるコンクリート部材（例えば消波ブロックや根固めブロック等）においては、JISの規格を満足していない珊瑚骨材であっても、特に問題はないと考えられる。

5.2 基準類への影響

ここで、今後遠隔離島で珊瑚骨材を使用する場合の基準類の状況について整理する。「港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁹⁾」において、コンクリートの配合条件について、下の枠囲み内の記載がある。通常の場合、無筋コンクリートの場合、無筋コンクリートであれば、水セメント比を0.60~0.65以下に設定していれば、耐久性が確保されるとしている。

なお、強度については、構造設計時に用いる強度（特性値）が無筋の場合18 N/mm²、鉄筋の場合に21~24 N/mm²と設定されているだけで、要求性能としての強度の設定

(4)コンクリートの配合条件は、耐久性を考慮して適切に定める必要がある。なお、下表は、港湾における既往のコンクリート構造物の調査結果、海水の作用を受けるコンクリートの耐久性に関する研究成果や知見に基づいて、構造部材の種類別に標準的な配合条件を示したものであり、これを参考にすることができる。ただし、栈橋上部工等のように、これまでに塩害劣化により所要の性能が失われる事例が多発しているような構造部材にあつては、耐久性（性能の経時変化）に関する検討を行い、施設の要求性能を達成するように適切に配合条件を定める必要がある。

表 構造部材別のコンクリート配合条件の参考表

種類	構造部材の種類別	配合条件：最大水セメント比	
		凍結融解がしばしば繰り返される地域	氷点下の気温となることがまれな地域
無筋コンクリート	防波堤上部工、ふたコンクリート、本体ブロック、異形ブロック（消波・被覆）、根固めブロック、袋詰めコンクリート	65	65
	係船岸上部工、胸壁、係船直柱基礎（重力式）	60	
鉄筋コンクリート	係船柱基礎（杭式）、胸壁、係船岸上部工 ^{*1)}	60	65
	栈橋上部工等 ^{*2)}	-	-
	ケーソン、ウェル、セルラーブロック、L型ブロック	50	50
	消波ブロック	55	55
	控壁、控杭上部工	60	60
	エプロン舗装	-	-

*1：栈橋上部工は除く。

*2：塩害劣化に起因する鉄筋腐食により、設計供用期間中に部材の性能低下が生じることが懸念される構造部材。

値は明確なものが存在していない。

上記を言い換えると、水セメント比が 0.60~0.65 程度である一般の骨材を用いたコンクリートと同程度の性能を有していれば、特殊な骨材を用いた無筋コンクリートに関する品質上の制約は、現状では特に無いといえる。

今回の珊瑚骨材の結果において、南鳥島のものは普通と同様以上であった。沖縄の方は、強度はやや劣った。ただし、海洋環境下で長期暴露された後も、強度は低下しておらず、むしろ強度増進が確認された。上述のように、外部環境の変化が著しくない環境(例えば海中)では十分適用可能と考える。

5.3 今後の課題

長期挙動、特に乾湿繰り返し戻しの厳しい環境での挙動は明確になっていないため、今後確認が必要である。なお、文献 30)では、乾湿繰り返し戻しの厳しい場合に劣化が生じやすい可能性を示唆している。併せて、実験的な評価のみならず、解析的な検討も含めて短期で評価できる手法の開発も望まれる。さらに、今回、鉄筋コンクリートの場合は主として想定していなかった。塩分浸透や腐食挙動の確認が今後必要である。なお、上記の検討を目的とした、珊瑚骨材コンクリートの暴露試験を現地と久里浜で実施中である。

(受付年月日：2020年9月11日)

謝辞：

本研究の大半(2-3章)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。

4章の長期暴露試験については、運輸省港湾技術研究所材料研究室出身の関博早稲田大学名誉教授(当時材料研究室室長)、大即信明東京工業大学名誉教授(当時研究官)等の諸先輩方が開始され、継続されたものである。

関係各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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
- 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) 石川雄康ほか: 高性能軽量骨材の吸水特性がコンクリートのポンプ圧送に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, No. 21, Vol.2, pp.349-354(1999)
- 4) 山路徹ほか: 珊瑚骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1827-1832(2016)
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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.
- 8) 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
- 9) 竹中寛ほか: 珊瑚由来の石灰石骨材が海水練りコンクリートの性質に及ぼす影響, 土木学会論文集, 論文番号: E2-0384, (登載決定)
- 10) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.709-714, 2009.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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
- 15) 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.
- 16) 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
- 17) 山路徹, 与那嶺一秀, 川端雄一郎: 珊瑚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.

- 18) 山路徹：海洋に位置するコンクリート構造物の耐久性照査手法に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1232(2011)
- 19) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2012
- 20) 西田法文ほか：湿式選別法によって製造した再生粗骨材を用いたコンクリートの性状，セメント・コンクリート論文集，No.59，pp.561-568(2005)
- 21) 松下博通ほか：再生細骨材を用いたモルタルの細孔構造の粗大化と強度及び耐久性の低下，土木学会論文集，Vol.62，No.1，pp.230-242(2006)
- 22) 早川健司ほか：海洋環境下における再生コンクリートの耐久性に関する研究，港湾空港技術研究所報告，第39巻第2号，pp.153-177(2000)
- 23) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]，pp.180-195 および pp.231-233.
- 24) 土木学会：ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー130，pp.7-8，2008.9.
- 25) 山路徹：熱帯(サバナ気候)環境下における珊瑚骨材を用いたコンクリートの諸特性，コンクリート工学，Vol.55，No.7，pp.570-577(2017)。
- 26) セメント協会：粗骨材の品質がコンクリートの諸性質の及ぼす影響，コンクリート専門委員会報告書，F-31 (1979)
- 27) 新井暢，中村成春，榊田佳寛，阿部道彦：再生細骨材コンクリートの強度及び変形状，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.1，pp.1081-1086，1997.
- 28) 山路徹ほか：海洋環境におけるコンクリートの劣化性状および劣化指標に関する検討，土木学会論文集E，Vol.66，No.1，pp.21-37(2010)
- 29) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上)，pp.482-484，日本港湾協会，2018.5.
- 30) 与那嶺一秀，山路徹，川端雄一郎：海水作用を受けるコンクリートの局所的劣化に対する一考察，セメント・コンクリート論文集，Vol.71，pp.425-431，2017.

港湾空港技術研究所報告 第59巻 第2号

2020.9

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2020) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

1. Investigation of Applicability of Coral Based Aggregate on Marine Concrete Structures Takahiro NISHIDA, Toru YAMAJI, Kazuhide YONAMINE, Osamu TANIGUCHI, Ryoichi TANAKA, Hiroshi TAKENAKA, Osamu KIYOMIYA.....	3
2. Centrifuge Model Tests for Investigation of Instability of Seawall Ground Due to Ocean Waves Hidenori TAKAHASHI.....	31
3. Interface shear properties between steel-slag-mixed dredged soils and different materials Satoshi MATSUMURA, Takaaki MIZUTANI, Yoshiyuki MORIKAWA, Yuzo AKASHI, Hideki HONDA, Masahiro SHIMIZU.....	51
4. Advanced Method for Identification of Windsea and Swell on the Multi-modal Directional Wave Spectrum Takashi FUJIKI, Koji KAWAGUCHI.....	84