

ブルーカーボン固定性を有する実機製造ほたて貝殻砂を用いたコンクリートの力学特性・耐久性の評価

DB20016 井口菊乃

1.はじめに

現在、北海道では年間約 40 万トンのほたてが水揚げされているが、それに伴い約 11 万トンの貝殻が廃棄物として発生していることが明らかになっている¹⁾。北海道の主要な水産物で、今後も安定した生産量が見込まれるほたて貝の持つ炭素固定性に着目し、PCa コンクリート部材にほたて貝殻砂を細骨材として置換した、カーボンニュートラル建材の開発を目的として研究^{2)~5)}を進めている。2009 年国連環境計画 (UNEP) にて、浅場の海洋生態系に取り込まれた炭素が「ブルーカーボン」と命名され、海洋生態系が炭素吸収源として位置付けられており、一般的には主に藻類などの生育中の水産資源を指すが、本旨であるほたて貝殻は、固化物として CO₂を固定化しており、長期利用される PCa 部材等の建設材料として使用可能とするものである。既往の研究では、北海道南西部の内浦湾で水揚げされた養殖ほたて貝の殻を原料に、地元の製造会社が少量生産で丁寧に加工した貝殻砂 (記号 Hs) を使用して実験を行ってきたが、実用化に向けて本報は、低コストの貝殻砂を大規模設備で量産が可能で、北海道東部にあるもう一つの製造会社から貝殻砂 (記号 Hbs) を入手して、これまでと同様の実験を行い、コンクリート用の細骨材として使用できるかを検証する。

2.ほたて貝殻砂使用コンクリートによる研究

2.1 ほたて貝殻砂の製造

図 1 に本研究で使用したほたて貝殻砂 Hbs の製造フローを示す。現在北海道では、ほたて貝殻は未利用資源と定義されているため、Hbs の製造工場は水産加工場より産業廃棄物であるほたて貝殻を購入し貝殻砂の製造を行っている。今回のコンクリートでは、粒径 0.6~1.2mm の製品を使用している。しかし、図 1⑧のエコセパレーターは時間制で篩をかけているため、分級が不十分であり、完全に微粉末を取り除くことができないと工場視察で確認できた。図 2 の a) に貝殻砂 70% と石灰砕砂 30% を混合した砂の粒度分布を、b) c) にほたて貝殻砂の形状を示す。ふるい分け試験の結果、0.3mm 以下の砂が (以下、微粉末) 12% 含まれていることが分かった。本報では、微粉末を全く除かないものを 12%、半分取り除いたものを 6%、全て取り除いたものを 0% と表記する。

2.2 実験の方針

本研究では、貝殻砂 Hbs を用いて、貝殻砂置換率の違いに加え、微粉末混入率の異なるものを含めた計 6 調合のコンクリートのフレッシュ性状と圧縮強度、長さ変化試験、促進中性化試験、凍結融解試験の確認を行う。併せて、貝殻砂の微粉末を全て取り除いた 2 調合については、引張強度と曲げ強度の測定を行う。外壁 PCa コンクリート部材としての要求性能を満たすことができるかを確認し、今後の実機練りに向けての課題を検討する。

2.3 使用材料および実験内容

表 1 に貝殻砂使用コンクリートの使用材料を、表 2 に PCa 部材に用いるコンクリートの、目標のフレッシュ性状と圧縮強度を、表 3 にコンクリートの計画調合を、表 4 に実験の要因と水準を、表 5 に試験項目および内容を示す。貝殻砂置換率、シリカフューム添加率、貝殻砂に占める微粉末混入率を試験要因としており、貝殻砂置換率 50% に対するシリカフュームの外割添加率は 5% とし、貝殻砂置換率 70% に対するシリカフュームの外割添加率は 20% とし、微粉末混入率 0%, 6%, 12% の 3 水準を組み合わせた計 6 調合について試験練りを行った。

表 1 使用材料

材料	記号	名称	内容
水	W	上水道水	密度 1.00g/cm ³
セメント	C	早強ポルトランドセメント (外壁 PCa パネル想定)	密度 3.14g/cm ³
混和材	Sp	シリカフューム	密度 2.2g/cm ³
細骨材	Ls	高知県鳥形山石灰石砕砂	表乾密度 2.65g/cm ³
	Hbs	ほたて貝殻砂 (Hbs 使用)	表乾密度 2.62g/cm ³
粗骨材	Lg	高知県鳥形山石灰石砕石	表乾密度 2.65g/cm ³
化学混和剤	Ad	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE	AE 剤	天然樹脂酸塩

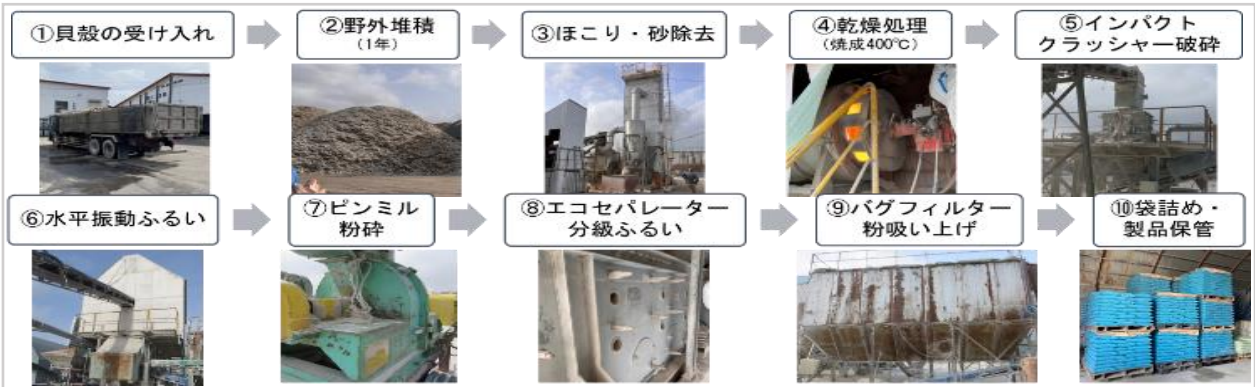
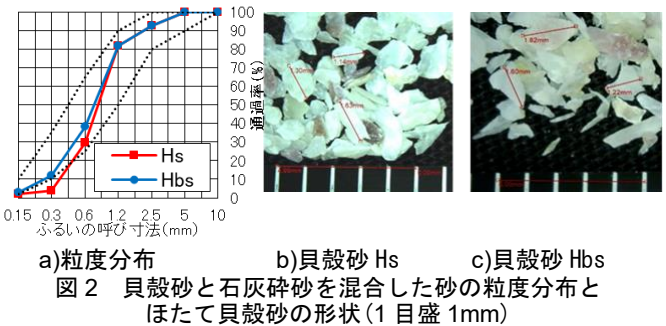


図 1 貝殻砂 Hbs 製造フロー⁶⁾

表 2 目標のフレッシュ性状と圧縮強度

項目	目標値
空気量	4.5±1.5 %
スランプ	12±2.5 cm
設計基準強度	30 N/mm ²
脱型時強度	15 N/mm ²

表 3 コンクリートの計画調査

調査	単位量 (kg/m ³)							
	C	W	LS	Hbs (%)	Lg	Sp	Ad (C×)	AE (C×)
①BC50/5/0	356	168	425	399 (0%)	976	18	2.1 (0.6%)	0.71 (0.2%)
②BC50/5/6	356	168	425	399 (6%)	976	18	2.5 (0.7%)	0.71 (0.2%)
③BC50/5/12	356	168	425	399 (12%)	976	18	2.5 (0.7%)	0.71 (0.2%)
④BC70/20/0	356	192	204	470 (0%)	976	71	3.2 (0.9%)	0.71 (0.2%)
⑤BC70/20/6	356	192	204	470 (6%)	976	71	3.6 (1.0%)	0.71 (0.2%)
⑥BC70/20/12	356	192	204	470 (12%)	976	71	3.9 (1.1%)	0.71 (0.2%)

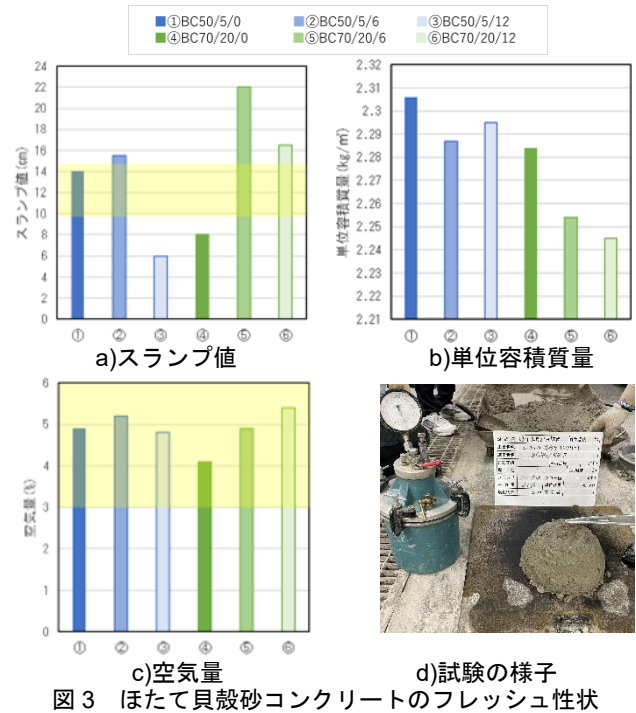
備考) Hbs の () 内は、0.3 mm 以下の微粉末混入率を示す。
結合材は B=C+Sp とし、W/B=0.45 で一定とする。

表 4 実験の要因と水準

要因	水準
ほたて貝殻砂種類	BC (Hbs)
セメント種類	PCa 部材想定・ 早強ポルトランドセメント一定
水結合比	W/b= 45%一定
細骨材中の貝殻砂割合 (%)	0, 30, 50, 70%
貝殻砂中の微粉末割合 (%)	0, 6, 12%
シリカフューム割合 (%)	5, 20%
化学混和剤使用量	通常使用量以下で、フレッシュ性状評価
コンクリート種類	貝殻砂種類/貝殻砂置換割合 /シリカフューム添加割合/微粉末割合 =① (BC50/5/0), ② (BC50/5/6), ③ (BC50/5/12), ④ (BC70/20/0), ⑤ (BC70/20/6), ⑥ (BC70/20/12) 計 6 種類

表 5 試験方法および内容

	試験項目	方法および内容
フレッシュ性状	スランプ試験 (mm)	JIS A 1101:コンクリートのスランプ試験方法 調査: ① (BC50/5/0), ② (BC50/5/6), ③ (BC50/5/12), ④ (BC70/20/0), ⑤ (BC70/20/6), ⑥ (BC70/20/12)
	単位容積質量 (g/mm ³)	JIS A 1116:フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法 及び空気量の質量による試験方法 (質量方法) 調査: ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥
	空気量 (%)	JIS A 1128:フレッシュコンクリートの空気量の圧力による 試験方法-空気室圧力方法 調査: ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥
力学特性	圧縮強度 (N/mm ²)	JIS A 1108:コンクリートの圧縮強度試験方法 円柱試験体 (D:100 mm, H:200 mm) 気中養生 材齢: 1d, 7d, 28d (各 3 本) 調査: ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥
	割裂引張強度 (N/mm ²)	JIS A 1113:コンクリートの割裂引張強度試験方法 円柱試験体 (D:100 mm, H:200 mm) 水中養生 材齢: 1d, 7d, 28d (各 3 本) 調査: ① (BC50/5/0), ④ (BC70/20/0)
	曲げ強度 (N/mm ²)	JIS A 1106:コンクリートの曲げ強度試験方法 角柱試験体 (H:100 mm, W:100 mm, L:400 mm) 水中養生 材齢: 28d (各 3 本) 調査: ①, ④
耐久性	長さ変化試験	JIS A 1129-2:モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第 2 部:コンタクトゲージ方法 角柱試験体 (H:100 mm, W:100 mm, L:400 mm) (各 3 本) 保存期間: 0d, 7d, 28d, 56d, 91d, 162d, 182d 保存条件: 温度 20±2°C, RH (60±5) %の恒温恒湿室 支持箇所: 試験体の両端から約 80mm 調査: ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥
	促進中性化試験	JIS A 1153:コンクリートの促進中性化試験方法 JIS A 1152:コンクリートの中性化深さの測定方法 角柱試験体 (H:100 mm, W:100 mm, L:400 mm) (各 3 本) 促進期間: 28d, 56d, 91d, 162d 促進条件: 温度 20±2°C, 相対湿度 (60±5) %, 二酸化炭素濃度 (5±0.2) %の恒温恒湿室 測定位置: 間隔 16mm, 左右 5 か所ずつ 調査: ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥
	凍結融解試験	JIS A 1148:コンクリートの凍結融解試験方法 角柱試験体 (H:100 mm, W:100 mm, L:400 mm) (各 3 本) 中心部温度: 最高 5±2°C, 最低-18±2°Cの範囲内 1 サイクル: 3 時間以上 4 時間以内 ブライン温度: 20°C~25°Cの範囲内 測定サイクル: 30s, 60s, 90s, 120s, 150s, 180s, 210s, 240s, 270s, 300s 調査: ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥



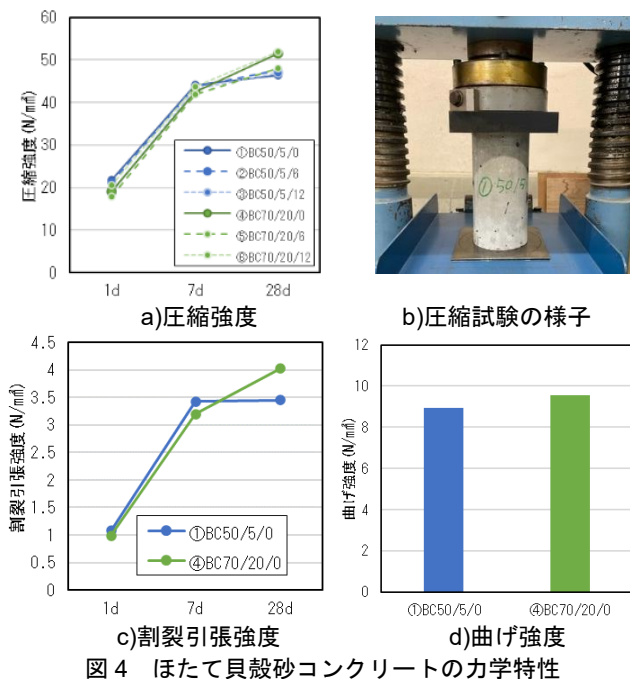


図4 ほたて貝殻砂コンクリートの力学特性

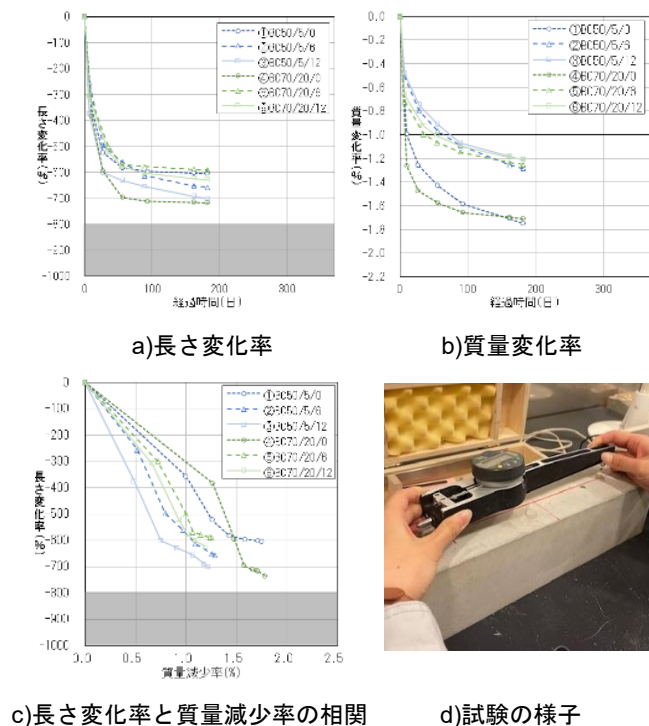


図5 ほたて貝殻砂コンクリートの収縮特性

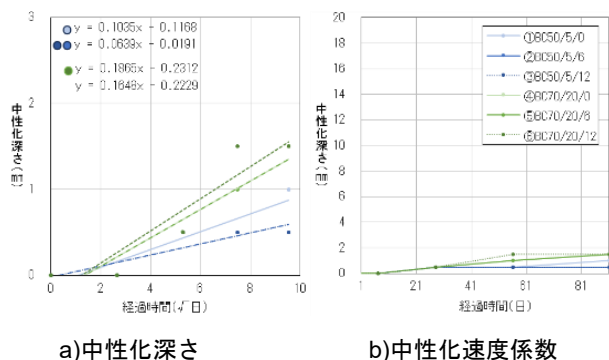


図6 ほたて貝殻砂コンクリートの中性化深さ特性

を図4のd)に示す。こちらにも貝殻砂置換率の大きい調合④の方が①を上回っていることがわかる。これは、シリカフュームの外割添加率の違いによる強度発現への影響も考えられるが、貝殻砂の扁平で角張った形状が、曲げ変形に抵抗する効果を発揮して、ほたて貝殻砂置換率が高い調合④の強度が高くなったと考えられる。

2.6 ほたて貝殻砂コンクリートの長さ変化試験

図5にコンクリートの収縮特性を示す。コンクリート中の空隙には径の小さいものから順に、ゲル空隙、毛細管空隙、小径エントラップトエア、大径エントラップトエアなどがある。図5のa)長さ変化率より、BC50/5シリーズでは微粉末を含んでいない調合①が最も収縮が小さく、微粉末割合の増加によって収縮率が大きくなることからわかる。これは、微粉末が混入することで収縮に関係するエントラップトエアよりも小さな空隙が発生することが原因であると推測できる。一方で、BC70/20シリーズは微粉末が少量の調合④の収縮が大きい。これは、フレッシュ性状の空気量が小さいことやほたて貝殻砂の微粉末が上手くかみ合わさったことでエントラップトエア以下の小さな空隙が多く発生し、乾燥に伴う収縮が発生したことで値が大きくなっており、空気量が大きいものは収縮に影響しない程度の大きさの空隙ができてしまい、変化が起こりにくいと考えられる。つまり、ほたて貝殻砂置換率や微粉末混入率だけでなく、空気量も関係すると言える。また、日本建築学会のJASS5鉄筋コンクリート工事によると、計画供用期間の級が長期および超長期のコンクリートでは、使用するコンクリートの乾燥収縮率は 8×10^{-4} とすることを踏まえて、今回ほたて貝殻砂を置換した試験体の収縮量は使用上問題のない範囲であると言える。次に、図5のb)質量減少率より、BC50/5シリーズとBC70/20シリーズで、ともに微粉末が0%である調合①・④の質量減少率が大きく、微粉末を含んでいる調合の方が質量減少率は小さい。これは、微粉末が混入することでより緻密になり大きな空隙の数が減り、結果的に含水が少なくなることが原因であると考えられる。続いて図5のc)平均長さ変化率と質量減少率の相関より、調合④は一定時間経過後の質量減少に対する長さ変化が大きくなっている。乾燥初期段階において気泡からの水分蒸発と毛細管空隙の水分蒸発に伴う、質量減少と乾燥収縮が同時に発生した後、乾燥期間が進むと、毛細管空隙を主とした乾燥に伴う収縮が進行したと考えられ、貝殻砂置換率とシリカフューム添加率、微粉末混入率の影響で生まれた空隙分布の違いが、質量減少や時間変化に伴う収縮率の増加につながると考えられる。

2.7 ほたて貝殻砂コンクリートの促進中性化試験

図6にほたて貝殻砂コンクリートにおける各試験体の中性化深さについて材齢ごとの変化と中性化速度係数を示す。グラフより、BC70/20シリーズがBC50/5シリーズに比べて1.5～2倍程度大きいことがわかる。続いて、BC50/5シリーズで微粉末を含んでいる調合②と③は、微粉末を含んでいない調合①と比べて中性化深さが若干小さい。BC70/20シリーズにおいては微粉末を多く含んでいない調合④が若干大きな値を取っている。しかし大きな差ではないため、ほたて貝殻砂中の微粉末割合は中性化深さに対する影響は小さい。既往の研究⁵⁾と同じく、粒形の良い石灰砕砂とは異なり、扁平で角張った形状を持つほたて貝殻砂の置換率の増減で中性化深さに多少の差が発生するが、微粉末による影響は微々たるものと考えられる。また、グラフ全体より、ほたて貝殻砂置換率で

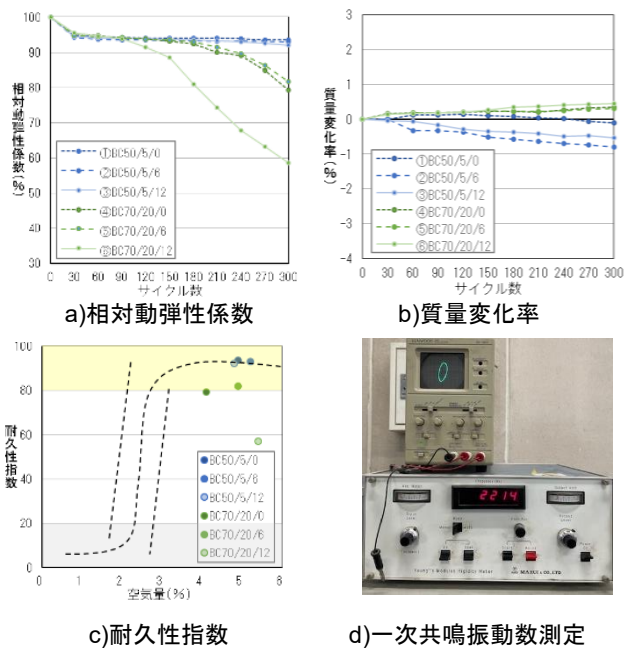


図7 ほたて貝殻砂コンクリートの凍結融解抵抗性

違いは見られるが、全体として中性化深さの進行は13週の時点において2mm以下と良好な結果である。PCa部材の配筋にあたって、日本建築学会のプレキャスト鉄筋コンクリート工事標準仕様書では、耐久性能上、有効な仕上りのない非構造部材の最小かぶり厚さは30mmであることを踏まえて、今回ほたて貝殻砂に置換した試験体の中性化深さは使用上問題のない範囲であると言える。

2.8 ほたて貝殻砂コンクリートの凍結融解試験

図7にほたて貝殻砂コンクリートにおける各試験体の相対動弾性係数と質量変化率を示す。図7のa)相対動弾性係数については、調合①～③は微粉末の混入率にかかわらず300サイクルを終えても90%以上を保っているのに対し、調合④～⑥では、最終的に大きく低下しており、調合④と⑤は300サイクルで80%前後、調合⑥では60%以下となった。JASS5では、激しい凍結融解作用を受ける箇所に使用するコンクリートの300サイクルにおける相対動弾性係数は85%以上とすることをふまえて、BC70/20シリーズでは、寒冷地においては十分な耐凍害性を有していないと言える。これは、貝殻砂に置換することで組織が疎になるため、置換率の増加で耐凍害性が低下したものと考えられる。次に、図7のb)質量変化率のグラフから、BC50/5シリーズは減少しているのに対し、BC70/20シリーズは増加している。BC50/5シリーズについては、相対動弾性係数からもわかるように、耐久性が高い傾向があるため、試験体内部の劣化が起きにくく表面のみに影響があり質量は減少している。一方で、BC70/20シリーズは凍結融解により試験体の外部だけでなく、内部にも劣化が生じて水が入り込み、質量が増加したと考えられる。続いて、図7のc)耐久性指数より、BC50/5シリーズはいずれも90%以上であることから、十分な耐凍害性を有していると言える。

3. まとめ

- 1) コンクリートのフレッシュ性状は、貝殻砂置換率や微粉末混入率が大きくなるほど、スランプ値は小さくなるが、高性能減水剤の添加によって調整が可能である。
- 2) 貝殻砂置換率や微粉末混入率が大きいほど単位容積質量が小さくなり、空気量が大きくなる傾向がある。

- 3) 圧縮強度や割裂引張強度は、貝殻砂置換率が大きい調合の方が、強度上昇が緩やかになるが、最終強度は高くなると考えられる。
- 4) 気中養生下においては、貝殻砂の微粉末混入率が異なっても圧縮強度に大きく影響はないものと考えられる。
- 5) 曲げ強度についても同様に、BC50/5よりも貝殻砂置換率の大きいBC70/20調合の方が材齢28日強度は高い。
- 6) 扁平で角張った形状を持つ貝殻砂は見かけ上の空隙ができやすく、そこから二酸化炭素が入り中性化が進むため傾向があるため、貝殻砂置換率の違いで多少の差が発生するが、微粉末による影響は小さく、問題ないと言える。
- 7) 一般に微粉末混入率の増加で小さな空隙が大量に発生し収縮が大きくなるが、貝殻砂微粉末の有無にかかわらず、フレッシュ時の空気量が小さい貝殻砂コンクリートは、材料同士が上手にかみ合わさり小さな空隙が多く発生して、収縮が大きくなる場合があると考えられる。
- 8) 微粉末混入率0%のコンクリートは大きな空隙が生じて、水分を多く含み、質量変化率が大きくなり、微粉末混入率が高い調合は大きな空隙が減り、含水率が少なくなることによって質量変化が小さくなると考えられる。
- 9) 貝殻砂置換により組織が疎になるため、貝殻砂置換率の増加で耐凍害性が低下する。また、相対動弾性係数が低下したものは、試験体の外部だけでなく内部にも劣化が生じて水が入り込み、質量が増加したと考えられる。

謝辞

本研究は、高橋カーテンウォール工業株式会社との共同研究であり、(株)北海道裕雅高柳雅保氏、(株)ビッシェル小川徳子氏、あいもり(株)小松幸雄氏及び技術者各位より多大な協力をいただいた。

参考文献

- 1) 水産系廃棄物発生量等調査(令和3年度発生分), 北海道水産林務部水産局水産振興課 HP,2022
- 2) 小室, 田村, 炭素固定性を有する海洋生物殻を混入したモルタルの基礎力学特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.33, No.1307, 2011.6
- 3) 小室, 田村, 炭素固定性を有する海洋生物殻を用いた鉄筋コンクリート造建築物のカーボンニュートラル性の検討, 日本建築学会技術報告集, 第40号, pp.841-846, 2012.10
- 4) 佐々木ら, 炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いたPCaコンクリート部材の開発 その1~3, 2022年度日本建築学会学術講演梗概集, 2022.9
- 5) 尾関ら, 炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いたPCaコンクリート部材の開発 その4~7, 2023年度日本建築学会学術講演梗概集, 2023.9
- 6) 井口, 細田ら, ブルーカーボン固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いたPCaコンクリート部材の開発と仕上げ性状の評価 その1~2, 2023年度日本建築学会論文報告集, 2023.10
- 7) Hosoda.N, Iguchi.K and etc, Development and basic property evaluation of mortar for 3D printer using sea shells waste with blue carbon fixation property, ISAT-22, 2023.10
- 8) 井口ら, 炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いたPCaコンクリート部材の開発 その6~7, 2023年度日本建築学会関東支部研究報告, 2024.3