

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 ほたて貝殻使用モルタルのフレッシュ性状・力学特性

1.材料施工ー2.モルタル・コンクリートの物性

準会員 ○ 高橋竜也*¹ 正会員 田村雅紀*²
 正会員 佐々木哲也*³ 正会員 齊藤敬志*³
 正会員 尾関伶太*³

モルタル 海洋生物殻 カーボンニュートラル
 資源循環 炭素固定 フレッシュ性状 力学特性

1. はじめに

現在、地球では温室効果ガスによる地球温暖化が顕在化しており、これは世界中で取り組むべき重要な課題となっている。2015 年にはパリで開かれた第 21 回国連気候変動枠組条約締約国会議(COP)において 2020 年以降の気候変動に関する取り組み「パリ協定」が合意され世界全体に目標が設定された。日本では 2030 年度までに 2013 年度比で 46%の温室効果ガス削減、さらには 2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルの実現に向け活動がなされている。その中でも二酸化炭素についてはカーボンニュートラルなど、技術とシステムの多面的な適応が求められている¹⁾。海水中の二酸化炭素を短期間で吸収して生成されるほたて貝殻は炭素固定性を有することにより、大気中または海水中の二酸化炭素を固定蓄積することが可能であり、二酸化炭素の削減に貢献できることがわかっている。現在、廃棄された貝殻の主な利用方法としてチョーク、融雪剤、路盤材¹⁾などがあるが、これらは資源環境の改善を主眼にした再利用方法の検討であり、炭素固定性を有する材料として新しい位置付けを築く目的は含まれていない。

2. ほたて貝殻砂混入基本調合モルタルに関する研究

2.1 実験の方針

本研究では、炭酸カルシウムの鉱物形成作用を有する有機無機融合体と位置付けられる、ほたて貝殻が炭素固定性を有する点に着目し、二酸化炭素を建築物に長期間固定蓄積することが可能となるコンクリートを調合し、そのフレッシュ性状、力学特性、熱伝導率、意匠性および環境改善性について調査を行う。本研究は PCa カーテンウォールにおいて求められる性能を満たすことを目標としており、今回はコンクリー

ト試験の事前検討として、モルタルのフレッシュ性状、圧縮強度、曲げ強度について調査する。



a) ほたて貝殻置き場



b) 一次焼成キルン



c) 分級機



d) ほたて貝殻砂

写真 1 ほたて貝殻生産工場 (2021 年北海道豊浦町調査)

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	密度 3.14g/cm ³
混和材	Sp	シリカフェウム	密度 2.2g/cm ³
	Lp	群馬県産石灰石微粉末	表乾密度 2.65g/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
	Hs	粗細粒度用ほたて貝殻砂	表乾密度 2.62g/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

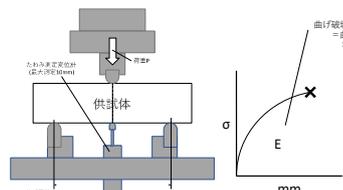
表 2 実験の要因と水準

要因	水準
セメント種類	早強ポルトランドセメント一定
水結合材比	45%一定
細骨材中の ほたて貝殻砂の割合(%)	0,30,50,70%
セメントに対する シリカフュームの割合(%)	0,5,10,20%

表3 モルタル調合(基本・改質)

調査番号	C	単位量(kg/m ³)						Ad(C×)
		W	Ls	Hs	Lp	Sp		
①	M0	508	228	1498	0	0	0	1.52g(0.3%)
②	M30	508	228	899	444	150	0	2.54g(0.5%)
③	M50	508	228	599	740	150	0	8.60g(1.5%)
③-1	M50/5	573	270	648	641	0	29	22.8g(1.0%)
③-2	M50/10	573	283	614	607	0	57	22.8g(1.0%)
④	M70	508	228	449	1037	150	0	8.60g(1.5%)
④-1	M70/5	573	270	389	897	0	29	22.8g(1.0%)
④-2	M70/10	573	283	368	850	0	57	22.8g(1.0%)
④-3	M70/20	573	309	327	754	0	115	22.8g(1.0%)

表4 試験項目と方法及び内容

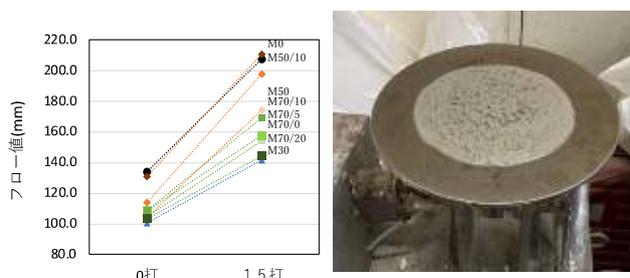
試験項目	方法および内容	
モルタルフレッシュ性状	フロー試験(mm)	JIS R 5201:セメントの物理試験方法によりフロー値を測定
	単位容積質量(kg/m ³)	JIS A 1116:フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法および空気量の質量による試験方法により単位容積質量を算出
	空気量(%)	JIS A 1116:フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法および空気量の質量による試験方法により空気量を算出
モルタル力学特性	圧縮強さ(N/mm ²)	JIS A 1108:フレッシュコンクリートの圧縮試験方法を参照し、円柱供試体(直径50mm、高さ100mm)(材齢7d、28d各3本)(20°C封緘養生)を用いて圧縮強度を測定
	曲げ強さ(N/mm ²)	JIS R 5201:セメント物性試験方法に準じ角柱供試体(40×40×160mm)(材齢28d各3本)(20°C封緘養生)を作成し、3線式中央1点載荷法により曲げ強度とたわみ量の関係を計測 

2.2 使用材料と実験の要因・水準

表1に使用材料一覧を、表2に試験要因と水準を、表3①～④にモルタル基本調合と③,④の改質調合を示す。細骨材中のほたて貝殻砂混入率を要因とし、ほたて貝殻砂を含まない0シリーズと30%、50%、70%含む4つの水準で試験練りを行い、細骨材中のほたて貝殻砂混入率によりフレッシュ性状や力学特性にどのような差が出るのかを調べる。モルタルの練

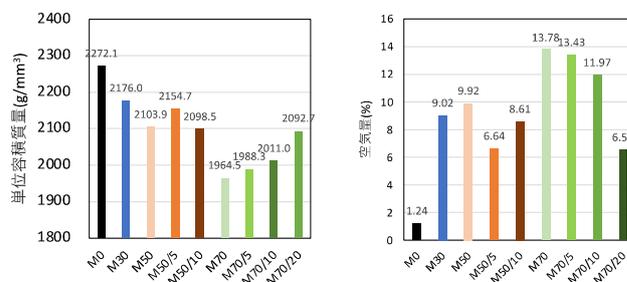
り混ぜは、モルタルミキサーで行い、各種試験に対応する供試体を作成し、硬化後脱型、20°C封緘養生した。

加えて、ほたて貝殻混入モルタルに関する研究から、ほたて貝殻混入モルタルの強度はモルタル中の空気量を減らすことで改善されるのではないかという考察に至ったため、調査にシリカフュームを加えることで、微小な粒子が空隙を埋め



a) フロー試験

写真2 15打フロー試験(M50/5)



b) 単位容積質量

c) 空気量

図1 フレッシュ性状の試験結果

るフィラー効果と、セメント中のCa(OH)₂とのポズラン反応でケイ酸カルシウム水和物を生成することによる強度向上、さらに球体の粒形によるベアリング効果を期待した改質調合を作成した。また、シリカフュームはシリコン製造の電気炉から発生する副産物であるため、製造によるCO₂排出がカウントされない材料となっている。本研究の調査は解体時の完全リサイクル性²⁾を考慮しており、シリカフュームはそれを害さない。改質後の試験要因は、ほたて貝殻砂混入率とシリカフューム添加量とし、水準は、ほたて貝殻砂混入率0%、50%、70%、シリカフューム添加率0%、5%、10%とした。

2.3 基本調合におけるフレッシュ性状に関する結果及び考察

表4に試験項目と方法及び内容を、図1にフレッシュ性状の試験結果を示す。目標のコンクリートの調査は水セメント比45%、空気量4.5%、目標スランプ12cmとしているため、今回のモルタル試験練りもこの調査条件を統一して行った。混和剤量は流動性が見られるまで後添加をしたため、調査ごと

に使用量が変化している。

表より、ほたて貝殻砂で置換したモルタルは流動性が低くなったため、加える混和剤量が増加し、ほたて貝殻を含んだ調合は材料分離の起こらない範囲では流動性の十分な確保ができなかった。フロー値についてほたて貝殻砂混入率とは比例せず、M30 のものが一番低く、M50 が一番高い結果となった。

率が増加するほどフロー値は下がり、空気量が大幅に増加したため強度が低下したと考えられる。

以上より、細骨材中のほたて貝殻砂混入率が増加するほどモルタルの圧縮強さは下がる事が確認できた。そのため、モルタル中の空隙を埋める粒径の細かい材料を調合に加えることで、強度低下を改善できると考える。

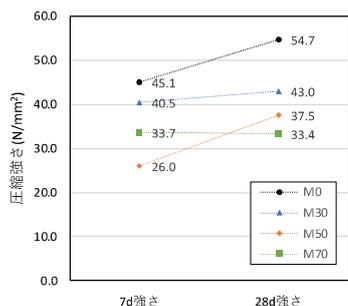


写真 3 破壊断面 (M50/5)



写真 4 圧縮強さ試験



写真 5 曲げたわみ試験

(2) 曲げ強さ

図 3 に曲げたわみ曲線とモルタルの曲げエネルギーを示す。曲げエネルギーは供試体が破断するまでの荷重とたわみ曲線下の面積 (N/mm) を計算して求めた。M70 の供試体は測定データに疑義があるため除外する。図より、曲げ強度について M30 は M0 と似た値を示したが、曲線特徴として M0 は最大荷重到達後すぐ脆性破壊するのに対し、M30、M50 は最大荷重到達後も急激に曲げ強度が低下することなく、変形が軟化し韌性を持つという特性が確認できた。曲げエネルギーについては、ほたて貝殻混入率が増加するほど大きくなる事がわかった。これはほたて貝殻混入モルタルに見られた韌性により、たわみ量が増加したことによると考えられる。

以上の結果より、フレッシュ性状、力学特性ともにほたて貝殻混入による影響が大きいことが確認できた。主に改善しなくてはならない項目は空気量で、空気量の改善を確認できれば単位容積質量、圧縮強度も向上していくと考えられる。

3. シリカフェームを加えたほたて貝殻混入改質調合モルタルに関する研究

3.1 改質調合におけるフレッシュ性状に関する結果及び考察

表 4 に試験項目と方法を、図 1 にフレッシュ性状の試験結果を示す。フレッシュ性状試験のみ M70 シリーズのシリカフェーム混入率 20% の調合を加えた。全ての調合条件については 2.3 と同様としている。図より、シリカフェームを添加することにより、フロー値は上昇し、特に M50/5、M50/10 のフ

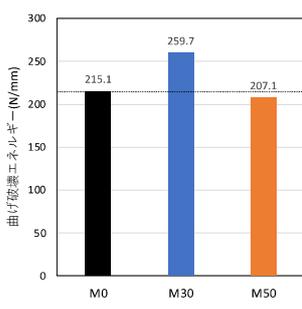
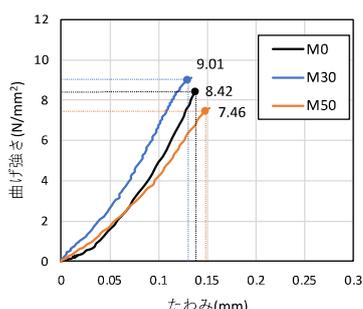


図 3 曲げ強さ試験結果 (基本調合)

単位容積質量はほたて混入率が増えるとともに低下し、それに伴い空気量が目標を超える値となった。空気量は貝殻砂の割合が増えるほど増加し、M70 シリーズでは M0 の値の 10 倍となった。

以上より、ほたて貝殻砂を細骨材として利用する場合、フロー値が低下し、流動性が悪くなることに加え空気量が大幅に増加するため単位容積質量が減少する事が確認された。

2.4 基本調合における力学特性に関する結果及び考察

(1) 圧縮強さ

図 2 に各供試体の強度試験の結果を示す。ほたて貝殻砂を混入したモルタルは、混入していないものに比べ強度は下がり、その値はほたて貝殻砂混入率が高くなるほど減少した。ほたて貝殻砂の扁平な粒形等の影響によりほたて貝殻砂混入

ロー値はM0/0の値と同等の結果となった。

図よりM70シリーズはフロー値こそ高く出なかったが、0打フローから15打フローの値への傾きは他の水準と同等だった。

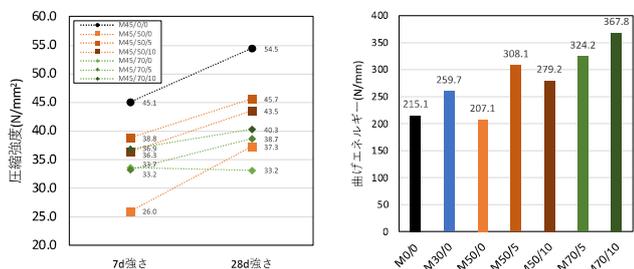
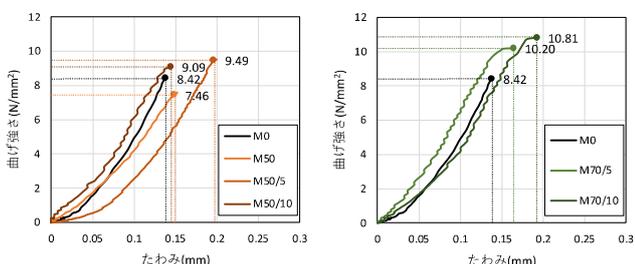


図4 圧縮強さ

a) 曲げ破壊エネルギー



b) 曲げたわみ曲線 (M50)

c) 曲げたわみ曲線 (M70)

図5 曲げ強さ試験結果 (改質割合)

ほたて貝殻砂混入モルタルにシリカフュームを添加することで、単位容積質量、フロー値、空気量と全て改善する結果となった。フロー値についてはシリカフュームの球体粒形によるベアリング効果、単位容積質量、空気量についてはファイラー効果の影響が大きいと考える。

3.2 改質割合における力学特性に関する結果及び考察

(1) 圧縮強さ

図4に各供試体の強度試験変化の結果を示す。圧縮強度についてM50シリーズはシリカフュームの添加量が5%のものがより改善効果が得られ、M70シリーズではシリカフューム添加量が多いほど強度が上昇したが、最終的な強度はM0シリーズの8割弱に留まった。これらの結果は単位容積質量、空気量の値が改善していることと、シリカフュームによるポズラン反応により、強度が向上しているためであると考えられる。

(2) 曲げ強さ

図5に曲げ強さとモルタルの曲げエネルギーを示す。図より、シリカフュームを加えたものは、曲げ強さ、たわみ量ともに値が向上し、M50シリーズでは5%、M70シリーズでは10%添加したものが高い値となった。また、曲げ強度等が向上し

た。空気量についてはM50シリーズではシリカフューム5%のものがより改善効果が見られ、M70シリーズでは10%でもあまり見られず、20%混和したところ改善が見られた。以上より、たことで、曲げ破壊エネルギーも向上し、M0/0に対しM50/5では約1.5倍、M70/10では1.7倍の値となった。

4. まとめ

- 1) ほたて貝殻砂はフレッシュ性状に大きく影響を及ぼし、空気量は貝殻混入率が増えるほど増加し、流動性も大きく下がる結果となったが、シリカフュームを添加することで、流動性の向上と混入空気量を抑える効果が見られた。
- 2) 圧縮強度について、ほたて貝殻砂を加えた割合は強度が低くなり、その値は貝殻割合が増えるほど低くなったが、シリカフュームを添加することで、強度改善が見られ、圧縮強度についてはM50シリーズでは5%、M70シリーズでは10%のシリカフュームを加えるとより高い効果を得られることが確認できた。
- 3) 曲げ強度については、ほたて貝殻砂混入率30%では大きな差は見られなかったが、50%になると大きく低下した。しかし、シリカフュームを加えることで、曲げ強度及びたわみ量が改善し、M50シリーズでは5%、M70シリーズでは10%添加するとより高い値を示した。また、曲げ破壊エネルギーについても曲げ強度とたわみ量の改善により値が向上した。
- 4) 以上より、ほたて貝殻を細骨材中に混入したコンクリートを調査する際にはフレッシュ性状及び各強度の低下が予測され、その値は混入率が増えるほど小さくなると考えられる。しかし、ほたて貝殻砂混入率50%のものにはシリカフュームを5%、70%のものには20%添加すると各種性状が向上し、PCaコンクリート製品としての諸条件を満たすことができるのではないかと予測できる。

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及び技術者各位、北海道豊浦町の関係者各位より、多大な協力をいただいた。

参考文献

- 1) 小室ら, 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，2012

- 2) 田村ら，セメント回収型完全リサイクルコンクリートの完全リサイクル住宅(SPRH)への実施工検討，日本建築学会技術報告集，2005

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 2 ほたて貝殻使用コンクリートのフレッシュ性状・力学特性

1.材料施工-2.モルタル・コンクリートの物性

準会員 ○ 高橋竜也*¹ 正会員 田村雅紀*²
 正会員 佐々木哲也*³ 正会員 斉藤敬志*³
 正会員 尾関伶太*³

コンクリート 海洋生物殻 カーボンニュートラル
 資源循環 炭素固定 フレッシュ性状 力学特性

1. はじめに

現在、北海道では年間約 34 万トンのほたてが水揚げされており、それに伴い約 13 万トンの貝殻が廃棄物として発生している¹⁾。それらの主な利用先としてチョーク、融雪剤、路盤材などがあるが、これらは廃棄されるほたて貝殻のリサイクルという扱いであり、ほたて貝殻自体の性質や性能を利用する意図は含まれていない。そこで本研究では、北海道の主要な水産物であり、今後も安定した生産量が見込まれるほたて貝殻の持つ炭素固定性²⁾に着目し、コンクリート材料のうち細骨材をほたて貝殻に置換した PCa コンクリート部材の開発を目指す。コンクリート中にほたて貝殻を混入することにより固定化させた CO₂ 分を排出量から減算させることで、環境負荷低減コンクリートを作成することができる。ほたて貝殻は海中の二酸化炭素を吸収して成長し、炭酸カルシウムの殻を形成する。その炭酸カルシウムには約 44%の CO₂が含まれているため、ほたて貝殻を 100kg 固定化させることができれば約 44kg の CO₂を固定化させることができると言える。本研究ではコンクリートへの細骨材としての混入量を意識した上で、フレッシュ性状・力学特性を評価する。

2. ほたて貝殻混入コンクリートに関する研究概要

2.1 実験の方針

事前研究³⁾より、ほたて貝殻を混入したモルタルは貝殻混入率の増加に伴い流動性が下がり、空気量が増大した。そこにシリカフェームを加えて試験を行った結果、ほたて貝殻混入率 50%はシリカフェーム 5%添加、混入率 70%にはシリカフェーム 20%添加が流動性と空気量の改善が見られることがわかったため、それらの調合を元にコンクリートを調合し、フ

レッシュ性状、力学特性について試験を行い PCa コンクリート製品としての基本性状を満たすことができるか検討する。

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	密度 3.14g/cm ³
混和材	Sp	シリカフェーム	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
	Hs	粗細粒度用ほたて貝殻砂	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

表 2 実験の要因と水準

要因	水準
セメント種類	早強ポルトランドセメント一定
水結合材比	45%一定
細骨材中のほたて貝殻砂の割合(%)	0,30,50,70%
セメントに対するシリカフェームの割合(%)	0,5,20%

表 3 コンクリート調査

調査番号		単位量(kg/m ³)							
		W	C	Ls	Hs	Lg	Sp	Ad(C×)	AE(C×)
①	C0/0	160	356	849	0	976	0	1.068(0.3%)	1.068(0.3%)
②	C30/0	160	356	594	252	976	0	1.068(0.3%)	1.068(0.3%)
③	C50/0	160	356	425	420	976	0	2.136(0.6%)	0.712(0.2%)
④	C50/5	168	356	403	399	976	18	2.136(0.6%)	0.712(0.2%)
⑤	C70/0	160	356	255	588	976	0	1.78(0.5%)	0.712(0.2%)
⑥	C70/20	192	356	204	470	976	71	2.492(0.7%)	0.712(0.2%)

表4 コンクリートの練り混ぜ時間と内容

練り混ぜ時間	30秒	60秒	90秒
内容	石灰石砕砂、ほたて貝殻砂、セメント、(シリカフューム)の順で投入 ドライミキシングにより十分ほたてを砂とセメントと混和し、分散性を高める	モルタル試験での調査検討 ³⁾ を反映し、コンクリートのコンシステンシーとして適切なモルタルを製造する	PCaコンクリート用の粗骨材のかさ容積を意識された材料を投入し、モルタルと十分に練り混ぜられる時間をセットしてコンクリートを練る

表5 試験項目と方法及び内容

試験項目		方法および内容
フレッシュ性状	スランブ試験 (cm)	JIS A 1101: コンクリートのスランブ試験方法により、スランブを測定
	単位容積質量 (t/m 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および空気量の質量による試験方法により、単位容積質量を算出
	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に準じ、空気量を計測
	塩化物量 (kg/m ³)	JASS5 T-502: フレッシュコンクリート中の塩化物量の簡易試験方法のカンタブを用いたモル法により測定
力学特性	圧縮強度 (N/mm ²)	JIS A 1108: コンクリートの圧縮試験方法に準じ、円柱供試体 (直径100mm、高さ200mm) (材齢1d、28d、56d各3本) (20°C封緘養生) を用いて圧縮強度を測定
	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に準じ、円柱供試体 (直径100mm、高さ200mm) (材齢1d、28d、56d各3本) (20°C封緘養生) を用いて引張強度を測定
	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に準じ、角柱供試体 (高さ100mm、幅100mm、長さ400mm) (材齢28d各3本) (20°C水中養生) を用いて曲げ強度を測定

コンクリート調合を、表4にコンクリートの練り混ぜ時間と内容について示す。細骨材中のほたて貝殻砂混入率とシリカフューム添加割合を要因とし、ほたて貝殻砂を含まない0シリーズとほたて貝殻30%、50%、70%含む4つの水準に加え、シリカフューム添加によりモルタル性状の改善が見られた

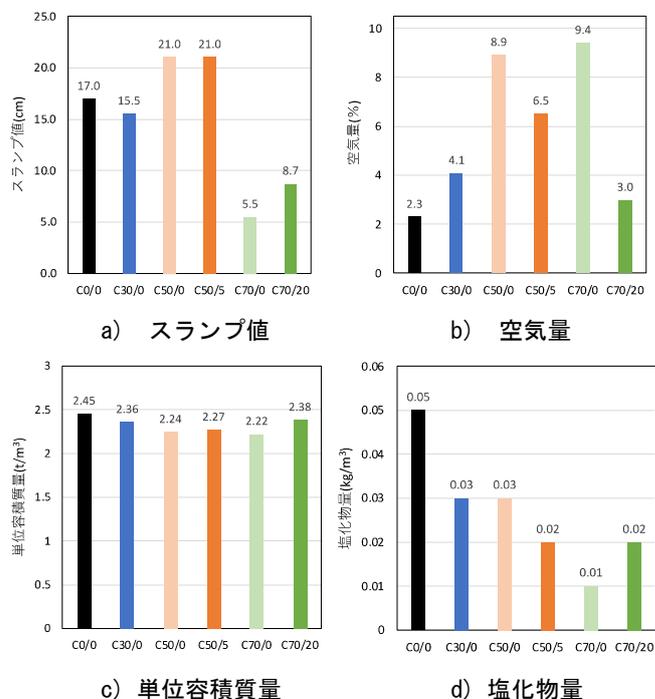


図1 フレッシュ性状の試験結果

ほたて貝殻50%にシリカフュームを5%添加したもの、70%に20%添加したものを加えた計6つの調合で試験練りを行い、フレッシュ性状や力学特性にどのような特徴が出るかを調べる。コンクリートの練り混ぜは、パンミキサーにより行い、各試験項目に対応する供試体を作成し、練り日の翌日に脱型を行い、円柱供試体は20°C封緘養生、角柱供試体は20°C水中養生をした。

2.3 フレッシュ性状に関する結果及び考察

表5に試験項目と方法及び内容を、図1にフレッシュ性状の試験結果を示す。今回のコンクリートの調合条件は水結合材比45%、空気量4.5%、目標スランブ12cmとしている。また、混和剤量は十分な流動性が得られるまで添加をしているため、調合ごとに使用量が変化している。

図より、スランブ値はC50シリーズのものが高くC70シリーズが低くなる結果となった。空気量についてはほたて貝殻砂混入率の増加とともに増加したが、シリカフュームを混入す



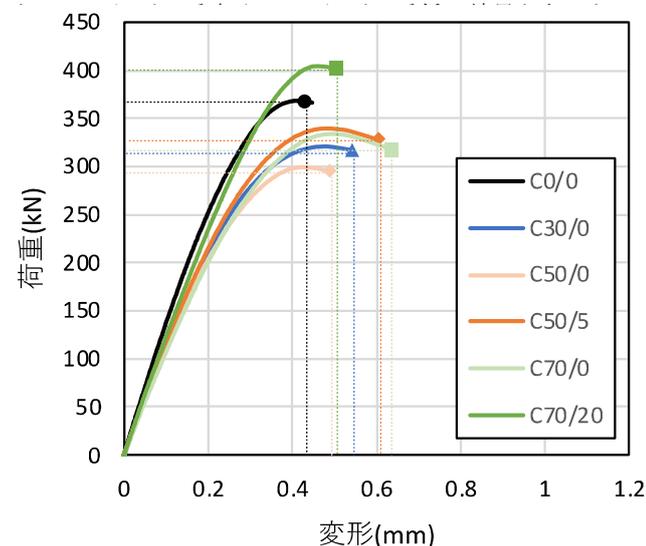
写真1 実験の様子

2.2 使用材料と実験の要因・水準

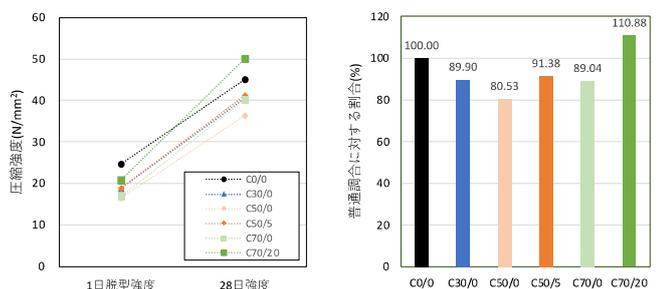
表1に使用材料一覧を、表2に試験要因と水準を、表3に

ること増加を抑えることができた。単位容積質量については空気量との相関が見られ、空気量の大きいものは単位容積質量が小さく、空気量の小さいものは単位容積質量が大きくなった。また、塩化物量はほたて貝殻砂混入量が増えると減

いても空気量の調節により改善が見られると考える。また塩化物量はほたて貝殻砂を混入すると減少し、混入割合が大きくなるほど低くなることがわかった。これはほたて貝殻砂生産時に洗浄と構成の工程が入っているためだと考えられる。

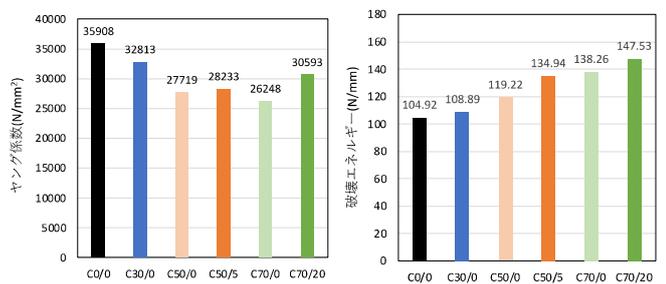


a) 荷重変形曲線



b) 圧縮強度変化

c) 対 C0/0 圧縮強度比 (28 日)

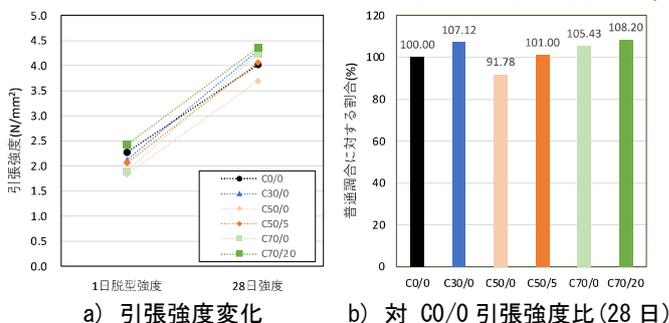


d) ヤング係数 (28 日)

e) 圧縮破断時破壊エネルギー

図 2 圧縮特性の試験結果

以上より、ほたて貝殻砂を細骨材として利用した場合ほたて貝殻砂混入量が多くなるほどフレッシュ性状は低くなるが、粗骨材により流動性や空気量に大きな差は出ず、混和剤の添加で流動性を調節できることがわかった。単位容積質量につ



a) 引張強度変化

b) 対 C0/0 引張強度比 (28 日)

図 3 引張特性の試験結果

2.4 力学特性に関する結果及び考察

(1) 圧縮特性

図 2 に各供試体の圧縮強度試験結果とヤング係数、破壊エネルギーを示す。ほたて貝殻砂を混入したコンクリートは、混入していないものに比べ脱型強度が下がった。28 日強度については C70/20 の強度増加が大きく、C0/0 の値を超える結果となった。その他の割合についても一番低いもので C50/0 が C0/0 に対し 8 割という結果になった。図 2d より、コンクリートのヤング係数は、ほたて貝殻混入率の増加に伴い値が小さくなったが、シリカフェームの添加によって改善し、その値は C0/0 の普通割合に続いて C30/0 が高く、その次に C70/20、C50/5 の順であった。

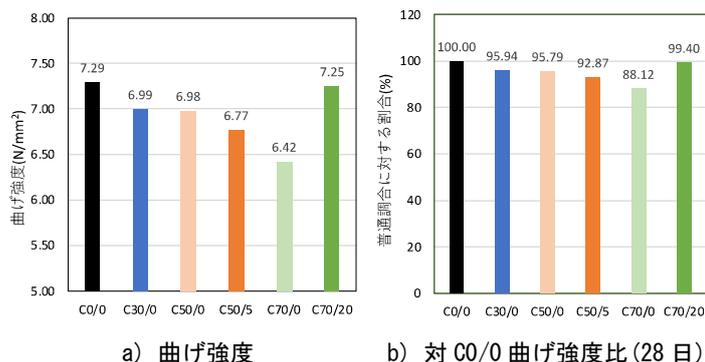
以上より圧縮強度試験について、細骨材中のほたて貝殻砂混入率が増加すると脱型強度は C0/0 と比べて低下したがシリカフェームを添加した割合は強度改善が見られた。そして 28 日強度は、C30/0、C50/5、C70/20 の割合において C0/0 に対し 9 割以上の値を示した。ヤング係数について、ほたて貝殻砂を混入すると普通割合に比べその値は大きく下がった。シリカフェームを添加することで改善が見られたが、最も改善が見られた C70/20 で普通割合の 8 割 5 分程度となった。

(2) 引張特性

図 3 に各供試体の引張強度試験結果を示す。脱型強度では、圧縮強度と同様にほたて貝殻混入量が増えることで強度は低下したがシリカフェームの添加により強度は向上し C70/20 の割合では C0/0 の値を超える結果となった。28 日強度では C50/0 の割合を除く全てが C0/0 の値を超え、一番値の大きい

C70/20はC0/0に対し約108%という結果だった。

以上より、引張強度についてほたて貝殻砂混入率が増加すると、脱型強度はC0/0と比べて低下したが、シリカフェュームを添加することにより改善が見られた。



c) 曲げ強度試験 (C70/20) d) 曲げ破断 (C70/20)

図 4 曲げ特性の試験結果

(3) 曲げ特性

図 4 に各供試体の曲げ強度試験結果を示す。図より、曲げ強度について、ほたて貝殻砂の混入による強度低下が見られた。C0/0 に対して C30/0 と C50/0 の強度低下は小さかったが、C70/0 では強度が大きく低下し 9 割弱の結果となった。また、C70/20 ではシリカフェーム添加により曲げ強度が改善され、C0/0 と同等の値を示したが、C50/5 は強度改善が見られなかった。C70/20 の値については、シリカフェームを添加したことによるフィラー効果とポゾラン反応で空気量の改善と強度向上が大きな影響を与えたと考えられる。

以上より、曲げ強度試験についてほたて貝殻砂混入により強度低下が見られたが、C30/0、C50/0 の値は大きく変わらず、C70/0 については大きく強度が下がったが、シリカフェームを添加することにより強度が向上し、普通調合と同等の値を得ることができた。ほたて貝殻混入量が多い調合の強度改善には空気量の改善と混和材による強度向上が必要であることがわかった。

3. まとめ

- 1) ほたて貝殻砂はフレッシュ性状に影響を及ぼすが、モルタルと違い粗骨材が入ることにより大きな性状悪化は見られなかった。
- 2) 圧縮強度について、ほたて貝殻砂を加えた調合は強度が下がり、その値は貝殻割合が増えるほど低くなったが、シリカフェームを添加することで強度改善が見られ、28 日強度では、C70/20 が普通調合に対し 110% と普通調合を超える結果となった。
- 3) 割裂引張強度について、ほたて貝殻砂を加えた調合は普通調合と比較して脱型強度が下がるが、シリカフェームを加えることで改善が見られ、28 日強度では普通調合を超える値となった。
- 4) 曲げ強度について、ほたて貝殻砂混入率 30%、50% では大きな差は見られなかったが、70% になると大きく低下する結果となった。また、シリカフェーム添加による効果について、C50/5 では改善が見られず、C70/20 になると曲げ強度が改善し、普通調合と同等の結果を示した。
- 5) 以上より、ほたて貝殻を細骨材中に混入したコンクリートはフレッシュ性状及び各種強度の低下が見られたが、シリカフェームを適量添加することで各性状が向上し、PCa コンクリート部材を製造する上でのフレッシュ性状、力学特性などの基礎物性を確認することができた。

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及び技術者各位、北海道豊浦町の関係者各位より、多大な協力をいただいた。

参考文献

- 1) 水産系廃棄物の発生状況等, 北海道水産林務部水産局水産振興課 HP, 2021
- 2) 小室ら, 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, 2012
- 3) 高橋ら, 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, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2021

*1 工学院大学 建築学部 建築デザイン学科 4 年

*2 工学院大学 建築学部 建築学科 教授・博士 (工学)

*3 高橋カーテンウォール工業株式会社

Undergraduate student, Kogakuin Univ. *1

Prof. School of Architecture, Kogakuin Univ. *2

Takahashi Curtain Wall Corporation *3

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3 材料・製品の製造段階の炭素量計量

1. 材料施工-16. 地球環境・資源

食品廃棄物 リサイクル カーボンニュートラル
 海洋生物殻 炭素固定性 環境負荷

正会員 ○ 斉藤敬志^{*1} 正会員 田村雅紀^{*2}
 準会員 高橋竜也^{*3} 正会員 佐々木哲也^{*1}
 正会員 尾関伶太^{*1}

1. はじめに

海洋生物殻は、成長時に海水中の CO₂ を短時間で吸収して固定することで生成され、炭素固定性を有する^{1),2)}。食用貝の中でも国内需要が最大のほたて貝は、漁獲消費によって排出される貝殻の量が最も多く、主な産地の北海道では年間約 13 万トンが廃棄物として出されている⁴⁾。日本の主要水産物であるほたて貝は今後も安定生産が見込まれ、貝殻廃棄物は発生し続けると考えられる。これまで貝殻の循環利用先について検討が行われ、建設土木分野ではコンクリートに用いる研究も行われてきた。当初、主眼はリサイクルであったが、小室・田村によって、ほたて貝殻をコンクリート用細骨材に利用した場合のカーボンニュートラル性に着目した検討が行われた^{1)・3)}。

本報では引き続きほたて貝殻の海洋からの採取、食用としての加工、骨材としての製造の各段階について、現地では実態調査とヒアリングを行った。これを基に、工場製品である外壁 PCa コンクリート部材（以下 PCa 部材）の細骨材に、ほたて貝殻砂（以下貝殻砂）を用いた場合の製造段階における炭素量の計量を行った。

2. 研究概要

PCa 部材で用いる、設計基準強度 30N/mm² の普通コンクリート調合（以下基本調合）をベースに、適正な粒度が得られる範囲で細骨材を貝殻砂に置換できる割合と、組み合わせる砂の種類などを検討した。その後、貝殻砂の置換率からモルタル、コンクリートの順でそれぞれのフレッシュ性状、力学特性などの基礎物性を確認した^{5),6)}。今回

の実験では貝殻砂への最大置換率が 70% までであれば、必要な基礎物性が得られることが確認できた。この結果から PCa 部材の製造段階で排出および固定される CO₂ 量を算出した。

3. 試算条件の設定

3.1 モデル建物の設定

モデル建物として関東地方の S 造 6 階建て事務所ビルに、非耐力外壁として貝殻砂を使用した PCa 部材を使用する想定とした。外壁面積は 3300 m²、PCa 部材厚 180mm、使用するコンクリート体積 600 m³ で設定し、現場塗装仕上げの一般の中規模ビルを想定した。

3.2 システム境界範囲の設定

図 1 の a) に貝殻砂の製造・輸送、b) に PCa 部材の製造に関わるシステム境界⁷⁾を示す。a) では水産加工業者からの貝殻を引き取る場所から境界範囲に含んでおり、b) では PCa 部材の製造までを境界範囲としている。また、本研究の主目的は貝殻砂を用いる効果についての評価であるため、貝殻砂を含めた PCa 部材を構成する各材料の製造・輸送も試算範囲に含めている。

3.3 各材料製造時の CO₂ 排出量の試算条件設定

表 1 に①PCa 部材の基本調合と②貝殻砂 70% 置換の調合（以下貝殻砂調合）を、表 2 に環境負荷の試算条件を示す。貝殻砂調合には貝殻砂の扁平形状に起因するコンシステンシーの低下を補う目的で、シリカフュームをセメント量の 20% を外割で使用しており、水粉体比を保つために単位水量を調整している。各材料の製造時の CO₂

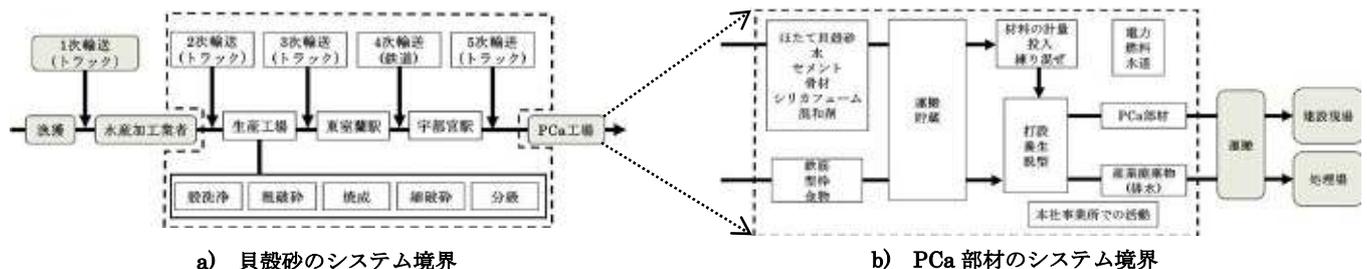


図 1 製造・輸送に関わるシステム境界

排出量については、既往の研究データ^{1), 2)}とヒアリングにより得られたデータを用いた。貝殻砂については、実態調査で得られたデータから粗破碎、焼成、細破碎のCO₂排出量を試算した。

3.4 各材料運搬時のCO₂排出量の試算条件設定

運搬時のCO₂排出量については、国が定めたガイドラインに基づいて試算した⁸⁾。試算方法は物資の輸送方法により異なっており、トラック輸送は最大積載時における改良トンキロ法を、鉄道・船舶輸送は最大積載時における従来トンキロ法を用いた。出発地から目的地までの片道輸送距離はヒアリングによるデータ収集、または地理情報システムによる一般道・最短距離の検索結果から求めた。

3.5 PCa部材製造時のCO₂排出量の試算条件設定

PCa部材製造時の試算は2019年に製造したPCa部材総量と、工場・本社事務所で使用した重油・ガソリン・軽油・灯油・LPG・電力から求めた年間CO₂排出量を用いて⁹⁾、PCa部材1m³あたりのCO₂排出量を試算した。

3.6 貝殻砂のCO₂固定量の試算条件設定

実態調査によって得られた貝殻砂に含まれる炭酸カルシウムの割合から、固定されているCO₂を試算した。

4. 結果および考察

4.1 製造時CO₂排出量の試算結果

表3に貝殻砂製造時の計算に用いる原単位を示す。これから現行の貝殻砂を1t製造する際の焼成に2時間、細破碎に4時間かかるものとして、製造時CO₂排出量を算定した。表4に②の調査における主な構成材料の製造時CO₂排出量と、設備更新を行うことで貝殻砂の製造量を4倍にするために、焼成と細破碎時間を1/4にした場合を②'改良貝殻砂調査として試算した。図3に①と②'調査における、主な構成材料の製造時CO₂排出量の比較を示した。CO₂排出量はセメントが最も多く、次いで貝殻砂が多い。貝殻砂を製造する際のCO₂排出量は石灰石砕砂と比べると約30倍になる。これは貝殻砂の製造時に、有機物臭の焼成処理が必要なためである。②と②'の比較から、製造効率を上げることで約31tのCO₂が削減できることが分かった。

4.2 輸送時CO₂排出量の試算結果

②の調査で輸送時にCO₂を排出する主な構成材料について、材料ごとの片道輸送距離、輸送回数、およびその積から総輸送距離を算定した結果を表5に示した。表2の試算条件から単位輸送距離当たりのCO₂排出量を求め、表5の総輸送距離との積から輸送時CO₂排出量を求めたもの

表1 PCa部材の計画調査

記号	調査内容	水粉体比 (%)	水	早強セメント	シリカフェューム	石灰石砕石	石灰石砕砂	ほたて貝殻砂	混和剤	空気量(%)	スランプ(cm)
①	PCa部材の基本調査	44.9	160	356	0	976	849	0	適量	4.5	12
②	貝殻砂70%置換の貝殻砂調査	44.9	192	356	71	976	204	470			

※備考:②'改良貝殻砂調査は②貝殻砂調査と同じ。

表2 環境負荷の試算条件

項目	内容
評価方法	PCa部材製造に用いる材料の製造時、出発地からPCa工場までの片道輸送時、およびPCa部材製造による環境負荷量 (CO ₂ 排出量)
材料製造負荷算定方法	貝殻砂: 貝殻砂の製造会社から得られたデータと実態調査より、粗破碎、焼成、細破碎時の、貝殻砂生産時のCO ₂ 排出量を試算した ^{1), 2)} 。
	シリカフェューム: 製造会社にヒアリングを行い、得られたデータを使用した。シリカフェューム0.006(kg-CO ₂)/t 早強セメント、水、高性能減水剤、AE剤、鉄筋、型枠、石灰石砕石、石灰石砕砂: 製造によるCO ₂ 排出量のデータを使用した ¹⁰⁾ 。早強セメント769(kg-CO ₂)/t, 水0.3(kg-CO ₂)/t, PCE系高性能減水剤350(kg-CO ₂)/t, リグニン系AE剤150(kg-CO ₂)/t, 鉄筋755(kg-CO ₂)/t, 形鋼型枠746(kg-CO ₂)/t, 石灰石砕石2.9(kg-CO ₂)/t, 石灰石砕砂3.7(kg-CO ₂)/t
PCa部材製造負荷算定方法	PCa製造工場: A重油、ガソリン、軽油、灯油、LPG、電力の使用量から換算係数(A重油: 39.1Gj/kg, ガソリン: 34.6Gj/kg, 軽油: 37.7Gj/kg, 灯油: 36.7Gj/kg, LPG: 50.8Gj/kg, 電力: 9.97Gj/1000Mwh)とCO ₂ 排出係数(A重油: 0.0189t-CO ₂ /GJ, ガソリン: 0.0183t-CO ₂ /GJ, 軽油: 0.0187t-CO ₂ /GJ, 灯油: 0.0185t-CO ₂ /GJ, LPG: 0.0161t-CO ₂ /GJ, 電力: 0.505t-CO ₂ /GJ)から得られた2019年度のCO ₂ 排出量の合計のデータ(677t)とPCa部材製造量のデータ(15801.3m ³)からPCa部材1m ³ あたりのCO ₂ 排出量を試算した ⁹⁾ 。 本社事務所: 関東の本社事務所での電気使用量から換算係数(電力: 9.97Gj/1000Mwh)とCO ₂ 排出係数(電力: 0.505t-CO ₂ /GJ)から得られた2019年度のCO ₂ 排出量のデータ(72.3t)と、関東3工場のPCa部材製造量のデータ(32795m ³)から、PCa部材1m ³ あたりのCO ₂ 排出量を試算した ⁹⁾ 。
輸送距離設定方法	貝殻砂: ほたて貝の水産加工業者(北海道長万部町)から貝殻砂製造工場(北海道虻田郡豊浦町)、製造工場から東室蘭駅、宇都宮駅からPCa工場(茨城県八千代町)までを10tトラックによる輸送と仮定し、G社のルート検索地理情報システムを用いて、一般道・最短距離で片道輸送距離を試算した。また、東室蘭駅から宇都宮駅までを鉄道(650t貨物列車)による輸送と仮定し、J社路線距離を用いて試算した。 石灰石砕石、石灰石砕砂、AE剤、シリカフェューム: 製造会社にヒアリングを行い得られたデータから試算した。石灰石砕石・砕砂は製造工場から須崎港までベルトコンベアで運ばれ、10000t船舶によって袖ヶ浦港まで輸送し、そこから10tトラックによってPCa工場まで輸送している。ベルトコンベアは石灰石砕石・砕砂製造のシステム領域に入るため、輸送負荷の試算に含めない。AE剤は製造工場(神奈川県東八幡)からPCa製造工場まで4tトラックで輸送している。シリカフェュームは製造工場から上海港まで20tトラックで運ばれ、10000t船舶によって横浜港まで輸送し、そこから10tトラックによってPCa工場まで輸送している。 早強セメント、高性能減水剤、鉄筋、型枠: 製造会社にヒアリングを行い、得られたデータからCO ₂ 排出量を試算した。PCa工場までの片道輸送距離は、G社のルート検索地理情報システムを用いて、各材料の出荷場所(早強セメント:埼玉県熊谷市, 高性能減水剤:群馬県邑楽郡, 鉄筋:埼玉県川口市, 型枠:埼玉県熊谷市)からの一般道・最短距離で片道輸送距離を試算した。早強セメント, 高性能減水剤, 鉄筋は10tトラックによる輸送とし、型枠は20tトラックによる輸送とした。
輸送負荷算定方法	トラック輸送: 10tトラック, 4tトラックの最大積載時の運搬距離と総輸送回数の積による総輸送距離を求め、改良トンキロ法燃料使用原単位(軽油, 10tトラックの最大積載量10,000~11,999kg・積載率100%: 0.0342 L/t・km, 4tトラックの最大積載量4,000~5999kg・積載率100%: 0.0573 L/t・km), CO ₂ 排出係数(軽油: 2.62kg-CO ₂ /L)を用いて試算した ⁸⁾ 。 20tトラックについては積載率100%の時の最大積載時の運搬距離と総輸送回数の積による総輸送距離を求め、土木学会コンクリート委員会におけるコンクリートの環境負荷評価研究小委員会のインベントリデータ(20tディーゼルトラック: 0.0714kg-CO ₂ /km・t)を用いて試算した ¹⁰⁾ 。 船舶輸送: 10000t船舶において最大積載時の運搬距離と総輸送回数の積による総輸送距離を求め、従来トンキロ法CO ₂ 排出原単位(船舶: 39g-CO ₂ /t・km)を用いて試算した ⁸⁾ 。 鉄道輸送: 650t貨物列車において積載率100%の時の最大積載時運搬距離と総輸送回数の積による総輸送距離を求め、従来トンキロ法CO ₂ 排出原単位(鉄道: 22g-CO ₂ /t・km)を用いて試算した ⁸⁾ 。
	CO ₂ 固定量算定方法

を表6に示す。図4には②調合での各材料の総輸送距離を示し、図5には①、②調合の輸送時CO₂排出量の比較を示した。表5から、貝殻砂や石灰石砕石・砕砂は出発地から茨城県内のPCa工場までの片道輸送距離は長い、1回の輸送量が多い鉄道や船舶輸送を行っているため、総輸送距離が短いことが分かる。ただし、中国産シリカフェウムは片道輸送距離が非常に長く、輸送量は少ないが総輸送距離が長い。図5より輸送時CO₂排出量は、使用量が最も多く輸送距離の長い石灰石砕石が最も高い値を示し、次いでシリカフェウム、貝殻砂の順であった。

表3 貝殻砂製造時の計算に用いる原単位

工程	数値
電気使用に伴う二酸化炭素の排出係数(kg-CO ₂ /kWh)	0.601 ¹¹⁾
A重油の二酸化炭素の排出係数(t-CO ₂ /L)	0.00277 ¹⁰⁾
1次粗破碎 ハンマーミル(kW)	15
焼成用キルン式 灯油バーナー(L・t/h)	10
2次粗破碎 ビクトリーミル(kW・t)	37

表4 ②、②'における材料製造時のCO₂排出量

材料	②貝殻砂調合		②'改良貝殻砂調合	
	CO ₂ 排出量(t-CO ₂)		CO ₂ 排出量(t-CO ₂)	
セメント	164		164	
石灰石砕石	1.7		1.7	
石灰石砕砂	0.5		0.5	
貝殻砂	1次粗破碎	2.5	1次粗破碎	2.5
	焼成	15.6	焼成	3.9
	2次細破碎	25.1	2次細破碎	6.3
	合計	43.2	合計	12.7
鉄筋	36.2		36.2	
型枠	10.7		10.7	
合計	257		226	

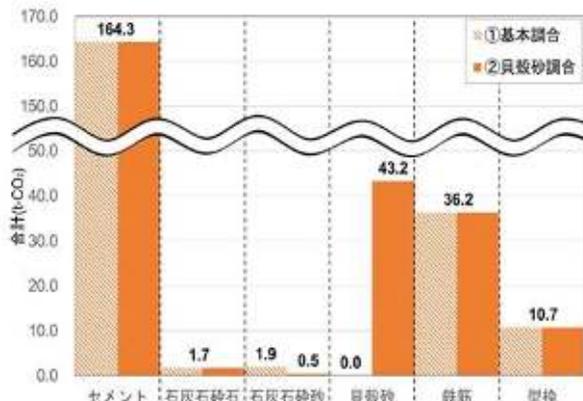


図3 ①、②における材料製造時のCO₂排出量の比較

4.3 PCa部材製造・輸送時のCO₂排出総量

本研究では材料製造・材料輸送とPCa部材製造で発生するCO₂量の合計をCO₂排出総量として、モデル建物における施工数量に合わせて評価を行った。表7に各調合の材料別CO₂排出量を、表8に材料の製造・輸送とPCa部材製造でのCO₂排出量、およびCO₂排出総量を、図6にはCO₂排出総量の比較を示した。図6のIのように、②の調合では、貝殻砂が固定しているCO₂を差し引いた場合に、CO₂排出総量が約36%削減され、②'では約40%削減されることが示された。また、IIのように①の基本調合と比較した場合、②の調合ではCO₂排出総量は約26%削減され、②'では約37%削減されることが示された。

今回の調査は建物解体時の完全リサイクル性を考慮し、骨材は高知県産の石灰石砕石・砕砂を使用した¹²⁾。また、

表5 実態調査に基づく②における輸送関係の試算結果

材料	出発地	目的地	輸送方法	片道輸送距離(km)	輸送回数(回)	総輸送距離(千km・回)
早強セメント	埼玉県熊谷市	PCa製造工場(茨城県八千代町)	10tトラック	65	21.4	1.39
			20tトラック	2400	2.1	5.11
シリカフェウム	中国工場	上海港	10000t級船舶	2000	0.004	0.01
	上海港	横浜港	10tトラック	105	4.26	0.45
	横浜港	PCa製造工場	10000t級船舶	720	0.06	0.04
石灰石砕石	須崎港	袖ヶ浦港	10000t級船舶	105	58.6	6.15
	袖ヶ浦港	PCa製造工場	10000t級船舶	720	0.01	0.01
石灰石砕砂	須崎港	袖ヶ浦港	10tトラック	105	12.2	1.29
	袖ヶ浦港	PCa製造工場	650t貨車	925	0.43	0.40
貝殻砂	水産加工業者(北海道長万部町)	貝殻加工業者(北海道豊浦町)	10tトラック	10	28.2	3.36
	貝殻加工業者	東室蘭駅		52		
	宇都宮駅	PCa製造工場		57		
鉄筋	埼玉県川口市	PCa製造工場	10tトラック	80	4.80	0.38
型枠	埼玉県熊谷市	PCa製造工場	20tトラック	24	0.72	0.02

表6 ②における輸送時のCO₂排出量の試算結果

材料	二酸化炭素排出量	
	輸送距離当たり(kg-CO ₂ /km)	施工量当たり(t-CO ₂)
早強セメント	0.896	1.2
シリカフェウム	トラック輸送	1.428
	船舶輸送	390
石灰石砕石	トラック輸送	0.896
	船舶輸送	390
石灰石砕砂	トラック輸送	0.896
	船舶輸送	390
貝殻砂	鉄道輸送	14.3
	トラック輸送	0.896
鉄筋	0.896	0.34
型枠	1.428	0.02
合計		47.9

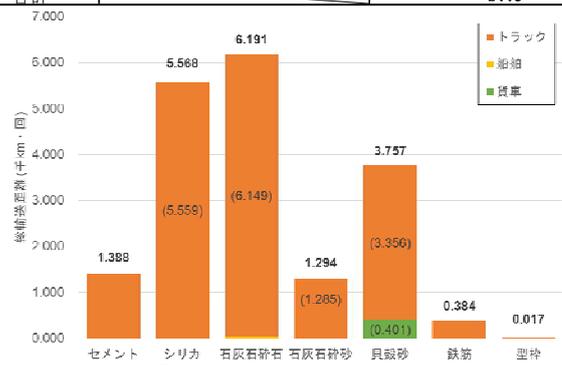


図4 総輸送距離

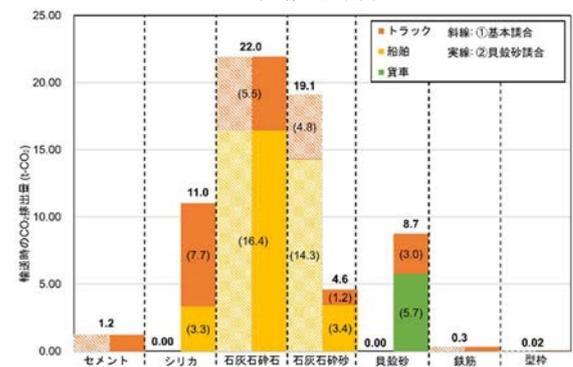


図5 ①、②における輸送時のCO₂排出量の比較

フレッシュ時のコンシステンシーを維持するため、②、②'にはシリカフェウムを併用しており、現在、耐久性についての評価を行っている。試算結果から、砂の70%を貝殻砂に置換した場合、併用するシリカフェウムの輸送負荷も加わり、PCa部材の材料製造と輸送時のCO₂排出量は、①の基本調合に比べて多い傾向を示したが、ほたて貝殻の成長時のCO₂固定量を差し引くことで、PCa部材製造全体における、CO₂排出総量は削減されることが示された。

表7 各調査の材料別CO₂排出量(製造+輸送)

	①基本調査	②貝殻砂調査	②'改良貝殻砂調査
早強セメント	165.5	165.5	165.5
シリカフェーム	0.0	11.0	11.0
石灰石砕石	23.7	23.7	23.7
石灰石砕砂	21.0	5.0	5.0
貝殻砂	0.0	52.0	21.5
鉄筋	36.6	36.6	36.6
型枠	10.8	10.8	10.8
その他	0.4	0.5	0.5

表8 PCa部材製造に関わるCO₂排出総量

	①基本調査	②貝殻砂調査	②'改良貝殻砂調査
材料製造時(A)	214.8	257	226
材料輸送時(B)	42.7	47.9	47.9
PCa工場・本社(C)	27.0	27.0	27.0
CO ₂ 排出総量(A+B+C)	284.9	332.1	301.5
CO ₂ 固定量	0.0	121.7	121.7
(CO ₂ 排出総量) -(CO ₂ 固定量)	284.9	210.3	179.8

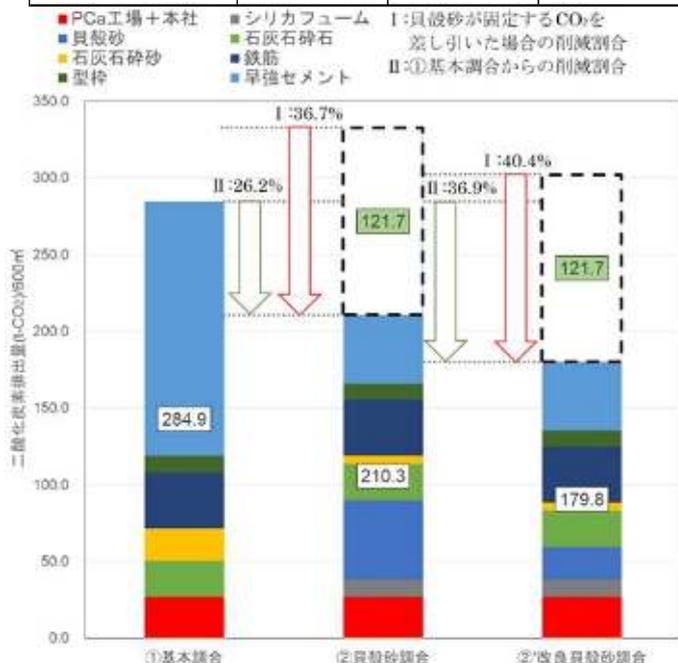


図6 モデル建物のPCa部材製造によるCO₂排出総量の比較

5. まとめ

- 1) 貝殻砂の製造段階では、石灰石砕砂に比べ、約30倍のCO₂を排出している。
- 2) PCa部材製造に関わるCO₂排出総量について、貝殻砂調査では貝殻が固定している分を差し引くことで、CO₂排出量が36%以上異なる。
- 3) 基本調査から貝殻砂70%置換調査に変えた場合、材料の製造・輸送時のCO₂排出量が増加するため、PCa部材製造に関わるCO₂排出総量は増加するが、貝殻砂のCO₂固定量を差し引くことで、基本調査よりも約26%の削減効果がある。
- 4) 貝殻砂の製造効率の改善によりCO₂排出量が抑えられ、

*1 高橋カーテンウォール工業株式会社

*2 工学院大学 建築学部 建築学科 教授・博士(工学)

*3 工学院大学 建築学部 建築デザイン学科4年

CO₂排出総量に対する貝殻砂のCO₂固定割合が高まる。

- 5) 貝殻砂の置換率を最大にしてCO₂固定効果を引き上げるのに、フレッシュ時のコンシステンシーを維持する目的でシリカフェームを併用したことで、シリカフェームの長距離輸送によるCO₂排出量が多く占める結果となった。
- 6) 2~3年で成長するほどに貝殻を細骨材に利用してPCa部材を製造し、建築材料の一部として建物に使用し続けることで炭素固定効果を発揮する¹²⁾。建物の供用期間が長いほど効果は持続するため、耐久性の高いコンクリートが求められる。引き続き耐久性については検証を行っていく。
- 7) 本研究では、建物解体時のリサイクル性を考慮して、高知県産の石灰石骨材と貝殻砂を組み合わせた。これにより、廃棄物を出さずに全量がセメント材料として再利用できる。

謝辞

本研究にあたり、北海道裕雅高柳雅保氏および北海道豊浦町の関係各位より多くの助力を得た。

参考文献

- 1) 小室ら, 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, 2012
- 2) 小室ら, 海洋生物殻廃棄物を用いたコンクリート系材料の破壊特性と環境改善効果, 日本建築学会技術報告集, 2009
- 3) 清宮ら, シェルコンクリートの強度特性について, コンクリート工学年次論文集, 30(2), 2008
- 4) 水産林務部, 令和3年度水産系廃棄物発生量等調査, 2021
- 5) 高橋ら, 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, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2022
- 6) 高橋ら, 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2, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2022
- 7) ISO13315-2 コンクリートに関するシステム境界及びインベントリデータ, 2017
- 8) 経済産業省・国土交通省, 物流分野のCO₂排出量に関する算定方法ガイドライン, 2016
- 9) 環境省: 地球温暖化対策地域推進計画ガイド, 2007
- 10) 日本コンクリート工学会, コンクリート環境テキスト, 2020
- 11) 環境省, 電気事業者別のCO₂排出係数, 2021
- 12) 田村ら, セメント回収型完全リサイクルコンクリートの完全リサイクル住宅への実施工検討, 日本建築学会技術報告集, 2005

Takahashi Curtain Wall Corporation *1

Prof. School of Architecture.Kogakuin Univ. *2

Undergraduate student, Kogakuin Univ. *3