炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いたモルタル・コンクリートのフレッシュ性状・力学特性

DC18174 高橋 竜也

1. はじめに

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 [1)]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置換することにより固定化させた CO_2 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。本研究では細骨材としての置換量を意識した上で、モルタル・コンクリートのフレッシュ性状・力学特性と材料・製品製造段階の炭素量を計量し評価する。

2. 研究概要

2.1 研究の方針(研究 1・2・3)

研究 1 では、コンクリート試験の事前検討として、ほたて貝殻砂置換モルタルのフレッシュ性状、圧縮強さ、曲げ強さについて調査し、研究 2 ではモルタル実験の結果をもとに調合したコンクリートで、フレッシュ性状、力学特性についての試験を行い、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。研究 3 ではモデル建物における施工数量に合わせて、材料製造・材料輸送と PCa 部材製造で発生する CO_2 量の合計を CO_2 排出総量として計量し、そこから貝殻成分($CaCO_3$)に含まれる CO_2 固定量を embody CO_2(CO_2 固定分)として CO_2 排出量から減算することで評価を行った。

2.2 使用材料および研究方法(研究 1・2)

表 1 に本研究で使用する材料一覧を、表 2 に研究 1・2 の実験要因と水準を、表 3 に研究 1・2 の調合を表 4 に本研究の試験方法と内容を示す。研究 1 では細骨材中のほたて貝殻砂置換率とシリカフューム添加量を要因とし、ほたて貝殻砂置換率 0%、30%、50%、70%に加え、ほたて貝殻砂置換率 50%、70%にシリカフュームを 0%、5%、10%,20%添加したもので試験練りを行い、細骨材中のほたて貝殻置換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。研究 2 ではほたて貝殻砂置換率 0%、30%、50%、70%の 4 水準に加え、シリカフューム添加により性状の改善が見られたほたて貝殻 50%にシリカフュームを 5%、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う。

表 1　実験使用材料(研究 1・2)

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	Lp	群馬県産石灰石微粉末	表乾密度 2.65g/cm^3
	Sp	シリカフューム	密度 2.2g/㎤
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/㎤
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(研究 1・2)

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%
粗骨材量（研究 2）	石灰石砕石一定
化学混和剤使用量（研究 2）	通常使用量以下一定でフレッシュ性状把握
空気量　（研究 2）	4.5±1.5%目標(一定混和剤量以下)
スランプ（研究 2）	12±2.5cm目標（一定混和剤量以下）

表 3 PCa 製品用の計画調合(研究 1・2)

		調合記号	単位量(kg/m^3)								
			C	W	Ls	Hs	Lg	Lp	Sp	Ad(C×)	AE(C×)
研究1	モルタル調合	M0	508	228	1498	0	0	0	0	1.52g(0.3%)	0
		M50	508	228	599	740	0	150	0	8.60g(1.5%)	0
		M50/5	573	270	648	641	0	0	29	22.8g(1.0%)	0
		M50/10	573	283	614	607	0	0	57	22.8g(1.0%)	0
		M70	508	228	449	1037	0	150	0	8.60g(1.5%)	0
		M70/5	573	270	389	897	0	0	29	22.8g(1.0%)	0
		M70/10	573	283	368	850	0	0	57	22.8g(1.0%)	0
		M70/20	573	309	327	754	0	0	115	22.8g(1.0%)	0
研究2	コンクリート調合	C0/0	356	160	849	0	976	0	0	1.068(0.3%)	1.068(0.3%)
		C30/0	356	160	594	252	976	0	0	1.068(0.3%)	1.068(0.3%)
		C50/0	356	160	425	420	976	0	0	2.136(0.6%)	0.712(0.2%)
		C50/5	356	168	403	399	976	0	18	2.136(0.6%)	0.712(0.2%)
		C70/0	356	160	255	588	976	0	0	1.78(0.5%)	0.712(0.2%)
		C70/20	356	192	204	470	976	0	71	2.492(0.7%)	0.712(0.2%)

備考）化学混和剤使用量は通常使用量範囲とし、空気量・スランプ値の比較を行う

写真 1 ほたて貝殻砂

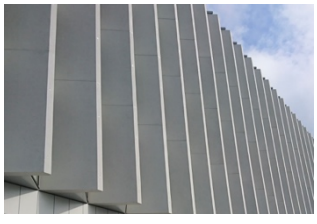
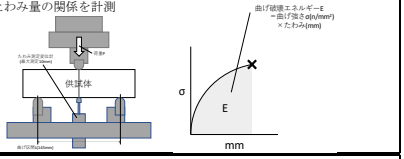


写真 2 PCa カーテンウォール

表 4　試験方法と内容(研究 1・2・3)

	試験項目		方法および内容
研究 1	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/m³)	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/mm²)	JIS A 1108：フレッシュコンクリートの圧縮強度試験方法を参照し、円柱供試体(直径50mm、高さ100mm)(材齢7d、28d各3本)(20℃封緘養生)を用いて圧縮強度を測定
		曲げ強さ (N/mm²)	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℃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 
研究 2	コンクリート フレッシュ性状	スランプ試験 (cm)	JIS A 1101：コンクリートのスランプ試験方法により、スランプを測定
		単位容積質量 (t/m³)	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/m³)	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ール法により測定
	コンクリート 力学特性	圧縮強度 (N/mm²)	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℃封緘養生)を用いて圧縮強度を測定
		引張強度 (N/mm²)	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℃封緘養生)を用いて引張強度を測定
		曲げ強度 (N/mm²)	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℃水中養生）を用いて曲げ強度を測定
研究 3	算出項目	材料 製造負荷	既往の研究データとヒアリングにより得られたデータを用い各材料の製造時のCO_2排出量を算出
		PCa部材 製造負荷	1年間に製造したPCa部材総量と、PCa製造工場・製造会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CO_2排出量を用いてPCa部材1m³あたりのCO_2排出量を試算
		輸送負荷	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算出
		CO2固定量	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

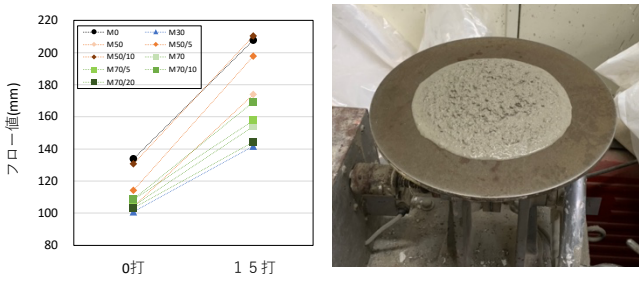
2.3 モルタルのフレッシュ性状(研究 1)

図 1 にフレッシュ性状の試験結果を示す。混和剤量は流動性が見られるまで後添加をしたため、調合ごとに使用量が変化している。図より、ほたて貝殻砂を細骨材として利用する場合、流動性が悪くなることに加え空気量が増加するため単位容積質量が減少するが、シリカフュームを適量添加することで、単位容積質量、フロー値、空気量の全てが改善した。

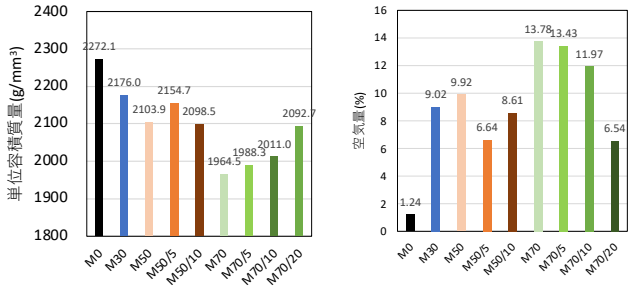
2.4 モルタルの力学特性(研究 1)

図 2 に圧縮強さ変化の結果を、図 3 に曲げ強さとモルタルの曲げ破壊エネルギーを示す。図より、圧縮強さについてほたて貝殻置換率 50%にはシリカフュームを 5%、70%には 10%加えたものが最も改善する結果となった。また、曲げ強さについては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、圧縮強さ同様、ほたて貝殻置換率 50%にシリカフューム 5%、70%に 10%加えたものが高い値となった。また、曲げ強さ等が向上したことで、曲げ破壊エネルギーも向上した。

これらの結果より、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。

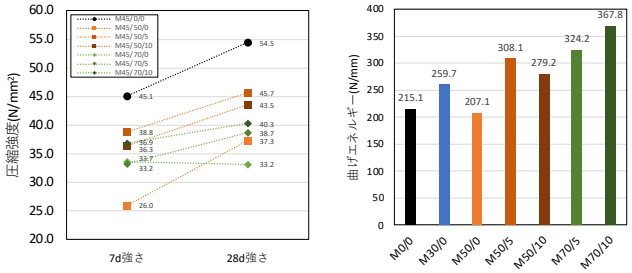


a) フロー試験　　b) 15 打フロー試験(M50/5)

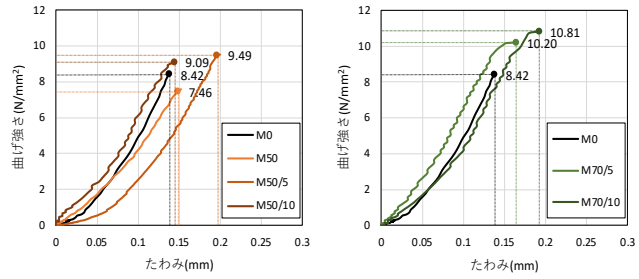


c) 単位容積質量　　d) 空気量

図 1　モルタルのフレッシュ性状(研究 1)



a) 圧縮強さ　　b) 曲げ破壊エネルギー

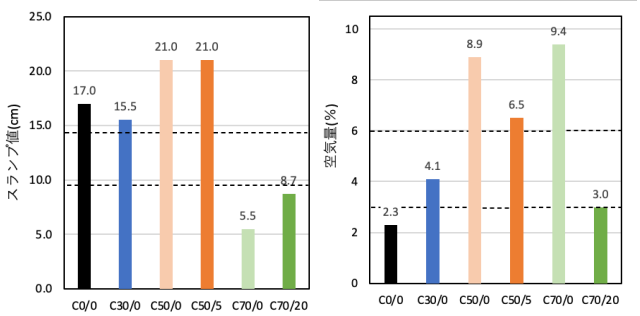


c) 曲げたわみ曲線(M50)　　d) 曲げたわみ曲線(M70)

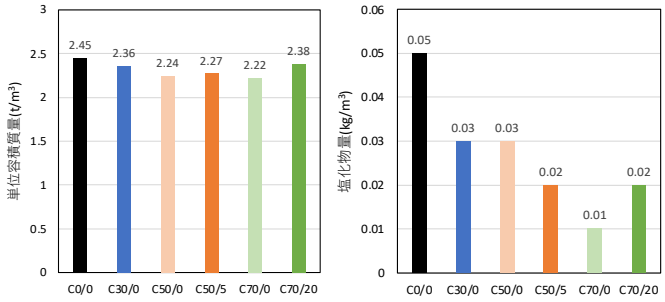
図 2 モルタルの力学特性(研究 1)

2.5 コンクリートのフレッシュ性状(研究 2)

図 4 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%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たため、調合ごとに使用量が変化している。図より、スランプ値は C50 シリーズのものが高く C70 シリーズが低く出る結果となった。空気量はシリカフュームを添加することで増加を抑えることができた。空気量の大きいものは単位容積質量が小さく、空気量



a) スランプ値　　b) 空気量



c) 単位容積質量　　d) 塩化物量

図 4　コンクリートのフレッシュ性状(研究２)

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置換量が増えると減少した。ほたて貝殻を用いた調合は、骨材形状等に起因して混入空気が入りやすく、通常の化学混和剤量でのフレッシュ性状の調整が容易ではない。ここでは過剰な化学混和剤の混入を避け、製造工場での打設・締固めが可能な範囲のフレッシュ性状と判断して打設をおこなった。空気量の増加分は、力学特性の評価としては安全側となる。

2.6 コンクリートの力学特性(研究 2)

(1) 圧縮特性

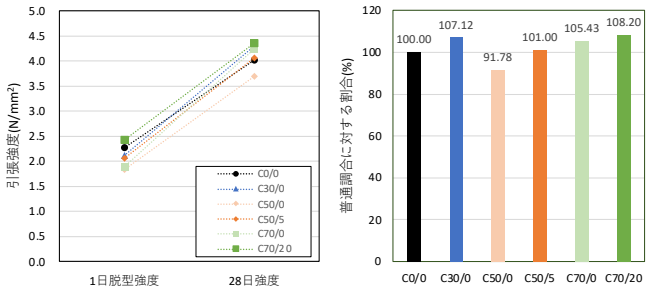
図 5 に各供試体の圧縮強度試験結果とヤング係数、破壊エネルギーを示す。ほたて貝殻砂を置換したコンクリートは、置換していないものに比べ脱型強度が下がり、28d 強度では C70/20 の強度増加が大きく、基本調合の値を超える結果となった。コンクリートの静弾性係数は、ほたて貝殻置換率の増加に伴い値が小さくなり、シリカフューム添加によって値は向上したものの、普通調合を越えなかった。

(2) 引張特性

図 6 に各供試体の引張強度試験結果を示す。図より、引張強度についてほたて貝殻砂置換率が増加すると、置換強度は C0/0 と比べて低下したが、シリカフュームを添加することにより改善が見られた。

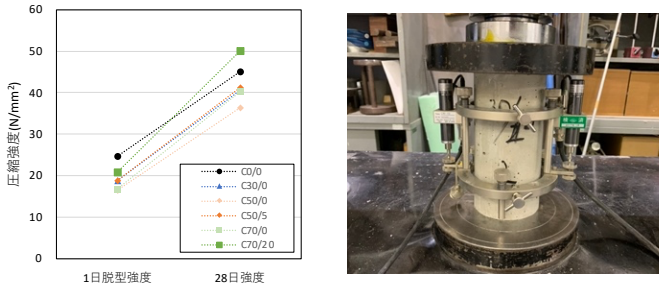
(3)曲げ特性

図 7 に各供試体の曲げ強度試験結果を示す。図より、曲げ



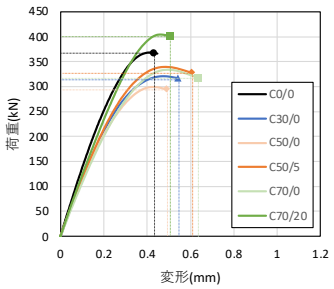
a) 引張強度　　b) 対 C0/0 引張強度比(28d)

図 5 コンクリートの引張特性(研究２)

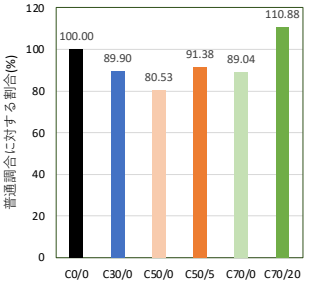


a) 圧縮強度

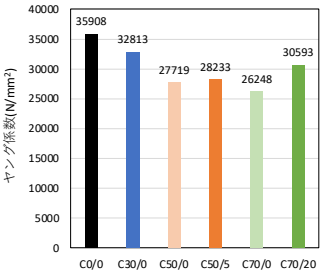
b) 圧縮強度試験(C30/0)



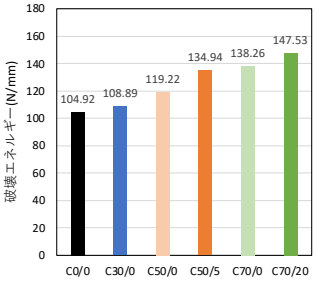
c) 圧縮荷重変形曲線



d) 対 C0/0 圧縮強度比(28d)

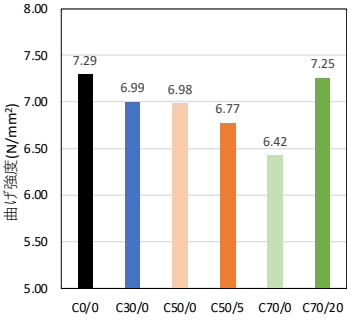


e) ヤング係数(28d)

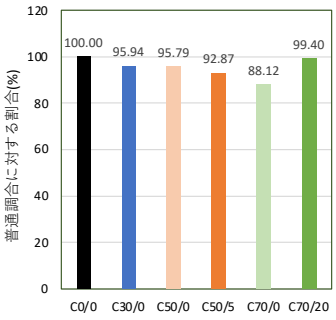


f) 圧縮破断時破壊エネルギー

図 6 コンクリートの圧縮特性(研究２)

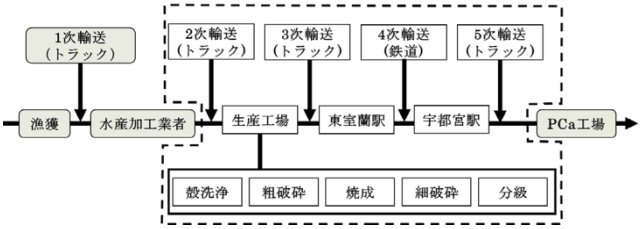


a) 曲げ強度

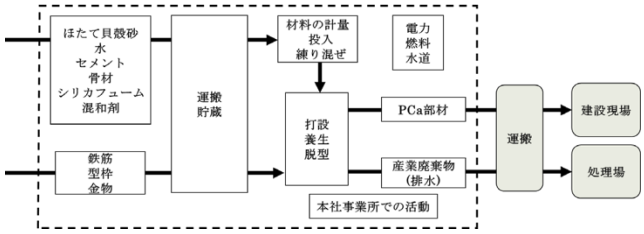


b) 対 C0/0 曲げ強度比(28d)

図 7　コンクリートの曲げ特性(研究 2)



a) 貝殻砂のシステム境界



b) PCa 部材のシステム境界

図 8　製造・輸送に関わるシステム境界(研究 3)

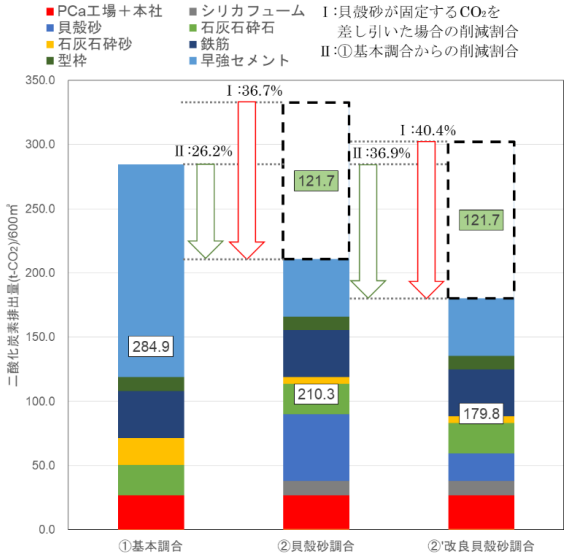


図 9　モデル建物の PCa 部材製造による CO_2 排出総量の比較

表5 PCa部材の各材料における製造・輸送段階のCO_2排出量

単位:(t-CO_2)

	①基本調合	②貝殻砂調合	②' 改良貝殻砂調合
早強セメント	165.5	165.5	165.5
シリカフューム	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6 PCa部材製造段階に関わるCO_2排出総量

単位:(t-CO_2)

	①基本調合	②貝殻砂調合	②' 改良貝殻砂調合
材料製造時(A)	246	257	226
材料輸送時(B)	11.9	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**

強度試験についてほたて貝殻砂置換により強度低下が見られたが、C70/0 はシリカフュームを適量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。

これらの結果より、ほたて貝殻を細骨材中に置換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、シリカフュ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。

3. 材料・製品製造段階の炭素量計量(研究３)

表 5 に各調合の材料別 CO_2 排出量[2)]を、表 6 に材料の製造・輸送と PCa 部材製造での CO_2 排出量および CO_2 排出総量を、図 8 に製造・輸送に関わるシステム境界を、図 9 モデル建物の PCa 部材製造による CO_2 排出総量の比較を行ったものを示す。図より、PCa 部材製造に関わる CO_2 排出総量について、貝殻砂調合では貝殻が固定している分を差し引くことで、CO_2 排出量が 36%以上異なることがわかり、また、基本調合から貝殻砂 70%置換調合に変えた場合、材料の製造・輸送時の CO_2 排出量が増加するため、PCa 部材製造に関わる CO_2 排出総量は増加するが、貝殻砂の CO_2 固定量を差し引くことで、基本調合よりも約 26%の削減効果があることがわかった。

4. まとめ

1) ほたて貝殻置換モルタルによる事前実験により、ほたて貝殻の特性によるフレッシュ性状や力学特性への影響を把握することができた。

2) ホタテ貝殻砂置換コンクリートによる実験より、化学混和剤量を抑制した調合でのホタテ貝殻置換により低下した性状が、シリカフュームを添加することにより改善し、貝殻砂 70%置換、シリカフューム 20%添加のものは静弾性係数を除く全ての値が普通調合コンクリートを上回る結果となった。

3) 材料・製品製造段階の炭素計量より、ほたて貝殻砂 70%置換による CO_2 固定量を差し引くことで基本調合より約 26%削減できることが確認できた。これらより、PCa コンクリート部材として適切なコンクリート調合であり、一般調合よりカーボンニュートラルを意識した CO_2 固定化製品と言える根拠となる。

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、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

2) 環境省:地球温暖化対策地域推進計画ガイド，2007