

# 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

D2-06040 小室清人

## 1.はじめに

環境配慮が前提となる今後の社会において、今後の建材開発のあり方を見直す気運が高まっている。その1つの指標にカーボンニュートラルがある。カーボンニュートラルとは二酸化炭素排出量・吸収量の炭素収支がゼロとなる考え方だが、現在は、製造時の乾燥、輸送時の負荷などにより、木材においても実質的にカーボンニュートラルの条件は達成できていない。本研究対象の海洋生物殻であるほたて貝は、短期間でカルシウム成分に二酸化炭素を固定化し、数年で材料として利用できるものなので、カーボンニュートラルの定義に合致する材料といえる。

本研究では、ほたて貝殻を粉砕化して得られる砕砂の物理化学的特性を活かした新たな性能特性を、実験を通じて明確化し(図1)、環境改善効果を具体化する可能性を検討することを目的とする。

## 2.研究概要

### 2.1 ほたて貝の市場動向及び資源循環性

図2に北海道におけるほたて貝の生産・廃棄量、処理状況、2007年の海洋水産物の生産・廃棄物量を示す。図からもほたて貝殻の廃棄量は群を抜いて多い。また近年は貝殻の再資源化率は大幅に向上し、2004年には100%近くに達している。しかし、用途が限定されていること、需用に変動がある等により安定して大量に循環材料として用いられているわけではない。また2007年度の水産物生産量、生産量からも、今後もほたて貝が水揚げされる可能性は高く、安定した海洋生物殻廃棄物として位置づけ、活用方法を生み出す価値がある。

### 2.2 使用材料と計画調査

表1に使用材料を、表2に調査表を、図3にほたて砕砂の粒度分布を示す。ほたて砕砂とは、ほたて貝を一定期間保管した後、粉砕、焼成処理(350℃前後)を行ったものである。本実験では、ほたて砕砂(H)の性能を評価する上で、比較用として石灰石砕砂(B)用いてモルタルを作成し試験を行った。また、細骨材の分量を標準(0)と増大(1)の2水準を設け、水セメント比は40%(高強度)、60%(普通強度)とした。計画調査は、コンクリート実験の実施を視野に、骨材の特性を明確にするため、コンクリートの単位粗骨材かさ容積を大幅に変えた2水準とし、そのモルタル部分を想定した。

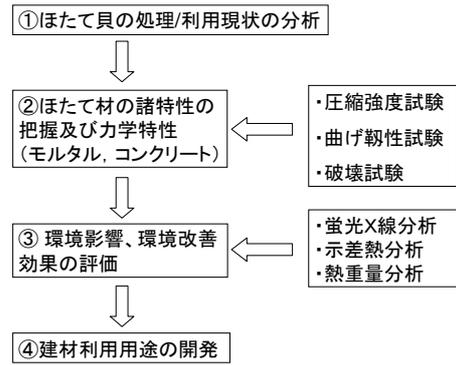


図1 本研究の流れ

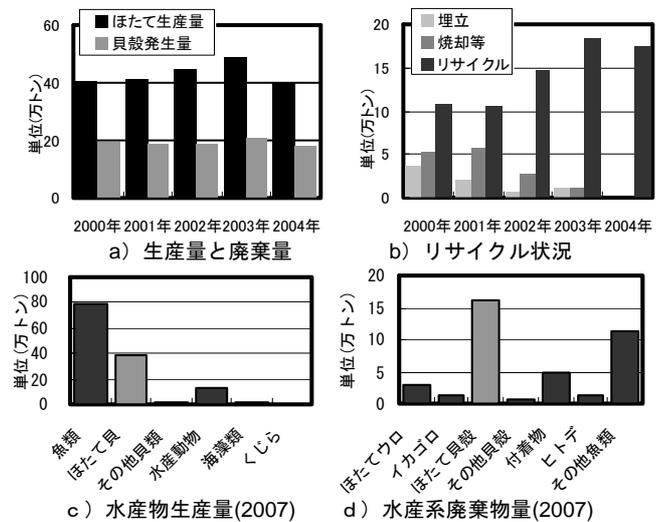


図2 ほたて貝と貝殻の市場動向(北海道)

表1 使用材料

材料	記号	種類	内容
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度 3.15 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	B	石灰石砕砂(秩父産)	表乾密度 2.71g/cm <sup>3</sup>
	H	ほたて貝砕砂	表乾密度 2.70g/cm <sup>3</sup>

表3 コンクリートおよびモルタルの計画調査

細骨材量	W/C	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	fa	ca
標準(0): Bv=0.76	0.4	184	460	439	1254
増大(1): Bv=0.60		184	460	709	983
標準(0): Bv=0.76	0.6	242	403	439	1254
増大(1): Bv=0.60		242	403	709	983

備考)Bv: 単位粗骨材かさ容積

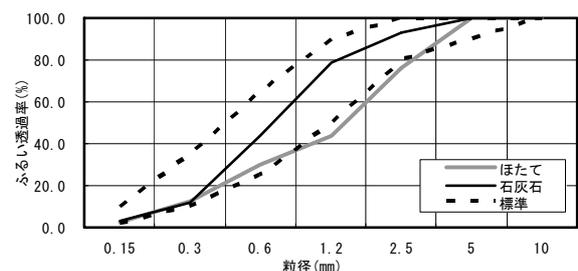


図3 細骨材の粒度分布

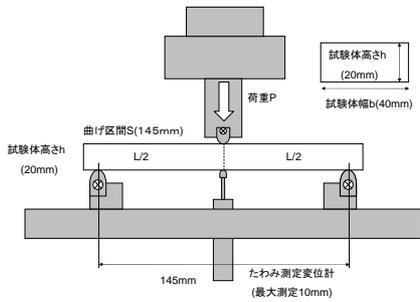


図4 曲げ靱性試験図

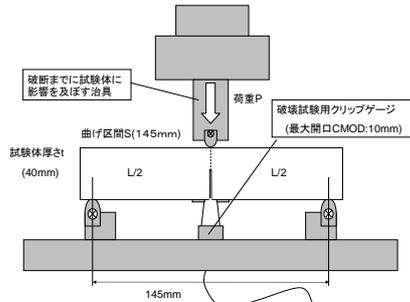


図5 破壊試験図(引張型)

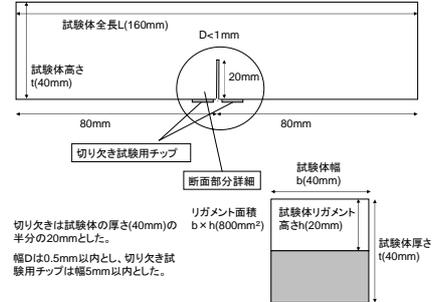


図6 試験体詳細図

## 2.3 試験項目とその内容

### 1) 圧縮強度試験

JIS A 1108 により円柱試験体(直径 50mm、高さ 100mm) 各シリーズ 3 本ずつ、計 24 本の圧縮強度を測定し、ほたて貝の基本力学特性を把握する。

### 2) 曲げ破壊靱性試験

図4に試験の概要図を示す。試験体は 40×20×160mm 角柱試験体(JIS A 1414 曲げ靱性試験)を 3 本ずつ計 24 本に、3 線式中央 1 点荷重方法により曲げ荷重をかけ、曲げ荷重とたわみ量の関係の評価した。

### 3) 破壊試験方法(引張型)

図5、図6、図7に試験の概要図と破壊試験条件を示す。試験体は 40×40×160mm の角柱試験体を用い、試験体下端の引張域に開口ひび割れが生じるように長さ 20mm、幅 1mm の切り欠きを入れ、クリップゲージを用いてひび割れ開口幅(CMOD: Crack Mouth opening Displacement)を、3 線式中央 1 点荷重方法により、各シリーズ 3 本ずつ、計 24 本を測定した。なお、破壊試験は引張型およびせん断型があるが、実際のコンクリートの破壊現象は、安定した引張型で評価されることが多いため、本試験でも引張型(モード I)で検討した。また安定した荷重—開口変位曲線を計測するため、最大荷重以降の軟化域を精度よく検出する必要があるため、切り欠き端部開口変位の変位速度は、安定破壊が得られるよう 0.1mm/min として荷重を行った。

### 4) 破壊エネルギーの算定方法

曲げ靱性、破壊試験における破壊エネルギーの算出方法は、RILEM 推奨法に準じ、縦軸に各強度、横軸に変位(曲げ靱性試験ではたわみ量、破壊試験では CMOD)をとり、荷重変位曲線に囲まれた部分を積分して算出し、エネルギーを算出した。

## 2.4 モルタルの力学特性と破壊特性

### 1) 圧縮強度

図7にモルタルの圧縮強度結果を示す。Hシリーズの圧縮

強度は標準の B シリーズと比較し、普通強度では同等であるが高強度の場合、差が顕著になった。H シリーズは高強度化することでほたて貝砕砂の粒度等が影響し、コンシステンシーが低下し 1.4 倍程度の増加で止まったが、B シリーズはコンシステンシーも良好で 2 倍ほど増加したためである。また細骨材の増加により、H1 シリーズは強度が 1/3 程度に低下したが、B1 は同等であった。以上より、H シリーズは一般的なコンクリート用骨材よりも圧縮強度に影響を及ぼしやすいことが確認された。

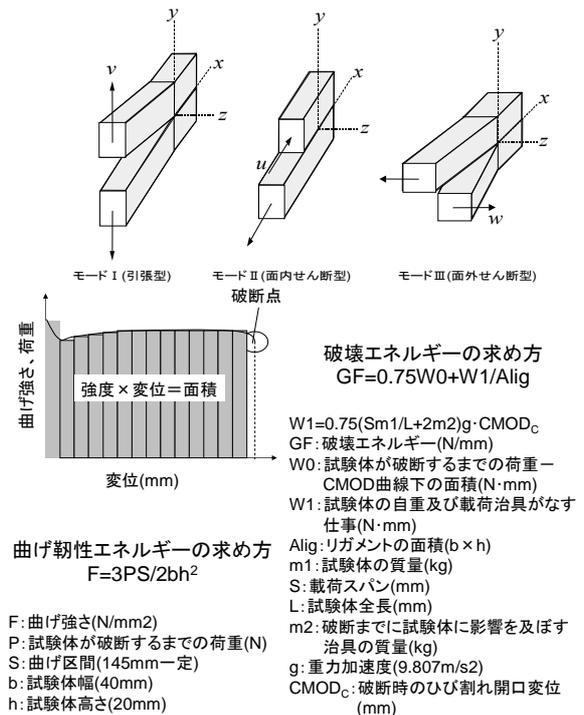


図7 破壊試験条件と破壊エネルギー概念図

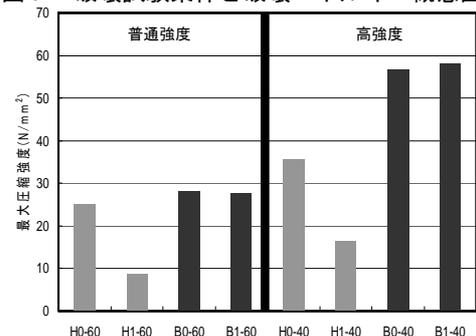


図8 モルタルの圧縮試験結果

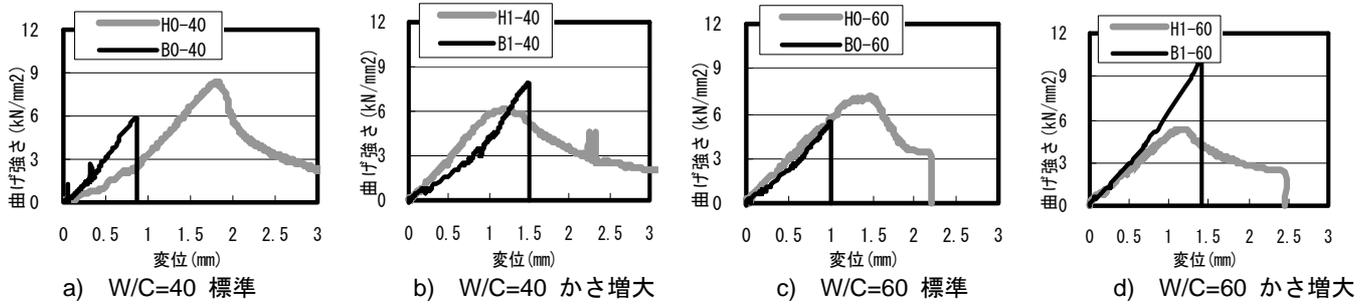


図9 モルタルの曲げ-たわみ曲線

## 2) 曲げ-たわみ特性

図9にモルタルの曲げ-たわみ曲線を、図10に曲げ破壊エネルギーの比較を示す。曲げ破壊エネルギー(N/mm)は、曲げ強度と変位量の積を断面係数で除して得られる。

曲げ-たわみ曲線に関して、圧縮強度と同様に、Bシリーズについては水セメント比依存性が保持されるが、Hシリーズについては細骨材の影響により、高強度化しても強度増加が大きく得られず、また、量を増やすと強度上昇する傾向も鈍くなった。一方、たわみ量については、Hシリーズは最大荷重に到達後も、一度に曲げ強度が低下することなくひずみが軟化しながら一定の靱性が得られる変形特性を有していた。Bシリーズは、曲げ強度が急激に低下し、脆性的に破断した。更に、細骨材の量を増やすと、高強度より普通強度シリーズではさらにひずみがゆっくりと軟化し、靱性がある破壊特性を有することが確認された。

曲げ破壊エネルギーについては全の試験体でHシリーズがBシリーズを上回っており、3~4倍ほど高い値を示した。細骨材量を増やした場合の曲げ破壊エネルギーも幾らか増大したが、大きな変化がみられない場合もあった。また高強度の場合、値が大きくなったが、これは曲げたわみ曲線の最大荷重が増加した点の影響が大きく、高強度化による破壊エネルギーの影響も含めて材料特性を認識することができる。

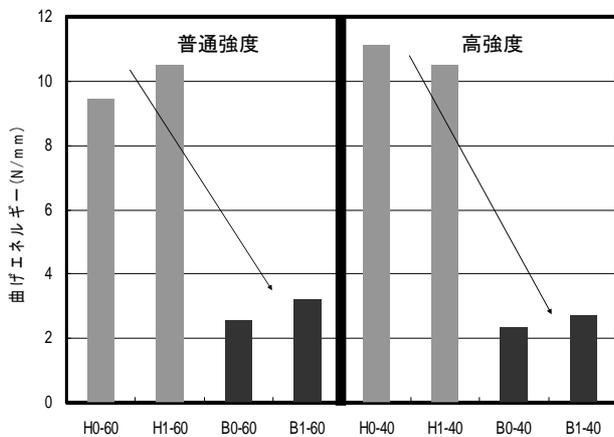


図10 モルタルの曲げ破壊エネルギーの比較

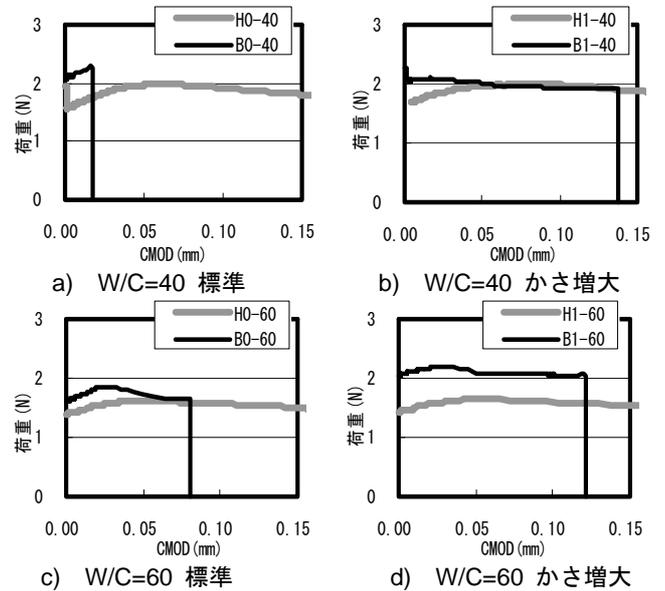


図11 モルタルの荷重-CMOD 関係 (0.15mm まで)

## 3) 破壊靱性

図11にモルタル試験体による荷重-CMOD 関係を、図12にほたて貝細骨材量の比較を、図13にモルタルの破壊エネルギーを示す。これまでの圧縮強度、曲げ強度に関しては、Bシリーズの方が、Hシリーズよりも若干大きい傾向を示し、また細骨材量が増加した場合、普通強度に関しては、強度低下が大きくみられることが特徴であった。ここでのモードIによる破壊特性に関しては、Hシリーズは、最大引張強度以降の引張軟化が緩やかであり、最大開口変位量はおおよそ16倍程度大きい値を示し、同一成分の骨材に関しても、粒度および形状が相違するだけで、製造されたモルタルの破壊靱性は大きく向上する可能性があることが確かめられた。また、普通強度の場合、変位量が大きく細骨材の増加させることで、さらに変位量が増加する性質をもつようになることが分かった。破壊エネルギーの値についても全試験体でHシリーズのほうが上回っており、平均で10~15倍ほど高い値を示した。細骨材量の増加に比例して破壊エネルギーも増大する傾向が明確にされた。また高強度の場合、普通強度よりも1.4倍ほど高い値を示した。これは普通強度のほうが高強度より強度が高く、変位についても大きいためと思われる。

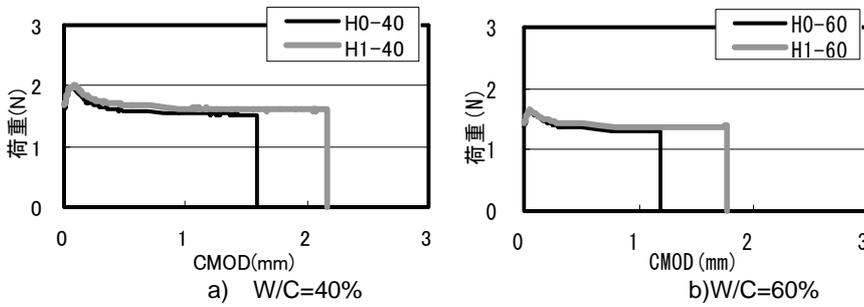


図 12 ほたて貝の細骨材量の違いによる CMOD

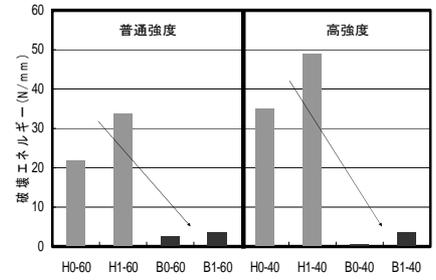


図 13 破壊エネルギー

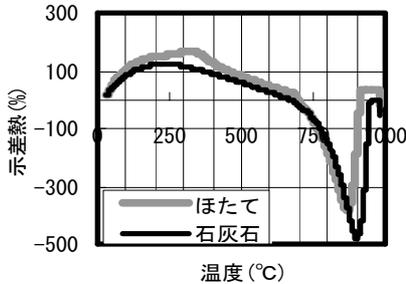


図 14 示差熱分析結果

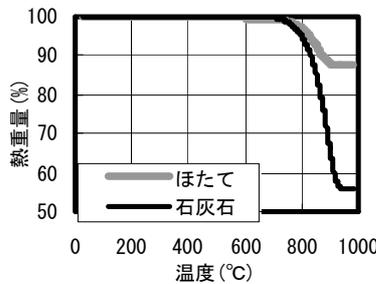


図 15 熱重量分析結果

表 4 細骨材の蛍光 X 線分析値

名称	CaCO <sub>3</sub> (脱炭酸)	CaX* (非脱炭酸)	SrO
ほたて	27.6	69.3	1.89
石灰石	98.0	0	0.94
SO <sub>3</sub>	0.92	0.29	12.3
	0.44	0.11	43.1

\*XはO、H、Cなどが考えられる

### 2.5 化学組成と熱的性能の影響

図 14 に示差熱分析、図 15 に熱重量分析の結果を、表 4 に蛍光 X 線分析の結果を示す。本研究では H シリーズのほたて貝砕砂と B シリーズの石灰石砕砂を用いたが、分析の結果、双方ともに一般には同一成分と見なし扱われる。石灰石砕砂の場合、脱炭酸現象 ( $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \uparrow$ ) が生じる 800~850 度あたりの吸熱量がほたて貝よりも大きく、その時の熱重量変化がほたて貝の変化量の 3 倍程度大きい結果が示された。よって蛍光 X 線分析による化学組成については、石灰石の igloss 分である二酸化炭素分を含め再計算したところ、表に示す成分で構成され则认为られる。ほたて貝砕砂は、脱炭酸する炭酸カルシウムと、脱炭酸しない炭酸カルシウムが見られた。

### 2.6 カーボンニュートラル化

図 16 にほたて貝におけるカーボンニュートラルモデルグラフを示す。カーボンニュートラルとは光合成で二酸化炭素を固定したによるバイオ燃料など、再生可能となる資源を用いることで、二酸化炭素の排出量・吸収量の炭素収支がゼロになる考え方である。ただし、排出期と吸収期が人間の寿命以上離れてはならないとされる。分析結果から、ほたて貝殻の主成分は炭酸カルシウムであり二酸化炭素を吸収する。炭酸カルシウムに内在する二酸化炭素分は 44% なので、単純計算ではあるが、廃棄量 20 万トンに対する二酸化炭素量は 8.8 万トンに及ぶ。直径 1.5~2m、高さ 40m の 50 年杉が、1 本あたりに吸収する二酸化炭素量は、年間で約 14kg 二酸化炭素を吸収すると言われているので、ほたて貝の二酸化炭素の固定は効率が良い。

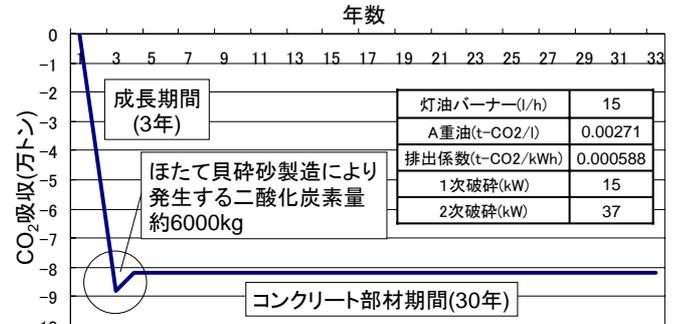


図 16 カーボンニュートラルモデル(ほたて貝)

### 3. まとめ

- (1)ほたてモルタルは、靱性、破壊エネルギーが増大するため、最大強度に到達後の変形抵抗性の優れる材料となる。
- (2)力学特性をふまえた結果から、パネル材などに応用できる可能性がある。
- (3)ほたて貝砕砂は CaO の含有量が多い可能性があり、セメントとの親和性に富む材料にできる可能性がある。
- (4)ほたて貝は人間の時間尺度で捉えられる二酸化炭素の固定期と排出期の定量が可能であり、カーボンニュートラルの実現に貢献する可能性があるが、製造時・輸送時の影響を十分に考慮する必要がある

### 謝辞

平成 21 年度工学院大学都市減災センター(中課題 3)の支援を受け北海道裕雅より材料提供を受けた

### 参考文献

- 1)北海道：北海道水産現勢水産林務部水産局水産振興課、2000.11
- 2)コンクリート破壊特性試験方法に関する委員会報告、JCI、2001
- 3)清宮理ほか：シェルコンクリートの強度特性について、JCI、2007
- 4)Common Carbon Metric、UNEP Sustainable Building & Climate Change in COP15、2009