

生体構造特性を有する海洋生物殻を用いたコンクリートの
動的劣化特性と炭素固定性の評価
EVALUATION ON AGING DETERIORATION PROPERTIES
AND CARBON FIXATION OF CONCRETE
USING SEA SHELLS POSSESSING SPECIFIC STRUCTURE

小室清人
Kiyoto KOMURO

The objectives of this research are to make clear the properties of concrete using scallop shells for fine aggregate and elucidate the effects of scallop shells which possess carbon fixation as their attribute, in reducing carbon dioxide. This study tested basic and aging deterioration properties and simulated and compared the carbon dioxide emission by taking into consideration the manufacturing and transportation processes of reinforced concrete buildings that use scallop shells and with a general, non-scallop shell reinforced building. As the results of this study, scallop shells are superior to resist aging deterioration and can contribute to the reduction of the total emission of carbon dioxide in the process of manufacturing and transportation.

Keywords : Aging Deterioration, Sea Shells, Carbon Fixation, Environmental Impact, Reinforced Corrosion
動的劣化, 海洋生物殻, 炭素固定性, 環境負荷, 鉄筋腐食

1. はじめに

日本は世界でも有数のほたて貝の生産国であり、その量は全世界の25%を占め、それに伴い年間で20万トン以上のほたて貝殻が発生している¹⁾。主な利用方法として、消しゴム、チョーク、融雪剤など、また建築分野でもほたて貝殻を混入したコンクリートの基礎的物性、耐久性、強度などが研究されてきた²⁾。ほたて貝殻の特徴として、生体内鉱質形成作用により、層状に重なった構造になっており、ほたて貝殻を混入したモルタルは通常のモルタルに比べ圧縮強度は下がるが、曲げ・引張破壊において、塑性域での変形抵抗性に優れることが示されている³⁾。また、ほたて貝殻は海水中の二酸化炭素を吸収しながら成長しているので、炭素固定性を有する材料といえ、地球温暖化問題の改善に効果的な材料として位置付けることができる³⁾。

本研究では上記を踏まえ、動的劣化特性試験(研究1)では、実部材を想定し、潜伏期・進展期・加速期・劣化期までの年数を実験により推定した。なお、本研究で使用する動的劣化とは、時間変化を意識した劣化性状であり、腐食の増加に伴い変化する部材の劣化度進展のことを指す。炭素固定性の評価(研究2)では、実際に建材用骨材としてほたて貝砕砂を鉄筋コンクリート造に用いた場合と、一般的なコンクリート材料を用いた場合との材料製造時・輸送時の二酸化炭素排出量を比較し、また、炭素固定性を有する材料の評価方法を示した。

2. 動的劣化特性試験(研究1)

2.1 使用材料と実験の要因

表1に使用材料を、表2に実験の要因と水準を、写真1にほたて貝砕砂を示す。細骨材は建築細骨材用ほたて貝殻(以後ほたて貝砕砂)と大井川産陸砂を使用し、細骨材の影響を調べた。実験の水準について、水セメント比は普通強度(W/C=60%)と高強度(W/C=40%)の2水準を設定し、ほたて貝砕砂混入率は大井川産陸砂を基準とし、ほたて貝砕砂

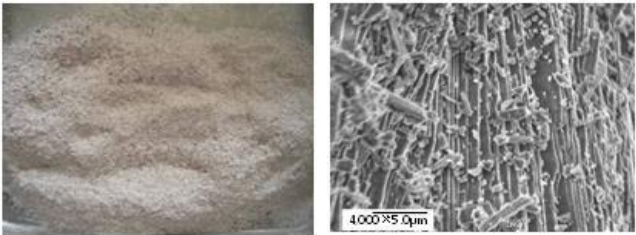
の混入割合を0%(S0-W/C)、30%(S30-W/C)、60%(S60-W/C)の3水準に設定することで、ほたて貝砕砂の骨材量による違いを調べた。

表1 使用材料

材料	種類	記号	内容
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.16g/cm ³
細骨材	ほたて貝砕砂	S	表乾密度 2.61g/cm ³ 吸水率 1.8% 実積率 50.9%
	大井川産陸砂	O	表乾密度 2.63g/cm ³ 吸水率 1.5% 実積率 65.8%
粗骨材	青梅産碎石	G	表乾密度 2.65g/cm ³ 吸水率 1.5%
混和剤	AE 減水剤	Ad1	リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体 (W/C=60%に使用)
	高性能 AE 減水剤	Ad2	末端スルホン酸基を有するポリカルボン酸基含有ポリマー(W/C=40%に使用)

表2 実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比(%)	60, 40
ほたて貝砕砂置換率(%)	0, 30, 60



a)外観 b)断面のSEM画像

写真1 ほたて貝砕砂

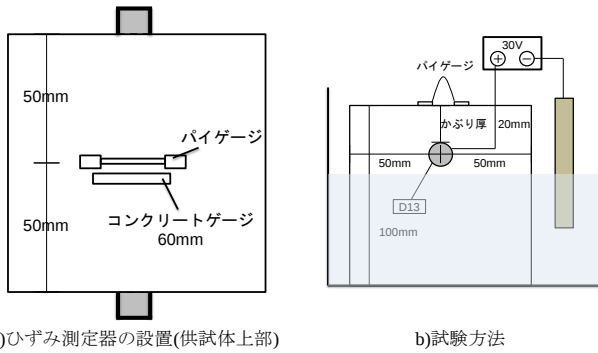


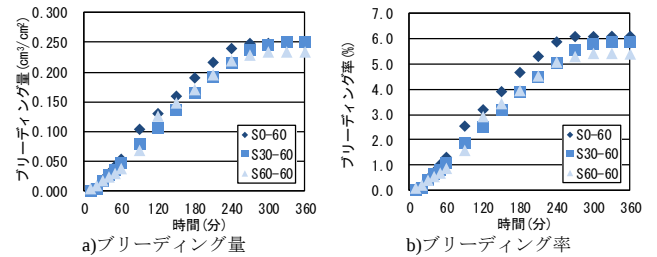
図1 供試体と電食による鉄筋の腐食促進方法

2.2 供試体の概要と鉄筋腐食の促進試験方法

図1に供試体と電食による鉄筋の腐食促進方法を示す。かぶり部分のひび割れの原因は、コンクリート中の鉄筋が中性化、塩害などにより鉄筋が腐食することで、鉄筋から錆が発生し、体積が膨張するため、コンクリート内部に引張破壊が生じたためである。中性化による鉄筋腐食は、塩害と異なり全面腐食となることが多く、均一に腐食が進行する電食による試験が参考となる⁴⁾。よって、本研究でも電食により鉄筋腐食の促進試験を行った。供試体の寸法は100×100×100mm、内部に組み込む鉄筋はD13を用い、かぶり厚さはブリーディングの影響により所定のかぶり厚さが得られない可能性があるため、コンクリートの打ち込み下面から、かぶり厚さが2cmとなるように鉄筋を設置した。電食による鉄筋の腐食促進方法について、ひずみ測定面が上面になり、内部鉄筋が直接5%NaCl溶液に触れないように水槽に設置し、鉄筋を陽極、銅板を陰極に接続し直流安定化電源により30V一定の通電を行うことで内部の鉄筋を腐食させた。また、露出している鉄筋部には、腐食しないようエポキシ樹脂によりシールを行い、かぶり部分の上面には腐食ひずみを測定するためにパイゲージ(計測区間50mm)を設置した。なお、本研究では鉄筋は一律に腐食することとした。鉄筋の腐食減量の測定について、試験後の腐食した鉄筋を10%クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬し錆を十分に除去し、試験前後の鉄筋の単位表面積当たりの重量変化を計測したものを鉄筋の腐食減量とした。

2.3 コンクリートのフレッシュ性状

表3にコンクリートの調合とフレッシュ試験の結果を、図2にブリーディング試験の結果を示す。コンクリートの調合について、W/C=60%の場合は目標のスランブを18±2.5cm、W/C=40%の場合はスランブフローを600±100mm、空気量は4.5±1.5%とし、試験結果が減水剤の影響を受けないように単位水量により調節をした。なお空気量について、ほたて貝砕砂を用いる場合は空気室圧力方法により測定した実測空気量から、骨材修正係数を引いたものを空気量とした。表より、ほたて貝砕砂を多く入れることで単位水量を増やさないと所定のワーカビリティを得ることが難しいことが分かった。また、空気量



備考) W/C=40%は120分経過後もブリーディングが見られなかった
図2 ブリーディング試験の結果(W/C=60%)

表4 各供試体の強度試験の結果

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
S0-60	35.8	3.7	28.8
S30-60	26.7	3.1	23.8
S60-60	26.8	3.0	20.9
S0-40	59.8	5.9	34.3
S30-40	44.5	4.7	28.7
S60-40	44.7	4.7	27.6

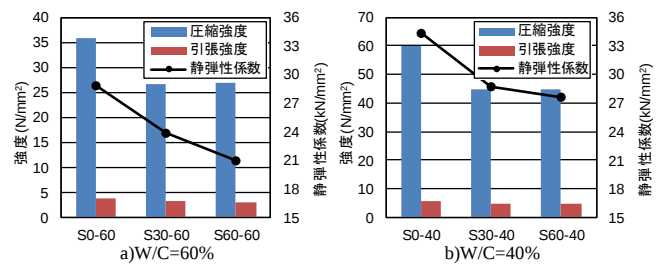


図3 強度試験と静弾性係数の関係

はほたて貝砕砂の混入率が増えるに伴い実測空気量は増加する傾向を示したが、骨材修正係数を引くことで所定の空気量を得ることが可能であった。ただしW/C=60%、ほたて貝砕砂の混入率60%のものは、試し練りの結果から材料分離の起こらない範囲では所定のスランブ値を得ることが出来ず、空気量も設定値より多く混入した。これは、ほたて貝砕砂の形状が扁平であり、実積率が低くなっていることから、セメントペーストと骨材が均一に混ざりにくいと思われる。

ブリーディング試験の結果より、ほたて貝砕砂を混入したコンクリートは所定のワーカビリティを得るため、単位水量を増やしているが、初期のブリーディングは若干抑えられ、また、ブリーディング量には大きな変化は見られなかった。なお、W/C=40%のコンクリートは120分経過後もブリーディングが見られなかったため、ブリーディング無しとした。

以上より、ほたて貝砕砂を細骨材に用いる場合、骨材の形状が影響し、所定のワーカビリティを得るために単位水量を増やさなければならないが、ブリーディングには問題ないことが確認された。

2.4 基礎力学的性状

表4に各供試体の強度試験の結果を、図3に強度試験と静弾性係数の関係を示す。ほたて貝砕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強度は下がり、その値は水セメント比およびほたて貝

表3 コンクリートの調合とフレッシュ試験の結果

供試体名	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					Ad1 (C×%)	Ad2 (C×%)	スランブ (cm)	スランブフロー (mm)	実測空気量 (%)	骨材修正係数 (%)	空気量 (%)
		W	C	S	O	G							
S0-60	60	175	292	0	817	999	0.25	-	19.0	-	4.0	-	4.0
S30-60	60	185	308	259	518	999	0.25	-	18.5	-	5.0	0.8	4.2
S60-60	60	195	325	489	245	999	0.25	-	12.0	-	7.5	1.4	6.1
S0-40	40	160	400	0	766	999	-	0.90	-	610×610	3.0	-	3.0
S30-40	40	170	425	240	479	999	-	0.90	-	620×630	6.0	1.6	4.4
S60-40	40	180	450	448	224	999	-	0.90	-	600×600	7.0	2.1	4.9

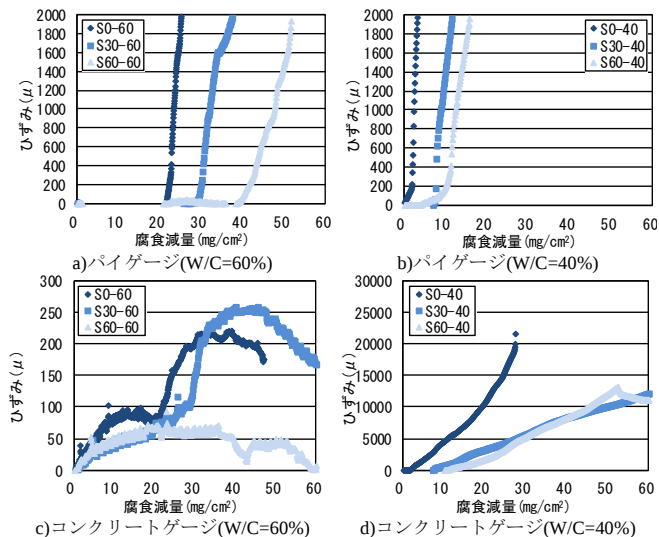


図4 劣化期における腐食減量とひずみの関係

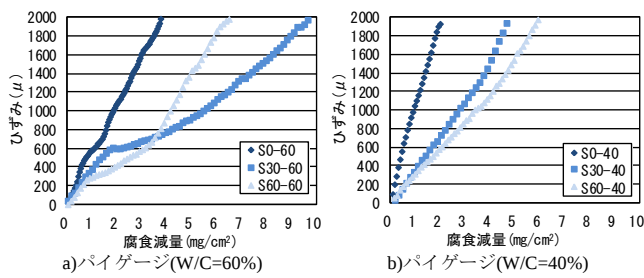


図5 進展期における腐食減量とひずみの関係

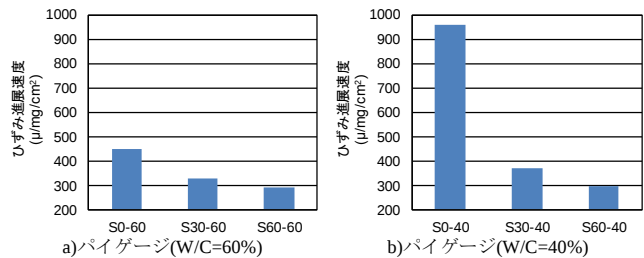


図6 初期ひずみ発生後のひずみ進展速度

砕砂混入率に関わらず、ほたて貝砕砂を混入していないものを 100% とすると約 75%程度となった。静弾性係数について、ほたて貝砕砂を混入したコンクリートは下がり、混入率が大きいほうが静弾性係数は下がる傾向が示された。これは、ほたて貝砕砂の骨材の形状が扁平であるため供試体が密実になりにくく、また、ほたて貝砕砂自体の強度が大井川産陸砂に比べ低い可能性があり、圧縮強度はある一定の下限值まで下がり、静弾性係数は置換率に比例して下がると思われる。

以上より、ほたて貝砕砂を混入することで、混入率に関係なく強度は下がるが、混入率が多い方が静弾性係数は下がることが確認された。

2.5 鉄筋腐食の促進試験結果

図4に劣化期における腐食減量とひずみの関係を、図5に進展期における腐食減量とひずみの関係を、図6に初期ひずみ発生後のひずみ進展速度を示す。本研究ではパイゲージのひずみが増加した時の初期変化量を、腐食減量の変化量で除したものを初期ひずみ進展速度とし、値が大きい方が初期ひずみの進展する速度が速いことを示している。各供試体とも腐食減量の増加に伴いひずみが増加するが、ほたて貝砕砂を混入した供試体の方が、また水セメント比が高い方が、腐食減量

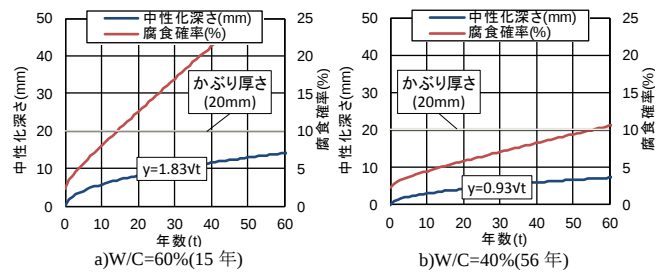
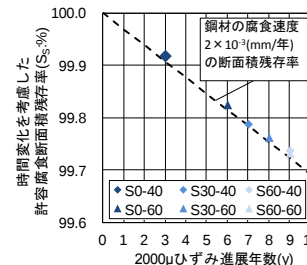


図7 中性化深さの予測と腐食確率

$$f(D-C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot (C^2 \cdot v^2 + \sigma^2)}} \cdot \exp \left\{ -\frac{\{(D-C) - (D_{Av} - C_{Av})\}^2}{2(C^2 \cdot v^2 + \sigma^2)} \right\} \quad (1)$$

ここに

D : かぶり厚さ(20mm)
 C : 中性化深さ(mm)
 v : 中性化変動係数(0.3)
 σ : かぶり厚さの標準偏差(10mm)
 D_{Av} : かぶり厚さの平均(20mm)
 C_{Av} : 中性化深さの平均



$$S_s = \frac{A_s}{A_{s0}} \times 100 \quad (2)$$

$$A_s = \left(\frac{\phi_0 - C_s \cdot y}{2} \right)^2 \times \pi \quad (3)$$

$$A_{s0} = \left(\frac{\phi_0}{2} \right)^2 \times \pi \quad (4)$$

$$S_s = \left(1 - \frac{4W_c}{\rho_s \cdot \phi_0} \right) \times 100 \quad (5)$$

図8 2000μ ひずみ進展時の許容腐食断面積残存率と年数

ここに

S_s : 時間変化を考慮した許容腐食断面積残存率(%)
 A_s : 腐食した鉄筋の断面積(mm²)
 A_{s0} : 腐食前の鉄筋の断面積(mm²)
 W_c : 2000μ ひずみ発生時の腐食減量(mg/mm²)
 ρ_s : 鉄の密度(7.85mg/mm³)
 ϕ_0 : 腐食前の鉄筋の直径(mm)
 C_s : 鋼材の腐食速度(2×10⁻³mm/年)
 y : 2000μ ひずみ進展年数

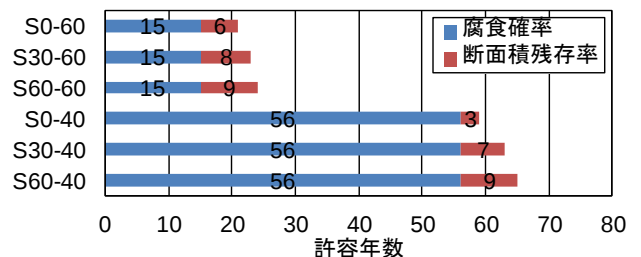


図9 2000μ ひずみ発生時までの許容年数

に対してグラフの立ち上がり位置が遅れる傾向を示した。初期ひずみ発生時の詳細について、ほたて貝砕砂混入率を増やすことで、水セメント比および強度に関わらず腐食減量に対するひずみの傾きが緩やかになった。また、ひずみ進展速度はほたて貝砕砂を混入したコンクリートの場合、混入率により一定の値をとることが確認された。

2.6 動的劣化による材齢の予測

図7に中性化深さの予測と腐食確率を、図8に断面積残存率と年数の関係を、図9に2000μ ひずみ発生時までの許容年数を示す。腐食確率とは潜伏期における中性化深さとかぶり厚さにおける正規分布(式1)のある年数における中性化残りまでの累積の確率密度(積分値)であ

る⁹⁾。また、鉄筋の許容腐食確率は 10%とし、その時の年数から鉄筋腐食の開始と仮定した。腐食開始からひずみが 2000 μ (本試験のパイゲージで 0.1mm)を許容ひずみとし、その時の断面積残存率を、許容断面積残存率とした⁹⁾。モデル図は式 2、式 3 および式 4 から、供試体の断面積残存率は各供試体の 2000 μ 時の腐食減量を初期ひずみ進展速度から求め、式 5 から算出した。

図より、水セメント比が低い方が初期ひずみ進展速度は大きいため、腐食してから 2000 μ までひずみが進展するのが早い傾向にあった。ただし、ほたて貝砕砂を混入することでひずみ進展速度は遅くなるため、混入していない鉄筋コンクリートでは 2000 μ のひずみが生じる断面積残存率でも、同量のひずみは生じなかった。その結果を年数と比較すると、ほたて貝砕砂を混入した鉄筋コンクリートの方が、混入していないものと比較して 2～6 年程度 2000 μ までのひずみの進展を遅らせる可能性があり、ひずみに対する抵抗性に優れるといえる。また、腐食確率、鋼材の腐食速度、腐食減量とひずみの関係式、断面積残存係数を用いることで、鉄筋コンクリートの経年変化する部材の動的劣化特性を明確に示すことが可能である。

3. 炭素固定性の評価(研究 2)

3.1 試算条件の設定

図 10 に使用材料とモデル建物の概要を、図 11 にほたて貝砕砂の製造および輸送に関わるシステム境界を、表 5 にモデル建物の計画調合と施工数量を示す。本研究では、ほたて貝砕砂を長寿命が期待できる RC 造建築物の細骨材として使用することを仮定し、製造時および輸送時の二酸化炭素排出量を一般的なコンクリート材料と比較し評価を行った。モデル建物は首都圏で 2011 年に竣工された標準的な RC 造

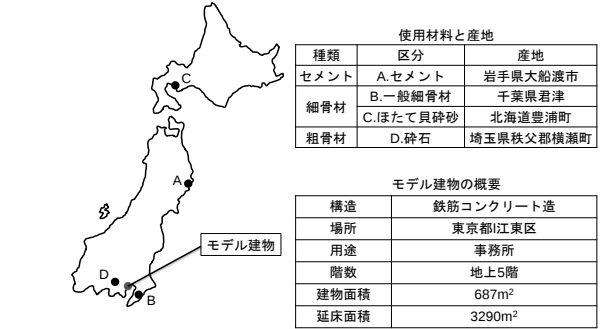


図 10 使用材料とモデル建物の概要

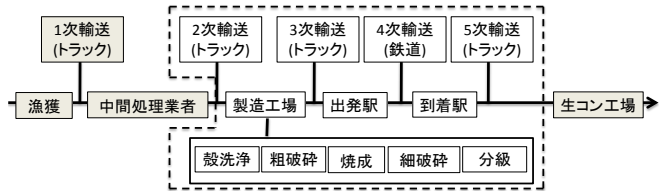


図 11 ほたて貝砕砂の製造および輸送に関わるシステム境界

の事務所ビルに設定し⁷⁾、ヒアリングおよび実態調査より、実際に使用されたコンクリート構成材料(セメント、細骨材、粗骨材)の計画調合、コンクリートの施工数量より、資材投入量を試算し、評価の基準となる RC 造(基準 RC 造)、細骨材にほたて貝砕砂を用いた場合の RC 造(ほたて貝砕砂 RC 造)との各材料の製造時・輸送時における二酸化炭素排出量を算出した。なお、ほたて貝砕砂の製造・輸送に関わるシステム境界では、漁獲後からほたて貝を加工・処理する中間処理業者までの製造・輸送に関しては、食品としてのほたて貝の生産に関わる二酸化炭素の排出のため、本研究では試算の範囲に含めない。また、

表 5 モデル建物の計画調合と施工数量

項目	打込み箇所	W/C(%)	単位質量(kg/m ³)				その他
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
計画調合	基礎～1 階	42.0	170	404	835	910	空気量
	2 階～3 階	45.0	170	378	859	907	4.5%
	4 階～塔屋階	47.5	170	358	885	899	4.5%
施工数量	基礎～1 階	—	施工数量(t)				総重量(t)
			188.7	448.4	926.9	1010.1	2574.1
	2 階～3 階	—	126.0	280.1	636.5	672.1	1714.7
	4 階～塔屋階	—	108.5	228.4	564.6	573.6	1475.1
	全体	—	423.2	956.9	2128.0	2255.8	5763.9

備考)本データは実施工された当該建物に関するヒアリングおよび実態調査により得た

表 6 環境負荷の試算条件

項目	内容
評価内容	各材料の製造時および出発地からコンクリート工場までの片道輸送時の環境負荷量(二酸化炭素排出量)
製造負荷算定方法	ほたて貝砕砂:実態調査により得られたデータより、1 次粗破砕、焼成、2 次細粉砕時の、ほたて貝砕砂製造時の二酸化炭素排出量を試算した。 セメント、普通細骨材、粗骨材:製造時の二酸化炭素排出量のデータ ⁸⁾ を使用した。 セメント:765.5(kg-CO ₂ /t)、普通細骨材(天然細骨材砕砂):3.4(kg-CO ₂ /t)、粗骨材砕砂:2.8(kg-CO ₂ /t)
輸送距離設定方法	ほたて貝砕砂:ほたて貝の中間処理業者(北海道伊達市)からほたて貝砕砂製造工場(北海道虻田郡豊浦町)、製造工場から東室蘭駅、東京駅から A コンクリート工場(江東区)までをトラック(10t トラック)による輸送と仮定し、(財)日本デジタル道路地図協会の全国デジタル道路地図データベースならびにインクリメント P 社ルート検索地理情報システムを用いて、一般道・最短距離の条件で片道輸送距離を試算、東室蘭駅から東京駅までを鉄道(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。 セメント:セメント製造工場である T セメント工場(大船渡市)から、コンクリート製造工場である A コンクリート工場が最も近い、東京港までの船舶(2000t 運搬専用タンカー)による輸送とし、片道輸送距離を試算した。なお、東京港からの陸路による移動は、航路の輸送距離と比較し、短距離で輸送工程が多様に存在することから、本試算では含めないこととした。 細骨材および粗骨材:主要な骨材採取地(細骨材は千葉県君津市役所、粗骨材は埼玉県秩父市役所)からモデル建物から最も近くにある A コンクリート工場までトラック(10t トラック)による輸送を仮定し、ほたて貝砕砂と同条件で片道輸送距離を試算した。
輸送負荷算定方法	トラック輸送(改良トンキロ法):10t トラック最大積載時運搬距離と総輸送回数の積によるトンキロ値を求め、改良トンキロ法燃料使用原単位(軽油、最大積載量 10,000～11,999kg、・積載率 100% : 0.0342 L/t・km)、二酸化炭素排出係数(軽油:2.62 kg-CO ₂ /L)を用いて試算した。 鉄道輸送(従来トンキロ法):650t 貨物列車最大積載時運搬距離と総輸送回数の積によるトンキロ値を求め、従来トンキロ法二酸化炭素排出原単位(鉄道 : 22 g-CO ₂ /t・km)を用いて試算した。 船舶輸送(従来トンキロ法):2000t 運搬船用専用タンカー最大積載時運搬距離と総輸送回数の積によるトンキロ値を求め、従来トンキロ法二酸化炭素排出原単位(船舶 : 39 g-CO ₂ /t・km)を用いて試算した。

表 7 ほたて貝砕砂製造時に用いる計算値

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)	0.588 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/h)	10
2 次細破碎 ピクトリーミル(kW)	37
A 重油(t-CO ₂ /L)	0.00271

備考)稼働時間:破碎は各々1h, 焼成は 0.5h とした

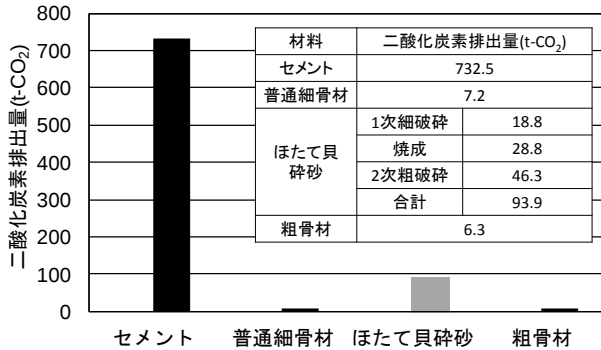


図 12 製造時の二酸化炭素排出量の比較

表 8 実態調査にもとづく輸送距離の設定値

材料	出発地	目的地	輸送距離(km) (片道)
セメント	Tセメント工場 (大船渡市)	A コンクリート 工場(江東区)	814.0
普通 細骨材	千葉県君津市		78.0
ほたて貝 砕砂	中間処理業者 (北海道伊達市)	製造工場 (北海道豊浦町)	37.3
	製造工場 (北海道豊浦町)	東室蘭駅	52.0
	東室蘭駅	東京駅	1126.3
	東京駅	A コンクリート 工場(江東区)	8.4
粗骨材	埼玉県秩父郡		84.9

表 9 各材料における輸送回数と総輸送距離の計算結果

材料	輸送モード	輸送量 (t/回)	輸送回数 (回)	総輸送距離 (千 km・回)
セメント	2000t 運搬専用 タンカー	2000	0.48	0.39
普通 細骨材	10tトラック	10	212.80	16.60
ほたて貝 砕砂	10tトラック 650t 貨物列車	10 650	212.80 3.27	20.79 3.69
粗骨材	10tトラック	10	225.58	19.15

表 10 輸送時の二酸化炭素排出量の試算結果

材料	二酸化炭素排出量	
	施工量当たり(t-CO ₂)	輸送距離当たり(kg-CO ₂ /km)
セメント	5.3	13.5
普通細骨材	1106.1	66.6
ほたて貝 砕砂	10tトラック 650t 貨物列車	1385.5 60.3
		59.1
粗骨材	1369.7	71.5

コンクリート製造時の生コン工場の製造段階, 現場の施工段階における二酸化炭素排出量は範囲に含めず, モデル建物から最も近い生コン工場を輸送時の目的地とした輸送段階までを評価の範囲とした。

3.2 製造時および輸送時の二酸化炭素排出量の試算方法

表 6 に環境負荷の試算条件を示す。各材料の製造時の二酸化炭素排出量の試算方法については, 既往の研究データを用いた⁹⁾。ほたて貝砕砂については, 実態調査により得られたデータより 1 次粗破碎, 焼成, 2 次細破碎の二酸化炭素排出量を試算した。輸送時の二酸化炭素排出量の試算方法については, ロジスティクス分野における CO₂ 排出

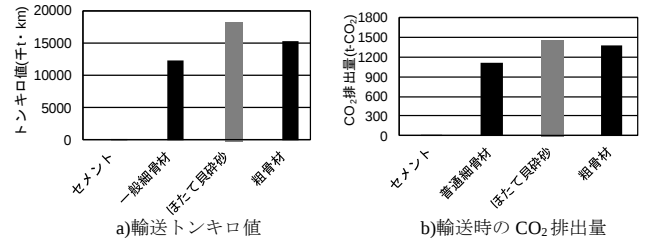


図 13 輸送時の二酸化炭素排出量の比較

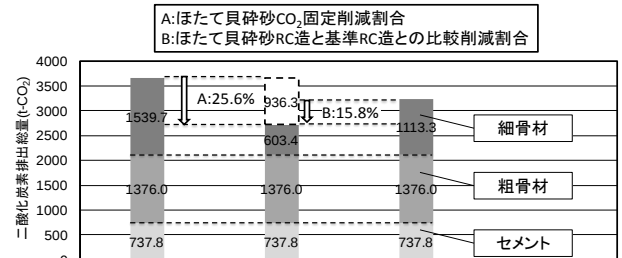


図 14 二酸化炭素排出総量の比較(製造・輸送)

量算定方式共同ガイドライン⁹⁾に示される方法に基づき試算した。

3.3 製造時二酸化炭素排出量の試算結果

表 7 にほたて貝砕砂製造時に用いる計算値を, 図 8 に製造時の二酸化炭素排出量の比較を示す。製造時の二酸化炭素排出量はセメントが多く, 次に多いのがほたて貝砕砂であった。ほたて貝砕砂を製造する際に発生する二酸化炭素排出量は, 普通細骨材と比べ約 13 倍高い値であった。これは, ほたて貝砕砂の場合は, 1 次粗破碎, 焼成, 2 次細破碎と製造時に有機物臭の焼成処理に伴う加工をしなければならず, そのため二酸化炭素を多く排出するためといえる。

3.4 輸送時二酸化炭素排出量の試算結果

表 8 に実態調査にもとづく輸送距離の設定値を, 表 9 に各材料における輸送回数と総輸送距離の計算結果を, 表 10 に輸送時の二酸化炭素排出量の試算結果を, 図 13 に輸送時の二酸化炭素排出量の比較を示す。総輸送距離は輸送回数(施工数量を輸送モード除したもの)と輸送距離の積で表したものである。ほたて貝砕砂は産地が北海道であるため, 東京にあるモデル建物までの距離は長い, 1 回の輸送量が多い鉄道輸送によって北海道から東京まで輸送している, 総輸送距離は普通細骨材に比べ 1.4 倍程度であった。このことより, 総輸送距離は輸送モードの 1 回の輸送量に大きく影響があると言える。表 11 より, 施工量当たりの輸送時の二酸化炭素排出量は, 総輸送距離と輸送モードに影響を受けており, 総輸送距離が最も長いほたて貝砕砂が一番高い値を示した。ただし輸送距離当たりに換算すると, ほたて貝砕砂は長距離の輸送には鉄道輸送を使用しているため, 距離に比べ二酸化炭素排出量が少なくなった。このことより, 輸送モードにより二酸化炭素排出量が大きく変わり, 長距離を輸送する場合は, 鉄道または船舶が二酸化炭素排出量の削減には有効である。

3.5 製造・輸送時の二酸化炭素排出総量

図 14 に二酸化炭素排出総量の比較を示す。本研究では, 製造時・輸送時に発生する二酸化炭素量を合わせたものを二酸化炭素排出総量として, モデル建物における実際のコンクリート施工数量に合わせた評価を行った。また, ほたて貝砕砂 RC 造の場合は, 成長時に吸収, 固定した二酸化炭素量も示した。A より, ほたて貝砕砂 RC 造は, ほ

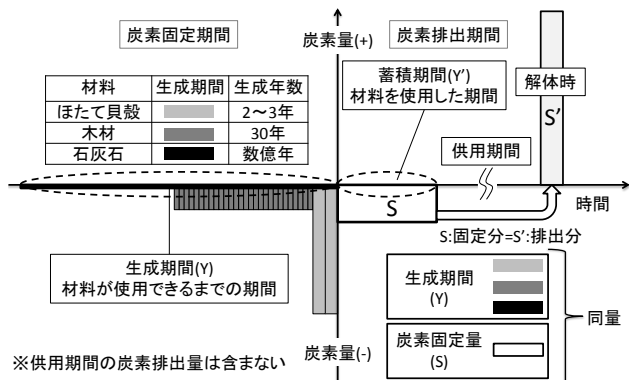


図 15 建築に用いる各材料における炭素の吸収・排出モデル

$$E = \frac{Y'}{Y} \quad (6)$$

$$F = \frac{Y'}{Y} \times S \quad (7)$$

ここに

F :炭素固定評価値(t)
E :炭素固定効率
Y :生成期間(年)
Y' :蓄積期間(年)
S :炭素固定量(t)

たて貝殻の二酸化炭素の吸収量を考慮した場合と、考慮しない場合では、二酸化炭素排出量が25%以上異なる結果を示した。またBより、ほたて貝殻 RC 造の二酸化炭素排出総量は、基準 RC 造に比べ16%程削減することが示された。以上より、ほたて貝殻の製造時・輸送時における二酸化炭素排出量は、普通細骨材に比べ多い傾向を示したが、成長時の二酸化炭素固定量を差し引くことで、製造時・輸送時の二酸化炭素排出総量は削減する可能性があることが示された。

3.6 炭素固定性を有する材料の環境負荷評価

図 15 に建築に用いる各材料における炭素の吸収・排出モデルを示す。ここでは、研究対象であるほたて貝殻(生成期間:2~3年)、炭素を吸収・蓄積する木材(生成期間:30年)、セメントの原料であり主成分が炭酸カルシウムである石灰石(生成期間:数億年)を比較対象とした。生成期間中の累積の炭素固定量が一定の場合、材料の生成期間が長くなるほど、年当たりの炭素固定量は小さくなるため、生成時に吸収した炭素は大気中にはほぼ影響がないと言える。また、炭素排出期間では、蓄積期間が長いほど、大気中に炭素を放出しないため、長期間固定していた場合の方が大気中の炭素濃度の上昇を留めることが出来る。よって、炭素固定量が同じ炭素固定性を有する材料の場合、生成期間は短期であり、蓄積期間が長期であればあるほど、炭素固定性能が優れることになる。

ここに、式(1)に Y':蓄積期間(年)を Y:生成期間(年)で除した値の E:炭素固定効率を、式(2)に S:炭素固定量(t)を含めた F:炭素固定評価値(t)を示す。炭素固定効率は炭素の固定量を総合的に評価した値であり、大きいほど炭素の固定に優れていることを示す。ほたて貝殻、木材、石灰石と比較すると、蓄積期間、炭素固定量は一定であるが、各材料とも生成期間が異なる。炭素固定評価値が大きい順に列举すると、ほたて貝殻、木材、石灰石となり、ほたて貝殻は炭素固定性能が一番高い材料といえる。ただし、蓄積期間の長さと材料は関係なく、材料の炭素固定量が重要となる。このグラフは各材料の合計の炭素固定量が一定として考えたもので、実際には各材料の製造量や使用量により固

定量が大きく異なる。

本研究で使用したほたて貝殻は生成期間が2~3年と短期間で海中の炭素を固定し、建築用細骨材に使用することが出来る。また、研究1の結果より、コンクリート材料として、炭素を建物内部に長期間固定し、蓄積期間を長くすることに貢献することが出来る。一方で、ほたて貝殻の建材利用に向けた製造は、同時にほたて貝の養殖促進と、地域産業の活性化にも繋がる。また、炭素固定評価値を用いることで、材料の生成期間、炭素の蓄積期間、炭素固定量を総合的に評価することが可能であることから、炭素固定性を有する材料の性能評価指標の基礎的知見となる。今後、炭素固定性を有するほたて貝殻の建築用細骨材としての利用方法がさらに広がれば、RC造建築物に、長期に渡り炭素を固定する可能性が拡大することに繋がる。

4. まとめ

- (1) ほたて貝殻の骨材の形状が扁平であるため供試体が密実になりやすく、また、ほたて貝殻自体の強度が大井川産陸砂に比べ低い可能性があり、圧縮強度はある一定の下限値まで下がり、静弾性係数は置換率に比例して下がる。
- (2) 鉄筋の促進腐食試験について、ほたて貝殻を置換した供試体の方が、また水セメント比で高い方が、腐食減量に対してグラフの立ち上がり位置が遅れる。
- (3) ほたて貝殻の製造時・輸送時における二酸化炭素排出量は、普通細骨材に比べ多い傾向を示したが、成長時の二酸化炭素固定量を差し引くことで、製造時・輸送時の二酸化炭素排出総量は削減する可能性がある。
- (4) 炭素固定性を有するほたて貝殻の建築用細骨材としての利用方法がさらに広がれば、RC造建築物に、長期に渡り炭素を固定する可能性が拡大することに繋がる。

謝辞

本研究は、(株)北海道裕雅高柳雅保氏及び技術員各位、(株)イワタ舗装外構事業部古川真弘氏及び各位(株)、豊浦町議会村井洋一氏、(有)北海スキャロップ丹田美智男氏、ぎょれん室蘭食品関係各位に多大な協力を頂いた。また本研究の一部は、平成23年工学院大学都市防災センター(課題3)、平成23年度総合研究所プロジェクト研究費、平成23年度文部科学省科学研究費、若手研究A(23686081、代表田村)による。

参考文献

- 1) 小室清人、田村雅紀：炭素固定性を有する海洋生物殻を使用した建材に関するカーボンニュートラル性の検証、日本建築士学会大会学術講演会、pp.133-136、2011.10
- 2) 山内匡、清宮理、高橋久雄、山路徹：ホタテ貝殻を細骨材として活用したコンクリートの耐久性および実証試験、コンクリート工学年次論文集30(2)、pp.469-474、2008.7
- 3) 小室清人、田村雅紀：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集Vol.33、No.1、pp.1877-1882、2011.7
- 4) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書「維持管理編」、pp.95、2008
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説、pp.92-94、2004.3
- 6) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム、pp.242-243、2004.10
- 7) 名知洋子、田村雅紀、鈴木道哉：建築生産プロセスを考慮した建築資材の輸送形態に関する実態調査・分析、日本建築学会技術報告集、Vol.16、No.34、pp.871-876、2010.10
- 8) 河合研至ほか：コンクリートの環境負荷評価(その2)、土木学会コンクリート委員会、pp.39、2004.9
- 9) 経済産業省：ロジスティクス分野におけるCO₂排出量算定方式共同ガイドライン、2006.4
- 10) 環境省：電気事業者別のCO₂排出係数、2009.12