

カキ殻を細骨材置換したコンクリートの特性と炭素固定量

正会員 ○ 都祭 弘幸*1, 非会員 ト部 将平*2

カキ殻
塩化物量

粒度分布
強度発現

フレッシュ性状
無機体炭素量

1. はじめに

広島県内におけるカキ殻堆積可能容量は約 37.9 万 m³ (2024 年)であるが、現状の堆積量は既に約 30 万 m³に達しており、2025 年度の調査では約 5 万 m³の超過が予測されている¹⁾。広島県では毎年約 20 万 m³のカキ殻が発生しているが、主な利活用は飼料・肥料に限られており、利活用範囲の拡大は喫緊の課題である。

カキ殻を大量に利活用できる分野として、土木・建築構造物に用いるコンクリートの細骨材利用が挙げられる。既往研究の文献 2)から 4)によれば、カキ殻細骨材の置換率を増加させると空気量が増加し、密度・圧縮強度・弾性係数が低下することが報告されている。カキ殻置換率 50%と置換無しと比較すると、材齢 28 日の圧縮強度で 6 ～7 割、静弾性係数では約 7 割まで低下している。文献 4)でも同様の報告がなされている。使用するカキ殻の粒度分布については、文献 2)3)では JIS A 5005 に規定されている細骨材の標準粒度分布に近いもの、文献 4)では ASTM C33-18 に適合したものとしている。また、共通してフレッシュ性状に関しては、置換率の増加に伴いワーカビリティ(スランプ)の低下が報告されている。

カキ殻をコンクリートの細骨材に利用することは、産業廃棄物の課題に対応すると同時に、持続可能な建設技術の発展に貢献するという面を併せ持っている。さらに、カキ殻は炭酸カルシウム (CaCO₃) を主成分とする石灰化生物由来の材料であり、近年では CO₂ の長期的な生物由来炭素固定として再評価されつつある⁵⁾。

本研究で使用するカキ殻は、広島県のルールに則って適正に処理され、写真-1 に示す肥料・飼料用に工場で粉砕されたものであり、粒径・水分量・成分が安定している。

粗骨材・細骨材の粒度分布は、コンクリートの強度発現に影響することが考えられるので粒度分布を調整可能

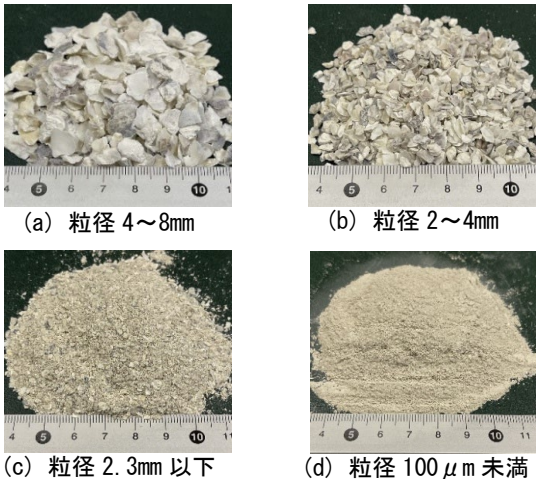


写真-1 本研究で使用するカキ殻

な材料が望ましい。この材料により JIS A 5005 の細骨材標準粒度分布を考慮したカキ殻材骨材を作ることができる。

既往の研究ではカキ殻細骨材の置換率を増やすと圧縮強度や静弾性係数が低下することが報告されているが、筆者らはカキ殻細骨材の粒度分布を調整することによりカキ殻置換率を増加しても強度発現の改善が期待できる。そこで本研究では、粒度分布を調整したカキ殻細骨材を用いて、細骨材をカキ殻置換したコンクリートの研究を実施し、フレッシュ性状、硬化後の強度発現推移・静弾性係数などについて検証する。また、圧縮試験後の供試体を 150 μm 以下に粉砕し、無機体炭素(IC)を全有機炭素計(TOC)で分析を行いカキ殻置換したコンクリートの炭素固定量を推察する。

2. 使用材料

本研究で使用了材料を表-2 に示す。また、カキ殻細骨材の粒度分布を図-1 に示す。カキ殻細骨材には表-1 に示す粒径 2～4mm 以下の材料を用い、JIS A 5005 の細骨材標準粒度分布の中央値に近づくよう複数粒径を混合し

表-1 本研究で使用するカキ殻のふるい試験結果 (質量百分率)

ふるい(mm)	40	20	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	粗粒率
粒径4～8mm	0	0	0.1	34.5	97.1	98.1	98.7	99.2	99.5	5.27
粒径2～4mm	0	0	0	0	53.7	91.2	93.8	96.4	98.1	4.33
粒径2.3mm以下	0	0	0	0	0.1	27.2	54.5	72.5	89.8	2.44
粒径100μm未満	0	0	0	0	0	0	0.96	8.7	86.0	0.96

表-2 使用材料

セメント	C	普通ポルトランドセメント(3.16) 高炉セメントB種(3.16)
細骨材	S ₁	砕砂(2.65), 海砂(2.56)
	S ₂	カキ殻細骨材(2.12)
粗骨材	G	砕石1505(2.65), 砕石2010(2.65)
水	W	上水道水
Caイオン水	Iw	カキ殻イオン水
混和剤	ad	高性能AE減水剤

注) 括弧内数値は、表乾密度を表す

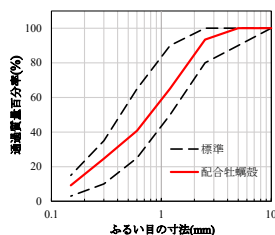


図-1 カキ殻細骨材の粒度分布

表-3 配合表(2024年シリーズ)

No.	NS	SR	C	W	S ₁	S ₂	G	ad
1	27	0	340	180	877	0	872	1.36
2	45		500		664		957	3.25
3	27		340		614	215	872	1.36
4	45	30	500	180	465	163	957	3.25
5	27		340		439	358	872	1.36
6	45		500		333	271	957	3.25

表-4 配合表(2025年シリーズ)

No.	NS	SR	C	W	Iw	S ₁	S ₂	G	ad
1	27	0	340	180	0	877	0	872	1.36
2	45		500			664		957	3.25
3	27		340			877		872	1.36
4	45		500			664		957	3.25
5	27	30	340	162	18	664	215	872	1.36
6	45	50	500			439	358	957	3.25
7	27	30	340			465	163	957	3.25
8	45	50	500			333	271	957	3.25
9	27	0	340*	180	0	870	0	870	1.36
10	45		500*			659		946	2.875
11	27		340*			870		870	1.36
12	45		500*			659		946	2.875
13	27	0	340*	162	18	609	213	870	1.36
14	45		500*			435	355	946	2.875
15	27		340*			461	162	946	2.875
16	45		500*			330	269	946	2.875
17	27	30	340*	162	18	609	213	870	1.36
18	45	50	500*			435	355	946	2.875
19	27	30	340*			461	162	946	2.875
20	45	50	500*			330	269	946	5.00

表-3・4 共通

注) NS: 呼び強度(N/mm²), SR: カキ殻細骨材置換率(%), *: 高炉スラグB種, その他の記号は表-2を参照。

た。表-2中のCaイオン水は、文献6)に示された方法により作成したものであり、長期強度発現効果が報告されている。

3. 配合計画

3.1 2024年シリーズ

表-3に2024年度の配合表を示す。本シリーズの目的は、カキ殻細骨材を使用した場合の基本的な性状を把握することである。呼び強度F27とF45、目標スランプ18cmの配合に対し、カキ殻置換率0・30・50%(容積比)の影響を調査した。フレッシュ性状としてスランプ、空気量、単位体積質量、塩化物イオン濃度を測定した。また、硬化後の強度発現に関しては、2・4・6週のφ100供試体圧縮強度を測定した。

3.2 2025年シリーズ

表-4に2025年度の配合表を示す。本シリーズの目的は、高炉セメントB種を使用した場合との比較およびCaイオン水の効果を検討した。2025年シリーズも呼び強度F27とF45、目標スランプ18cmに対するカキ殻置換率0・30・50%(容積比)を対象とし、フレッシュ性状は2024年シリーズと同様に測定した。F45のNo.20のみ混和剤を増やし、フレッシュ性状や強度への影響を検討した。硬化後の強度発現に関しては、1・4・14週の圧縮強度、4週の静弾性係数を測定することとした。

4. フレッシュ性状

4.1 スランプ

図-2にカキ殻置換率とスランプの関係を示す。図からセメントの種類に係わらず、カキ殻置換率の増加に伴いスランプが低下する傾向が確認できる。また、Caイオン水を混合したもの(+Iw)は、カキ殻混入・セメント種類に関係なくスランプが低下する可能性がある。目標スランプ18cmに対して許容値(±2cm)を満足したのは置換率0%配合と2025年の混和剤を増やしたNo.20だけであった。

4.2 空気量

図-3にカキ殻置換率と空気量の関係を示す。カキ殻置換率の増加に伴い空気量が増加・減少する場合があります、一定の傾向を示さず、定性的な関係は明確ではなかった。Caイオン水を混合した場合(+Iw)は、カキ殻置換率・セメント種類に関係なく空気量が若干ではあるが低下する傾向が見られた。空気量が許容範囲(4.5±1.5%)を外れたものはカキ殻置換率50%で空気量2.5%が最低値であること

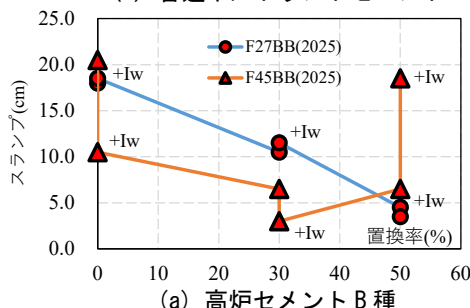
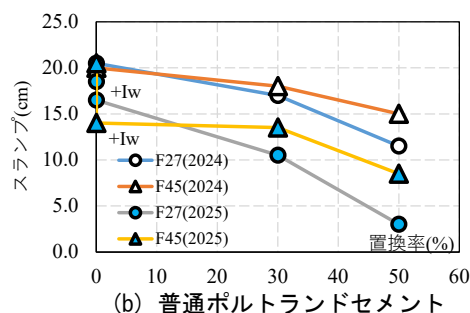


図-2 置換率—スランプ関係

から配合計画の検討より許容範囲への対応は可能と考えられる。

4.3 単位体積質量

図-4にカキ殻置換率と単位体積質量の関係を示す。カキ殻置換率の増加に伴い単位体積質量はほぼ線形に減少した。図-4は普通ポルトランドセメントの場合であるが、高炉セメントB種でも同様の傾向が見られた。これはカキ

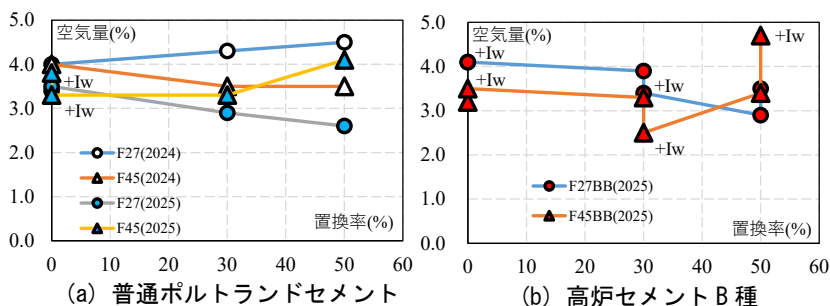


図-3 置換率-空気量関係

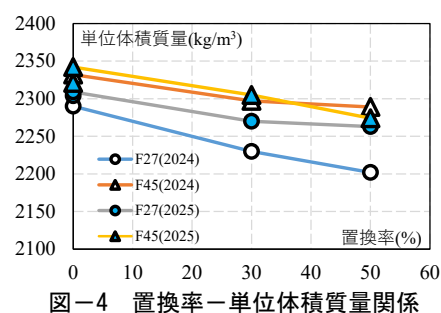


図-4 置換率-単位体積質量関係

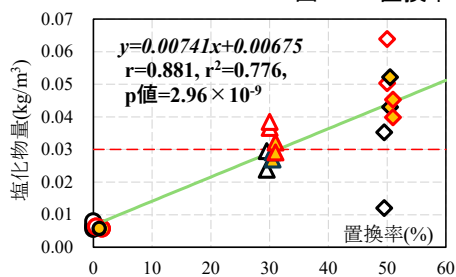


図-5 置換率-塩化物量関係

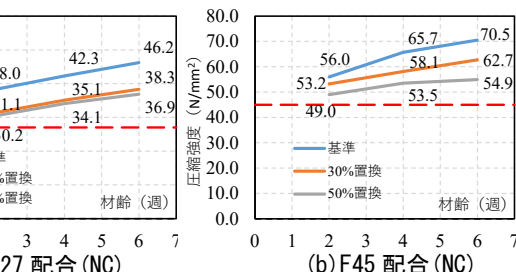
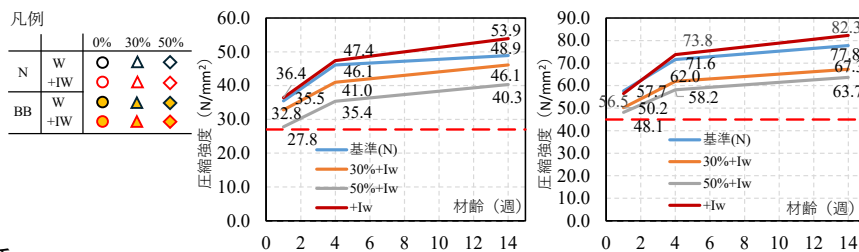


図-6 2024年シリーズの圧縮強度推移

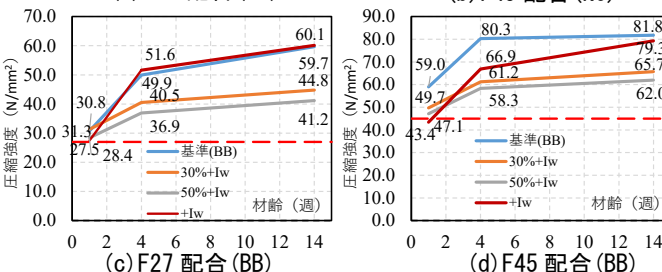


図-7 2025年シリーズの圧縮強度推移

殻の表乾比重が一般的な砂よりも小さいためである。

4.4 塩化物量

図-5 にカキ殻置換率と塩化物量の関係を示す。塩化物量は、塩化物イオン濃度簡易測定法を用い 1m³あたりの使用水量から算出した値である。

カキ殻置換量の増加に比例して塩化物量が増加する傾向がある。カキ殻置換率 30%で規制値前後であることから置換率を抑えることにより塩化物量抑制可能と考えられる。本研究の全 26 データを用いて回帰分析を行った結果、図-5 中の緑実線で示す式(1)を得た。

$$y = 0.000741x + 0.00675 \quad (1)$$

ここで、 y ：塩化物量(kg/m³)、 x ：置換率(%)である。式(1)の $r=0.881$, $r^2=0.776$, 標準誤差 0.0087, p 値= 2.96×10^{-9} , F 値=82.93 であり、有意な相関性が見られた。

カキ殻置換率を 20%程度に抑えることで、塩化物量を確実に規制値 0.03(kg/m³)未満に抑制できると考えられる。

5. 硬化後の性状

5.1 圧縮強度の推移

図-6 に 2024 年シリーズの F27 配合・F45 配合の圧縮強度推移を、図-7 に 2025 年シリーズの F27 配合・F45 配合の圧縮強度推移を示す。NC は普通ポルトランドセメントを、BB は高炉セメント B 種を意味する。供試体はいずれも標準水中養生($20 \pm 2^\circ\text{C}$)とした。

図-6 および図-7 より、カキ殻置換率および呼び強度に関係なく 1 週でそれぞれの呼び強度に達した後、14 週まで強度発現が継続した。普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種とでは大きな差異はないが、高炉セメント B 種の方がセメントの性質通り若干強度発現が遅い傾向が見られた。

4 週および 14 週におけるカキ殻置換率と圧縮強度比の関係を図-8 に示す。4 週・14 週における強度比の最低値は、置換率 50%でそれぞれ 72.6%と 69.0%である。F27・F45 ともに高炉セメント B 種使用時の方が強度比は小さくなる傾向が見られた。強度比は置換率の増加に伴い低下する。このため置換率を 20%程度に抑えれば 4 週で強度比 9 割程度のカキ殻コンクリートが可能であると言える。

Ca イオン水を用いると文献 6)報告のように長期強度が高くなるものも存在した。

5.2 静弾性係数

図-9 に 2025 年シリーズの 4 週における静弾性係数分布を示す。図中の青実線は RC 規準⁷⁾式である。実験値はコンプレッソメーターを使用して得られた応力-ひずみ曲線から JIS A1149 に準拠して計算した 3 本の平均値である。静弾性係数は置換率 50%で最大 82%まで低下した。図-9 より置換率 30%・50%ともに RC 規準式を使って圧縮強度に応じた静弾性係数を良好に推定できることが分かる。

6. 無機体炭素量(IC 濃度)および CO₂ 吸収量

2024 年シリーズのカキ殻置換率 0%・30%・50%の同一材齢(約 17 週)の供試体各 1 本を 150 μm の粉末状に粉砕し、全有機体炭素計・固体試料燃焼装置を用いて試料中に含まれる無機体炭素量(IC 濃度)を測定した。測定結果および回帰分析結果を図-10 に示す。図-10 に示すように IC 濃度(%)は置換率に比例して増加することが分かる。回帰分析結果は非常に高い相関が得られた。

図-11 および表-5 に上記 3 供試体が約 17 週間で吸収した CO₂ 量推定結果を示す。算定では、供試体製作に使用した石灰砕砂質量の 95%を CaCO₃、カキ殻質量の 90%を CaCO₃ とし、それら材料の CO₂ 換算量(元素モル質量)を IC 濃度から求めた CO₂ 換算量から除いた。カキ殻コンクリートの炭素固定量は一般コンクリートよりも高く、CO₂ 吸収量もカキ殻置換率増加に伴い増加する傾向が見られた。同一条件下では CO₂ 吸収量は CaCO₃ 量に比例する結果となった。供試体なのでコンクリート酸化状況は一般構造物と異なるが貴重なデータである。本結果は特定条件下で得られたものであり、今後多くのデータを蓄積する必要がある。

7. まとめ

本実験研究から以下の知見が得られた。

- 1) カキ殻細骨材置換コンクリートのフレッシュ性状は、置換率の増加に伴いセメント種類に関係なく、スランプ低下・単位体積質量減少・塩化物量増加の傾向を示した。空気量に関しては明確な傾向は見られなかった。
- 2) 本研究で使用するカキ殻について置換率から塩化物量を推定できる式を構築した。置換率を 20%程度に抑えることで塩化物量を規制値未満に抑制できる。
- 3) Ca イオン水を混入した場合、セメント種類に係わらず、スランプおよび空気量がわずかに低下した。長期の強度発現効果の可能性は認められた。
- 4) 硬化後の性状は、セメント種類に係わらずカキ殻置換率 50%までは 1 週で呼び強度以上の強度発現が可能であり、以降も置換なしと同様に強度発現を継続した。また、置換率に係わらず静弾性係数は、RC 規準式で推定可能であった。
- 5) カキ殻置換率の増加に伴いコンクリート中の炭素濃度、CO₂ 吸収量ともに増加する傾向が見られた。カキ殻細骨材置換コンクリートの IC 濃度および CO₂ 吸収量の評価に関しては、今後、多くの条件下におけるデータ蓄積が必要である。

謝辞

本研究は、広島県カーボンリサイクル関連技術研究開発支援事業[テーマ名「カキ殻を用いた環境配慮型コンクリートの開発とその CO₂ 固定化能力の評価」]の補助を受けて実施したものです。本研究における配合計画策定・供試体製作では三谷建設㈱の方々に多大な協力を頂きました。また、無機体炭素(IC)分析では、㈱島津製作所の方々、CBRD 研究会

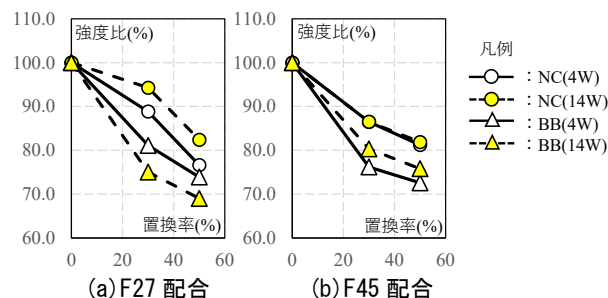


図-8 カキ殻置換率と圧縮強度比の関係

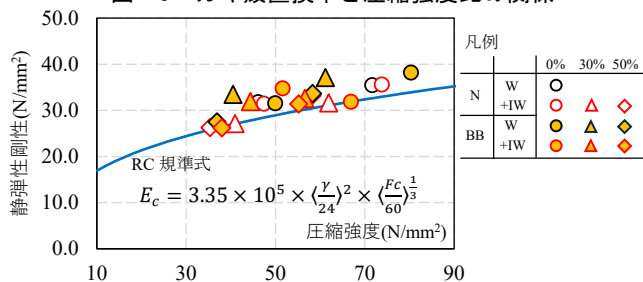


図-9 圧縮強度－静弾性係数関係

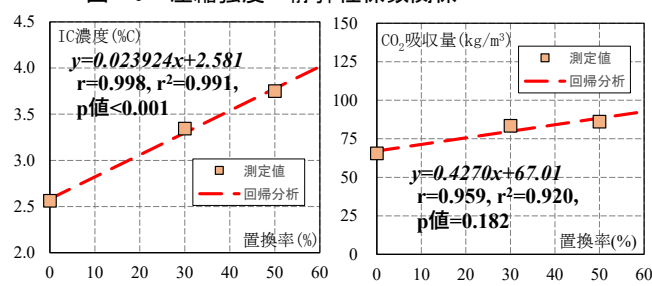


図-10 置換率－IC 濃度関係

図-11 置換率－CO₂ 吸収量関係

表-5 CO₂ 吸収量の算出

置換率	%	0	30	50
IC濃度	%C	2.563	3.345	3.750
単位体積質量	kg/m ³	2,290	2,230	2,202
炭素量	kg-C / m ³	58.7	74.6	82.6
CO ₂ 換算	kg-CO ₂	215.2	273.5	302.8
カキ殻使用量	kg/m ³	0	215	358
石灰砕砂使用量	kg/m ³	358	251	179
CO ₂ 吸収量	kg/m ³	65.6	83.5	86.2

「CO₂ 吸収・固定材料の評価に関するガイドライン作成」(主査：大和ハウス工業㈱, 委員：旭化成ホームズ㈱, 神島化学工業㈱, 国立研究開発法人建築研究所, 五洋建設㈱, ㈱フジタ, 五十音順) 委員の方々からご助言を賜りました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 広島県農林水産局水産課：かき殻堆積超過の現状と利活用対策の取組状況について, <https://www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/585612.pdf>, 2025.7
- 2) 堀口至, 目片雄士, 三村陽一：コンクリート用細骨材への破砕した牡蠣殻の適用性, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1576-1581, 2012.7
- 3) 堀口至, 目片雄士, 三村陽一：コンクリートの基礎特性に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.559-564, 2013
- 4) Yao-Ming Hong and Sharan Roy Choudhury : The Substitution Effect of the Fine Aggregate in Concrete with Oyster Shell, Materials 2024 (一社)水圏統合カーボン固定推進機構(AICaS) : AICaS とは, <https://sites.google.com/aicas-org.com/aicas>, 2025
- 5) 大廣麻里, 森村毅：牡蠣殻で作るカルシウムイオン水を用いた強化靱性モルタルの最適配合の研究, 日本建築学会大会講演梗概集, 構造IV, pp.557-558, 2009.8
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2024

*1 福山大学工学部建築学科教授 博士 (工学)

*2 ト部産業 (株)

*1 Prof. Department of Architecture, Fukuyama University, Dr.Eng.

*2 Urabe Industry Co., Ltd.