

論文 造粒した籾殻炭を混合したコンクリートの基礎的性質

緒方 英彦*1・服部 九二雄*2・高田 龍一*3

要旨：未利用バイオマスである籾殻は、年間発生量の約 14%が再利用されることなく廃棄処分されており、再利用方法の更なる検討が必要なバイオマスの一つである。籾殻を炭化して作られる籾殻炭の特性としては、軽量、吸湿・吸水性、保水性が挙げられる。本研究では、籾殻の再利用を図るとともに、籾殻炭の特性を活用した多機能コンクリートを開発することを目的として、造粒した籾殻炭をコンクリートに混合し、その基礎的性質を検討した。そして、造粒した籾殻炭を混合することで、コンクリートに自己養生機能を付加することができるかを検討した。

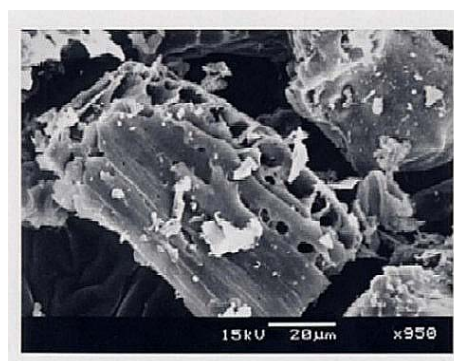
キーワード：籾殻炭，造粒，人工骨材，吸水性，保水性，軽量化，自己養生

1. はじめに

循環型社会を形成するために平成 14年に策定されたバイオマス・ニッポン総合戦略では、日本国内の廃棄物総量の 6割を占める有機性廃棄物を再資源化し、環境負荷低減も兼ねた総合的な利用方法について取り組むことを目的としている。バイオマスは、廃棄系バイオマス（食品廃棄物、家畜廃棄物等）、未利用バイオマス（稲藁、籾殻、間伐材等）、資源作物（飼料作物、でんぷん系作物等）に大別され、その年間発生量は農林水産省バイオマス・ニッポン総合戦略推進事業の資料によると約 24,480 万 tにも及ぶとされている。その内、未利用バイオマスである農作物非食用部（稲藁、籾殻等）の年間発生量は約 1,300 万 tである。

稲藁は、すき込みや堆肥、家畜の粗飼料、畜舎の敷料、マルチング材料等で全体の約 95%が再利用されており、焼却処分されるのは約 5%である。一方、籾殻は、暗きょ資材、堆肥、畜舎の敷料、マルチング材料、燐炭として再利用されているものの、約 14%は焼却処分されていることから、再利用方法の更なる検討が必要なバイオマスであると言える。

このような状況にある籾殻を有効利用するた



写真－1 籾殻炭の顕微鏡写真（950倍）

めの方法の一つとしては、完全燃焼後の籾殻（籾殻灰）の主成分である SiO_2 がポズラン性を有することを利用した籾殻灰のコンクリート用混和材としての利用がある¹⁾。しかし、籾殻を完全炭化するためには、高温の燃焼設備が必要であり、コンクリート用混和材としての必要量を確保するためには、高額の設定投資が必要となる。

一方、籾殻の炭化物である籾殻炭は、古くから土壌改良材等として利用されており、排気口を有する簡単な装置で製造することができるほか、農協等で製造・販売もされている。籾殻炭は、籾殻の細胞構造をそのまま珪酸質骨格として残していることから多孔質（写真－1を参照）であり、密度が 0.12g/cm^3 と小さく、吸水率が約

*1 鳥取大学 農学部生物資源環境学科助教授 博士（農学）（正会員）

*2 鳥取大学 農学部生物資源環境学科教授 農学博士（正会員）

*3 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科教授 農学博士（正会員）

400%と高い。また、完全に炭化されていれば pH が約 10 のアルカリ性である²⁾³⁾。

著者らは、粉殻炭の特性である軽量、吸湿・吸水性、保水性を活用した多機能コンクリートの開発に関する研究の一環として、モルタルによる実験を行い、粉殻炭を混合したモルタルは材齢 3 日まで水中養生を行ったならば、その後の養生が不十分であったとしても、粉殻炭が吸水した水により自己養生を行うことができることを明らかにした²⁾³⁾。ここで、自己養生とは、コンクリート自体に養生機能を持たせ不十分な養生による強度低下の抑制を図ることである。しかし、モルタルに粉状の粉殻炭をそのまま混合したことで、粉殻炭の吸水率が高いことによるワーカビリティの低下、粉殻炭の密度が小さいことによる材料分離、硬化後のモルタルが黒色になることによる景観性能の低下が生じ、これらを解決するための工夫が必要になることもこれまでの研究を通して明らかになった。

本研究では、これまでに明らかになった問題点を解決する手段として粉殻炭の造粒化を考え、粉殻炭の造粒方法及び造粒した粉殻炭を混合したコンクリートの基礎的性質を検討した。そして、造粒した粉殻炭を混合することで、コンクリートに自己養生機能を付加することができるかを検討した。

2. 粉殻炭の造粒方法

2.1 配合方法

造粒する粉殻炭は、ポットミルを用いて 15 分間粉碎し、粉状にしたものを気中乾燥状態で使用した。配合は粉殻炭を 200g 一定とし、セメント C と粉殻炭 R の質量比（以下、C/R）が、0.4~1.2 となるような 5 ケースを設定した。セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）である。練混ぜ水は、セメント：粉殻炭：水が 1：1：1 を基本配合として 200g としたが、実験室内の湿度によって粉殻炭の吸水率が変化したために 200±20g とした。表-1 に粉殻炭の造粒における配合表を示す。

表-1 粉殻炭の造粒における配合表

粉殻炭混合率 C/R (%)	セメント C (g)	粉殻炭 R (g)	水 W (g)
0.4	80	200	200 ±20
0.6	120		
0.8	160		
1.0	200		
1.2	240		



写真-2 造粒した粉殻炭

粉殻炭の造粒は、次の手順で行った。

まず、表-1の配合に基づきセメントと粉殻炭を計量し、その半分を造粒機（千代田技研工業製 オムニミキサー OM-10E）に投入した。30 秒空練りした後、造粒機を回転させたまま水を霧吹きにより全体に吹き付けるように入れた。セメントと粉殻炭を半分に分けて投入するのは、最初に細かな粒径のものを作製し、残りの材料を少しずつ造粒機に投入していくことで徐々に粒径を大きくし、その粒径もほぼ均一に作製することができるからである。また、霧吹きを使用したのも同様の理由からである。粒径が 5~20 mm 程度になるまで造粒を行った。写真-2 に造粒した粉殻炭を示す。

2.2 造粒した粉殻炭の諸特性

粉殻炭の造粒に適した配合を検討するために、各配合ケースにおける吸水率、密度、圧縮強度を測定した。

(1) 吸水率

表-1 に示した配合で造粒した粉殻炭を 24 時間気中養生した後、20℃一定の恒温水槽内で 24 時間水中養生を行うことで飽水させ、表面乾燥

飽水状態における質量を測定した。その後炉乾燥機（110℃）で24時間乾燥させ絶対乾燥状態における質量を測定して、吸水率を求めた。その結果を図-1に示す。

吸水率は、C/Rの割合が増すほど小さくなるのがわかる。特にC/Rが1.0から1.2にかけては、吸水率の低下が大きくなっている。また、吸水率が40%を超えているのはC/Rが0.8以下である。粉殻炭自身の吸水率は約400%であることから、セメントと混合して造粒することで、その約1割に吸水率が減少することになる。しかし、一般的に用いられる粗骨材の吸水率が約2%前後であることを考えてみても、造粒した粉殻炭の吸水率はかなり高いことがわかる。

(2) 密度及び圧縮強度

造粒した粉殻炭の圧縮強度を直接求めることは困難であったことから、粉状粉殻炭、セメント、水を表-1に示した所定の質量比で練混ぜたものを塩ビパイプに詰め、半径25mm、高さ50mmの円柱供試体を作製して、密度及び圧縮強度を測定することにした。

造粒した粉殻炭に求める機能は自己養生機能であることから、吸水率ができるだけ大きくなる配合が適当である。そこで、粉殻炭の造粒に際して基本配合としたC/Rが1.0と吸水率がそれよりも大きくなるC/Rが0.8の二配合について、密度及び圧縮強度を測定することにした。

作製した円柱供試体は、練混ぜ後24時間で脱型し、20℃一定の恒温水槽内で所定の材齢まで水中養生を行った。試験材齢は、材齢3、5、7、14、28、56日である。密度及び圧縮強度の結果を図-2、図-3にそれぞれ示す。

密度は、材齢7日までC/Rが0.8と1.0で異なる値を示すが、材齢7日以降では両者とも1.65g/cm³の一定値となる。

圧縮強度は、セメント量の多いC/Rが1.0の方が0.8よりも大きくなり、材齢14日までの増加量も大きい。ただし、材齢14日以降では、両者ともほぼ一定値となる。

造粒した粉殻炭は、粗骨材としてコンクリー

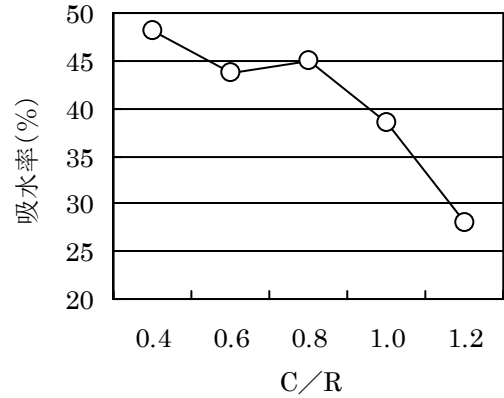


図-1 造粒した粉殻炭の吸水率

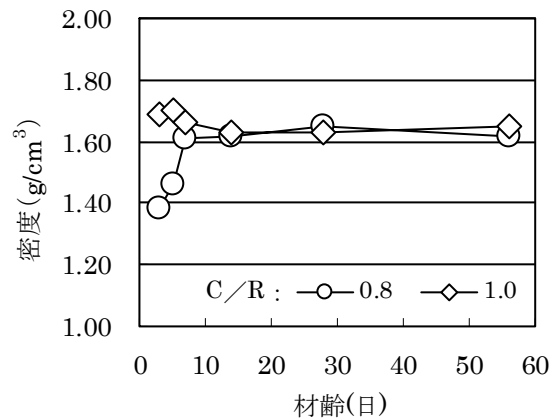


図-2 造粒した粉殻炭の密度

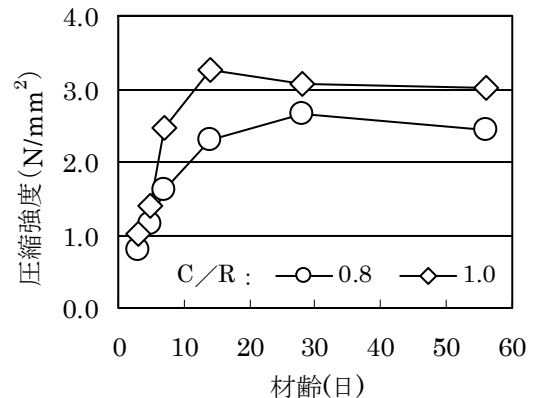


図-3 造粒した粉殻炭の圧縮強度

トに混合することから、強度ができるだけ大きくなる配合が適当である。この条件に加えて、密度及び圧縮強度が材齢14日以降でほぼ一定値になることを考慮に入れ、C/Rが1.0の配合で材齢14日まで水中養生したものをコンクリートに混合する造粒粉殻炭として採用することにした。

表－2 コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
20	8±2	55	2±1	44.2	197	359	744	982

表－3 材料の物性値

材料	密度(g/cm ³)	吸水率(%)	有効吸水率(%)	F.M.
セメント (普通ポルトランドセメント)	3.16	—	—	—
細骨材 (中国産)	2.51	1.73	1.48	1.85
粗骨材 (鳥取県産砕石)	2.63	1.37	0.55	6.85

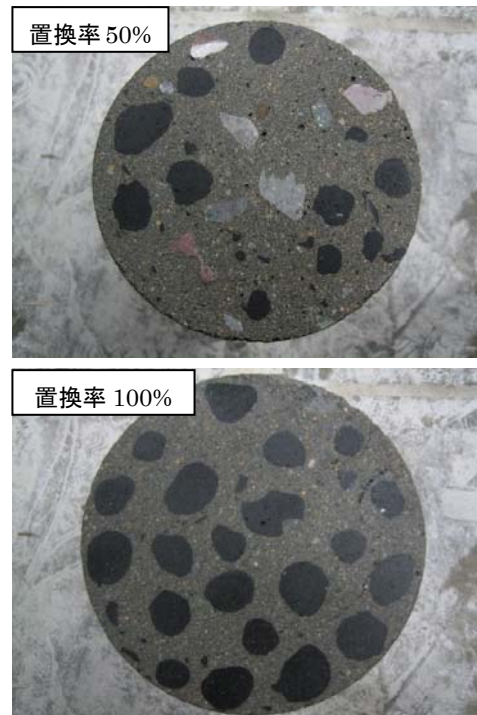
3. 造粒矽炭を混合したコンクリートの特性

3. 1 実験の概要

造粒矽炭を混合したコンクリートの配合は、表－2に示すコンクリートの示方配合を造粒矽炭の粗骨材置換率 0%として、粗骨材を造粒矽炭で 50, 100%置換した 3 種類である。各材料の物性値は表－3に示すとおりであり、造粒矽炭は前章での検討結果を踏まえて、セメント：矽炭：水を 1：1：1 の質量比で造粒したものである。ここで、コンクリートに混合する造粒矽炭は、表－3に示す粗骨材の F.M.に概ね一致させた粒径のものを、20℃一定の恒温水槽内で材齢 14 日まで水中養生し、表面乾燥飽水状態にして使用した。

練混ぜ手順は、一般的なコンクリートの手順と同じであり、造粒矽炭は粗骨材と同じタイミングで練混ぜ機に投入した。供試体は直径 10cm×高さ 20cm の円柱供試体として、各配合とも 3 本ずつ作製した。スランプは、造粒矽炭の粗骨材置換率 0%が 7.2cm, 50%が 6.5cm, 100%が 6.7cm であり、造粒矽炭の混合によるワーカビリティの低下は起こらなかった。

作製後の供試体は、打設の翌日に脱型した後、材齢 3 日まで標準水中養生を行い、その後両端面を研磨した。造粒矽炭の置換率 50%と 100%における研磨後の状況は、写真－3のとおりであり、造粒矽炭がおおよそ均一に分布していることがわかる。円柱供試体の高さ方向においても、概ね造粒矽炭が均一に分布していることを確認できたことから、粉状の矽炭を混合



写真－3 造粒矽炭を混合したコンクリートの研磨面

した際に起こった材料分離は、矽炭を造粒することで解決することができた。また、写真－3に示すのは水中養生後の写真であるが、粉状の矽炭を混合した際に起こった黒色になることによる景観性能の低下は、矽炭を造粒することで解決することができた。

研磨後の供試体は、造粒矽炭によるコンクリートの自己養生を検討するために、次の 3 ケースで所定の材齢まで養生した。Case 1 は 20℃一定の恒温水槽内での水中養生、Case 2 は温度 30℃、湿度 40%一定の恒温恒湿器内での気中養生、Case 3 は温度 20℃、湿度 70%一定の恒温恒

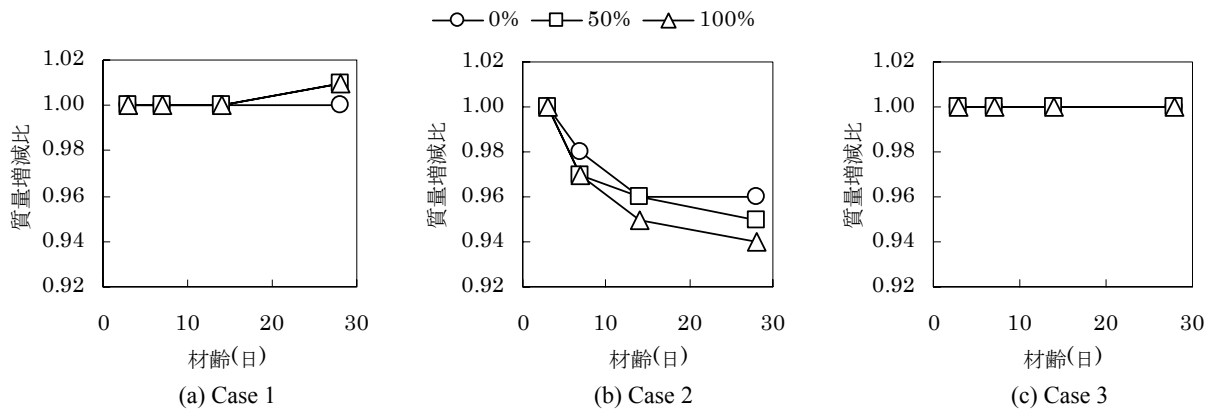


図-4 造粒した粉殻炭を混合したコンクリートの質量増減比

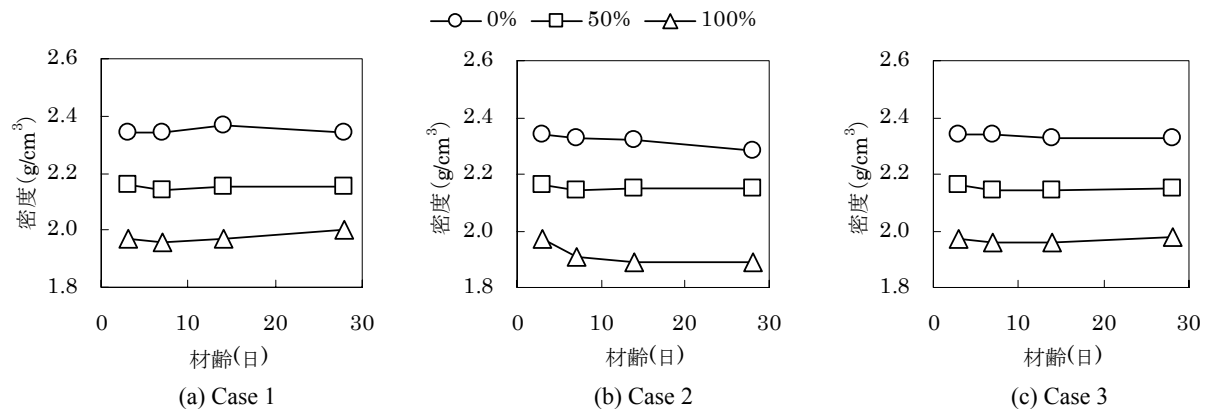


図-5 造粒した粉殻炭を混合したコンクリートの密度

湿室内において供試体をラップで巻いた封緘養生，である。それぞれの養生ケースでは，各配合で作製した供試体を3本ずつ設置した。

3. 2 実験の結果と考察

材齢3, 7, 14, 28日における質量増減比，密度，圧縮強度及び圧縮強度比を図-4～7に示す。ここで，質量増減比及び圧縮強度比は，材齢3日の質量及び圧縮強度を規準として求めたものである。

質量増減比は，水中養生であるCase 1及び封緘養生であるCase 3においてほとんど変化していないが，気中養生であるCase 2においては造粒粉殻炭の置換率が増すほど小さくなる。これは，写真-3に示したように今回作製した供試体の端面は，キャッピングではなく研磨により平坦性を確保したことから，供試体の端面に露出している造粒粉殻炭から保水していた水が蒸発したためであると考えられる。

密度は，造粒粉殻炭の密度が1.65g/cm³と粗骨

材の密度2.63g/cm³よりも小さいことから，Case 1～3のいずれにおいても造粒粉殻炭の置換率が増すほど小さくなる。したがって，造粒粉殻炭を粗骨材として使用することで，コンクリートの軽量化を図ることができる。

圧縮強度は造粒粉殻炭の置換率が増すほど小さくなるが，Case 1及びCase 3においてはそれほど大きな強度差は生じていない。Case 2については，質量増減比のところで考察したように，造粒粉殻炭が保水していた水が蒸発により減少し，造粒粉殻炭自体の強度が低下したためにコンクリートの強度も小さくなったのではないかと考えられる。また，コンクリート中に含まれる水分が蒸発により減少したことで，セメントの水和反応が十分に進まなかったことも原因の一つとして考えることができる。

一方，Case 1及びCase 3における圧縮強度比は，造粒粉殻炭の置換率が増すほど大きくなる。特に封緘養生であるCase 3においてこのような

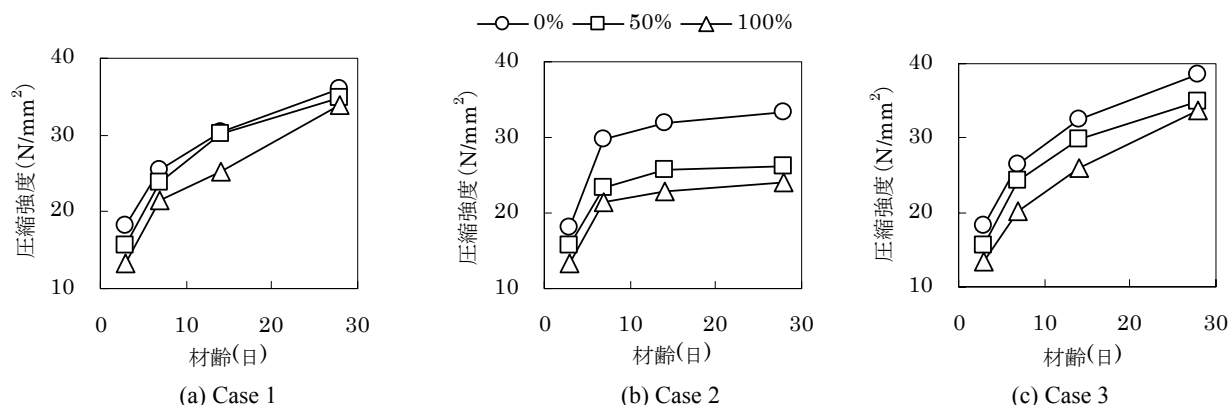


図-6 造粒した粉殻炭を混合したコンクリートの圧縮強度

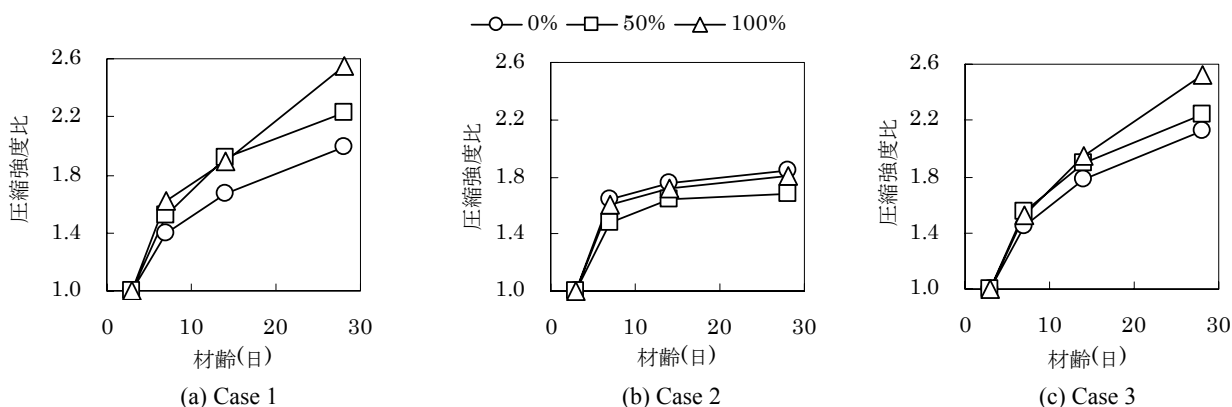


図-7 造粒した粉殻炭を混合したコンクリートの圧縮強度比

結果が得られたことから、造粒粉殻炭が保水していた水による自己養生が行われた効果であると考えることができ、造粒粉殻炭による自己養生が十分に可能であることがわかる。

4. まとめ

本研究により得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) セメント：粉殻炭：水を 1：1：1 の質量比で造粒した粉殻炭の吸水率は約 40%と高く、密度は 1.65g/cm³と小さい。
- (2) 造粒粉殻炭の置換率が増すほどコンクリートの密度は小さくなることから、造粒粉殻炭を粗骨材として使用することで、コンクリートの軽量化を図ることができる。
- (3) 造粒粉殻炭の置換率が増すほど圧縮強度比は大きくなることから、造粒粉殻炭をコンクリートに混合することで、造粒粉殻炭の保水性を活用した自己養生を図ることができる。

- (4) 粉殻炭を粉状で用いた場合に生じたワーカビリティの低下、材料分離、景観性能の低下の問題は、粉殻炭を造粒することで改善することができる。

謝辞：本研究は、平成16, 17 年度科学研究費補助金（若手研究(B), 課題番号16780170）により行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 石黒 覚：粉殻炭混合セメントを用いたモルタルの強度特性，農業土木学会論文集 210, pp.83-88, 2000
- 2) 緒方英彦，服部九二雄，桐岡宏恭：粉殻炭混合モルタルに関する研究(1)－粉殻炭及び粉殻炭混合モルタルの諸特性－，平成 15 年度農業土木学会大会講演会, pp.594-595, 2003
- 3) 緒方英彦，服部九二雄：粉殻炭混合モルタルに関する研究 (2)－粉殻炭混合モルタルの力学的特性－，第 58 回 農業土木学会中国四国支部講演会, pp.24-26, 2004