水産系副産物（貝殻）の保水性に着目した 土質代替材への利用に向けた基礎的研究

STUDY FOR EFFECTIVE USE OF FISHERY BYPRODUCTS AS ALTERNATIVE EARTH MATERIALS FOCUSING ON THEIR WATER RETENTION

小林 薫¹・中房 悟²・西村友良³・森井俊広⁴

Kaoru KOBAYASHI, Satoru NAKAFUSA, Tomoyoshi NISHIMURA and Toshihiro MORII

¹正会員 博(工) 飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

²日本原子力発電株式会社 廃止措置プロジェクト推進室 (〒101-0053 東京都千代田区神田美土代町1番地1)

³正会員 博(工) 足利工業大学 都市環境工学科 (〒326-8558 栃木県足利市大前町268)

⁴正会員 博(農) 新潟大学 自然科学系(農学部) (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050)

Capillary barriers have been known and widely used in geoenvironmental engineering applications as soil cover for typical rainfall infiltration control systems. The capillary barrier is consisting of a fine-grained soil layer placed over a coarse-grained soil layer. The applications of capillary barriers are significantly useful to preventing infiltration into waste materials. Natural gravel or coarse-grained soil material had a exhaustion problems in practices. On the contrary, shells a kind of fishery byproduct, are classified as industrial waste in laws concerning waste disposal. The majority of shells are piled and left near the fishing port without controlling system. Therefore, it is proposed that the crushed shells are available to layer material instead of natural coarse-grained soil. This solution is considered to great contribute developing of recycle for fisher byproduct shells and is related to environment conservation. Water retention for crushed shells, however, never been fully investigate.

This study focuses on the ability of crushed shells to capillary barrier applications. The soil-water characteristic curve for crushed shells with three different grain size distributions was determined using the modified SWCC testing apparatus. Also, it is observed using a conventional model equipment that the getting of fine sand into crushed shell layer is prevented.

Key Words : *Crushed shells, fishery byproduct, capillary barrier, water retention, recycling of materials, waste landfill*

1. はじめに

廃棄物処分場の閉鎖時のトップカバーとして、キャピラリーバリアを利用した降雨浸透制御システムが知られている。このキャピラリーバリアの構造は、砂層とその下部に礫層を重ねた自然材料を用いた土層地盤である¹⁾。一方、環境保全および自然環境維持の観点から、天然の砂礫の採取量は毎年減少している^{2),3)}。また、水産系副産物である貝殻は、廃棄物処理および清掃に関する法律から、産業廃棄物に該当するため、事業者自らが処分する必要があるが、その処分方法や利用方法が確立されていないことから、その多くが漁港周辺に野積みされているのが現状である。

このことから、近年では破碎したホタテ貝殻をケーソン中詰材⁴⁾、漁港の岸壁などの裏込材⁵⁾およびアスファルト舗装材⁶⁾などに利用し、また、貝殻の溶出試験による使用時の環境への影響⁷⁾などに関する研究も行われている。しかし、これまでの利用

方法は、貝殻を砂と混合したり、コンクリートやアスファルト舗装材の骨材の一部として混合されることがほとんどであり、その利用目的・形態から貝殻単体で使用した事例は肥料⁸⁾以外はほとんど見受けられない。資源の乏しい我が国では、水産系副産物である貝殻の積極的な利活用は天然の砂礫の枯渇問題への対応や循環型社会の構築推進ならびに再資源化に大いに貢献するものである。

本論文は、主成分が炭酸カルシウム(CaCO_3)で化学的、物理的に安定した貝殻を天然の砂材や礫材の土質代替材として、キャピラリーバリアに有効利用することを目的に、これまで着目されていない破碎した貝殻の保水性について検討し、水分特性曲線と貝殻の粒径および垂直応力（以後、拘束圧と記す）との関係について明らかにする。また、メスシリンダー（以後、容器と記す）に砂材と礫材、砂材と破碎した貝殻で構成する2種類の土層を空中落下により作製し、その後に打撃による振動を容器に与えて、

砂材が下部の礫層または破碎した貝殻層に混入する状況を観察する。観察の様子から破碎した貝殻を有効活用することで、砂材が混入し難い長期的に安定したキャピラリーバリアを構築できる可能性について実験的に検証する。

2. 土のキャピラリーバリア

砂層とその下部に礫層を重ねた水平な土層構成の地盤では、土粒子の径や間隙の大きさに伴う保水性の違いにより、砂層と礫層の境界面の上部で降水浸透水が遮断され貯留する。境界面に傾斜をつけると、集積水は傾斜方向に流下していくため、境界面はあたかも不透水性の障壁として機能し、それ以深の領域への水の浸透が抑制される（図-1参照）。また、傾斜した境界面に沿って流下した浸透水は、末端で集水することにより、貴重な水資源として利用することも可能である。自然材料である砂層と礫層を重ねた単純な地層構造の地盤にみられる浸透水の遮断・貯留の機能を、土の毛管障壁あるいは土のキャピラリーバリア¹⁾（Capillary barrier）と呼ぶ。前記の機能を効果的に得るには、砂層と礫層の保水性の違いが特に重要である。図-1(a)に示す様に、傾斜したキャピラリーバリアのもつ降水の浸透抑制機能を有効利用すれば、地盤に浸透した降水を表層部で効果的に遮断し、地盤深部への浸透を低減できるため、廃棄物処分場閉鎖時のトップカバーやため池堤防などの斜面のすべり防止技術への展開が可能となる⁹⁾。一方、図-1(b)の様にキャピラリーバリアを地表面の近傍で敷設すれば、土壤水を植物の根群域に貯留・保水でき、節水かんがいも可能となる¹⁰⁾。

図-1 土のキャピラリーバリアの概念図

3. 破碎した貝殻を用いた保水性試験

(1) 破碎した貝殻試料

試験に用いた試料は、貝殻（蛤、アサリの貝殻類）を十分水洗いをした後、乾燥炉で絶乾状態にし、破碎したものである。破碎した貝殻は、土質試験で用いるふるい¹¹⁾を用いて3種類の粒径区分（4.75～9.5mm、2.0～4.75mmおよび2.0mm未満）に分けた。

粒径区分	粒径区分	粒径区分
4.75～9.5mm	2.0～4.75mm	2.0mm 未満

写真-1 破碎した貝殻の水浸状況

写真-2 剛性モールド内に詰めた破碎した貝殻

写真-3 加圧膜法に対応した水分特性曲線測定装置

図-2 水分特性曲線測定装置の概要¹²⁾

(2) 供試体の作製

粒径区分ごとに分けた貝殻をさらに一度煮沸し塩分除去を行い、24時間水浸状態で静置した（写真-1参照）。その後、内径6cm、高さ6.6cmの剛性モールド内にゆる詰めにして供試体を作製した（写真-2参照）。ここで、貝殻の供試体乾燥密度は、粒径区分が大きい方から、 $1.00\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $1.19\text{g}/\text{cm}^3$ および $1.27\text{g}/\text{cm}^3$ である。また、拘束圧作用時の供試体乾燥密度は、拘束圧P（10、20および50kPaの3段階）により異なり、拘束圧Pの小さな方から、 $1.34\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $1.35\text{g}/\text{cm}^3$ および $1.37\text{g}/\text{cm}^3$ である。

(3) 保水性試験（JGS0151-2009）¹³⁾

拘束圧Pを作用させた状態でも水分特性曲線を測定できる装置（写真-3）の主な構成は、三軸室、微細多孔質膜（セルロース膜等）装着のペデスタル、剛性モールド、非接触型変位計および圧力供給装置と差圧計付き二重管ビューレットで、図-2には改良ペデスタルと剛性モールドに固定されている膜を示す。

本試験では、西村・古関¹²⁾が報告した微細多孔質膜の拡散スペクトルの結果を参考に、加圧膜法によるマトリックサクシジョンの制御範囲を0～200cmH₂Oとした。飽和させた微細多孔質膜を改良ペデスタル上に置いた後、剛性モールドを固定する。剛性モールド内で破碎した貝殻をゆる詰めにし、脱気水を入れて水没させる。装置全体を組み上げ、試験開始前の二重管ビューレット内の水位を貝殻供試体下端に調整し初期値を読み取る。

また、本試験では微細多孔質膜を用いた加圧膜法によって所定のマトリックサクシジョンを0cmH₂O から段階的に200cmH₂O 付近まで作用させる。その後、湿潤過程としてマトリックサクシジョンを0cmH₂O 近くまで低下させる。マトリックサクシジョンの増加・減少による貝殻供試体中の間隙水の排水量または吸水量は二重管ビューレットの水位変化を基に測定する。ただし、二重管ビューレットの水位変化による貝殻供試体下端の水圧の変化を考慮して、マトリックサクシジョン値を補正する。

さらに、実施工時の上載荷重を想定して粒径区分の2.0mm未満の貝殻供試体に対してのみ、拘束圧Pを載荷した保水性試験を実施した。作用した拘束圧Pは10、20および50kPaである。

表-1には実施した保水性試験の一覧を示す。

表-1 保水性試験の一覧

ケース名	貝殻の粒径区分 (mm)	拘束圧 (kPa)
ケース A-1	4.75～9.5	0.0
ケース A-2	2.0～4.75	0.0
ケース A-3	2.0 未満	0.0
ケース B-10	2.0 未満	10.0
ケース B-20	2.0 未満	20.0
ケース B-50	2.0 未満	50.0

(a) ケースA-1（粒径区分4.75～9.5mm）

(b) ケースA-2（粒径区分2.0～4.75mm）

(c) ケースA-3（粒径区分2.0mm未満）

図-3 粒径区分ごとの水分特性曲線

図-4 粒径区分2.0mm未満の貝殻と砂・礫材の粒径加積曲線

(4) 試験結果

a) 貝殻の粒径が水分特性曲線に及ぼす影響

図-3(a) (b) (c)にケースA-1～ケースA-3の粒径区分ごとの破碎した貝殻の水分特性曲線を示す。粒径区分4.75～9.5mmと2.0～4.75mmの供試体は飽和状態からマトリックサクシジョンを作用させると急激な体積含水率の低下とともに、供試体中の水分が排水され、体積含水率はほぼゼロに近づいている。

一方、粒径区分2.0mm未満の場合も、体積含水率の急激な低下を示すが、マトリックサクシジョン5cmH₂Oで0.07程度の体積含水率が示され、粒径区分4.75～9.5mmと2.0～4.75mmの供試体に比べ水分が残

(a) 砂材の水分特性曲線

(b) 礫材の水分特性曲線

図-5 砂材および礫材の水分特性曲線

存している．よって，粒径区分2.0mm未満の貝殻で構成された供試体は保水性を確認できた．保水性を確認した最小粒径区分2.0mm未満の破碎した貝殻の粒径加積曲線は図-4に示す．

キャピラリーバリアで使用される土質材料の粒度や保水性は基準化または限定されていない．また，それらの保水性などの報告例も十分ではない^{14), 15)}，図-4の粒径加積曲線を有する砂材と礫材の水分特性曲線を図-5に示す．粒径区分2.0mm未満の貝殻の水分特性曲線が，礫材の湿潤過程の水分特性曲線に類似していることがわかる．一方，砂材の保水性は貝殻よりも保水性が高く，乾燥過程と湿潤過程のヒステリシスも大きいことがわかる．

b) 拘束圧が水分特性曲線に及ぼす影響

図-6(a) (b) (c)には粒径区分2.0mm未満の破碎した貝殻を用いて上載荷重を想定した拘束圧 P を10, 20および50kPa作用させた場合の水分特性曲線を示す．また，比較のための拘束圧 P が0kPa（ケース A-3）の水分特性曲線は図-3(c)を参照のこと．

図-6より，拘束圧を高めることにより保水性が高くなる傾向を示した．例えば，湿潤過程におけるマトリックサクシオン5cmH₂O時の体積含水率は，拘束圧 P が低い方から，0.11程度，0.12程度および0.14程度である．また，拘束圧 P が0kPa時の体積含水率は0.05程度である．よって，拘束圧 P の作用が破碎した貝殻を更に細粒化し，水分特性曲線に変化を生じさせた可能性がある．このことから，写真-4に圧縮前後の貝殻を，図-7には拘束圧 P を作用させる前の破碎した貝殻の粒度分布と拘束圧 P を50kPa作用させた後の破碎した貝殻の粒度分布を示す．両者の粒度分布に明確な違いがないことから，少なくとも50kPaまでの拘束圧 P の作用は粒度分布に変化を与え

(a) ケースB-10（拘束圧 $P=10$ kPa時）

(b) ケースB-20（拘束圧 $P=20$ kPa時）

(c) ケースB-50（拘束圧 $P=50$ kPa時）

図-6 各拘束圧における水分特性曲線
(粒径区分2.0mm未満)

(a) 圧縮前 (b) 圧縮後
写真-4 圧縮前後の貝殻

図-7 圧縮前後の貝殻の粒径加積曲線

ず、同時に水分特性曲線にほとんど影響しないことが確認できた。従って、拘束圧Pの影響は、供試体の密度増加を生じ、保水性を高めたと考えられる。

また、水分特性曲線の乾燥過程と湿潤過程のヒステリシスについては、拘束圧Pを作用させることでケースA-3の拘束圧Pが0kPaと比較して大きくなっている。しかし、ケースB-10～ケースB-50の拘束圧Pが10～50kPaの範囲では、水分特性曲線のヒステリシスの大きさに顕著な差が見受けられなかった。

4. 砂材混入に関する簡易試験

(1) 試料

試験に用いた試料は、保水性試験に用いた破碎した貝殻と図-4の粒度分布を有する砂材と礫材の3種類である。容器内で、空中落下により作製した各供試体の乾燥密度は、破碎した貝殻は $1.38\text{g}/\text{cm}^3$ 、砂材は $1.43\text{g}/\text{cm}^3$ および礫材は $1.64\text{g}/\text{cm}^3$ である。また、砂材混入確認のための振動を与えた後の砂材と礫材の組合せ土および砂材と破碎した貝殻の組合せ土の乾燥密度は、それぞれ $1.79\text{g}/\text{cm}^3$ と $1.42\text{g}/\text{cm}^3$ であった。

(2) 試験概要

平らな水平の机の上に置いた容器（ $\phi 6.5\text{cm}$ ）に礫材または破碎した貝殻（粒径区分 2.0mm 未満）を口元から空中落下により同じ体積になるように詰め（写真-5参照）、その上に同量の砂材を口元から空中落下で重ねて詰めた。その後、容器を「最小密度・最大密度試験」（JIS A 1224 : 2009）¹⁶⁾の要領を参考にして、写真-6に示す木づちで振幅 5cm 程度で、容器土台側部の同一点を5連打する。5連打後、容器を $45\sim 90^\circ$ 回転させ、累計100回打撃して試料に振動を与え、砂材が下部の試料内に混入する状況を確認する。

(3) 試験結果

所定の振動を与えた後の砂材と礫材の組合せ土（写真-7(a)）および砂材と破碎した貝殻の組合せ土（写真-7(b)）における砂材の混入状況を示す。写真-7(a)より、砂材と礫材の組合せ土は、礫材の間に砂材が多量に混入し、写真-5(a)の礫材がほとんど見られない状況である。振動を与えた後の砂材と礫材の組合せ土の乾燥密度は $1.79\text{g}/\text{cm}^3$ で、砂材や礫材の各単体の乾燥密度に比較して、密度増になっている（初期の高さより変化しており）、礫材の間に砂材が多量に混入したことがわかる。

一方、写真-7(b)に示す様に、砂材と破碎した貝殻の組合せ土では、所定の振動を与えても、上層の砂材は下層の破碎した貝殻層にはほとんど混入しておらず、初期の高さからほとんど変化が無い。また、上下層がはっきりと分かれたままの状態を維持している（写真-7(b)中の←部は目視による境界面）。

(a) 礫材 (b) 破碎した貝殻

写真-5 空中落下で容器に詰めた各試料

写真-6 木づちにより容器土台側部を打撃

(a) 礫材+砂材 (b) 貝殻+砂材

写真-7 打撃による振動を与えた後の砂材の混入状況

5. まとめ

本論文では、破碎した貝殻（3種類の粒径区分： $4.75\sim 9.5\text{mm}$ 、 $2.0\sim 4.75\text{mm}$ および 2.0mm 未満）を用いて、保水性試験とキャピラリーバリアを構成する砂材混入に関する簡易試験を実施した結果、以下のことが明らかになった。

①飽和した貝殻供試体にマトリックサクションを作用させると粒径区分の大きさに関わらず、急激な

体積含水率の低下を生じた。粒径区分4.75～9.5mmと2.0～4.75mmの供試体は、体積含水率はほぼゼロに近づいたが、2.0mm未満の貝殻供試体の場合は、水分が残存し保水性が確認できた。

- ②薄片状の形状が大部分を占める破碎した貝殻の水分特性曲線を砂材・礫材の水分特性曲線と比較すると、礫材の湿潤過程の水分特性曲線に類似している。
- ③粒径区分2.0mm未満の破碎した貝殻は、拘束圧を載荷することまた、拘束圧を高めることにより保水性が高くなる傾向を示した。破碎した貝殻の粒度分布は、拘束圧作用の前後で変化がないことから、保水性の変化は貝殻の粒度分布の変化によるものではなく、拘束圧Pの増加による破碎した貝殻の密度増加が影響したといえる。
- ④上部に砂材、下部に礫材の組合せ土は、振動を与えることで砂材が下部の礫材の空隙に多量に混入する。しかし、下部を破碎した貝殻に置き換えた場合の組合せ土は、砂材は下部の破碎した貝殻層にはほとんど混入しない。
- ⑤破碎した貝殻の水分特性曲線や振動作用による砂材の破碎した貝殻層への混入の観察結果から、破碎した貝殻はキャピラリーバリアに有効利用できる可能性があるといえる。

6. おわりに

従来、砂材が下層の礫材の空隙に混入しないように、砂材と礫材の層境界部に特殊シート¹⁷⁾を用いることがある。極低レベル放射性廃棄物処分場のような超長期安定性を必要とする場合、各種人工材の超長期耐久性が不明確であることなどから、自然材料のみによるキャピラリーバリアの構築が望まれる。今回、貝殻と砂材からなる自然材料のみで、超長期安定性を有するキャピラリーバリアを構築できる可能性を示したことは、水産系副産物（貝殻）の有効活用の幅を拡げたものと考えられる。

今後は、実施工を想定した破碎した貝殻の締め固め特性の把握、破碎した貝殻の粒度の品質管理、および破碎した貝殻を用いた場合のキャピラリーバリアの限界長¹⁸⁾の設計など、実験的・解析的アプローチにより更なる検討を行っていきたいと考えている。

最後に、環境問題が叫ばれる中、資源の乏しい我が国においては、環境保全、自然環境維持の観点から、天然の砂礫の枯渇問題への対応や生産地における深刻な廃棄物の処理問題など、水産系副産物（貝殻）の積極的な利用による循環型社会の構築を推進するため、大量に発生している発電所の取放水路の付着貝類、ホタテ貝や牡蠣を含めた各種貝殻を恒常的に有効利用する方策として、本研究成果が今後の地域産業の課題解決の一助になれば幸いである。

謝辞：本研究成果の一部は、平成22年度科学研究費補助金(課題番号：22560507)の援助を受けて行った。

また、保水性試験等に用いた貝殻の収集については、飛島建設株式会社 目黒 千恵子氏および染谷京子氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 森井俊広：土のキャピラリー・バリア，地盤工学会誌，Vol. 59, No. 2, pp. 50-51, 2011.
- 2) 坂本 篤：キャピラリーバリア型覆土の浸透量制御および副産物有効利用に関する研究，岡山大学博士論文，p. 69, 2010.
- 3) 泉田典彦，中泉昌光，三上正樹，若松純子，菊池有：水産副産物（貝殻）の覆砂代替材としての有効活用に関する実験的研究，海洋開発論文集，pp. 1043-1048, 2004.
- 4) 大野 元：ホタテ貝殻のケーソン中詰材への有効利用，土木学会誌，Vol. 95, No. 9, p. 27, 2010.
- 5) 坪田幸雄，佐伯公康：水産副産物（貝殻）の裏込材への有効利用に関する基礎的研究（その2）-ホタテ貝殻を混合した砂の内部摩擦角-，海洋開発論文集，pp. 862-866, 2005.
- 6) 吉井昭博，安部隆二，内山智幸：ホタテ貝殻粉末のアスファルト舗装材としての適用性，北海道開発土木研究所月報，No. 598, 2002.
- 7) 清田 健，奥西 武，佐藤 準，佐藤朱美，桜井 博，足立 久美子：水産系副産物（貝殻）の土木資材としての利用にむけた環境影響の検討，海洋開発論文集，pp. 893-898, 2004.
- 8) 坂井正孝，豊川和夫：火力発電所除去貝類の全量肥料化処理方法の導入について，土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集，pp. 622-623, 2001.
- 9) 松本 智，森井俊広：土のキャピラリー・バリアを利用した斜面減災工の開発研究，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，III-283, pp. 565-566, 2009.
- 10) 森井俊広，小林 薫，竹下祐二：土のキャピラリー・バリア機能を利用した雨水資源化システムの構造設計，日本地下水学会 2010 年秋期講演概要要旨，pp. 212-217, 2010.
- 11) 地盤工学会編：地盤材料試験の方法と解説，第 4 章 粒度試験，pp. 115-131, 2009.
- 12) 西村友良，古関潤一：加圧膜法で使用する微細多孔質膜の拡散スペクトル，不飽和土研究会平成 20 年度研究発表会（北海道大学），pp. 33-34, 2008.
- 13) 地盤工学会編：地盤材料試験の方法と解説，第 7 章 土の保水性試験，pp. 162-173, 2009.
- 14) Yang, H., Razhardjo, H., Leong, E.C. and Fredlund, G.: A study of infiltration on three sand capillary barriers, Canadian Geotechnical Journal, 41, pp. 629-643, 2004.
- 15) Tami, D., Rahardjo, H., Leong, E.C. and Fredlund, D.G.: Design and laboratory verification of a physical model of sloping capillary barrier, Canadian Geotechnical Journal, 41, pp. 814-830, 2004.
- 16) 地盤工学会編：地盤材料試験の方法と解説，第 10 章 最小密度・最大密度試験，pp. 195-198, 2009.
- 17) 小林弘明，小澤一喜，川端淳一，薦田敏郎：キャピラリーバリア効果を利用した廃棄物処分場トップカバーの検討，鹿島技術研究所年報，第 52 号，pp. 207-212, 2004.
- 18) 小川倫直，宮崎 毅：湾曲キャピラリーバリアの限界長に関する研究，農業土木学会論文集，No. 232, pp. 51-58, 2004.