

# 貝殻の再利用に関する基礎的研究

## 一 貝殻の保水性に着目した実験的アプローチ 一

### A Basic Study on the Re-use of Shells - An Experimental Approach Focused on the Water Retention Capacity of Shells -

小林 薫<sup>\*1</sup>      中房 悟<sup>\*2</sup>      森井 俊 広<sup>\*3</sup>  
Kaoru Kobayashi      Satoru Nakafusa      Toshihiro Morii  
西村 友 良<sup>\*4</sup>      松 元 和 伸<sup>\*5</sup>      松 田 浩 朗<sup>\*5</sup>  
Tomoyoshi Nishimura      Kazunobu Matsumoto      Hiroaki Matsuda

#### 【要旨】

廃棄物処分場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。一方、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では、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。資源の乏しい我が国において、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<sub>3</sub>) で化学的、物理的に安定した貝殻を砂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、これまで着目されることがなかった破碎した貝殻の保水性に着目し、破碎した貝殻片の大きさが保水性に与える影響とキャピラリーバリアを構成する砂礫代替材としての適用性について論ずる。

【キーワード】 貝殻 再資源化 保水性 水分特性曲線 キャピラリーバリア 廃棄物処分場

#### 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<sup>1)</sup> (図-1の右側断面)。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<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>。

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では、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<sup>4)</sup>、漁港の岸壁などの裏込材<sup>5)</sup>およびアスファルト舗装材<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>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<sup>8)</sup>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<sub>3</sub>)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、

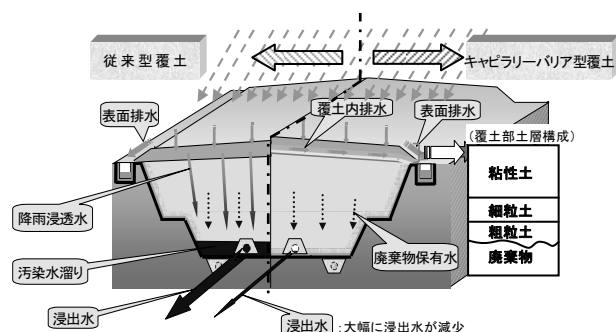


図-1 廃棄物処分場における覆土構造イメージ<sup>1)</sup>

[http://www.optic.or.jp/jyunkan/modules/pico/index.php?contene\\_id=4](http://www.optic.or.jp/jyunkan/modules/pico/index.php?contene_id=4) より

1. 建設事業本部 技術研究所
2. 日本原子力発電(株)
3. 新潟大学
4. 足利工業大学
5. 建設事業本部 技術研究所 第一研究室

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、貝殻を活用することで砂材が下部層に混入し難い、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した。さらに、砂材と破碎した貝殻で構成する土層を作製し、一次元浸透実験による浸透水の浸潤面降下挙動を観察し、礫材の代替材として破碎した貝殻を用いた場合でも、キャピラリーバリア機能が発揮されることを確認した。

## 2. 土のキャピラリーバリア<sup>2)</sup>について

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下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、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。古くは、貴重品を納めた石室への降水等の浸透を防ぐために古墳にも活かされている<sup>1)</sup>(図-2)。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(Capillary barrier)と呼んでいる。

土のキャピラリーバリアを有効利用すれば、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抑制(低減)できるため、廃棄物処分場の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<sup>9)</sup>。また、土のキャピラリーバリアを地表面の浅い位置に敷設すれば、土壤水を植物の根群域に保水でき、節水かんがいも可能となる<sup>10)</sup>。

## 3. 破碎した貝殻を用いた保水性試験

### 3.1 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<sup>11)</sup>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(写真-1参照)。

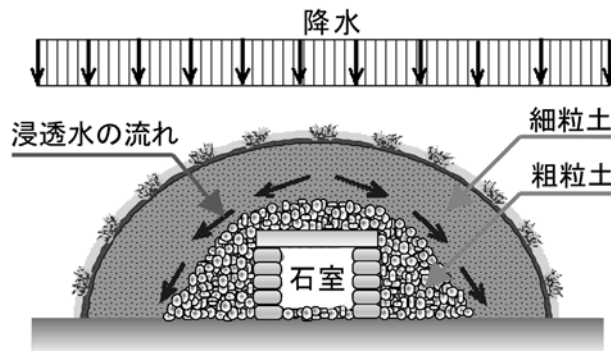


図-2 古墳における降水浸透防止イメージ

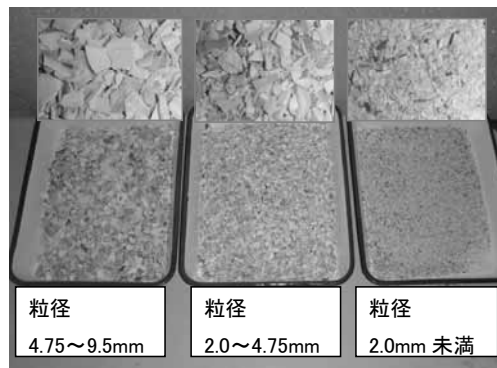


写真-1 3種類の粒径区分に分けた破碎した貝殻

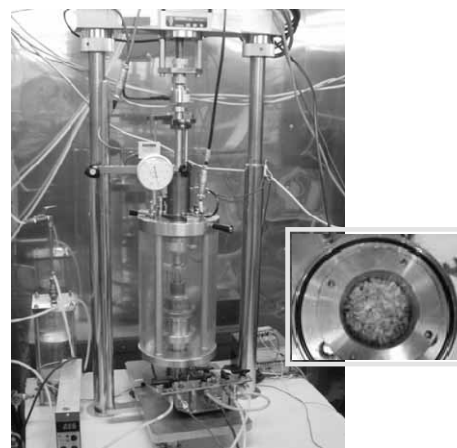


写真-2 加圧膜法に対応した試験装置

### 3.2 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。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。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、 $1.00\text{g/cm}^3$ ,  $1.19\text{g/cm}^3$  および $1.27\text{g/cm}^3$ である。

### 3.3 保水性試験<sup>12)</sup>

水分特性曲線を求める装置<sup>13)</sup>の主な構成は、三軸室、微細多孔質膜装着のペDESTAL, 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ある(写真-2)。

本試験では、西村・古閑<sup>14)</sup>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オン（負圧）の制御範囲を0～200cmH<sub>2</sub>Oとした。飽和させた微細多孔質膜を装着できる改良ペDESTAL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。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オンを0cmH<sub>2</sub>O から段階的に200cmH<sub>2</sub>O 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オンを0cmH<sub>2</sub>O 近くまで低下させる。マトリックサクシオンの増加・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。

ここで、水分特性曲線とは、供試体にマトリックサクシオンを負荷しその時に保持される水分量を測定することにより求められる。

### 3.4 試験結果

図-3 (a)(b)(c)に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オンを作用させると急激な体積含水率（土の全体積中に占める間隙水の体積の比または百分率であらわしたもの<sup>15)</sup>）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、マトリックサクシオン5cmH<sub>2</sub>O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。保水性を確認した粒径区分2.0mm未満の破碎した貝殻と砂・礫の各粒径加積曲線を図-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<sup>16)</sup>。

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（図-5(b)参照）に類似していることがわかる。一方、砂材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。

## 4. 砂材の混入に関する簡易実験

### 4.1 試料

実験に用いた試料は、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

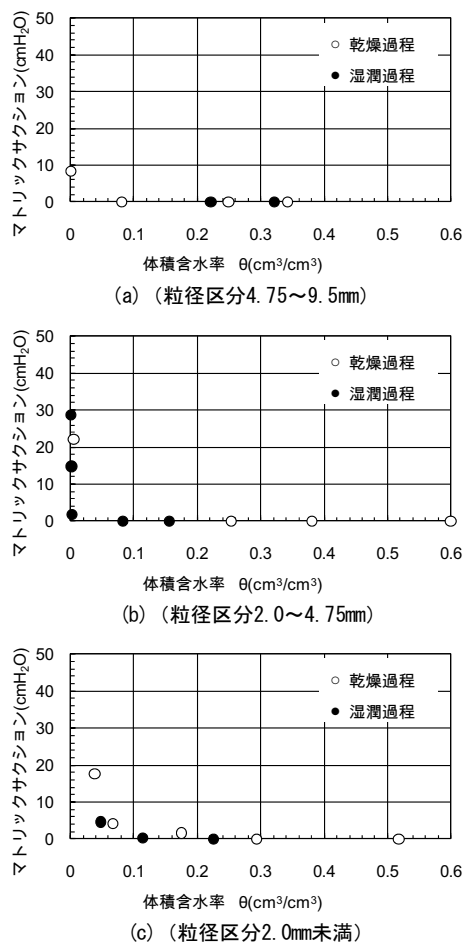


図-3 破碎した貝殻の水分特性曲線

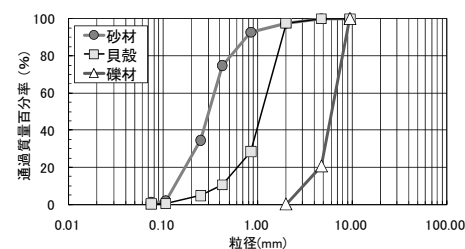


図-4 破碎した貝殻と砂・礫の粒径加積曲線

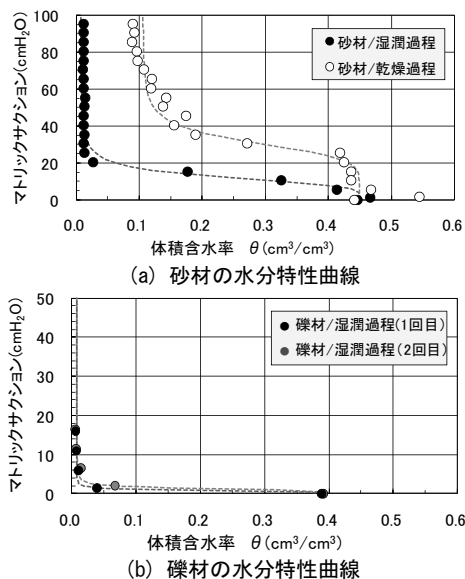


図-5 砂と礫の水分特性曲線

表-1 試料の乾燥密度

試料	乾燥密度
	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
破碎貝殻	1.38
砂材	1.43
礫材	1.64
砂材+礫材	1.79
砂材+破碎貝殻	1.42

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、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表-1に示す。

#### 4.2 実験概要

平らな水平の机の上に置いた容器(φ6.5cm)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-3参照),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)<sup>17)</sup>の要領を参考にして,写真-4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45~90°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。

#### 4.3 実験結果

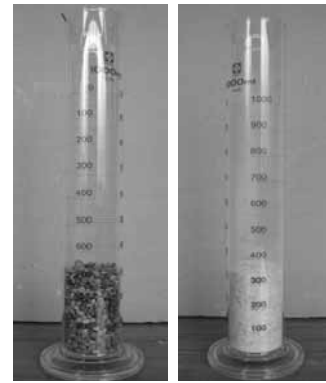
所定の振動を与えた後の砂材と礫材の組合せ土(写真-5(a))および砂材と破碎した貝殻の組合せ土(写真-5(b))における砂材の混入状況を示す。写真-5(a)より,砂材と礫材の組合せ土は,礫材の間隙に砂材が多量に混入し,写真-3(a)の礫材がほとんど見られない状況である。振動を与えた後の砂材と礫材の組合せ土の乾燥密度は1.79g/cm<sup>3</sup>で,砂材や礫材の各単体の乾燥密度に比較して,密度増になっており(初期の高さより約3cm変化),礫材の間隙に砂材が多量に混入したことがわかる。

一方,写真-5(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(初期の高さより数mm程度変化)。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-5(b)中の←部は目視による境界面)。

### 5. 浸透水の遮断・貯留に関する確認実験

#### 5.1 実験概要

水平で平らな机の上に置いた容器(φ=6.5cm)に砂材のみ,または,破碎した貝殻(粒径区分2.0mm未満)の上に砂材を重ねた組合せ土層を作製する。ここで,各試料は口元から空中落下により円筒容器内に詰めた。その後,円筒容器を「最小密度・最大密



(a) 礫材 (b) 破碎した貝殻  
写真-3 空中落下で容器に詰めた各試料

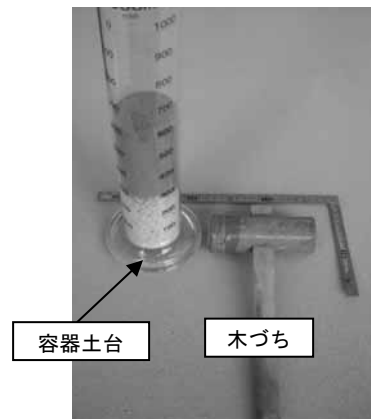
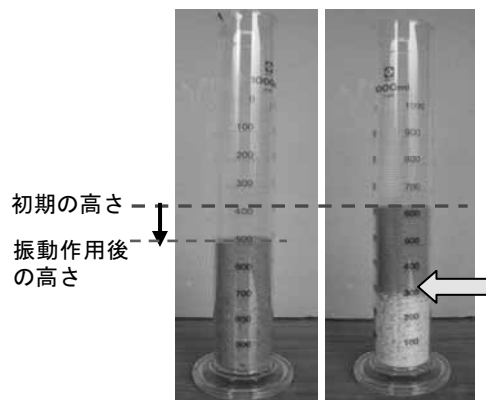


写真-4 木づちにより容器土台側部を打撃



(a) 礫材+砂材 (b) 貝殻+砂材  
写真-5 振動を与えた後の砂材の混入状況

度試験」(JIS A 1224:2009)<sup>17)</sup>の要領を参考にして,木づちで振幅5cm程度で,円筒容器土台側部の同一点を5連打する。5連打後,円筒容器を45~90°回転させ,累計100回打撃して試料に振動を与えて,円筒容器内に供試体を作製した。各試料の上面には濾紙を置き,円筒容器の口元より水をゆっくりと注いで試料内を降下する浸透水の様子を観察した。

#### 5.2 実験試料

実験に用いた試料は,保水性試験に用いた破碎した貝殻(粒径区分2.0mm未満)と図-4に示した粒径分布の砂材の2種類である。円筒容器内に各試料を

口元から空中落下，締固めにより作製した破碎した貝殻と砂材の各乾燥密度は， $1.38\text{g}/\text{cm}^3$ と $1.43\text{g}/\text{cm}^3$ である。

### 5.3 実験結果

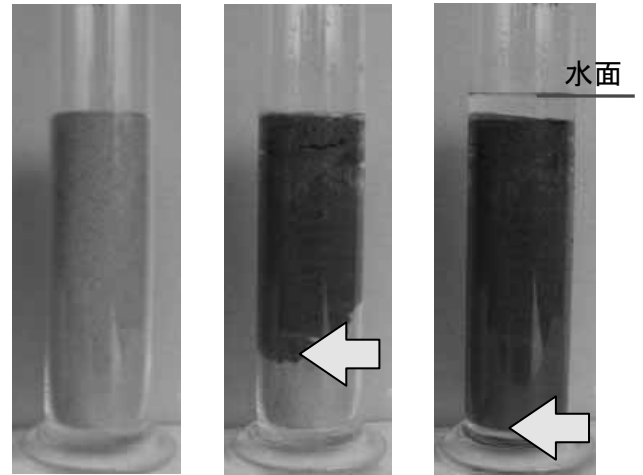
実験開始前の円筒容器内に詰めた砂材を写真-6 (a)に，破碎した貝殻を詰めた上に砂材を重ねた組合せ土層を写真-7 (a)に示す。各試料の上に円筒容器の口元から水を注いだ際の，試料内を降下浸透していく様子を写真-6 (b)と写真-7 (b)に示す。各写真には，矢印で降下する浸透水の浸潤面の位置を示した。写真-6 (b)より，砂材のみの場合には，水を注いだ後，時間経過と共に浸潤面は降下し，約660秒後には円筒容器の最下端まで浸透した。

一方，写真-7 (b)より，破碎した貝殻（粒径区分2.0mm未満）の上に砂材を重ねた組合せ土層の場合には，砂材部分については，前記同様に時間経過と共に浸潤面は降下するが，破碎した貝殻との境界面の上部で浸透水は一旦遮断・貯留され，下部に位置する破碎した貝殻層内には浸透水がまったく降下しないことを確認した。

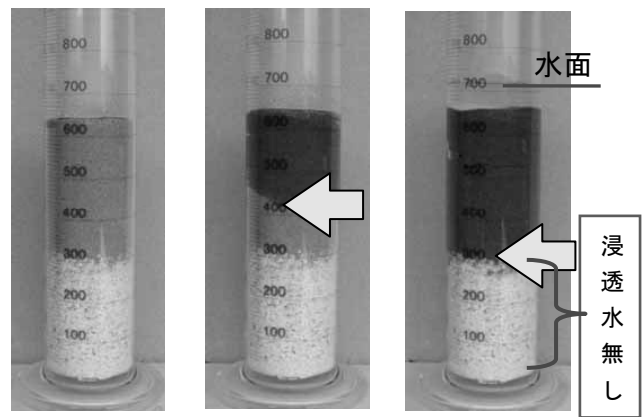
## 6. まとめ

破碎した貝殻（3種類の粒径区分：4.75～9.5mm, 2.0～4.75mm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実験を実施した結果，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間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。
- ④破碎した貝殻の水分特性曲線や打撃による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，破碎した貝殻を利用できればキャピラリーバリアに礫材を用いた場合の砂の混入による機能低下という課題を解決できる可能性がある。
- ⑤砂材と礫材の土質代替材として破碎した貝殻（粒径区分2.0mm未満）を用いた土層でも，その境界



(a)初期状態 (b)円筒容器口元より水を注水・浸透  
写真-6 砂材のみの降下浸透水の状況



(a)初期状態 (b)円筒容器口元より水を注水・浸透  
写真-7 砂材と破碎した貝殻（粒径2.0mm未満）による組合せ土の降下浸透水の状況

面の上部で浸透水を遮断・貯留し，キャピラリーバリア機能が十分得られることを実験的に確認した。

## 7. おわりに

従来，砂材が下層の礫材の間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<sup>18)</sup>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）の有効活用の幅を広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<sup>19)</sup>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、本研究が漁港周辺に野積みされている貝殻等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。

保水性試験等に用いた貝殻の収集は、飛鳥建設株式会社 目黒千恵子氏、染谷京子氏に、大型土槽実験は、(有)TNS 田口勝夫氏、染谷昇氏に多大なご協力を頂いた。また、査読者として飛鳥建設株式会社 笠井和弘氏には、詳細かつ有益なコメントを頂いた。ここに記して謝意を表す。

### 【参考文献】

- 1) 西垣 誠：http://www.optic.or.jp/jyunkan/modules/pico/index.php?contene\_id=4, 焼却灰を用いたキャピラリーバリアの設計・施工に関する研究(平成18年度), 2008.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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) 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.
  - 13) Satoru NAKAFUSA, Kaoru KOBAYASHI, Toshihiro MORII, Tomoyoshi NISHIMURA ; Alternative employment of crushed shell particles in capillary barrier of soil, International Journal of GEOMATE, 2011. (印刷中)
  - 14) 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.
  - 15) 地盤工学会編：地盤工学会用語辞典, 3.土の物理・化学的性質, p.75, 2006.
  - 16) 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.
  - 17) 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.
  - 18) 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.
  - 19) 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.

**Summary** As a top cover of a closed waste disposal plant, rainwater penetration control systems using a capillary barrier are known. The capillary barrier is a soil layer using natural materials combining a sand layer and an underlying gravel layer. Shells, fisheries byproduct, are classified as industrial waste under the laws concerning waste disposal and cleaning. Business operators need to dispose of shells by themselves. At present, however, most shells are piled outdoors near the fishing port because no methods have yet been established for disposing of or using shells. Active use of shells, fisheries byproduct, is expected to make great contributions to the response to lacking natural gravel, promotion of the building of recycling society and reuse of resources in resource-poor Japan. The objective of this study is to make effective use of shells, which are composed mainly of calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) and are chemically and physically stable, for capillary barriers as soils replacing gravels. Focus was placed on the water retention capacity of crushed shells that had caught little attention. Discussions were made on the effect of the size of a crushed shell on water retention, and on the applicability as a replacement for gravel as a material constituting a capillary barrier.

**Key Words:** *Crushed Shells, Fishery Byproduct, Capillary Barrier, Water Retention, Recycling of Materials, Waste Landfill*