廃棄物最終処分場覆土に用いる水産系副産物 (貝殻)の適用性に関する実験的研究

小林 薫¹・鈴木 ひかり²・進藤 里歩³・村上 哲⁴・
松元 和伸⁵・森井 俊広⁶

¹正会員 茨城大学教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

E-mail: kaoru.kobayashi.kk@vc.ibaraki.ac.jp

²鹿島建設(株) 東京土木支店 (〒107-0052 東京都港区赤坂 2-14-27)

³学生会員 茨城大学大学院都市システム工学専攻 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

⁴福岡大学教授 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈八丁目 19-1)

⁵正会員 飛島建設(株) 技術研究所第一研究室 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472)

E-mail: Kazunobu_Matsumoto@tobishima.co.jp

⁶正会員 新潟大学教授 農学部 (〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

土のキャピラリーバリア (CB) を生かした降雨浸透制御技術は、廃棄物最終処分場閉鎖時や極低レベル放射性 (L3) 廃棄物処分場などの覆土として採用・検討されている。しかし、砂層と礫層で構成される CB は、乾燥、地震力の作用などにより、上部の砂が下部礫層の隙間に移動し、CB 機能の喪失が危惧される。この課題に対し、筆者らは礫代替材として破碎貝殻を下部層に用いることで、CB 機能と共に、上部の砂が下部の破碎貝殻層の隙間に移動することも同時に防止できることを見出した。

本論文は、長期安定性が求められる廃棄物最終処分場の覆土などに、礫代替材として破碎貝殻を採用した場合、浸透水と接触した際の破碎貝殻からのカルシウム溶出量ならびに浸出水の pH に及ぼす影響を 2 種類の室内土槽実験により明らかにし、破碎貝殻の最終処分場覆土への適用性を明らかにした。

Key Words : capillary barrier, cover soil, crushed shell particles, pH, calcium

1. はじめに

北海道や青森を中心とした地域では、水産系副産物であるホタテ貝殻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 (廃棄物の処理及び清掃に関する法律)。しかし、現状ではその処分方法や利用・活用法が確立されておらず、多くが漁港周辺に野積みされている。資源の乏しいわが国では、水産系副産物である貝殻の利活用は、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。

一方、水産系副産物である貝殻は、ケーソン中詰材への有効利用や海浜変化の防止¹⁾などへの適用も検討されている。また、廃棄物最終処分場閉鎖時の覆土として採用されている^{2,3)}他、極低レベル放射性 (L3) 廃棄物処分場⁴⁾および中間貯蔵施設の覆土⁵⁾として、キャピラリーバリア (capillary barrier; 以下、CB と記す) の適用が検討されている。この CB の構造は、従来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⁶⁾。この CB の機能を有効に発揮させるためには、構成する砂材と礫材の保水性、透水性に差をつけることが効果的である。

その場合、砂材と礫材の粒径差を大きくする必要があるため、長期供用において乾燥状態や地震力作用などにより、上部の砂材が下部礫層の隙間に移動することが想定される。砂材と礫材が混合した場合、CB 機能の喪失が大きな課題である。この技術課題に対して、筆者らは破碎した貝殻の保水性、透水性に着目し、世界で初めて礫材の代替材として破碎した貝殻を下部層に用いることで、CB 機能と共に上部の砂材が下部の破碎貝殻層へ移動することも同時に防止できることを見出した⁷⁾。これにより、砂礫材で構築される CB に比較して、CB 機能の長期安定性を確保することが可能となった。

しかし、大量の破碎貝殻を用いて CB を構築することとなるため、降雨などの浸透水と破碎貝殻が接触することに伴うカルシウム (Ca) の溶出ならびに溶出した時の浸出水の pH に及ぼす影響についてはまったく明らかにされていないのが現状である。

本論文は、長期的な安定性を有するホタテ貝殻を用いた CB の覆土に関して、浸透水と破碎貝殻との接触パターンを 2 種類 (図-1 右の①と②) 想定し、カルシウムの溶出量や浸出水の pH に及ぼす影響を、破碎貝殻の粒径、層厚

図-1 浸透水と破碎貝殻との接触パターン模式図

および散水強度などをパラメータにした実験で明らかにする。その上で、破碎貝殻の覆土への適用性を論ずる。

2. キャピラリーバリア (CB) および限界長

降雨などにより地表面から浸透した水は、砂層（相対的に細粒な土層）と礫層（相対的に粗粒な土層）の両層の土粒子の大きさに起因した透水性、保水性（水分特性曲線）などの違いにより、上部からの浸透水は両層の境界面で遮断・貯留される。

この層境界面に傾斜をつけると（図-2(a)）、浸透水（図-2(b), (c)）は傾斜した層境界面に沿って集積流を形成し流下する。斜面全長にわたって降雨などが供給されるため、集積流の水分量は流下するにしたがい増えていく（図-2(d)）。浸透水と集積流が足し合わさって水分量が増加し、ある地点で砂層がそれ以上の水分量を保持できなくなると、下部の礫層へ浸透水が降下浸透し始め、ブレイクスルー（Breakthrough）が生じる（図-2(e)）。この浸透に伴う集積流の始まりからブレイクスルーが最初に生じた位置までの水平距離を限界長⁸⁾と呼んでいる。

図-2 CB地盤への浸透過程とブレイクスルーの概念図

写真-1 ふるいを用いて粒度調整した破碎貝殻（3種類）

図-3 試料の粒径加積曲線

表-1 試料の物理的性質と透水係数

	記号	単位	珪砂6号	破碎貝殻
土粒子の密度	ρ_s	g/cm^3	2.701	2.671
最大粒径	$D_{\max}$	mm	0.85	19
50%粒径	D_{50}	mm	0.194	1.90
均等係数	U_c		1.74	16.2
曲率係数	$U_{c'}$		0.938	1.46
工学的分類			SP	—
最大乾燥密度	$\rho_{d\max}$	g/cm^3	1.482	—
最適含水比	w_{opt}	%	11.9	—
最小間隙比	$e_{\min}$		—	0.779
最大間隙比	$e_{\max}$		—	1.452
飽和透水係数	K_s	m/s	1.31×10^{-4}	1.49×10^{-3}

3. 貝殻を利用した CB の室内土槽実験

(1) 試料

礫代替材として用いる貝殻は、実施工時に大量に入手可能なホタテ貝を用いた。貝殻は、十分水洗いをし、炉内温度を80℃に設定した恒温乾燥炉で24時間乾燥させた後に破碎した。本実験では、ホタテ貝殻の破碎は小型粉砕機を用いて行った（実施工では重機による転圧破碎）。また、破碎貝殻は、カルシウム溶出量などに及ぼす粒径の影響を把握するため、土質試験用のふるいを用いて粒度を調整した3種類（写真-1）と実構造物に適用することを想定した粒度調整なしの計4種類を用いた（なお、実験時に相似則への配慮は特に必要ない）。CBを構成する砂材は、珪砂6号を選定した。破碎貝殻（粒度調整なし）と珪砂6号の粒径加積曲線を図-3に示す。また、物理的性質

などについては表-1にとりまとめた。なお、飽和透水係数 K_s は、土槽実験時の条件と合わせるために、砂層は乾燥密度を締め固め $D_c=90\%$ （ $\rho_d=1.334\text{ g/cm}^3$ ）、破碎貝殻層（粒度調整無し）は、最小・最大密度試験結果を基にして、相対密度 $Dr=60\%$ （ $\rho_d=1.304\text{ g/cm}^3$ ）に締め固めた供試体を作製した上で、定水位透水試験を行い求めた。

(2) 供試体の作製

珪砂 6 号は、110℃に設定した恒温乾燥炉で 24 時間乾燥し、常温になるのを待った後、霧吹きで水を加えながら、含水比を事前の締固め試験より得られた最適含水比 (w_{opt}) に調整した。24 時間以上静置後、実験用土層を作製する前に含水比を測定した。また、貝殻は、80℃の恒温乾燥炉で 24 時間乾燥し、常温になるのを待った後に粉碎し、所定の質量を実験装置に投入し試料の高さを調整することにより、所定の乾燥密度になるように静的に詰めた。なお、層厚が 50 mm 超の場合には、1 層の高さを 50 mm (50 mm/層) として破碎貝殻層を仕上げた。

(3) 実験装置の概要

a) 一次元円筒カラム装置 (カルシウム濃度を測定)

大量の浸透水や局所的な地盤変状等によるブレイクスルーにより、破碎貝殻層内を鉛直下方に浸透した場合におけるカルシウムの溶出量を把握するための装置である。

図-4 には、工業用注射針 (内径 $\phi=0.3$ mm) を用いた散水装置を備えた円筒カラム装置 (内径 200 mm, 高さ 200 mm で、層厚 300 mm の場合は 2 段重ね) を示す。

b) 傾斜土槽装置 (浸出水の pH を測定)

砂層と破碎貝殻層により構成させる土層の層境界面で CB 機能が発揮されることによって、浸透水が破碎貝殻層上面で貯留・流下する場合における浸出水の pH に及ぼす影響を把握するための装置である。

図-5 には、工業用注射針 (内径 $\phi=0.3$ mm) を用いた散水装置と傾斜土槽装置 (長さ 2,000 mm, 奥行き 200 mm, 高さ 100 mm) を示す。なお、散水は上流端より 300 mm の位置で、散水位置から下流端の採水位置までの破碎貝殻層上面を流下する距離は平均 1,500 mm である。

(4) 実験方法

a) 一次元円筒カラム実験

内径 200mm の円筒カラム (塩ビ製) に所定の乾燥密度と層厚になるように破碎貝殻層 (20~300 mm) を作製した上に、層厚 50 mm の砂層を構築し、水滴で土層表面が掘れるのを防ぐために厚さ $t=0.3$ mm の透水性の良い不織布を上面に置いた。その後、供試体上部に設置した散水装置を用いて散水を開始した。なお、散水強度 (mm/h) は、蒸留水 (または、希硫酸 pH=4.0) を用いて水位制御用タンク内の水位を所定の高さに保つことで制御した。

散水後、砂層と破碎貝殻層を流下した浸出水を下端部で流出直後から連続的に採水した。採水時には、できる限り空気と浸出水との接触が無いように、円筒カラム実験装置の下端部に漏斗を設置して浸出水を直接 100 mL のポリ容器に入れた (図-4 拡大部参照)。

b) 傾斜土槽実験

傾斜土槽に所定の乾燥密度 ($D_r=60\%$ 相当) になるよう

図-4 一次元円筒カラム装置の概要

図-5 傾斜土槽装置の概要

に、質量を測定した破碎貝殻層を投入した後、厚さ $t=30$ mm に静的に締め固めた。その上に、砂層を所定の乾燥密度 ($D_c=90\%$ 相当) になるように、質量を測定した後、厚さ $t=50$ mm に静的に締め固めて供試体を作製し、上面には円筒カラム実験と同様の不織布を設置した。また、実験土槽の傾斜角度の設定は、上流端の高さで調整した。その後、散水装置を用いて散水を開始した。なお、散水した領域は傾斜土槽全面ではなく、上流部の奥行き方向 200 mm × 長さ方向 150 mm の領域に与えた。散水後、浸透水は CB 機能により破碎貝殻層上面で遮断され、下流に向かって平均 1,500 mm 流下して下流端から流出する流出水を連続的に 100 mL のポリ容器に採水した。

なお、採水後のポリ容器は、カルシウム濃度、pH を分析するまでの間、10℃程度のクーラーボックスで低温保管した。また、実験における浸出水のカルシウム濃度は、ICP 発光分析装置 (ICPS-7510, 島津製作所製) を、浸出水の pH については、pH 測定装置 (PH-230SD, Lutron 製) を用いて測定を行った。

(5) 実験ケース

一次元円筒カラム実験の実験ケースは、破碎貝殻の粒径 (粒度分布)、層厚、散水強度ならびに散水に用いた水の pH をパラメータにした計 11 ケースである。また、傾斜土槽実験では、一次元円筒カラム実験の実験結果を参考にしてケースを検討し、土槽の傾斜角度をパラメータにした計 2 ケースである。

表-2 には、各実験ケースの条件を一覧で示す。

4. 実験結果と考察

(1) 一次元円筒カラム実験の結果

a) 破碎貝殻の粒度の影響

図-6には、実験装置の下端部より浸出水が流出した直後からの経過時間と採水した浸出水のカルシウム濃度との関係について破碎貝殻の粒度をパラメータ（ケース A-1～ケース A-3、散水強度 5 mm/h、層厚 20 mm は一定）にして示したものである。これより、各ケースともカルシウム濃度は、採水直後が最も大きな値を示し、経過時間と共に低下する傾向が見受けられる。加えて、全ケースにおいて、経過時間と共に粒度の違いによるカルシウム濃度の差が徐々に小さくなり、経過時間が 12 時間程度になるとカルシウム濃度は粒度による差が見受けられない。なお、ケース A-1（粒径 2mm 未満）において、経過時間を 72 時間まで測定を実施した。その結果、カルシウム濃度は 12 時間以降については多少のばらつきが見受けられたものの、ほぼ一定の値を示したことから、経過時間が 12 時間程度でカルシウムの溶出量（濃度）は定常状態になるものと考えられる。

b) 破碎貝殻の層厚の影響

図-7には、実験装置の下端部より浸出水が流出した直後からの経過時間と採水した浸出水のカルシウム濃度との関係について破碎貝殻の層厚をパラメータ（ケース A-3、ケース A-7～ケース A-9、粒径 4.75～9.5 mm、散水強度 5 mm/h で一定）にして示したものである。これより、各ケースともカルシウム濃度は、採水直後が最も大きな値を示し、経過時間と共に低下する傾向が見受けられる。加えて、流出直後の浸出水のカルシウム濃度はほぼ層厚に比例した関係を示している。

また、層厚が 100 mm までは経過時間が 12 時間程度になると、層厚に関係なくカルシウム濃度 7mg/L 程度に低下しているが、層厚が 300 mm になると、経過時間が 24 時間でも 15 mg/L であり、100 mm 以下の層厚と同程度のカルシウム濃度に低下するには低下割合から 48 時間程度を要するものと考えられる。なお、浸出水の流出直後のカルシウム濃度が高いのは、貝殻を破碎した際に貝殻表面に付着した微細な貝殻粉が浸透水と共に流出したのと考えられる。これは、写真-2 に示すように、採水直後からの懸濁液が経過時間と共に澄んで行く様子からも判断される。

c) 散水強度の影響

図-8には、実験装置の下端部より浸出水が流出した直後からの経過時間と採水した浸出水のカルシウム濃度との関係について散水強度をパラメータ（ケース A-3～ケース A-6、粒径 4.75～9.5 mm、層厚 20 mm で一定）にして示したものである。これより、各ケースともカルシウム濃度は、前記同様に採水直後が最も大きな値を示し、

表-2 実験ケースの条件一覧

装置名	ケース名	貝殻粒径 (mm)	散水強度 (mm/h)	貝殻層 層厚 (mm)	傾斜角度 (%)	散水に 用いた水	
一次元 円筒 カラム	A-1	～2	5	20	<div></div>	蒸留水	
	A-2	2～4.75					
	A-3	4.75～9.5					10
	A-4						
	A-5						
	A-6	30					
	A-7	5	60				
	A-8		100				
	A-9		300				
	A-10						
	A-11	再散水(5)	希硫酸				
傾斜土槽							
B-1	5	30	5	蒸留水			
B-2			10

図-6 経過時間と浸出水のカルシウム濃度の関係（破碎貝殻の粒度の影響）

図-7 経過時間と浸出水のカルシウム濃度の関係（破碎貝殻の層厚の影響）

写真-2 時間経過と共に浸出水の懸濁が徐々に澄んでいく様子（ケース A-9：左端が採水直後）

経過時間と共に低下する傾向が見受けられる。本実験では、層厚 20 mm ということもあり、経過時間が 6 時間程度でカルシウム濃度はほぼ同値を示した。

d) 再散水および散水 pH の影響

図-9 は、ケース A-9 の実験終了後、約 15 時間静置した上で、これまでと同様の方法で散水（再散水）を行い浸出水が流出した直後から連続的に採水を行い、カルシウム濃度の経時的な測定結果を示す。その結果、再散水時にはカルシウム濃度は採水直後からほぼ一定値を示し、これまでの様な採水直後が最も大きく、経過時間と共に低下する傾向は見受けられなかった。このことから、再散水時には、破碎時に貝殻表面に付着していた微細な貝殻粉が事前の散水で浸透水と共に流出していることから、再散水時には流出直後でも微細な貝殻粉は少なく、カルシウム濃度が高くならなかったものと考えられる。

また、図-9 には、ケース A-10 が終了後、再度 15 時間静置した上で、散水を蒸留水から希硫酸（ $\text{pH}=4.0$ ）に替えて、これまでと同様の方法で再散水を行い浸出水が下端部から流出した直後から連続的に採水を行い、カルシウム濃度の経時変化を示す。その結果、 $\text{pH}=4.0$ の希硫酸を用いたが、浸出水のカルシウム濃度には顕著な差は見受けられなかった。これは、上部に位置する砂材の SiO_2 などと反応して中和されたため、破碎貝殻層に達した際にはカルシウム溶出量に影響を及ぼすことがなかったものと考えられる。

(2) 傾斜土槽実験の結果

図-10 は、散水を開始後、浸透水が砂層と破碎貝殻層の境界面上を流下し、傾斜土槽装置の下流端で流出した浸出水を 100 mL ポリ容器に継続的に採水した後、 pH を測定し経過時間毎に示したものである。これより、傾斜角度の異なるケース B-1、B-2 共に、浸出水の pH は経過時間に関わらず、排水基準の上限値（ $\text{pH}=8.6$ ）を少し超えていることがわかる。また、傾斜角度が緩い場合には流下速度が遅く（破碎貝殻層上面との接触時間長く）、いくぶん pH が高くなった可能性があるものの、両者の pH の違いは極わずかであり、傾斜角度の影響はほとんど無いものと考えられる。これは、同時に測定したカルシウム濃度にも顕著な差が無かったことと整合している。

図-11 には、図-10 のケース B-2 における経過時間が 12 時間時に採水した浸出水の pH を測定後（図-10 の矢印）、ポリ容器の蓋を閉めずに空気に触れる状態のままで pH の変化を測定した結果を示す。放置開始から 96 時間（4 日間）に渡り連続的に pH を測定した結果、経過時間と共に pH は低下し、経過時間が 14 時間程度で排水基準の上限値（図-11 の点線）を下回った。その後も経過時間と共に低下し、48 時間程度でほぼ横ばい（定常）になった。このことから、施工直後の浸出水は、排水基準の上限値を上回るものの、調節池などで放置できれば時間経過に伴い pH は低下し、 pH 調整剤などを必要とせず、そのまま河川などに放流可能であることが確認できた。

図-8 経過時間と浸出水のカルシウム濃度の関係（散水強度の影響）

図-9 経過時間と浸出水のカルシウム濃度の関係（再散水と散水 pH の影響）

図-10 経過時間と浸出水の pH の関係（土槽の傾斜角度の影響）

図-11 経過時間と浸出水の pH の関係（ケース B-2）

5. まとめ

本論文は、貝殻を用いた CB の覆土に関して、浸透水と破碎貝殻との接触パターンを 2 種類想定し、カルシウムの溶出量や浸出水の pH に及ぼす影響について実験的に検討した。主な結果を以下に示す。

- 1) 全ケースにおいて、浸出水のカルシウム濃度は採水直後が最も大きな値を示し、それ以降は経過時間と共に低下する傾向が見受けられた。これは、全ケース共に貝殻を破碎した際に貝殻表面に付着した微細な貝殻粉が浸透水と同時に、散水直後に一時的に多く流出したものと考えられる。
- 2) 破碎貝殻の粒径が小さいほど、層厚が厚いほど、貝殻破碎時の微細な貝殻粉の影響が大きく、採水直後のカルシウム濃度が高くなる。その後、経過時間が 12 時間程度になるとその差はほとんどなくなる。
- 3) 散水強度が強くなるほど、浸透水の量が多くなることで、微細な貝殻粉をより多量に洗い流すために、採水直後のカルシウム濃度が高くなる。しかし、層厚 20 mm では散水開始から 4 時間程度でその差はなくなる。
- 4) 再散水時は、カルシウム濃度は採水直後からほぼ一定値を示した。再散水時には、貝殻破碎時に貝殻表面に付着していた微細な貝殻粉が事前の散水でほぼ浸透水と共に流出したものと考えられ、流出直後でもカルシウム濃度が高くならなかったものと考えられる。
- 5) 再散水時に蒸留水から希硫酸 (pH=4.0) に替えて散水を行ったが、今回の実験では浸出水のカルシウム濃度には顕著な差は見受けられなかった。
- 6) 傾斜土槽の傾斜角度は、浸出水のカルシウム濃度および pH に及ぼす影響はほとんど無かった。
- 7) 容器に採水した浸出水を気中で放置した場合、経過時間と共に空気中の二酸化炭素と接触・反応して pH が低下し、経過時間が 48 時間程度で定常状態に達した。

- 8) 降雨などの浸透水と破碎貝殻層との接触によるカルシウム溶出が、浸出水のカルシウム濃度や pH に及ぼす影響はほとんど無く、廃棄物最終処分場覆土への適用は問題ないことを確認した。

謝辞：本研究の一部は、茨城大学 COC 事業 地域課題解決型特定研究プロジェクトの 1 つとして支援を受けると共に、JSPS 科研費 25420514 の援助を受けて行った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 菅 紘毅, 辻本剛三, 柿木哲哉, 宇野宏司, 小林 薫: 再利用した貝殻のキャピラリーバリアの海浜断面変化に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.72, No.2. (投稿中)
- 2) 鈴木正人, 中尾法生, 細野洋一, 斎藤 誠, 宇佐見貞彦, 斎藤正浩: キャピラリーバリア型覆土の適用事例, 土木学会第 58 回年次学術講演会概要集, pp.281-282, 2003.
- 3) 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.
- 4) 中房 悟: 極低レベル放射性廃棄物の盛土式処分施設の構造安定性と底部排水層に関する研究, 早稲田大学博士学位論文, pp.1-22, 2014.
- 5) 阪 絵梨子, 森井俊広, 松元和伸, 小林 薫: 土のキャピラリーバリア機能を用いた盛土形式の廃棄物貯蔵施設の提案, 平成 26 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.708-709, 2014.
- 6) 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
- 7) 小林 薫, 中房 悟, 西村友良, 森井俊広: 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, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.67, No.2, pp. I -382- I -387, 2011.
- 8) 宮崎 毅: 傾斜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.179, pp.49-56, 1995.

(2016.2.4 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON APPLICABILITY OF CRUSHED SHELL PARTICLES USING COVER SOIL OF FINAL WASTE DISPOSAL FACILITY

Kaoru KOBAYASHI, Hikari SUZUKI, Riho SHINDOU, Satoshi MURAKAMI, Kazunobu MATSUMOTO and Toshihiro MORII

Capillary barrier is a soil layer system which is composed of a finer soil layer underlain by a coarser soil layer. The authors found that an employment of crushed shells instead of gravel in the lower layer greatly reduces transport of the finer particles in the upper layer into the lower layer, and provides an effective function of capillary barriers.

In this study, elution amount of calcium from the crushed shells upon contact with percolating water and effect on pH value of the leachates, had become apparent from the two types of laboratory experiments. As the result, the authors was to clarify the applicability of the crushed shells to the cover soil of the final waste disposal facility et al. required long term stability.