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

菅 紘毅¹・辻本 剛三²・柿木 哲哉³・宇野 宏司⁴・小林 薫⁵

¹ 学生会員 神戸市立工業高等専門学校専攻科都市工学専攻 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町 8-3)
E-mail: r110512@g.kobe-kosen.ac.jp

² フェロー会員 熊本大学大学院教授 先端科学研究部 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1)
E-mail: tgozo@kumamoto-u.ac.jp

³ 正会員 神戸市立工業高等専門学校教授 都市工学科 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町 8-3)
E-mail: kakinoki@kobe-kosen.ac.jp

⁴ 正会員 神戸市立工業高等専門学校准教授 都市工学科 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町 8-3)
E-mail: uno@kobe-kosen.ac.jp

⁵ 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

水産系副産物（ホタテ貝殻など）の利用法の一つとして降雨浸透制御技術であるキャピラリーバリアへの活用が検討されている。通常、キャピラリーバリアには砂と礫が用いられるが、近年では水産系副産物である貝殻を用いる研究・開発も進められている。このキャピラリーバリア機能を砂浜に適用することで砂層内に浸透した海水をより迅速に沖へ排水し、砂の侵食を低減する効果と共に、砂の堆積を促進する効果も期待できる。

本研究では、ホタテ貝殻を用いたキャピラリーバリアの海浜断面変化に及ぼす影響について検討することを目的とし、室内実験による一定水深条件と変動水深条件での実験を行った。その結果、貝殻の設置による海浜断面変化への影響を確認し、砂の侵食低減効果および堆積促進効果を実験的に明らかにした。

Key Words : capillary barrier, coastal shore protection, shells, wave setup, erosion and deposition effect

1. はじめに

近年、ホタテ貝などを含む貝類の養殖量が増加している。これらの貝類は生産地でむき身加工されることが多く、その際に副産物として大量の貝殻が発生している¹⁾。発生した大量の貝殻は生産地における深刻な問題となっている。一方で、近年海浜や河川において砂資源が過剰に採取されたことで資源が枯渇し、環境へ影響を及ぼしかねない事態になった。そこで自治体などによって砂資源の採取が規制され、現在は砂資源の入手、利用が困難になりつつある。

このような状況下において、廃棄物最終処分場では、最終覆土にキャピラリーバリア型覆土が用いられることがある。キャピラリーバリア（以下、CB と記す）とは、砂層とその下部に礫層を重ねた層状地盤のことをいう²⁾。CB によって表面から浸透した水は砂層と礫層の粒径の違いによる毛管力の差などによって境界面で遮断され、この層境界面を傾斜させることで傾斜方向へ集積流として水が流下する。砂層と礫層の境界面で遮断された水は

一定量を超えて集積すると浸透力が毛管力を上回り下層に浸透する³⁾。この手法により廃棄物最終処分場において、地表面から浸透した雨水などを CB 層境界面に沿って排水する事が可能となり、埋設された廃棄物と接触することなく浸透水を排出することができる。

通常 CB の下層には礫が用いられるが、近年では水産系副産物である貝殻を用いた研究が進められている⁴⁾。貝殻を用いる利点として、貝殻の形状は砂が貝殻層の間に混入することを防止でき、CB 効果を長期間にわたって維持できる点が挙げられる。小林ら⁵⁾によって CB には毛管上昇を抑える効果があることも明らかにされた。

本研究と類似の着想の研究として、塩見ら⁶⁾や岩佐ら⁷⁾による透水層の埋設による海浜安定を図った研究がある。これらは浸透水が透水層内を浸透することで排水するが、CB では浸透水が CB 表面上を経て排水する機構であるため、浸透水の排水経路が異なる。前述の透水層を埋設した場合も、層表面を経た排水は発生すると考えられるが、長時間にわたる波の作用によって透水層内への砂の侵入により、透水層と底質面との境界面が曖昧とな

りCB機能は消失する。CB効果に着目した海浜断面変化への影響に関する研究の前例がないことから、本研究では、貝殻を利用したCBの海浜断面変化に及ぼす影響について明らかにすることを目的とする。

2. 室内実験

(1) CBによる浸透水の遮断効果（予備実験）

a) 実験方法

CBの効果を視覚的に確認するため、粒径約0.5 mmの粉碎ガラスで斜面を作製し、約0.5 cmに破碎した貝殻で厚さ約1 cmの層を傾斜させて設置し、左上方より0.5 cm³/秒で着色水を浸透させた。

b) 実験結果

写真-1に貝殻の有無による浸透の違いを示す。(写真-1) (b)より貝殻と粉碎ガラスの境界面では表面から浸透した着色水が斜面に沿って流下され、冲向きの浸透流が形成されている。さらに着色水を浸透させ続け、貝殻上が飽和状態に近づくと (c)、貝殻がない場合 (a) と同様に鉛直方向の浸透流が卓越する。

(2) 一定水深条件下における実験（実験1）

a) 実験方法

図-1に示す2次元造波水槽（長さ18 m、幅0.6 m、高さ0.8 m）の一端に長さ7 m、縦断勾配1/10の砂浜を粒径0.45 mm、乾燥状態の間隙率0.43の底質で作製した。実験1では水深を一定に保った状態で表-1に示す不規則波を5時間作用させ、斜面の断面形状をレーザー距離計で岸沖方向に間隔2 cmで測定した。なお、実験で使用した不規則波はブレットシュナイダー・光易のスペクトルを用いて作製した。侵食型波浪条件下では、造波前、1, 2, 3, 5時間後に断面形状を測定した。堆積型波浪条件下の実験では、造波前、2, 5時間後に断面形状の測定を行った。貝殻は約3 cmに破碎したものをを用いて設置深さ10 cm、厚さ3 cmの貝殻層を設置し、位置や設置長さを変化させた。この貝殻層の乾燥状態の間隙率は0.73である。表-2に貝殻の各設置条件を示す。各設置条件の貝殻層の設置深さと使用した貝殻の大きさおよび貝殻層の厚さは同じである。通常、CBは上下層の粒径の差が大きいほど多くの水を遮断することができると思われるため、使用する貝殻の大きさが実験に影響すると考えられるが、本研究はCBの海浜断面変化に及ぼす影響についての基礎的研究であるため、他の大きさの貝殻を用いた実験は行っていない。写真-2に実験で使用した、設置長さ0.5 mの貝殻層を設置した状態を示す。

写真-1 CBによる排水の様子

図-1 二次元造波水槽の概要

表-1 実験1で用いた波浪条件

波の種類	水深 (cm)	平均波		有義波	
		波高 (cm)	周期 (s)	波高 (cm)	周期 (s)
侵食	45	8.71	1.07	13.19	1.1
堆積	45	2.78	1.29	4.45	1.42

表-2 実験で用いた貝殻の設置条件

設置条件	設置長さ(m)	設置位置
A	0.5	
B	0.5	
C	1.0	
D	0.5	
E	1.5

写真-2 設置長さ0.5 mの貝殻層

b) 実験結果

図-2に設置条件Aと貝殻なしの断面形状の比較を示す。一つの図に全ての時間の断面形状を掲載するため、各時間の断面形状は縦軸方向に間隔を空けて掲載している。設置条件Aの貝殻層を用いた断面形状は貝殻なしと比較して、汀線の位置が沖側であり、侵食量も少ないことがわかる。この結果から、貝殻層の埋設による地形変化は、片山⁸⁾らが行った透水層の埋設による地形変化と同様の傾向を示すことがわかる。造波1時間後の地形において、両方の汀線近傍における断面形状の差は殆ど無いが造波2時間以降徐々に差が現れ、5時間後の汀線付近の断面形状には明らかな差が確認できる。また、貝殻なしの実験結果において造波3時間後と造波5時間後の断面形状の差が少ないことから造波5時間後には断面形状はほぼ平衡状態であると考えられる。

設置条件Bでは設置位置の違いによる変化を見るため貝殻層を沖側に25 cm 移動させた状態で実験を行った。図-3に設置条件Bと設置条件A, 貝殻なしの5時間後の断面形状の比較を示す。各実験における汀線の後退量は、設置条件A, 設置条件B, 貝殻なしの順に少ない。設置条件Bと設置条件Aの汀線近傍における断面形状を比較して、設置条件Aがより侵食量が少ないことから、貝殻層の設置位置として設置条件Aの汀線直下から岸側に伸ばす配置が適切である。CBは上層の含水率の上昇によってサクションが低下することで、上下層の境界で作用する毛管力が浸透力を下回り、下層へ水が浸透する。設置条件Bは設置条件Aより貝殻層が地中深くに設置されたため、結果的に造波中に貝殻層より上層の砂が飽和状態である時間が多く、貝殻層への浸透が頻繁に発生し、CB効果が低減したと考えられる。

設置条件A, 設置条件Bの貝殻層の設置長さでは、波の遡上域全域の浸透水をCBで集積することが出来なかったため、設置条件Cでは貝殻層を岸方向へ0.5m 延長し、遡上した水を全てCBで集積し排水することを目的とした。図-4に設置条件Cと設置条件Aの断面形状の比較を示す。設置条件Cの5時間後の断面形状は設置条件Aより侵食量が増加していることから、侵食作用を低減することを目的とした場合、貝殻層を岸方向に延長することは適切ではない。

設置条件Bより貝殻層は上層の砂が飽和状態である場合、CB効果が低減することが明らかになった。しかし、造波中の砂層内における飽和・不飽和状態の分布は波の作用によって常に変化し続けるものと考えられ、設置条件Bでは設置長さの半分は汀線直下より岸側に存在したため、造波中も貝殻層より上層の砂が常に飽和状態であるとは言えない。設置条件Dでは設置条件Bより更に25 cm 沖へ貝殻層を移動し、貝殻層より上層の砂が常に

図-2 侵食型波浪下における設置条件 A の断面形状 (実験 1)

図-3 侵食型波浪下における設置条件 B と設置条件 A, 貝殻なしの断面形状の比較 (実験 1)

図-4 侵食型波浪下における設置条件 C, 設置条件 A の断面形状 (実験 1)

図-5 侵食型波浪下における設置条件 D の断面形状 (実験 1)

飽和状態となるようにした。図-5に設置条件Dと貝殻なしの断面形状の比較を示す。設置条件Dの断面形状は貝殻なしと類似しており、変化が少ない。このことから貝殻層は上層の砂が飽和状態である場合、CB効果が低減し、断面形状の変化への影響が少なくなることがわかる。

堆積型波浪を用いた実験では、侵食型波浪を用いた実験で最も侵食作用を低減することが出来た設置条件A、および遡上域全体の浸透水をCBで集積することを目的とした設置条件Cを使用した。

図-6に設置条件Aと貝殻なしの断面形状の比較を示す。設置条件Aの断面形状は貝殻なしと比較して形成されたバームが大きいことがわかる。造波2時間後の断面形状において明らかな差が確認でき、貝殻層が堆積型波浪の堆積作用を促進していることがわかる。

図-7に設置条件Cと貝殻なしの断面形状の比較を示す。設置条件Cは造波2時間後時点では貝殻なしより堆積が促進されているが、造波5時間後の断面形状において汀線の位置が貝殻なしより岸側になっているため、堆積作用を促進することを目的とした場合、貝殻層を岸方向に延長することは適切ではない。

(3) 変動水深条件下における実験 (実験2)

実験1の結果から一定水深条件下において、貝殻層は海岸侵食を抑制する効果があり、その設置条件として最も侵食作用を低減し、堆積作用を促進した設置条件Aが適切であることがわかった。また、貝殻層は上層の砂が飽和状態である場合、CB効果が低減することも判明した。実際の砂浜では潮位が周期的に変動しそれに伴って砂層内における飽和・不飽和状態の分布も変化するため、実験2では水深を変動させた実験を行った。

a) 実験方法

実験2では実験1と同じく図-1に示す2次元造波水槽を用いた。水深40cmを低潮位時の水深、水深45cmを平均潮位時の水深、水深50cmを高潮位時の水深と設定し、水深を低潮位(40cm)~平均潮位(45cm)~高潮位(50cm)~平均潮位(45cm)~低潮位(40cm)と5時間連続して変化させ、75分おきにレーザー距離計で地形を測定した。造波中は、流入、流出量を一定に保ち、一定の割合(4cm/時間)で水深が変化するようにした。実験2で用いた不規則波の条件を表-3に示す。実験2における貝殻層の設置条件は表-2の条件AとEを用いた。

b) 実験結果

図-8に侵食型波浪条件下における設置条件Aと貝殻なしの断面形状の比較を示す。貝殻の有無に関わらず両方の断面形状は類似しており、設置条件Aの貝殻層の使用による断面形状の変化は少ない。これは造波中の貝殻層より上層の砂が、飽和状態である時間が長かったことが原因である。実験1における設置条件Dの結果(図-5)から貝殻層より上層の砂が飽和状態にある場合、CB効果が低減し、断面形状の変化への影響が少なくなることが判明した。設置条件Aにおいて、水面が低潮位(40cm)から平均潮位(45cm)の間に存在する場合、貝殻層より上層の砂は不飽和状態であり集積した水は、上下層の境

図-6 堆積型波浪下における設置条件Aの断面形状(実験1)

図-7 堆積型波浪下における設置条件Cの断面形状(実験1)

表-3 実験2で用いた波浪条件

波の種類	水深 (cm)	平均波		有義波	
		波高 (cm)	周期 (s)	波高 (cm)	周期 (s)
堆積型	40	2.67	1.18	4.27	1.45
	45	2.78	1.29	4.45	1.42
	50	3.19	1.24	4.82	1.43
侵食型	40	8.21	1.05	12.10	1.10
	45	8.71	1.07	13.19	1.10
	50	9.04	1.05	13.67	1.09

図-8 侵食型波浪下における設置条件Aの断面形状(実験2)

界面に沿って排水されていると考えられる。一方、平均潮位(45cm)から高潮位(50cm)の間に水面が存在する場合、貝殻層より上層の砂は水面より下に存在するため飽和状態である場合が多く、CB効果が低減したと考えられる。つまり、設置条件Aの貝殻層は造波開始から最初の75分間と最後の75分間でのみCB効果を発揮したため、断面形状の変化への影響が少なかったと考えられる。

図-9に設置条件Eと貝殻なしの断面形状の比較を示す。設置条件Eの断面形状は、貝殻なしと比較して全ての時間において類似した形状であるが、貝殻層を用いることで侵食作用が促進されることもなかった。CBによって集積され、傾斜方向へ排水された水は流れとともに流量が増加し、CB上のどこかの位置で下層へ浸透する。この、CBによる浸透流の集積が開始された位置から下層への浸透が発生する位置までの水平距離をCBの限界排水長という。設置条件Eでは貝殻を岸側に延長することで、より手前で浸透流の集積が開始された。その結果、より手前にて限界排水長に到達し下層への浸透が発生し、断面形状の変化への影響が弱まったと考えられる。

図-10に堆積型波浪条件下の設置条件Eと貝殻なしの断面形状の比較を示す。設置条件Eの断面形状は貝殻なしと比較して、全ての時間において形成されたバームの規模が大きく、貝殻を用いることで堆積型波浪によるバームの発達が促進されていることがわかる。

(4) 貝殻層の効果についての考察

本節では実験において貝殻層が断面形状の変化に与えた効果のメカニズムについて考察する。実験1での侵食型波浪条件下の貝殻層を用いた場合と貝殻なしの断面形状を比較すると、貝殻層を用いた場合は造波後の汀線の位置と形成されたバーの位置がより沖方向へ変動している。バーがより沖側に形成されたことから造波中の碎波帯が沖側に移動したことが考えられ、その原因として造波中の平均水位の上昇が抑えられたことが考えられる。このことから貝殻層が断面形状に与える影響として造波中の汀線近傍における平均水位の上昇（セットアップ）の抑制が考えられる。

セットアップを抑制する場合における貝殻層の影響として排水時間の短縮が考えられる。図-11に貝殻層の有無による浸透挙動の違いを示す。通常、貝殻層が存在しない場合、遡上した水は斜面表面から浸透した後には排水される（図-11左図）。この斜面に貝殻層が存在した場合、斜面表面から浸透した水はCB効果によって貝殻層と砂層の境界で遮断され傾斜方向に排水される（図-11右図）。この効果によって斜面表面から浸透した水は貝殻層が存在しない場合よりも短時間で排水される。貝殻を用いることで沖へ向かう流れが促進され、セットアップが抑制された結果、侵食作用が低減されたと考えられる。

3. 断面形状の変化に関する数値計算

CSHORE⁹⁾を用いて貝殻の設置による断面形状の変化の検討を行った。CSHOREでは時間平均された連続の式と Svendsen ら¹⁰⁾による運動方程式、wave action equation

図-9 侵食型波浪下における設置条件Eの断面形状(実験2)

図-10 堆積型波浪下における設置条件Eの断面形状(実験2)

図-11 貝殻層の有無による浸透挙動の違い

図-12 CSHOREによる計算結果との比較

と小林ら^{11) 12)}による roller energy equation を基本として計算が行われる。

(1) 計算方法

貝殻の設置を透水層と見なして、実験1における堆積型波浪条件下での貝殻なしと設置条件Aの地形変化の検討を行った。計算において入射波高は3.1 cmとし、入射波周期は1.3 sとした。計算格子間隔、計算領域はそれぞれ2 cm, 18 mとした。

(2) 計算結果

図-12に実験1の貝殻なしと設置条件Aの5時間後の断面形状とCSHOREによる計算の比較を示す。貝殻層の設置による堆積の促進やバーム高さは再現されているが、バーム頂の位置やバームのスケールについては、検討が必要である。

4. まとめ

本研究では、CBの海浜断面変化へ与える影響について検討した。水深を一定に保った状態と変動させた状態の2つの条件で室内実験を行った。主な結論を以下に示す。

- 1) 貝殻層は一定水深条件下において、造波中の汀線近傍における平均水位の上昇（セットアップ）の抑制により侵食型波浪の侵食作用を低減し、堆積型波浪の堆積作用を促進する。
- 2) 貝殻層は上層の砂が飽和状態である場合において、そのCB効果が低減し海浜断面変化へ与える影響は少なくなる。
- 3) 変動水深条件下において、貝殻層は侵食型波浪の侵食作用を促進するような影響はなく、一方、堆積型波浪の堆積作用によるバームの発達に寄与する。

謝辞：本研究において、CSHOREの使用の許可を頂きましたデラウェア大学の小林信久先生に深く感謝の意を表します。また、実験にご協力して頂いた元神戸高専の松本悟志君にも深く感謝します。

参考文献

- 1) 水産庁「きれいな海をめざして-海のごみへの取り組み-」
<http://www.fish-jfrca.jp/02/pdf/pamphlet/023.pdf> (2016/02/16 閲覧)
- 2) 森井俊広：土のキャピラリー・バリア, 地盤工学会誌, 59(2), pp50-51, 2011

- 3) 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, 179, pp.49-56, 1995
- 4) 小林薫, 西村友良, 森井俊広, 中房悟：水産系副産物（貝殻）のキャピラリーバリアへの有効活用に関する基礎的研究-粉碎した貝殻の保水性について-, 地盤工学会誌, 59-7, pp.14-17, 2011
- 5) 小林薫, 森井俊広, 松元和伸：貝殻を有効利用したキャピラリーバリアによる塩害防止策に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) 71(2), I_874-I_879, 2015
- 6) 塩見雅樹, 戸引勲, 松川文彦, 津川昭博, 長谷川巖：透水層埋設による海浜安定化効果の定量的評価, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.721-725, 1995
- 7) 岩佐直人, 堀謙吾, 谷山正樹：透水層埋設海浜の地盤特性と透水層の長期排水性に関する調査研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.636-640, 1998
- 8) 片山忠, 黒川誠, 柳嶋慎一, 加藤一正, 長谷川巖：透水層設置による前浜地下水位の制御, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.871-875, 1992
- 9) Kobayashi, N.: DOCUMENTATION OF CROSS SHORE NUMERICAL MODEL CSHORE 2009, Res. Rep. No. CACR-09-06, Center for Applied Coastal Research, Univ. of Delaware, Newark, Del, 2009.
- 10) Svendsen, I.A., Haas, K., and Zhao, Q. : Quasi-3D near-shore circulation model SHORECIRC version 2.0., Res. Rep. No. CACR-02-01, Center for Applied Coastal Research, Univ. of Delaware, Newark, Del, 2002.
- 11) Kobayashi, N., Zhao, H., and Tega, Y. : Suspended sand transport in surf zones., J.Geophys. Res., 110, C12009, doi:10.1029/2004JC002853, 2005.
- 12) Kobayashi, N., Agarwal, A., and Johnson, B.D. : Long-shore current and sediment transport on beaches. : J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., 133(4), 296-304, 2007.

A BASIC STUDY ON BEACH PROFILE CHANGES DUE TO CAPILLARY BARRIER OF REUSED SHELLS

Hiroki SUGA, Gozo TSUJIMOTO, Tetsuya KAKINOKI,
Kohji UNO and Kaoru KOBAYASHI

Recently, as production of farmed shellfish such as a scallop is increasing, a large amount of shells are produced as a by-product. Recently, these shells are reused in various fields. As one of them, the shells have been used at final disposal waste sites using the effect of capillary barrier.

In this paper, the experiments have been carried out over movable bed with constant water level and changing one. The experimental results showed that the shells can reduce the rate of erosion under constant water level and promote the effect of deposition.