

サンドバッグによる海浜安定化機能の検証

Experimental Study on Functions of Sandfilled-Geotextile Bags as Soft Shore Protection Works

富田沙希¹・田島芳満²

Saki TOMITA and Yoshimitsu TAJIMA

This study investigates process-based functions of sand-filled-geotextile bags as coastal stabilization works through laboratory experiments. An image-based technique was newly introduced to automatically extract bed profiles and this technique enabled us to acquire high-frequency and high-resolution data of bed profile changes, which provide instantaneous local cross-shore sediment transport rates. Sand-filled geotextile bags, installed inside the surf-zone, showed essential functions not only to mitigate erosion but also to trap sediment without causing significant impacts on natural beach processes. Experimental analysis revealed that principal factors of observed shoreline stabilization are wave energy dissipation and asymmetric profiles of the time-varying suspended sediment concentrations around the sand bags.

1. はじめに

近年、従来のコンクリート構造物に代わる、よりソフト、より安価な海岸保全対策としてジオテキスタイル袋に砂を詰めて作られるサンドバッグの導入が注目され始めている。海外では海岸侵食対策として、オーストラリアのMaroochy Groynes突堤や韓国のYoung-jin beach潜堤などの大型のサンドチューブ導入例が見られる (Saathoffら, 2007; E.C.Shinら, 2007)。また海岸構造物としての利用だけでなく、メキシコ・ユカタン州北部海岸に導入された長さ4km, 高さ0.9mのサンドチューブのように、サンドバッグをより積極的な堆砂促進に適用する事例も見られる (Alvarezら, 2006)。

本研究では、導入事例の少ない小型サンドバッグに着目し、これらを汀線付近に設置することによって、低コスト、低負荷型で適用性の高い海浜安定化工法を提案することを命題とし、断面2次元造波水路実験に基づきサンドバッグによる侵食緩和機能とそのメカニズムを検証する。

2. 実験

(1) 実験の概要

長さ30m, 幅0.6m, 高さ0.8mの2次元造波水路を用い、**図-1**に示したように、造波板からの距離13m地点 ($x=0$) から勾配1/10の移動床を成形し、同地点から水槽と平行に設置した導波板で仕切られた幅0.15mの移動床水路を観察対象領域とした。ここに低波浪、高波浪、低波浪の順に規則波を作用させ、サンドバッグ (以下、SB) の有無、SBの形状・設置位置を変化させた6 caseの実験を行った (**表-1**および**表-2**)。表-2のSBの配置に示した個数

は水路沿岸方向に均等に並べたSBの数、列数はその岸沖方向への配置数である。また実験スケールは1:25とし、底質には中央粒径0.24mmの相馬珪砂を用いた。SBは伸縮性のあるポリエステル混合布を利用して作成した。SBを投入するタイミングは、全caseにおいて低波浪を作用させる実験開始から28分後とした。実験では容量式波高計を用い、低波浪作用中は30分毎、高波浪作用中は10分毎にそれぞれ14~24地点での水位変動を計測した。

(2) 画像解析による縦断地形自動抽出システムの構築

本研究では、画像を利用して砂面境界位置を判定する

表-1 実験条件

	実験時間 (min)	一様水深部波高 (cm)	周期 T (s)	波形勾配
低波浪	t=1-133 (133分間) t=187-397 (210分間)	4.0	1.0	0.026
高波浪	t=134-185 (52分間)	15.0	1.5	0.046

表-2 実験case

ケース	SBサイズ (実験スケール)	SB配列	SB設置位置 (x座標)	設置初期水深 (cm)
1	なし	—	—	—
2	大SB (8×8×1.4cm)	2個×2列	$x=255-271$	2.5
3	小SB (3×4×0.6cm)	6個×5列	$x=255-271$	2.5
4	大SB	2個×1列	$x=263-271$	2.5
5	大SB	2個×2列	$x=214-230$	7
6	高SB (8×8×2.2cm)	2個×2列	$x=263-271$	2.5

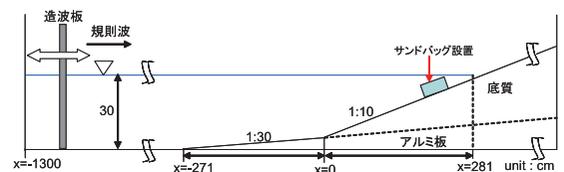


図-1 断面2次元水路

1 正会員 修(工) 東京電力株式会社
2 正会員 Ph.D. 東京大学准教授 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻

縦断地形自動抽出システムを新たに構築した。2次元造波水路を用いた移動床実験における断面地形は、レーザプロファイラー等で計測されることが多いが、この方法では造波機を停止して排水する必要があるなど、実験の連続性が損なわれ高頻度での地形計測は困難である。そこで本研究では、カメラによる連続写真から時々刻々と変化する縦断地形を抽出する手法を構築した。カメラは断面2次元水槽のガラス面側に、2台で移動床範囲を捉えられるように固定し、1分毎に静止画像を撮影した。得られた画像は田島ら (2009) と同様の手法で幾何補正を行い、各画素位置の実座標を算定した。次に砂面境界の画素位置を輝度値に基づいて判定した。砂面境界の抽出精度を高めるため導波板を黒色とし、ガラス側面から単一光源を用いて照射した。また同時にSB設置位置周辺をビデオカメラで撮影し、浮遊砂の時空間変化を記録した。

図-2はcase 4の実験終了時における、画像解析による砂面境界線抽出結果と従来のレーザプロファイラーによる砂面標高計測結果を重ね合わせたものである。レーザプロファイラーは観察対象区域の幅中央を計測しているのに対して、画像解析ではガラス面の砂面境界線を抽出しているため、砂連形状など多少の誤差があるものの、両者の計測結果は良い精度で整合することがわかった。

3. 海浜縦断地形の分析

構築した画像計測システムにより、毎分の海浜縦断地形を抽出した。これら的高頻度・高解像度断面地形データのうち、図-3にはcase 1 (SB無し) とcase 2 (SB大2個×2列) に対して、低波浪作用中は30分毎、高波浪作用中は10分毎の縦断地形を図示した。case 1の結果から、本実験条件では平常波浪時でも侵食傾向を示していることがわかる。また、高波浪時には沖側で大きく地形が変化し、2段のバー地形が形成された。その後、低波浪を再び作用させると海浜は堆積傾向に転じ、汀線付近の砂浜がゆっくりと回復した。

次に、SBによる海浜安定化効果が明確に見られた $x=200\sim 350\text{cm}$ の領域に着目し、より詳細な分析を試みた。図-4 (a1)～(a3) は、着目した領域における実験開始

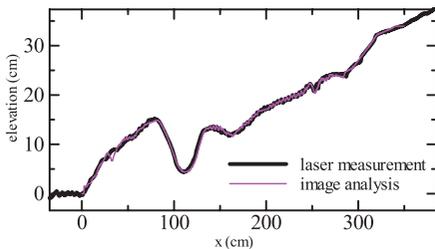


図-2 画像解析とレーザ計測の比較

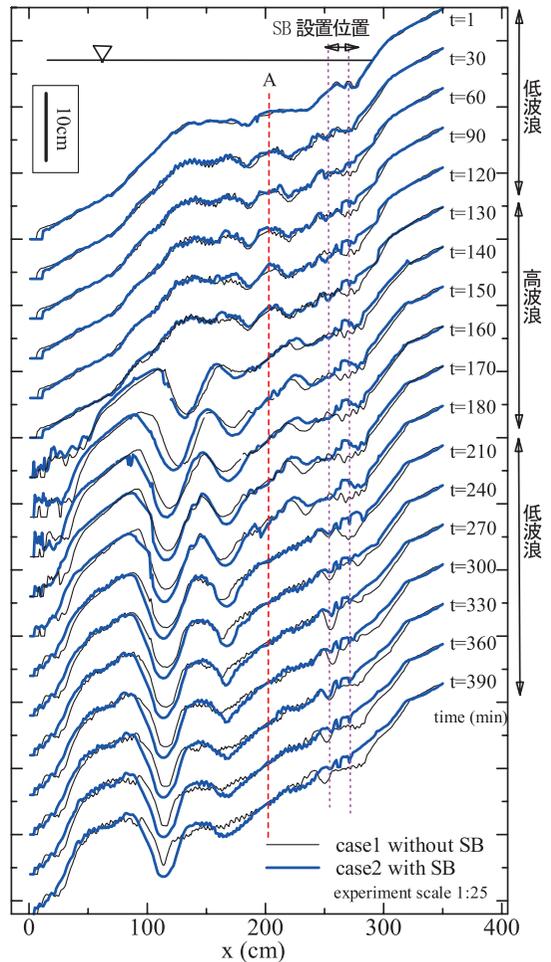


図-3 サンドバッグなし(細)とサンドバッグあり(太)の海浜縦断地形の時間変化の差異

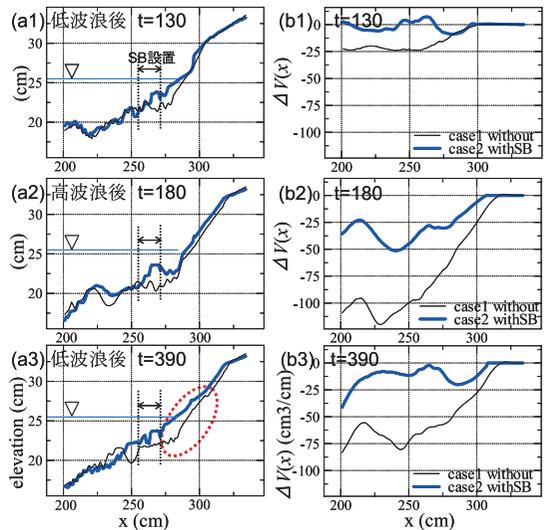


図-4 SB近傍の岸側領域(図-3点Aより岸側)における130, 180, 390分後の海浜地形(a1～a3)、累積土砂移動量(b1～b3)

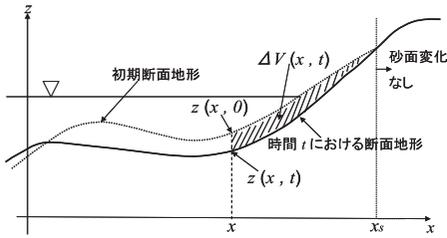


図-5 累積通過土砂量の算定方法

から130, 180, 390分後の縦断面地形を表す。SBは図に示した矢印の範囲に設置している。また、任意地点における土砂収支を比較する目的で、図-5に示した諸量を用いて次式で累積通過土砂量 $\Delta V(x, t)$ (岸向きを正)を定義し、その岸沖方向分布を図-4(b1)~(b3)に図示した。

$$\Delta V(x, t) = \int_x^{x_s} \{z(x, t) - z(x, 0)\} dx \dots\dots\dots (1)$$

ここで x_s は遡上帯の岸側で地形変化の見られなかった地点の座標であり、ここでは $x_s=334\text{cm}$ とした。画像計測に基づく実測データは水平方向に1mm間隔で標高データを記録しているため、式(1)のような積分による高精度な累積土砂量の算定が可能である。このようにして算定した累積土砂量を移動床の沖側境界で算定し、得られた値を固定床上で実験後に収集した土砂量と比較したところ、両者の差は絶対量の5.3%となり、本研究で構築した画像計測システムによる地形データは、累積土砂量の比較にも十分に耐えうる精度を有していることが確認された。

図-3, 4からわかるように、SB設置位置からSBの背後域において、SBの有無によって海浜地形に違いが生じる。本実験条件では実験開始から130分後までの平常波浪時にも砂面高が低下し、侵食傾向を示していたが、図-4(a1), (b1)からわかるように、SBありのcase 2ではその減少幅が小さく、SB設置位置までの範囲における累積土砂量はほぼゼロとなった。高波浪作用中は図-4(b2)より、SBを設置した場合でも、SBから岸側の土砂量は減少しているものの、その絶対量は大幅に減少している。またSB設置位置では、累積土砂量が一定値を示しており、これはSB設置位置で地形変化が生じていないことを意味している。また高波浪後の低波浪作用時には、SBより岸側の砂面高が時間と共に上昇しており(図-3)、実験終了時(図-4(a3), (b3))にはSBを設置したcase 2において堆砂が促進されており、沖合への土砂損失量がSBの設置によって4分の1以下に抑えられることがわかった。たとえば漂砂制御構造物としての潜堤の設置時には、平常波浪時における岸向き漂砂移動の遮断による海浜回復過程への負の影響に配慮した設計が重要であると考えられるが、本研究で着目したSBでは、海浜の回復過程を

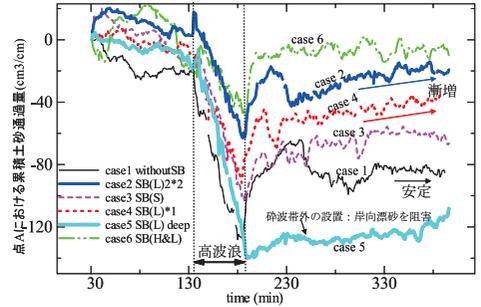


図-6 点A(図-3)を通過する累積土砂移動量の時間変化

むしろ助長する積極的な堆砂促進機能を有していたことが分かった。

次に図-6には、図-3に示したSB設置位置よりもやや沖側に位置する点Aにおける累積通過土砂量の時間変化を比較した。これより、矢印で示した高波浪作用中には全caseで土砂量が減少するものの、その減少率は大きく異なり、SBを設置したcase 2, 3, 4, 6の傾きがより緩やかであることがわかる。case 5はSBの設置位置が汀線から一番遠く、より深い位置に大型のSBを設置したcaseであり、高波浪後の平常波浪時における累積土砂量の増加量の傾きが他caseよりも小さいことがわかる。これは、case5では高波浪後の海浜回復過程ではSBの位置が碎波帯外に位置しており、碎波帯内で見られるような活発な砂の巻上げが起こらず、結果としてSBを越える岸向き漂砂移動を阻害したためであると考えられる。その他、同じ形状のSBを投入した場合はより被覆面積が大きいほど侵食緩和効果と堆砂促進機能を有すること(case 2と4の比較)、同じ被覆面積を持つ場合は、浮遊砂がSBを超えられる範囲において、より断面高さが高いほど(case 2, 3, 5, 6の比較)効果が大きいことがわかった。

また、高波浪後の回復過程に着目すると、SBなしのcase1は急速な回復が終わる240分以後は土砂移動量の変化量がほぼゼロとなり安定状態となるのに対し、SBを投入したcase 2および4では急速な回復が終了した後($t=230$ 分以後)も、累積通過土砂量が漸増傾向を示している。高波浪後の初期回復過程において、このように、SBの有無は回復速度の違いとして現れるものの、ほぼ平衡地形状態に達した時点における回復量の絶対値はほぼ同等であった。しかしながら、SBを設置した条件の方が、高波浪時における土砂損失量が小さいため、結果として正味の土砂収支はSBを設置したcaseの方がより沖側にSBを設置したcase5を除き累積土砂損失量が小さくなった。

次に、SB設置位置の岸側($x=275\text{cm}$)、沖側($x=225\text{cm}$)境界地点における時々刻々の累積通過土砂量を時間微分して岸沖方向漂砂量を算定し、その時間変化をcase1および2について比較した(図-7)。図より、高波浪入射直

後にはSBを設置したcase2でのみ大きな岸向漂砂移動(正)が生じ、その後両case共に短時間で大きな冲向漂砂移動(負)が見られる。この冲向漂砂量は両caseでほぼ同等であるものの、その後の冲向漂砂量はcase2の方が小さく、結果として高波浪時の冲向漂砂量の累積値は小さくなった。また、高波浪来襲後の平常波浪時には、両case共に漂砂量の周期的変動が見られるが、case2の方が変動幅が小さく、また岸向漂砂量の継続時間が長いため、海浜断面地形の回復(堆積)を促す傾向があることも見てとれる。以上より、SBを浅海域に設置することで、高波浪時における正味の土砂損失量を大きく低減し、また、回復過程(低波浪時)においても岸向漂砂を阻害せず、むしろ堆砂を促進する機能が見られた。

4. 海浜安定化メカニズムの分析

(1) 波浪低減効果

波高計測の結果から、SB背後域に伝わる波はSBの有無によって異なり、SBには浅海域における波浪低減効果があることが分かった。ここでは、SBによる波浪低減効果を比較するため、SBの両側固定点における沖波換算波高の比を算定し、各caseにおける違いを比較した。図-8はcase1~6におけるx=275地点と、x=205地点における沖波換算波高の比を示す。図-8より、case5を除くSB投入caseでは特に初期低波浪作用中に、SBの設置によって波エネルギーの減衰効果が見られた。初期の低波浪作用中の砕波点はx=185cm近傍であり、この波エネルギー減衰効果は砕波帯内で既に砕けている波のSBによる低減効果を示している。高波浪作用中、また高波浪後の低波浪作用中においては、実験初期の低波浪作用時よりも波浪の低減効果が小さくなるものの、特にcase2や6では、SBによる波高の低減効果が顕著に見られた。一方で、小型のSBを設置したcase3や、より深い地点にSBを設置し

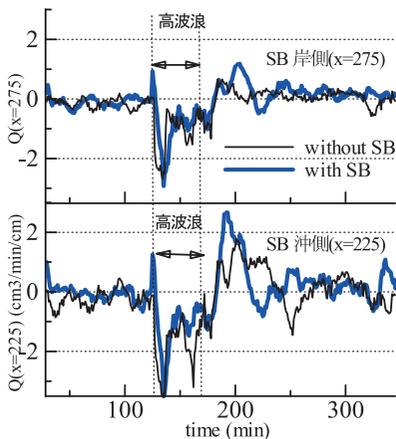


図-7 SB前後の2地点における瞬間局所漂砂量フラックス(岸向き正)の時間変化

たcase5では、SB前後の波エネルギー減衰効果はほとんど見られなかった。この結果から、SBによる砕波帯内での波高減衰促進効果は、SBを汀線付近の極浅海域に比較的広範囲に設置したときのみ顕著となることが分かった。

(2) 浮遊砂分布の分析

断面2次元水槽の側面を黒色板とガラス面で構成し、ガラス面側から単一光源を用いて水槽内をビデオカメラで撮影することにより、浮遊砂濃度に相当する画像輝度の時空間変化を計測した。図-9(2)および(3)は、case1, 2に関して、SB設置位置の鉛直測線上(図-9(1)の(A))における相当輝度の鉛直方向分布の平均位相変化である。ここで相対輝度値は、対象領域における輝度が最も小さい静水時の輝度 B_w と、最も明るい砂面内の輝度 B_s を基準とし、対象とする画素における輝度 B と B_s の差を $B_s - B_w$ で除して正規化した値として定義した。このため、砂面内の相対輝度は1、静水時における水域の相対輝度はゼロとなる。さらに図-9(4)には、SB設置位置の岸側地点(図-9(1)の(B))における相当輝度鉛直分布の位相変化を示した。

次にSB周辺における浮遊砂移動量の相対的な比較を行う目的で、線形進行長波の仮定の下、次式で相当浮遊漂砂量 q_s を算定した。

$$q_s = B' \eta \sqrt{gh} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 B' は時々刻々の相対輝度の断面平均値、 η は時々刻々の水位(平均水位からの偏差)、 h は各地点における平均水深である。SBによる堆砂促進効果は回復過程において顕著に見られたので、SBを設置したcase2の回復過程($t=210$)におけるSB上での浮遊砂分布特性と、SBなしのcase1の回復過程における同じ縦断方向位置の浮遊砂分布特性を比較した(図-10)。

同じ水平位置でも水深が異なるため、case1および2の単純な比較は難しいものの、両者には輝度値の変動傾向に明らかな違いがあることがわかる。たとえば、case1(SBなし)では水位変動と輝度値のピークに位相差が見られ、輝度の鉛直分布(図-9(2))も底面から右斜め上

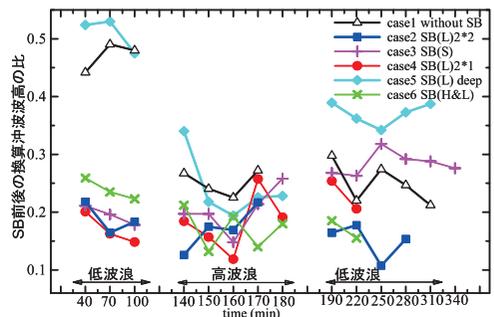


図-8 サンドバッグ前後における沖波換算波高の比

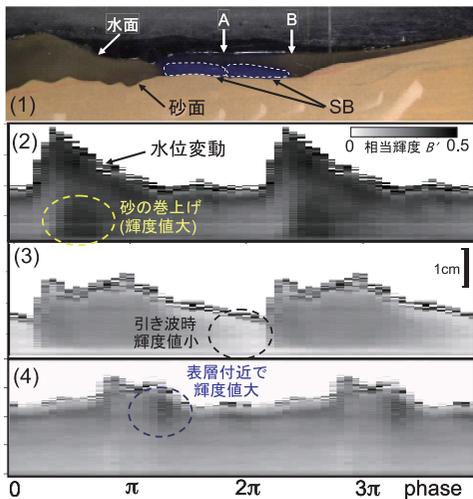


図-9 SB実験時の水槽側面写真(1), および水中の鉛直線における相当輝度の時間変化((2) A地点, SBなし(case 1), (3) A地点, SBあり(case 2), (4) B地点, SBあり(case 2))

方へ高輝度領域が分布しており、巻き上げによる浮遊砂が卓越であることが分かる。またcase 2 (SBあり)では、水位と輝度変化の位相がほぼ一致しており、押し波時の岸向き流れによる浮遊砂の移流が卓越であることを示唆している。またSB岸側の砂面上での輝度分布(図-9(4))では、波峰下の表層付近に輝度の高い領域が分布しており、SBの岸側では底面からの巻き上げ砂量が相対的に小さいことを意味している。このことは、SB上(図-9(3))における輝度が波谷付近(引き波時)で著しく小さいことも整合している。このような押し波・引き波時における非対称な浮遊砂濃度(輝度)の時間変化特性は、結果として正味の岸向き漂砂量を増大させる要因となっていると考えられる。

次に正味の漂砂量(図-10(c))に着目する。case 1では引き波時・押し波時ともに漂砂量が大きいが、引き波の継続時間がより長く、総漂砂量に占める岸向き漂砂量の比は0.34となった。一方で、case 2では総漂砂量に占める岸向き漂砂量の比は0.84となり、岸向き漂砂量が卓越であった。SBによる底面被覆効果と、波浪減衰によるSB岸側領域での巻き上げ砂量の低減により、結果として、浮遊砂はSBを越えて岸側には運ばれるものの、引き波時における沖側への浮遊砂移動量が著しく低減され、岸側領域の堆砂促進機能に寄与していると考えられる。このように、SBによる海浜安定化機能には、底面被覆による浮遊砂の非対称化と、遡上波の波エネルギー減衰効果という2つのメカニズムがあることがわかった。

5. おわりに

小型SBによる汀線際での海浜安定化機能を断面2次元水

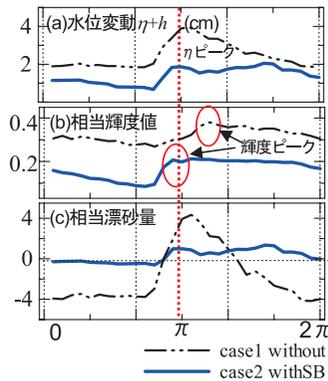


図-10 case1, 2の海浜回復過程におけるサンドバッグ設置位置上の(a)水位変動, (b)正規化した輝度, (c)相当漂砂量

路実験を通して検証し、以下の結論を得た。

連続画像を用いた高頻度で高解像度な縦断地形自動抽出システムを構築し、砂澱の生成・移動を含む詳細な地形変化や時々刻々の漂砂量の計測が可能となった。

小型SBを侵食性海岸の汀線付近浅海域に設置することにより、平常波浪時・高波浪時両方における海浜安定化が見られ、具体的にはSB直下の砂面高を維持し、岸側領域においても侵食緩和ならびに堆砂促進の効果が見られた。特に高波浪条件では主に設置位置直下の砂面低下抑制機能を果たし、平常波浪時にSB背後領域の汀線を安定化させていた分、岸側領域全体の侵食量も低減された。

SBが海浜安定化機能を果たすメカニズムには、土砂被覆による浮遊砂分布濃度の非対称化と、汀線付近に伝播する波エネルギーの減衰効果の2点が主に考えられる。このため、SBによる海浜安定化工法の効果的な導入には、被覆面積の増大に加え、波エネルギーを低減させるためには浮遊砂がSBを越えて岸側に輸送される範囲内で断面高さを増大させることが有効であると考えられる。

本研究は科研費(若手研究(B), 課題番号20760322, 研究代表者: 田島芳満)の助成を受けました。

参考文献

田島芳満・石指裕章・佐藤慎司(2009): 沿岸域地形急変部周辺における長周期変動を伴う波・流れ場の局所集中機構, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp. 211-215.

Alvarez, E., R. Rubio, and H. Ricalde (2006): Shoreline restored with geotextile tubes as submerged breakwaters, Geosynthetics Magazine, Vol. 24, No. 3, 8p.

Saathoff F., H. Oumeraci, and S. Restall (2007): Australian and German experiences on the use of geotextile containers, Geotextiles and Geomembranes, 25(2007), pp. 251-263.

E.C.Shin and Y.I.Oh (2007): Coastal erosion prevention by geotextile tube technology, Geotextile and Geomembranes, 25(2007), pp. 264-277.