

サンドチューブを用いた潜堤の安定性と性能評価

平松遥奈

指導教員 佐藤慎司教授

1. はじめに

海岸侵食が深刻な海岸では、沿岸の大規模構造物や長大な護岸などの構造物が沿岸の漂砂を遮断し、海岸過程の結果として暴浪時に出現していた沿岸砂州（バー）が消滅している事例も多い。沿岸砂州が消失すると、本来そこで碎波していた高波が碎波しないまま海岸に來襲することになり、さらに急速な海岸侵食を引き起こすことになる。このような場における波浪制御施設としては、離岸堤や人工リーフが効果的であるが、沿岸砂州の形成領域のような大水深域を想定すると、施設が大規模になり、コストや生態系環境への影響などを検討する必要がある。

本研究では、低コストでより自然に近い素材を用いたサンドチューブを用い、消滅した沿岸砂州の代替として、サンドチューブ潜堤を碎波点付近に施工するという海岸侵食対策を検討する。サンドチューブとは、透水性のあるジオテキスタイル製のチューブに現地の砂を充填したものである。海岸施設としての活用例は日本では少ないものの、海外ではメキシコで、4km の長さのサンドチューブが、汀線際に侵食対策として設置された事例 (Alvarez ら, 2006) や、オーストラリアのゴールドコーストで、海浜安定化とサーフィン利用を目的として、サンドチューブを用いた人工リーフを施工したという事例がある (Saathoff ら, 2007)。また、Pilarczyk(2000)では、海岸、海洋における様々なジオテキスタイルシステムの利用が整理されている。

本研究では、施工事例が少なく、設計手法が確立していないサンドチューブが、潜堤の材料として有効であるかどうかを検討するため、実験により安定性の検討を行い、設計手法を提案する。さらに、サンドチューブを用いた潜堤を沿岸砂州が形成される位置に設置することにより、これが消滅した沿岸砂州の代替となり、海岸侵食対策となるかどうかについて移動床実験で検討する。

2. サンドチューブの安定性

(1) サンドチューブの最適サイズ

底面近傍のサンドチューブに作用する波力を次式に示すモリソン式で評価する。

$$dF = \left[C_D \frac{1}{2} \rho_w D u |u| + C_M \rho_w A \dot{u} \right] ds \quad (1)$$

ここで、 dF は部材軸方向の長さ ds に作用する、部材軸と水粒子運動共通面における部材軸方向に直角方向の力、 ρ_w は水の密度、 D は部材の基準高さ、 A は部材の基準断面積である。また、 C_D と C_M は、それぞれ、抗力係数と慣性力係数である。

長さ l の構造物に作用する抗力の最大値 F_{Dmax} と慣性力の最大値 F_{Imax} との比は次式で表すことができる。

$$\frac{F_{Dmax}}{F_{Imax}} = \frac{C_D}{C_M} \frac{3}{4D} \frac{\hat{u}}{\omega} = \frac{C_D}{C_M} \frac{3}{8} \frac{d_o}{D} \quad (2)$$

ここで、 \hat{u} は底面流速振幅、 ω は角周波数、 d_o は底面付近における水粒子軌道長径である。式(2)より、 F_{Dmax}/F_{Imax} は、 D/d_o に反比例する。すなわち、水粒子軌道長径や波高に比べて、構造物の径が大きいときには慣性力が卓越する。

碎波帯近傍を考えることにして、波高 H を $H = \gamma h$ ($\gamma = 0.78$) で与え、さらに長波近似を導入する。断面が円の円柱状構造物として、 $C_D = 1.0$ 、 $C_M = 2.0$ とすると、式(2)は、

$$\frac{F_{Dmax}}{F_{Imax}} \cong \frac{C_D}{C_M} \frac{3}{8} \frac{\gamma}{2\pi} \frac{\sqrt{ghT}}{D} \cong \frac{1}{43} \frac{\sqrt{ghT}}{D} \quad (3)$$

となる。ここで、 h は水深、 T は周期、 g は重力加速度である。すなわち、局所波長/構造物径が 43 より大きい場合には、慣性力が卓越することになる。

さらに、構造物の摩擦力は、構造物の重量に比例するため、抗力が卓越する条件では、構造物径が大きいほど安定であり、慣性力が卓越する条件では、安定性は構造物径によらない。したがって、抗力と慣性力が等しくなる構造物径より小さい構造物では抗力が卓越するので、大きい方が有利、これより大きい場合には慣性力が卓越するので、大きさよりも形状を工夫して、摩擦力を大きくすることが有利となる。

(2) サンドチューブの安定領域

安定性に関する実験は、長さ 35m、深さ 0.8m、幅 0.6m の二次元造波水路を用いて、1/30 勾配の固定床で行った。一

様水深部での水深は29cmとした。サンドチューブ模型は、布で作成したチューブに粒径0.3mmの砂を充填するという方法で、寸法の異なるサンドチューブ模型を5種類作成した。すべての模型の断面は楕円形状で、高さは1.4cmである。長さが10cmの模型は、径が2.2cmのS、3.6cmのM、4.5cmのLの3種類で、残りの2種類は断面がMと同じで長さが20cmのMm、30cmのMIである。これらのサンドチューブ模型を $h=15\text{cm}$ と $h=6\text{cm}$ の位置に長手が波峰方向となるように置き、一様水深部の波高1.8~10.2cm、周期0.5~2秒の規則波を100波ずつ当て、挙動をビデオカメラで記録した。波高は容量式波高計を用いて一様水深部で計測した。

本研究で実施した条件に対して、抗力と慣性力のどちらが卓越するかについて、サンドチューブ径 D と水粒子軌道長径 d_o で整理したのが、図-1である。同図では、 C_D 、 C_M に関しては、すべて球ではなく円柱と仮定しているので、 $C_D=1.0$ 、 $C_M=2.0$ とした計算である。長さが短く、球体に対する係数 $C_D=0.5$ 、 $C_M=1.5$ を用いる場合には、抗力と慣性力の比がさらに大きくなる。本研究の実験条件では、抗力と慣性力が同程度の大きさになる条件もあるが、ほとんどが、慣性力が卓越する条件である。

サンドチューブの挙動は、安定、回転、滑動に分類できる。波を100波当てた後、移動距離が10cm以下のものを「安定」、10cm以上移動した場合は、その挙動により、「回転」もしくは「滑動」と判断することとした。サンドチューブは波高が大きくなるにつれ、安定、滑動、回転の順で移動するようになる。ただし、 $h=6\text{cm}$ に置いたサンドチューブでは「回転」は生じなかった。

全ての実験データに対して D/d_o を横軸にとり、単位長さあたりの最大波力/水中重量との対応関係を表したのが図-2である。ここで、単位長さあたりの波力を F 、単位長さあたりの水中重量を W と表すこととする。サンドチューブに作用する波力を算定する際、 C_D 、 C_M は、S、M、Lを球、Mm、MIを円柱と見なして決定した。また、慣性力が卓越する場合、加速度の大きさが重要であることから、流速波形の前傾化を考慮するために、佐藤ら(1990)にならい、流速波形の三次までのフーリエ成分の振幅と位相を碎波帯内の相対岸沖位置 x/λ_o から推定し波力の算定に用いた。図-2を見ると、滑動または回転が起こり、不安定となるのは、 D/d_o が小さい範囲に集中しており、 $D/d_o > 0.7$ の範囲は安定と言える。さらに、 $D/d_o > 0.4$ では、移動限界を与える F/W の下限値が0.75程度であるが、 $D/d_o < 0.4$ では、0.25程度まで下がる。以上より、 $F/W < 0.25$ または $D/d_o > 0.7$ を安定領域とすれば、波力に対して安定なサンドチューブを設計できる。

抗力は構造物径に比例して大きくなるのに対し、慣性力と摩擦力は重量に比例するため、抗力が卓越する条件下で

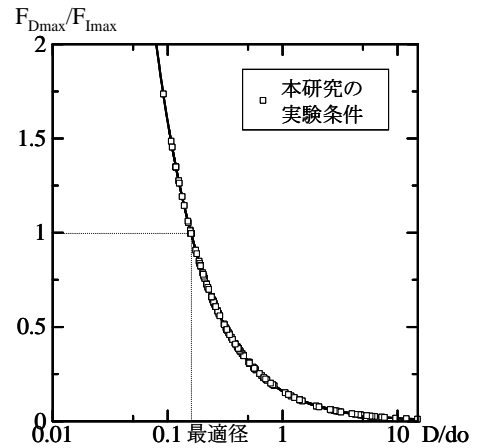


図-1 抗力と慣性力の比 (横軸は常用対数軸)

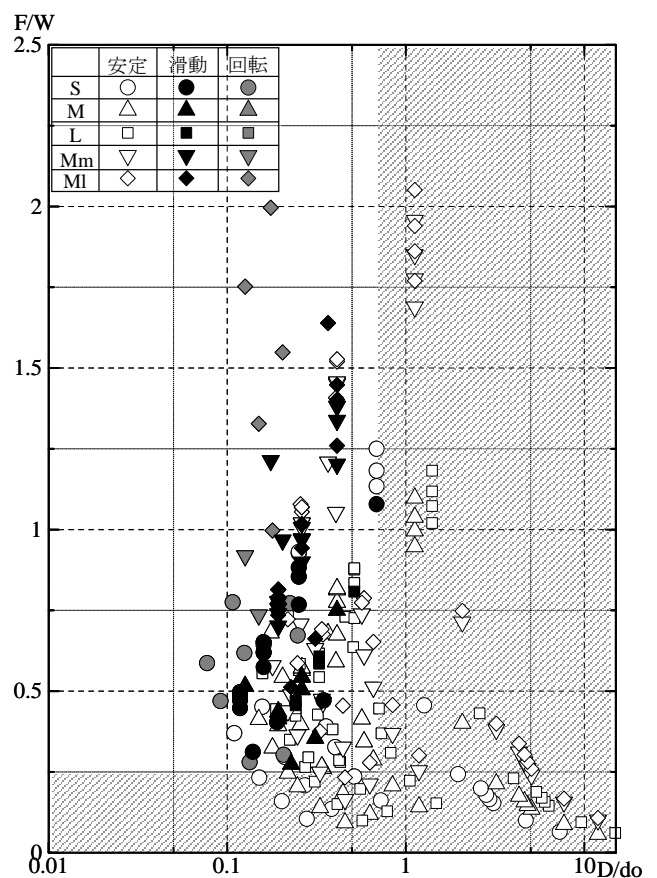


図-2 サンドチューブの安定度 (横軸は常用対数軸, 斜線部は安定領域)

は、サンドチューブは大きければ大きいほど安定である。

しかし、慣性力が卓越する条件下では、サンドチューブを大きくすると、慣性力と摩擦力の両方が大きくなるため、単純に大きければ有利というわけではない。しかしながら、前傾化した波浪のもとでは特に、図-3に示したように最大加速度の作用直後に最大流速が作用し、慣性力と抗力の連

携作用も安定性に影響していることを考えると、断面積を大きく、平坦な形状にするほど、チューブの安定性が増す傾向にあるものと考えられる。

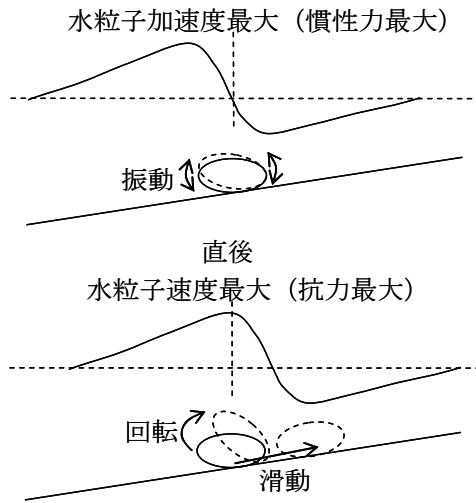


図-3 慣性力と抗力の連携作用

させて、海浜断面の変形を追跡した。実験条件を表-1に示す。ここで波高は一樣水深部での波高である。各ケースにおいて、Sunamura・Horikawa (1974) でタイプ I または II の波を暴浪時の波、タイプ III の波を静穏時の波と呼ぶことにする。実験はいずれのケースにおいても、初期勾配 1/10 の海浜に静穏時の波を 1 時間作用させた後、暴浪時の波 (作用時間: 1 時間) と静穏時の波 (作用時間: 5 時間) とを交互に 3 サイクル作用させて、一定の時間ごとに海浜縦断地形と波高分布を測定した。1 ケース当たりの造波時間は 19 時間である。

表-1 実験条件

ケース	暴浪時の波			静穏時の波			追加するもの
	波高 (cm)	周期 (s)	C値	波高 (cm)	周期 (s)	C値	
A-1	5.8	1	7.16	3.0	1.5	2.84	なし
A-2							サンドチューブ
A-3							養浜砂
B-1	7.0	1	8.64	3.0	1.5	2.84	なし
B-2							サンドチューブ
B-3							養浜砂
C-1	8.7	1	10.74	3.0	1.5	2.84	なし
C-2							サンドチューブ
C-3							養浜砂

3. サンドチューブ潜堤の海岸侵食緩和機能

(1) 時間変動波浪による海浜断面変形

移動床実験は、長さ 35m、深さ 0.8m、幅 0.15m の二次元造波水路で行った。一樣水深部での水深は 30cm とし、1/10 勾配の模型海浜を粒径 0.24mm の砂で製作した。砂村・倉田 (1981) にならい、特性の異なる規則波をサイクリックに作用



写真-1 投入したサンドチューブを用いた潜堤の写真

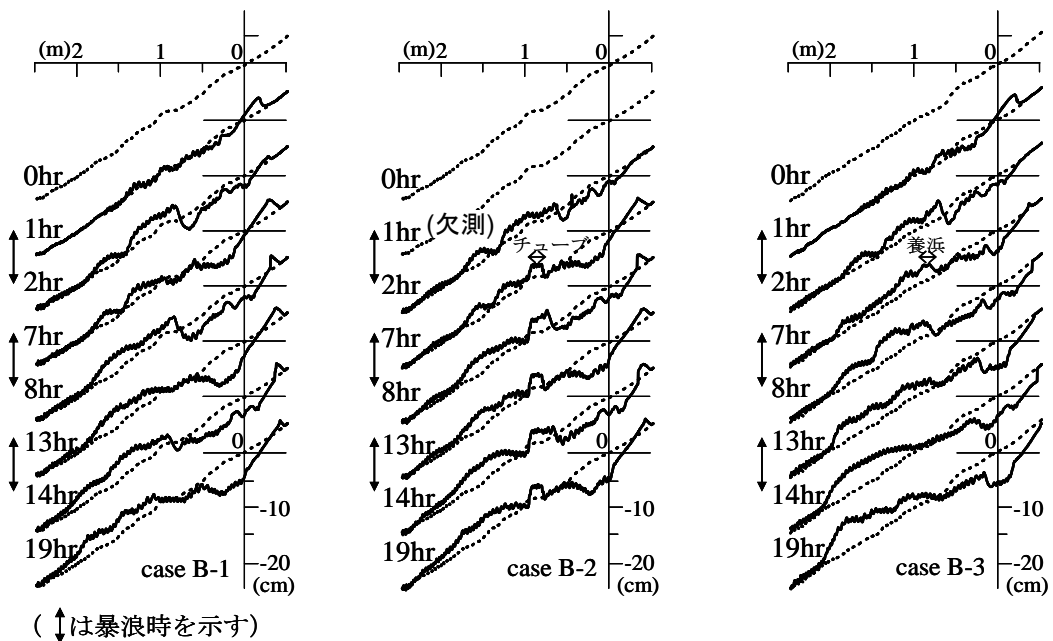


図-4 地形変化 (ケース B)

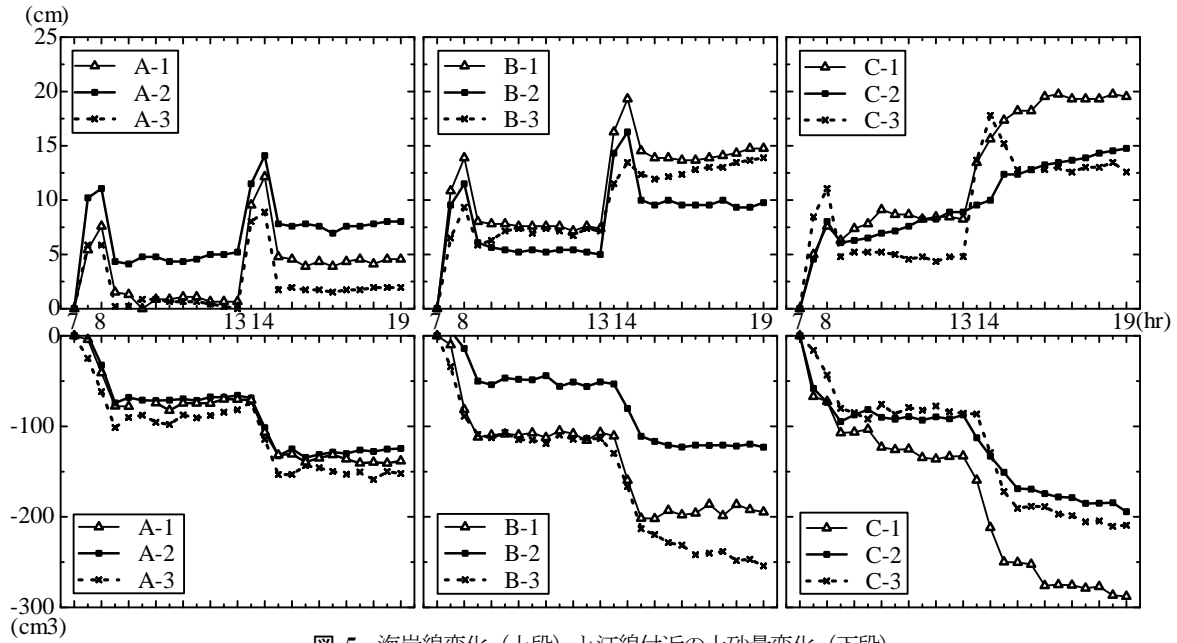


図-5 海岸線変化（上段）と汀線付近の土砂量変化（下段）

潜堤設置の効果を見るため、サンドチューブや土砂を追加しないケース（A-1, B-1, C-1）、バーの位置に、2.で述べたMの大きさのサンドチューブ9本を写真-1のような形状の潜堤として、7時間後に追加するケース（A-2, B-2, C-2）、同様にバーの位置にサンドチューブのかさ体積と同量の養浜を行うケース（A-3, B-3, C-3）の3種類を、それぞれの波浪条件で行った。ここで、サンドチューブや養浜を追加したバーの位置というのは、1時間から2時間までの暴浪時において形成されたバーの最大の高さの位置から沖方向に約18cmの範囲とした。海浜縦断地形の計測は、約30分ごとに、レーザ変位センサを用いて行った。ケースBの地形変化を図-4に示す。図中で、B-2では7hrにサンドチューブを設置し、B-3では同時刻に養浜を実施している。

海岸侵食緩和機能は、汀線位置の変動と汀線付近の土砂量の変動を指標として評価した。ここで、汀線付近の土砂量は、サンドチューブの平均設置位置である初期汀線から90cm沖側の位置よりも岸側の土砂量として算出した。図-5はすべてのケースの汀線変化と汀線付近の土砂量変化を示したものである。汀線後退や土砂量減少は、暴浪の作用する7hr~8hr, 13hr~14hrに著しいが、サンドチューブ潜堤を導入したケースでは、これらが緩和されていることがわかる。本研究の実験ではほぼすべての条件で、サンドチューブ潜堤は、暴浪時の汀線後退を抑制し、潜堤の岸側に土砂をとどめることで、海岸侵食を緩和する効果があることが分かった。

(2) サンドチューブ潜堤周辺の平面的な地形変化
現地への適用を想定して、沿岸漂砂卓越条件での侵食緩

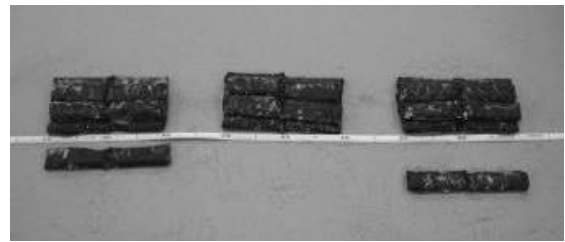


写真-2 サンドチューブを用いた潜堤

和機能や、端部や開口部における局所洗掘対策を検討するため、平面水槽で移動床実験を実施した。長さ6.5m、幅11mの平面造波水槽を用いて、1/20勾配の模型海浜を粒径0.3mmの砂で製作して行った。一樣水深部での水深は23cmとした。サンドチューブを用いた潜堤を汀線から100cmの位置に写真-2のように並べる。1つの潜堤の大きさは、長さ20cm、幅10cm、高さ3cmである。予備実験で潜堤すぐ岸側で洗掘が進むことが確認されたため、左端と右端の潜堤には、洗掘対策として、潜堤本体より岸側にそれぞれ4cmまたは8cm離して、サンドチューブ2本を並べた。沿岸方向、岸沖方向にx軸,y軸をとり、それぞれ右向き、沖向きを正とする。サンドチューブ潜堤と洗掘対策用のサンドチューブはx=140~220cm, y=118~138cmの範囲に存在する。地形計測はx=0~360cm, y=0~194cmの範囲で行った。

一樣水深部の波高3cm、周期1.5秒、波向き左側から20度の斜め入射規則波を3時間作用させた後のサンドチューブ付近の地形変化を示した図-6を見ると、全体的に汀線付近の堆積が進んでいるが、サンドチューブ潜堤の背後で堆積が著しい。潜堤の漂砂制御機能の効果が明確に表れたと

言える。ただし、サンドチューブ潜堤周辺には局所的な洗掘も観察された。洗掘の範囲と程度を詳細に検討するため、サンドチューブ潜堤の位置する $x=156, 186, 216\text{cm}$ の海浜縦断地形を図-7 に示す。同図を見ると、サンドチューブ潜堤の背後が洗掘しており、最も小さいのは $x=156\text{cm}$ で、 $x=186\text{cm}$ と $x=216\text{cm}$ の洗掘は同程度である。洗掘が予想される場所にあらかじめサンドチューブを設置することで、洗掘を緩和することができたものと考えられる。

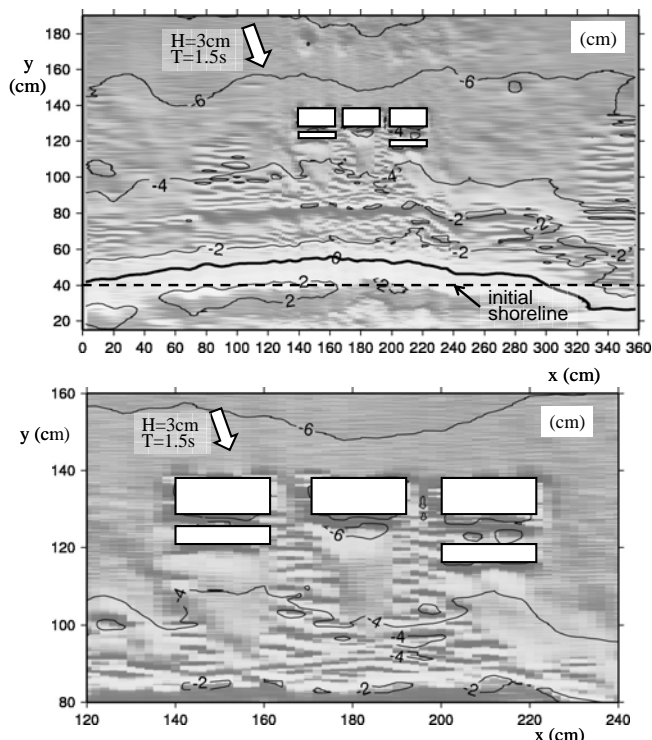


図-6 3時間後の地形(上図)と潜堤付近拡大図(下図)

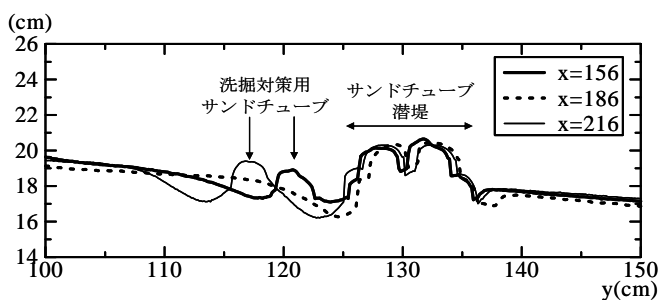


図-7 サンドチューブ潜堤付近の海浜縦断地形

4. おわりに

本研究では、沿岸砂州を代替するサンドチューブ潜堤について、安定性と侵食緩和効果について固定床および移動床実験において検討し、以下の結論を得た。

(1) サンドチューブに作用する波力をモリソン式で評価し、サンドチューブの断面幅と水粒子軌道長径の比が重要なパ

ラメータであることを示した。また、本研究の実験条件では慣性力が卓越しており、砕波帯内での流速波形の前傾化を考慮することにより評価した流体力によりサンドチューブの安定領域を提示することができた。安定性に対して有利となる最適径があるが、前傾化した波浪のもとでは、慣性力と抗力の連携作用も考慮する必要がある。

(2) サンドチューブ潜堤は、潜堤の岸側に土砂をとどめ、冲向き漂砂を抑制することで、暴浪時の汀線後退を抑制し、静穏時の汀線の前進を促すことが分かった。さらに、汀線付近の土砂量の暴浪時の急激な減少を防ぐことも分かった。

(3) 沿岸漂砂卓越条件における侵食緩和性能や三次元的な洗掘等の現象を見るため、平面造波水槽にサンドチューブ潜堤を設置し、斜めから波を入射させ、地形変化を検討した。その結果、サンドチューブ潜堤の侵食緩和機能を確認するとともに、潜堤背後に生じる局所的な洗掘がサンドチューブの配置を工夫することで軽減できることを確認した。

実験条件を増やすこと、現地スケールでの検討を行うことが今後の課題である。

参考文献

- Alvarez, E., R. Rubio, H. Ricalde (2006): Shoreline restored with geotextile tubes as submerged breakwaters, *Geosynthetics Magazine*, Vol. 24, No. 3, 8p.
- Saathoff F., H. Oumeraci, S. Restall (2007): Australian and German experiences on the use of geotextile containers, *Geotextiles and Geomembrances*, 25(2007), pp.251-263.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional beach transformation due to waves, *Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., ASCE*, pp. 920-938.
- Pylarcic, K. W. (2000) : *Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering*, Aa Balkema, 913p.
- 佐藤慎司・鈴木秀典 (1990) : 砕波帯における底面流速変動波形の評価法, *海岸工学論文集*, 第37巻, pp.51-55.
- 砂村継夫・倉田雄司 (1981) : 時間的に変化する波浪を用いた海浜変形に関する二次元実験, *第28回海岸工学講演会論文集*, pp. 222-226.