

袋詰体を用いた干潟潜堤の設計手法に関する研究

Design Method of Submerged Dike by use of Soil Bags for Man-made Tidal Flat

熊谷隆宏¹・池野勝哉²

Takahiro KUMAGAI and Katsuya IKENO

The application of geo-textile soil bags filled with recycled dredged material is proposed for the material of submerged dike of man-made tidal flat. The proposed dike is made of a pile of soil bags, in which not only sand but soft clayey material is supposed to be filled. In this study, the design method is proposed for the construction of dike of soil bag in the initial stage of placement of soil bags through the final stage of filling material for tidal flat. Especially, the shape of soil bags at the placement, the required strength of geo-textile material and the deformation of dike along with consolidation are analyzed in a case study, and the applicability of submerged dike by soil bag is investigated.

1. はじめに

人工干潟の形状として、波浪および土圧に対する干潟の安定性を確保するため、前面に潜堤を設置することが一般的である。また、浚渫土の有効活用を目的として、干潟の材料に浚渫土を用いるケースが多い。浚渫土のさらなる有効活用を図るため、本研究では、潜堤の材料として、袋材に浚渫土を中詰めした袋詰体を提案する。

袋材に土を中詰めする袋詰体に関して、国外では、数十から数百 m³ の大型袋詰体を、海岸保全のための突堤、潜堤、海岸堤防や護岸の法面被覆等の材料に用いる事例が報告されている(例えば Heerten ら, 2000; McClarty ら, 2006)。Heerten ら(2000)は、袋詰体構造物は、捨石、ブロック等に比べて、材料コスト、利用者の安全性、海底地形に対する追従性、形状補修の容易性等の点で優れていることを指摘している。また、不織材による袋詰体を用いた潜堤を海岸侵食対策のために設置した6ヵ月後に、袋詰体の表面に海藻の付着・生育を確認している。Oh・Shin(2006)は、同様に、織布の袋詰体による潜堤を築堤した1年後に、海藻の付着・生育を確認している。Ghazali ら(2006)は、マングローブ海岸の保全のため、従来行われてきた石やコンクリートによる護岸でなく、袋詰体潜堤を設置するプロジェクトを報告している。

このように、海岸保全効果に併せて、環境共生効果を期待されて、袋詰体が適用されるケースがある。

袋詰体により干潟潜堤を築堤する場合、積層構造となるが、これまで、袋詰体の積層構造物を築造した例は少ない。また、提案する潜堤の袋詰体には、粘性土を用いることも考えられるが、従来、取り扱いの容易さから、砂が一般的に用いられている。本研究では、粘性土を中詰めすることを含めて、確立されていない袋詰体の積層

による干潟潜堤に関する設計手法を提案する。

2. 袋詰体を用いた潜堤の設計手法の提案

袋詰体の設置方法として、「投入方法」：土運船内に袋詰体を作成した後、底面を開口させて、自由落下により設置する方法(図-1)と、「敷設注入方法」：ポンプ注入口を備えた袋材を海底に敷設後、スラリー状の土を注入して設置する方法(図-2)の2方法が一般に考えられる。このうち、土運船による設置が可能となる水深が確保されている領域には、投入方法が適している一方、潜水夫による袋の敷設および注入ポンプの着脱が容易な浅い領域には、敷設注入方法が適している。本研究では、一般に適用が考えられるこれらの方法によって築堤する袋詰体潜堤の設計手法を、図-3に示すように提案する。

(1) 袋詰体形状予測および袋材強度評価

干潟断面・潜堤形状、使用する袋材の大きさ、土質特性等の基本条件を定めたのち、潜堤を構成する袋詰体の形状を予測するとともに、袋材の必要強度を評価する。

a) 敷設注入方法(チューブ工法)

Leshchinsky ら(1996)は、直交座標系における曲率の定義と、曲率に応じた袋作用張力と内部圧力の釣り合いより、式(1)に示す袋作用張力、内部圧力、袋詰体形状の関係を表現する非線形2階微分方程式を導いた(図-4)。この支配方程式および境界条件(2)~(4)を用いることにより、袋詰体の形状を解析することができる。

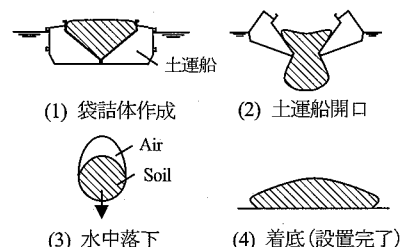


図-1 投入方法による袋詰体設置方法

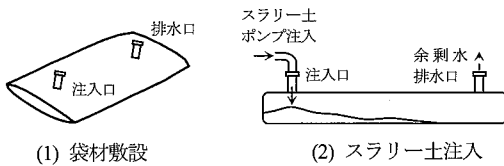


図-2 敷設注入方法による袋詰体設置方法

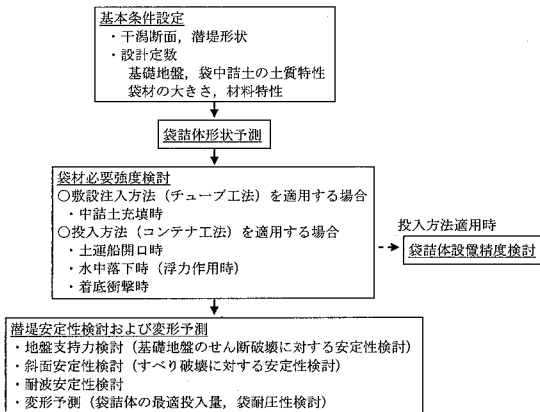


図-3 袋詰体を用いた潜堤の設計手法の提案

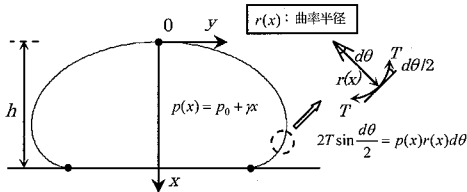


図-4 袋詰体形状解析における x, y 座標系

この手法では、支配方程式が非線形2階微分方程式により表現され、高精度な解析が可能であるが、式(3)のように袋頂部の勾配を無限大とする境界条件を用いるため、一意的に解を得ることが難しい。一方、Carroll(1994)は、袋詰体形状の曲率の変化が小さいと仮定し、式(5)～(7)に示す袋詰体形状の近似解析手法を提案している。

$$T \frac{d^2 y}{dx^2} - (p_0 + \gamma x) \cdot [1 + (dy/dx)^2]^{3/2} = 0 \quad (1)$$

$$y|_{x=0} = 0; y|_{x=h} = \frac{\gamma}{p_0 + \gamma h} \int_0^h y(x) dx \quad (2)$$

$$\frac{1}{(dx/dy)|_{y=0}} = 0 \quad (3)$$

$$S = 2 \int_0^h \left[\frac{\gamma y(x)}{p_0 + \gamma h} + \sqrt{1 + (dy/dx)^2} \right] dx \quad (4)$$

ここに、 S ：袋材周長、 γ ：中詰土単位体積重量、 p_0 ：頂部圧力（注入部圧力）、 T ：作用張力である。

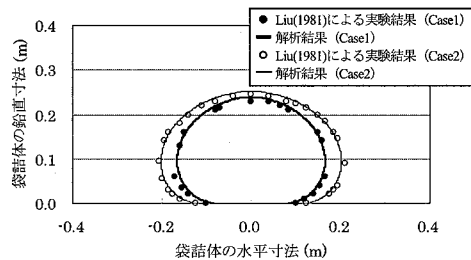
$$x = F(RAD) - \alpha; y = \int_0^\theta (F/RAD) \cos \theta d\theta \quad (5)$$

ここに、

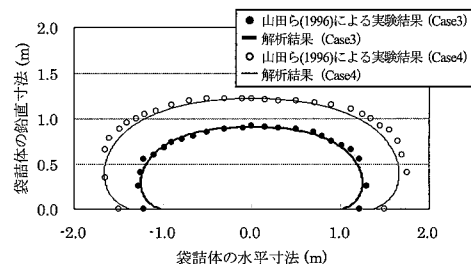
$$\alpha = p_0 / \sqrt{\gamma T}; F = \sqrt{T/\gamma} \quad (6)$$

表-1 数値解析手法の検証ケース

	袋周長 (m)	底面圧力 (kN/m ²)	中詰土密度 (g/cm ³)	充填率 (%)	中詰土
Case1	0.93	3.86	9.81	—	砂
Case2	1.04	3.44	9.81	—	砂
Case3	6.0	—	—	68	粘土
Case4	8.0	—	—	68	粘土



(1) Case 1およびCase2 (中詰土：砂のケース)



(2) Case 3およびCase4 (中詰土：粘土のケース)

図-5 数値解析モデルの検証

$$RAD = \sqrt{\alpha^2 + 4 \sin^2(\theta/2)} \quad (7)$$

本研究では、取り扱いが難しい式(3)の代わりに、 $x \approx 0$ の領域にCarroll(1994)の近似解析解を適用し、高精度でかつ、より簡便な数値解析手法を提案する。

この手法では、袋材の周長、中詰土密度、中詰土充填率（充填量）、頂部または底面圧力、袋詰体高さ、袋作用張力のうちのいずれか3つの条件が与えられるとき、袋詰体形状およびその他の諸量を解析することができる。例えば、袋材の周長、中詰土密度、頂部圧力（注入部圧力）の3条件が与えられれば、形状と同時に袋作用張力（必要強度）を評価できる。なお、周長と中詰土充填率が同一の条件では、同一の袋詰体形状が得られる。

砂と粘土をそれぞれ充填したLiu(1981)と山田ら(1996)の実験結果を用いて、本手法の妥当性の検証を行う。表-1に検証ケースを示すとともに、図-5に実験と解析結果の比較を示す。解析により実験結果が精度良く再現でき、提案する解析手法の妥当性を確認できる。

b) 投入方法（コンテナ工法）

投入方法を用いる場合、袋詰体の形状に関しては、袋材の周長と充填率（中詰土量）の条件が与えられたとき、同一の手法によって解析することができる。一方、袋の

必要強度については、中詰土の充填時に張力が発生する敷設注入方法と異なり、図-1に示す設置方法の中で、土運船開口時、水中落下時（浮力作用時）、着底衝撃時の3段階で有意な張力が作用する。各段階において作用する張力の評価手法を以下に示す。

・土運船開口時

土運船を開口して袋詰体を解放する際、土倉と袋材の間に働く摩擦力により袋詰体が一時的に保持されるため、袋材に張力が作用する。Bezuijenら(2004)は、作用張力を評価する式(8)を提案している。

$$T = 0.45W'/L \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 L 、 W' は袋詰体の長さ水中重量である。

・水中落下時

土運船上で袋材に中詰土を充填する際、中詰土の空隙、および中詰土と袋材の頂部の間に空気が混入する。袋詰体の落下過程では、このような空気が袋詰体の頂部に集まり浮力が作用するため、袋材に張力が作用する。作用張力は、次式を用いて評価できる(図-6)。

$$T = 0.5(1-R_f)H'B'(\gamma_w - \gamma_{air}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 R_f ：中詰土充填率、 H' 、 B' ：落下時の袋詰体の高さおよび幅、 γ_w 、 γ_{air} ：水と空気の単位体積重量である。

・着底衝撃時

着底の瞬間において、袋詰体の運動エネルギーが、袋材の伸張により吸収されるため、袋材に張力が作用する。den Adel(1996)は、これらのエネルギーの釣合いを定式化し、作用張力を評価する式(10)を提案している。このモデルでは、減衰パラメータを運動エネルギーに乗じて、摩擦等によるエネルギー損失効果を考慮する。一方、Bezuijen(2000)は、摩擦によるエネルギー損失効果を定式化し、より精度の高い式(11)のモデルを提案している。

$$\frac{1}{2}K\rho A v_b^2 = \frac{1}{2} \frac{S}{E'} T^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{1}{2}\rho A v_b^2 = \frac{1}{2} \frac{S}{E'} T^2 + P f_r b^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 K ：減衰パラメータ、 ρ ：中詰土密度、 v_b ：着底直前の速度、 A ：幅方向の袋詰体の断面積、 E' ：袋材の変形係数、 P ：着底の衝撃時に発生する圧力、 f_r ：袋材と海底地盤間の摩擦係数、 b ：着底の衝撃時に袋詰体が地盤に接する幅の1/2である。式(11)において、左辺は、着底直前の運動エネルギー、右辺1、2項は、袋材の伸長変形および海底地盤の摩擦による衝撃エネルギーの吸収をそれぞれ表現するものである。

(2) 袋詰体設置精度の検討

袋詰体を投入方法により設置する場合、投入した袋詰体は、海中の流れや傾斜した落下姿勢によって、水平移動する。水平移動による設置位置のずれは、可能な築堤形状を規定する。落下姿勢の影響を受けない物体の挙動

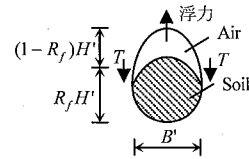


図-6 水中落下時における張力作用の模式図

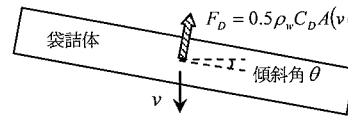


図-7 傾斜落下時において作用する抗力の模式図

に関しては、式(12)に示すような運動方程式を数値解析して評価することができる(例えば、熊谷ら, 2004)。

$$(M + \rho_w k_m V) \frac{d\vec{v}}{dt} = 0.5 \rho_w C_D A' (\vec{v}_w - \vec{v}) |\vec{v}_w - \vec{v}| + (M - \rho_w V) \vec{g} \quad (12)$$

ここに、 M ：袋詰体質量、 ρ_w ：流体密度、 k_m ：付加質量係数、 V ：袋詰体体積、 A' ：袋詰体の投影面積、 $\vec{v}_w$ 、 $\vec{v}$ ：流れおよび袋詰体速度ベクトルである。

また、傾斜した落下姿勢が及ぼす影響については、図-7に示す抗力ベクトルを用いて表現することができる。

本手法の適用性について、投入から着底までの水平移動量に関するBezuijenら(2004)の現地調査結果を用いて検証する。詳細は次章で述べるが、水深が深い条件では、傾斜落下の影響が卓越するため、解析において、傾斜落下の影響のみによる移動量を評価する。周長25m、長さ28.8mの袋に砂を中詰めした条件で投入した実験結果と解析結果の比較を図-8に示す。傾斜角を20°と仮定した解析により、現地調査結果を概ね表現できる。

(3) 耐波安定性検討

den Adel(1996)は、積層した袋詰体の耐波安定性に関する評価式として、式(13)を提案している。

$$H_s/(\Delta B) < 1 \quad ; \quad H_s/(\Delta D) < 1 \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 $\Delta = (\rho - \rho_w)/\rho_w$ 、 B および D は、それぞれ、袋詰体の幅と高さ、 H_s は前面有義波高である。

既往の研究で提案されているこのような簡便式には、堤体上の浅水変形や碎波の影響は考慮されていない。詳細な検討手法として、数値波動水路等による波浪変形解析を行い、作用外力を評価した上で、例えば、Kobayashi・Otta(1987)が示すような摩擦抵抗力との比較から、滑動等に対する安定検討を行う手法が提案できる。ただし、袋詰体の挙動は、捨石やブロックのような剛性の高い粒状体とは厳密には異なるため、破壊モードを確認した上で、より適切な検討を行うことが重要である。

(4) 変形予測および袋詰体の耐圧性検討

袋詰体の中詰土に軟弱な粘性土を用いる場合、袋詰体自身および背後の干潟造成部の荷重によって、圧密変形

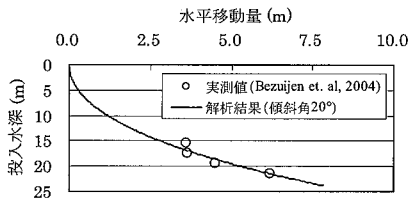


図-8 投入した袋詰体の水平移動量に関するモデルの検証

が生じる。特に、潜堤天端高を確保するために最適な袋詰体個数を検討するために、変形を予測することが重要である。未圧密状態を含む軟弱な粘性土の圧密変形を予測する方法として、異方性と主応力の回転に伴う塑性ひずみの発現を考慮できるように Cam-Clay モデルを拡張した Sekiguchi・Ohta(1977)の弾塑性または弾粘塑性構成則に基づく有限要素解析モデルの適用が提案できる(例えば、熊谷ら、2006)。なお、袋詰体を被覆する袋材は、引張強度を持つため、袋詰体の変形に対して影響を及ぼすことに留意する必要がある。簡便的には、袋材は、弾性体としてモデル化することができる。

また、変形予測と同時に、袋詰体の積み重ね時における袋材の破断に対する安全性(耐圧性)を検討する必要がある。Matsuoka・Liu(2006)によれば、袋詰積層体において、作用する鉛直応力に対する袋材の破断張力 T_f は、式(14)と(15)を用いて評価することができる。

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} K_p + 2c' \sqrt{K_p} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$c' = \frac{T_f}{BK_p^{1/2}} (BK_p/D - 1) \cos(2\delta) \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 c' は袋の強度が発揮する見かけの粘着力、 σ_{1f} 、 σ_{3f} は最大・最小主応力、 δ は主応力の傾斜角、 K_p は受働土圧係数である。式(14)では、砂を中詰めすることが想定されており、粘着力が考慮されていない。本研究では、粘着力 c_0 を持つ土を考慮できる次式に改良する。

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} K_p + 2(c_0 + c') \sqrt{K_p} \quad \dots\dots\dots (16)$$

3. 袋詰体を用いた干潟潜堤の適用性に関する検討

袋詰体を用いた干潟潜堤の適用性に関して、ケーススタディにより検討を行う。ケーススタディにおける基本条件を表-2に示す。含水比の高い軟弱な粘土を中詰めすることを想定し、中詰土の物性として、熊谷ら(2006)が使用した液性限界の1.3倍にあたる145%の含水比を持つ粘土(密度: 1.34 g/cm³)の物性を設定する。

(1) 袋詰体形状予測および袋材強度評価

2.(1)節で提案した解析手法を用いて、表-2に示す袋材の周長および充填率に対応する袋詰体形状の予測結果を図-9に示す。袋詰体を敷設注入方法により設置する場合、浮力作用の有無が異なる水中と陸上充填時で、袋の必要強度は、それぞれ2.8 kN/m、11.0 kN/mと評価される。

表-2 ケーススタディにおける基本条件

水深	築堤高	袋周長	袋長	袋材容積	充填率
8.0m	7.0m	15.7m	15.0m	294.5m ³	55%

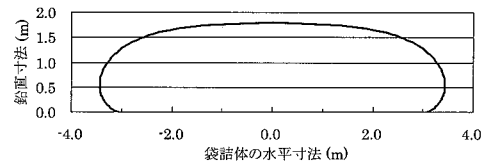


図-9 袋詰体予測形状

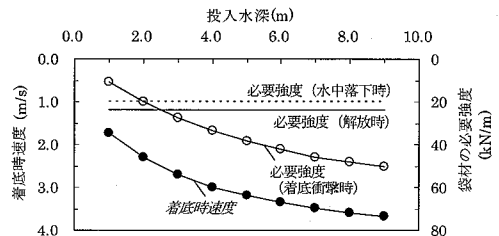


図-10 着底時速度および袋材必要強度解析結果

一方、投入方法を用いて設置する場合、張力が作用する各段階に対し、式(9)、(10)、(12)を用いて、袋材の必要強度を評価できる。表-2の条件に対して、袋詰体の着底時速度と、袋の必要強度を解析した結果を図-10に示す。飽和状態にある粘土を中詰めした場合は、袋詰体内の空気含有量は少ないと考えられ、水中落下時の検討では、空気含有量を中詰土の充填率によらず、袋容積の20%に設定した。解析の結果、水深が深くなるに従って落下速度が増大し、袋の必要強度は、着底時に破断しない条件で決まることがわかる。また、敷設注入方法に比べて、強い袋材の強度を求められることが明らかになった。

(2) 袋詰体設置精度の検討

投入方法適用時の袋詰体の移動量を2.(2)節で提案した手法により評価する。潮流と傾斜落下の各影響を比較するため、潮流条件として0.25、0.5 m/sを設定する。落下時の傾斜角は、2.(2)節で現地再現性が確認された20°に設定する。解析結果を図-11に示すように、水深が深くなるに従い、傾斜落下の影響が卓越することがわかる。

(3) 変形予測および袋詰体の耐圧性検討

Sekiguchi・Ohta(1977)の弾塑性構成則に基づく有限要素解析により、干潟造成完了までの圧密変形解析を行う。使用する物性パラメータは、想定する粘土が同一である熊谷ら(2006)の研究で設定されているものを援用する。解析領域および築堤と干潟造成の工程を図-12に示す。

ここで、袋詰体による築堤では、隣接する袋間の空隙が、中詰土内の過剰間隙圧を解放する排水路になることに留意する。このような排水路の有無に関する比較解析を行い、袋間の空隙が発揮する圧密促進効果を検証する。

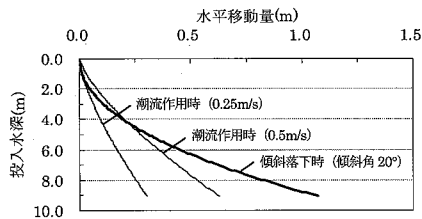


図-11 水平移動量解析結果

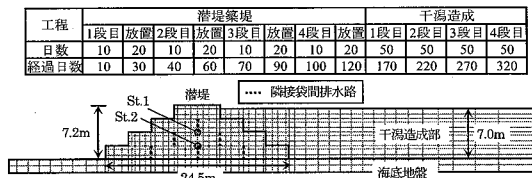


図-12 有限要素解析領域および干潟造成工程

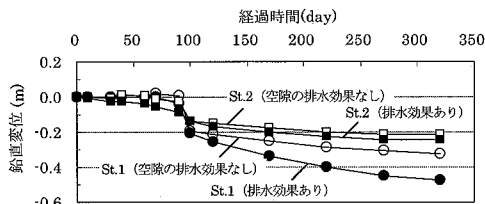


図-13 圧密沈下解析結果 (袋間の空隙が発揮する効果の検証)

代表位置 (St.1, 2) における沈下予測結果を図-13に示すように、袋間の空隙の影響により圧密が有意に促進されることが明らかになった。圧密沈下の促進により、袋詰体をより多く設置できる、すなわち、浚渫土をより有効利用できる可能性が示唆される。

また、圧密に伴って、間隙水が排水され、中詰土は、有効応力が増加するとともに、強度(粘着力)が増加する。中詰土の強度増加を考慮し、式(16)を用いて、特に、不安定になりやすい法先部における袋材の必要強度を評価する。なお、中詰土の強度増加は、鉛直有効応力に対する強度増加率を一般的な0.3に設定するとともに、間隙水の排水に伴う有効応力の増加を解析することにより、評価できる。袋間の空隙の排水効果の有無の条件で、法先部における袋の必要強度を評価すると、それぞれ9.1 kN/m, 11.2 kN/mとなる。空隙の圧密促進効果による中詰土の強度増加に伴い、袋材の必要強度は有意に低減される。すなわち、袋詰体の耐圧性が早期に得られ、築堤の安定性が確保される効果が現れることがわかる。

4. おわりに

本研究では、浚渫土を有効活用する人工干潟の造成に向けて、浚渫土を中詰める袋詰体を用いた潜堤に関する設計手法を提案した。また、築堤開始から干潟造成完

了までの期間を対象にしたケーススタディにより、①袋詰体設置時の形状と袋材の必要強度、②投入方法適用時の設置精度、③圧密変形、および圧密に伴う中詰土の強度増加を考慮した袋の安定性に関して、定量的な評価を行い、袋詰体潜堤の適用性に関する検討を行った。

参考文献

- 熊谷隆宏ら(2004):ブロック直投方式を用いた人工海底山脈築造に関するブロックの落下挙動および拡散特性に関する研究, 第51回, 海工論文集, pp. 801-805.
- 熊谷隆宏・上田正樹・池野勝哉・渡部要一・佐々真志(2006):潮間帯における粘性土地盤の圧密特性に関する研究, 第53回, 海工論文集, pp. 436-440.
- 山田哲也・土橋聖賢・高橋弘樹・西村 淳(1996):浚渫土の袋詰め脱水処理に関する実物大実験(その1)-大型袋の注入実験-, 地盤工学研究発表会, pp. 2535-2536.
- Adel H. den, Hendrikse C.S.H. and Pilarczyk K.W. (1996): Design and application of geotubes and geotainers, *Proc. EuroGeo 1. 30-9/2-10*, Maastricht, The Netherlands, pp. 925-931.
- Bezuijen A, Adel, H. den, Groot M.B. and Pilarczyk K.W. (2000): Research on geotainers and its application in practice, *Proc. 27th ICCE*, pp. 2331-2341.
- Bezuijen A., Groot M.B. de, Breteler M.K. and Berendes E. (2004): Placing accuracy and stability of geotainers, *Proc. of the Third European Geosynthetics Conference*, Munich, Germany, A4, pp. 1-6.
- Carroll R.P. (1994): Submerged geotextile flexible forms using non-circular cylindrical shapes, *Geotech. Fabrics Rep., IFAI, St. Paul, MN*, 12(8), 4-15.
- Ghazali N.H.M, Kam S. and Yee T.W. (2006): Geotextile tubes for protection of mangrove coast at Tanjung Piai Johor National Park, Malaysia, *Geosynthetics, Edited Kuwano, J. and Koseki, J.*, Millpress, Rotterdam, pp. 773-776.
- Heerten G, Jackson A., Restall S. and Saathoff F. (2000): New Geotextile Developments with Mechanically-Bonded Nonwoven Sand Containers as Coastal Structures, *Proc. 27th ICCE*, pp. 2342-2355.
- Kobayashi N. and Otta A.K. (1987): Hydraulic stability analysis of armor units, *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 113, No. 2, Mar./Apr., pp. 171-186.
- Leshchinsky D., Leshchinsky O., Ling H. I. and Gilbert P. A. (1996): Geosynthetic tube for confining pressurized slurry, *J. of Geotechnical Eng.*, ASCE, pp. 682-690.
- Liu (1981) G.S. (1981): Design criteria of sand sausages for beach defenses, *The 19th Congr. of the Int. Assn. for Hydr. Res.*, New Delhi, India, pp. 123-131.
- Matsuoka H. and Liu S. (2006): A New Earth Reinforcement Method using Soilbags, Taylor & Francis, 111p.
- McClarty A, Cross J., James G.M. and Gilbert L. (2006): Design and construction of coastal erosion protection groynes using geotainers, Langebaan, South Africa, *Geosynthetics, Edited Kuwano, J. and Koseki, J.*, Millpress, Rotterdam, pp. 765-768.
- Oh Y.I. and Shin E.C. (2006): Application of submerged geotextile for erosion prevention in east coast of Korea, *Geosynthetics, Edited Kuwano, J. and Koseki, J.*, Millpress, Rotterdam, pp. 757-760.
- Sekiguchi H. and Ohta H. (1977): Induced Anisotropy and Time Dependency in Clays, *Proc. of the 9th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng. Specialty Session 9*, Tokyo, pp. 229-238.