

袋詰め工の袋材に働く張力に関する実物大模型実験

Large scale Experiment on the Tension acting on Geotextile Bags

関口陽高¹・諏訪義雄²・野口賢二³・渡邊国広⁴・嶋田宏⁵・三浦健吾⁶

Yoko SEKIGUCHI, Yoshio SUWA, Kenji NOGUCHI, Kunihiro WATANABE,

Hiroshi SHIMADA and Kengo MIURA

Recently, the use of sandbags made of a fiber-containing material has been examined for coastal protection. When the bag stuff worker is applied on an actual site, it is necessary to check the tension that acts on the bag material. In the present study, the tension acting on the sandbag was determined by performing a large-scale experiment. Moreover, the tension that acted on the bag material at that time was checked in reproducing the deformed state of by waves with the real-size model.

1. はじめに

海岸保全のための施設はコンクリート構造物が主流であるが、近年、環境・景観の配慮や工期短縮が可能な工法が求められている。そこで筆者らは、繊維素材を用いた海岸保全のために利用可能な砂の袋詰め工の開発を進めている。袋詰め工とは、繊維素材を用いた袋材に現地海浜材料やそれと同等の砂礫を詰めて、海岸保全を目的とした施設である。海外では、突堤や護岸として使用実績が数多く報告されている。

砂の袋詰め工に関する研究では、袋材に関して Namias(1985)が充填時の作用張力を算出している。さらに Plaut・Suherman(1998)は、水中や地盤が沈下した状態における袋体に作用する張力や形状について計算手法を示している。但し上記に示した張力算定については、以下の仮定で計算している。1)袋材の周方向において等分布の応力が作用している。2)中詰め材は、流体と仮定し砂礫の内部摩擦角による内圧の軽減は考慮しない。3)水平地盤上に袋体を設置するものとし、傾斜地盤上の延長方向の荷重の偏心は考慮しないものとしている。本研究ではこれらの仮定条件で行った計算値と袋詰め工を海岸で適用する場合を想定した模型実験により張力実測値との比較検証をした。

砂袋体の安定性については平松・佐藤(2010)により碎波帯内で使用した場合の袋体の最適な形状についての検討や侵

食緩和機能について報告している。また、渡辺ら(2011)は縮小水理模型実験により汀線付近に袋体を設置した場合の波浪による移動・変形について報告している。そこで袋体の曲げ変形を受けた後に袋体の滑動・転動が発生することを報告している。また、袋体の移動が発生しない場合でも波浪による袋体の海側先端の浮き上がりによる変形を確認している。これらの波浪による袋体変形で袋材が破損しないためにも作用張力について確認しておく必要がある。しかし縮小水理模型実験では袋材に作用する張力を計測することが困難なことから、袋材強度や袋体剛性の相似性についても未解明な部分が多く残っている。そこで本研究では実物大の袋体模型を製作し袋材張力を測定することで実際に作用している応力分布を確認した。波力等により変形する場合を実験で再現して、変形による袋材の張力の変化について検討する。また、縮小模型実験では再現が困難な中詰め材の粒径の違いによる変形挙動への影響について検討した。最後にこれらの結果を総合して海岸保全のために利用する砂の袋詰め工に求められる素材強度について考察した。

2. 実物大模型実験

(1) 実物大模型の製作

本実験で使用する袋詰め工の試験体は $\phi 0.95$ m、長さ 3.0 m (容量 2.1 m³) の円筒形状とした。袋詰め工の中では小型形状で海外では砂浜や砂丘の保護工として使用している。安定性については Oumeraci ら(2003)が砂丘法面に袋体を積層した条件で水理模型実験を行い袋体の幅と安定係数 N_s の関係を示している。この式によれば本実験の袋体は波高 2 m 周期 7 s に耐えられるサイズである。

実験は、突堤型の構造物を想定して 20 分の 1 の勾配がついたコンクリート床面上に袋体を設置して行った。袋素材

1	正会員	国土技術政策総合研究所	交流研究員
2	正会員	国土技術政策総合研究所	室長
3	正会員	国土技術政策総合研究所	主任研究官
4	正会員	博(農)	国土技術政策総合研究所 研究官
5	正会員	パシフィックコンサルタンツ(株)	技術部長
6	非会員	パシフィックコンサルタンツ(株)	

は盛土補強材や吸い出し防止材に使用されているポリエステル織布(引張強度 183 kN/m, 伸び率 15%)を用いた。中詰め材として粗砂(1~2 mm), 中礫(10~15 mm)を充填した。また充填率は、70%, 80%, 限界最大充填の3段階に変化させて袋体を6体作成した(表-1)。充填率とは、袋体断面が真円とした場合の面積に対する実際の断面積の比率である。充填率の計測方法は、外形寸法の測定や充填材の重量と空隙率から体積を算出して求めた。また、中詰め材の単位体積重量は中礫 17.1 kN/m³, 粗砂 16.4 kN/m³であった。袋体の製作方法は、海外では海底の砂礫を水中ポンプで袋内に圧送して行うのが一般的となっており、今回は実験条件の関係から、水を貯めた水槽に中詰め材を投入して流動化させた状態でポンプにより圧送充填した。中礫の充填は、袋材を型枠に固定して、ホッパーを用いて中詰め材を水で流化させて投入した。充填方法について図-1に示す。

袋体の変形状態は、クレーンを用いて袋体の端部を吊って上方に鉛直変位させた状態と水平方向に変位させることで波浪による変形状態を再現した(写真-1)。変形量は、鉛直方向と水平方向それぞれ3段階で変化させた(表-1)。上方変形では、袋体が波浪により先端が浮き上がることを想定して、袋体の厚さ(約 50 cm)まで変化させた。袋体の長さの半分が地盤から離れた状態となっており、袋体の滑動が起きやすい条件を再現した。水平変形では、波浪により袋体が曲げ変形を受けて滑動・転動することを想定して、最大変位量は袋体全体が滑動するまでとした。また、袋体を吊上げて設置する施工を想定して、吊上げた状態で作用する張力についても検証した。吊上げ方法は、繊維ベルトを用いて3点吊りで行った。

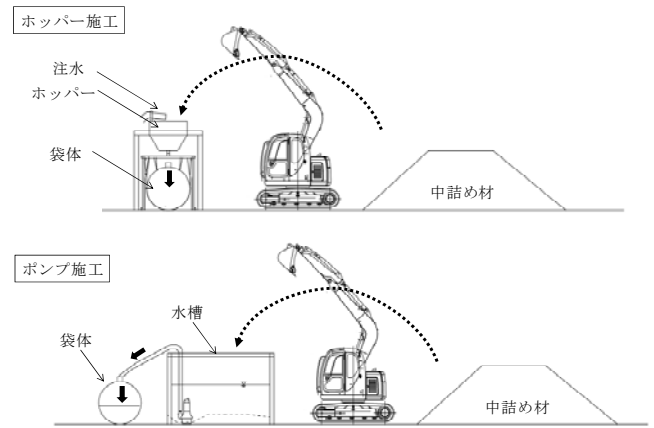


図-1 袋詰め施工方法



写真-1 試験体の実験状況

表-1 試験体の充填量と変位量

ケース	中詰め材	充填率	上方変位(cm)	側方変位(cm)
case1	中礫	67%	7	21
			30	50
			55	71
case2		71%	6	28
			23	53
			45	79
case3	95%	8	22	
		26	48	
		41	78	
case4	粗砂	76%	6	22
			23	56
			47	74
case5		86%	9	17
			28	43
			53	68
case6	100%	7	22	
		27	50	
		48	75	

(2) 計測方法

袋材に作用する張力を算定するため、袋材のひずみ量を測定した。ひずみ量を測定する位置は、袋材の側面3箇所及び天端、底面の計5箇所とし、延長方向には両端部と中央部の3側線で合計12箇所とした(図-2)。張力は、延長方向と周長方向の2方向の張力を測定した。また、袋体の内部応力と袋材の張力の関係を検証するため、土圧計を袋体の両端部と中央部の底面3箇所に設置した。鉛直変位及び水平変位の作用外力をロードセルによって計測した。

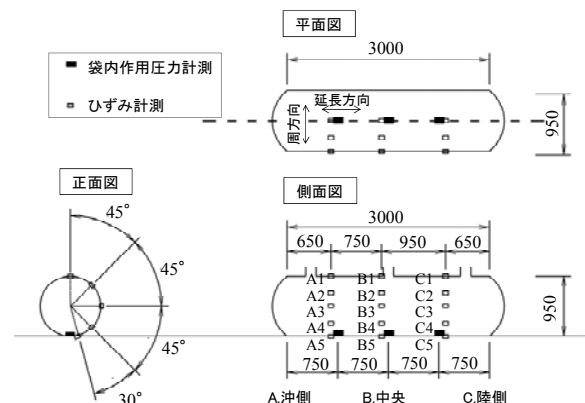


図-2 計測器設置位置 (mm 単位)

張力の算定方法には、事前に引張試験機により袋材のひずみ量と張力の測定をして、その結果から導いた関係式を用いた。試験方法については、日本工業規格に記載されたジオテキスタイル試験方法(JIS L 1908)に準拠して行った。試験片は 30 mm 幅とし、引張り試験の 3 回の平均値から近似曲線を算出した。ひずみ 7% の付近で、傾きが変化していることからひずみ 7% を境界に 2 式の近似曲線を算出した。ひずみ量の測定方法はノギスを用いて袋材の点間測定により行った。

3. 袋材の作用張力の検証

(1) 充填完了時の張力計算

充填時の周方向張力の算出方法について Namias(1985)が示した簡易数値計算の手法を用いて充填完了時の張力の計算を行った。下記に袋材の張力の計算手法について示す。また、計算模式図を図-3 に示す。袋内の作用圧力と袋材の張力の釣り合いから、式(1)が成り立つ。また、袋材の微小片の座標を接線の角度から求めた式(2)で示される。袋に作用する圧力と袋の底面に作用する圧力をそれぞれ式(3), (4)に示す。

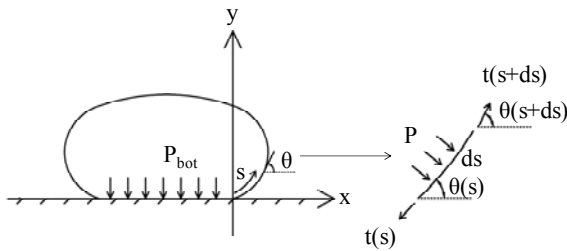


図-3 袋体の作用応力図(Plaut・Suherman, 1998)

$$t \frac{d\theta}{ds} = P \quad (1)$$

$$\frac{dx}{ds} = \cos \theta, \frac{dy}{ds} = \sin \theta \quad (2)$$

$$P = P_{bot} - y \quad (3)$$

$$P_{bot} = h - P_0 \quad (4)$$

ここで、 t は作用張力、 θ は袋材の接線角度、 s は原点からの袋材の長さ、 P は袋体に作用する圧力、 P_{bot} は袋体の底面圧力、 x, y は袋材の座標を示す。 h, P_0 はそれぞれ充填圧、大気圧とする。 $t, s, P, P_{bot}, x, y, h, P_0$ は無次元とする。上記の式から近似解析法を用いて式(5)を導く。式(5)より袋材に作用する張力 t を算出する。

$$t = \frac{P_{bot}^2}{4} k^2 \quad (5)$$

$$K(k) - E(k) = \frac{1}{2P_{bot}} \quad (6)$$

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}} d\theta \quad (7)$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad (8)$$

ここで、 k は係数で、(6)式より数値計算により算出する。

$K(k), E(k)$ は、 k の関数とする。

また、延長方向の張力は、Lawson(2008)が数値解析により周方向の張力の 63% が延長方向に作用することを報告している。張力に関する検討を以上に示した式を用いて行った。

(2) 充填完了時の張力分布

図-4 に、充填完了時の袋高さ毎の周方向張力分布を示す。張力は C 陸側から A 沖側にかけて 1/20 で傾斜している状態で計測した値を示す。図-5 に充填率と周方向の張力関係図を示す。また、同様に延長方向について図-6, 7 に示す。

周方向の張力は、天端付近に高い張力が発生している傾向が確認された。計算式では袋材の作用張力が均等にかかる想定しているが、本実験で製作した袋体は充填後の脱水により中詰材として残るのは若干の水分を含んだ中礫もしくは粗砂のみであった。そのため、充填率が 100% 以下の場合には天端部分に内圧がかからない一方で、袋体側面で中詰材がはらみを発生させるために天端部分の袋材が両側面に引っ張られた結果と考えられる。また、中詰め材が粗砂の場合、計算値の 2 倍で収まっているが、中礫の場合、計算値の 10 倍の張力が作用していた。

延長方向では、側面部で張力が高い傾向が確認されたが周方向の張力に比べて最大張力が低い傾向にあった。計算値と比較した場合、粗砂では計算値に収まっており、中礫では計算値の 3 倍の張力が作用していた。

計算による張力結果は、中詰め材の内部摩擦角を考慮しておらず流体として計算しているため、実験値よりも大きな張力が算出されると予測されたが、周方向と延長方向の両方で中礫を詰めた場合に実験値が計算値を超える傾向があった。原因として中礫では、粗砂のように均等に充填されず、天端高に凹凸が発生していたことから袋内で充填度に片寄りが発生し、袋材に大きな張力が作用したと考える。

傾斜地盤上に設置したことによる袋材の張力への影響については、A 沖側が C 陸側の張力より大きくなる傾向は確認されなかった。1/20 の緩い勾配では、張力への影響は小さく充填量のばらつきのほうが張力に大きな影響を与えると考えられる。

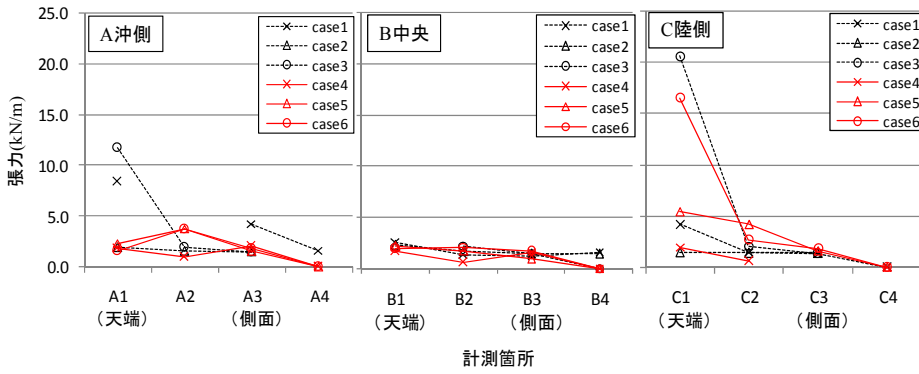


図-4 充填完了時における袋材に作用する周方向張力分布図

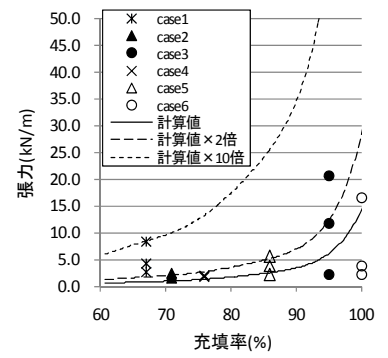


図-5 充填率と周方向張力

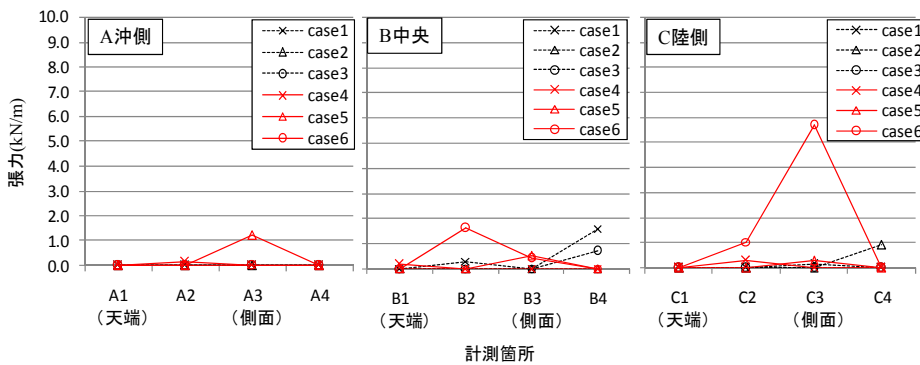


図-6 充填完了時における袋材に作用する延長方向の張力分布

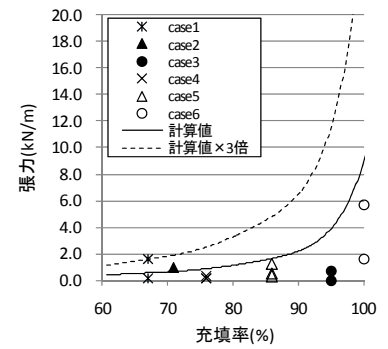


図-7 充填率と延長方向張力

(3) イベント毎（変形，吊上げ時）の張力

波浪による変形を想定した上方変形と側方変形時に作用する張力を検証した。変形の影響を受けた B 中央部の周方向及び延長方向に作用する張力の変化をそれぞれ図-8, 9に示した。張力は、袋高さ方向の張力のうち最大値を採用した。延長方向の張力は、変形による作用力を受けて増加すると予測されたが、今回の計測結果で変形による張力の増加傾向は case4 以外では確認されなかった。ひずみの計測が出来なかった箇所が多く、十分なデータが取れなかったためと考える。延長方向は曲げ変形による応力を直接受けるため再度検討する必要がある。直接外力の影響を受けない周方向の張力において case4-6 の粗砂を詰めた袋体の変形で充填時の 3 倍の張力が確認された。これは粗砂を詰めた袋体は剛性が低く、変形を受けたことにより中詰め材がせん断力を受けて、体積膨張を引き起こしたと考える。また、吊上げ時に関しては、周方向張力で最大 19.5 kN/m、延長方向張力で 30.0 kN/m 作用していた。吊りベルトと計測箇所が近い位置にあったことから、ベルトによる局所的な荷重が作用したと考えられる。今回は、5 cm 幅の繊維ベルトで 3 点吊りであったが、吊り方によっては袋材に局所的な引張力が作用しないように袋体の吊り方を工夫して作用張力を低下させたり、袋体を設置する場所で製作することで吊上げない施工方法を検討する必要がある。

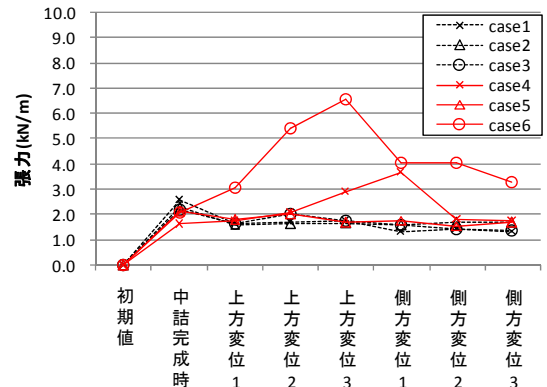


図-8 イベント時の袋材に作用する周方向張力

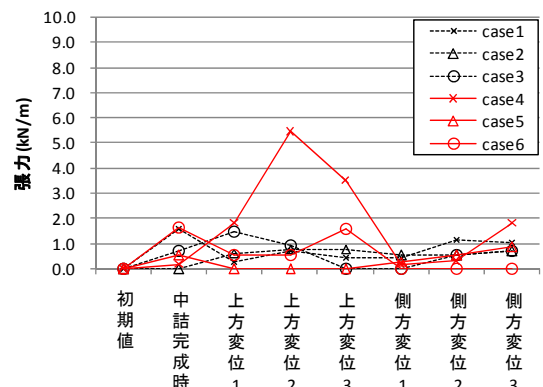


図-9 イベント時の袋材に作用する延長方向張力

(4) 外力と張力の関係

袋体の変形時に作用した鉛直上向きの外力と袋材に作用する張力の関係を図-10に示す。延長方向に比べて張力の増加が大きかった周方向の張力で検証した。中詰め材が粗砂の Case4-6 の場合は、鉛直上向きの外力 12.6 kN-18.7 kN に対して、周方向の張力が 1.8 kN/m-6.6 kN/m の張力が作用しており増加傾向にあった。一方、図-11の水平変形時においては外力の増加に伴う張力の増加は確認されなかった。粗砂では中礫に比べて袋体の剛性が低く上方変形の場合、中央部で折れ曲がる現象が確認された。浮き上り部が大きくなるほど折れ曲げ部に荷重が集中し張力が増加したと考えられる。これらの結果から、波浪条件が厳しくなるほど袋材に作用する外力が高まる可能性がある。渡辺ら(2011)による水理模型実験で汀線付近に設置した袋体が受ける流体力として、慣性力、抗力、揚力が働くことで、曲げ変形が発生することが報告されている。本実験では、気中での擬似検証であったため、実際の波浪による袋体に作用する外力について確認する必要がある。水理模型実験等により袋体周辺の流速場と作用する外力に関する関係についての検証を今後の検討課題としたい。

4. おわりに

袋詰め工を実現場で使用するにあたり、袋材の選定に関して考慮すべき点について、本研究でわかったことを以下にまとめた。

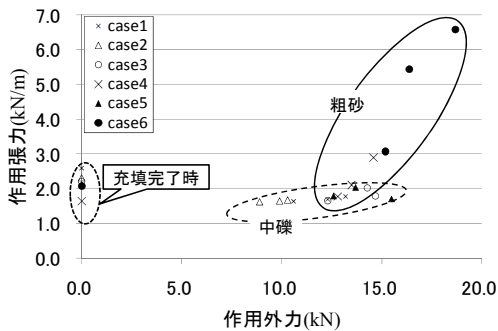


図-10 袋体への作用外力（上方変形）と張力

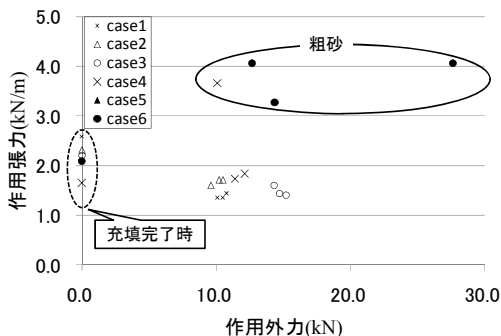


図-11 袋体への作用外力（水平変形）と張力

1) 今回の実験から袋内で充填度に不均等が発生するため応力集中が起こり、局部的に張力が計算値を起こることが確認された。特に中礫を詰めた場合は、応力集中が大きくなる可能性がある。計算による張力は充填率、中詰め材密度、ポンプ圧により決定されるが、袋材の必要強度を決める際に中詰め材の種類とそれに伴う充填度の不均等の影響について考慮する必要がある。

2) 袋体を設置する際の吊上げ時において、吊り上げ方法によっては袋体重量と同等の張力が発生する。充填時の張力だけでなく、袋体の重量や移設方法を踏まえて袋材強度決定する必要がある。

3) 変形時の作用張力は、粗砂を充填した袋体で張力が充填時より大きくなる可能性がある。また、上方に変形を引き起こすような波浪条件では、外力が大きくなるほど張力が比例して増加する可能性がある。一方、中礫の場合、袋体の剛性が高く変形による張力増加は小さい傾向にあった。袋体が移動しない場合でも、波浪による浮き上りなどの変形により張力の増加する可能性があり、袋材の必要強度の設計時に考慮する必要がある。今後、波浪条件と袋体への応力作用関係を検討する必要がある。

また、本研究では袋材が砂礫による摩耗損傷や紫外線による劣化を受けていない状態での結果であるので、袋体の供用期間に応じて、張力の安全率を別途考慮する必要がある。上記の袋材の劣化については、現在研究中有るので今後報告していく予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土技術政策総合研究所によって公募された「海岸保全における砂袋詰め工の性能評価技術に関する研究」の共同研究者である前田工織(株)、三井化学産資(株)には、袋詰め工の試験体の施工に関するご協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

平松遥奈・佐藤慎司 (2010): サンドバック潜堤の安定性と海岸侵食緩和機能, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp656-660.

渡辺国広・諏訪義雄・高田保彦・土橋和敬・弘中淳市・梶原幸治・野口賢二・関口陽高 (2011): 袋詰め工の現地試験施工に向けた水理模型実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 67. (掲載予定)

Lawson,C.R.(2008): Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering, Geosynthetics International, 15, No.6, pp.384-427.

Namias,V.(1985): Load-supporting fluid-filled cylindrical membranes, J.Appl.Mech., Vol.52(4), pp.913-918.

Oumeraci,H, M.Hinz, M.Bleck and A.Kortenhaus.(2003):Sand-filled Geotextile Containers for Shore Protection,Proceedings Coastal Structures,Portland,Oregon,USA.15pp.

Plaut R.H. and S. Suheran.(1998): Two-dimensional Analysis of Geosynthetic Tubes, Acta Mechanica.,129, pp.207-218.