サンドバックの変形および波浪作用時に 袋材に働く張力の特性

渡辺 国広¹・野口 賢二¹・諏訪 義雄¹・関口 陽高²・嶋田 宏³・
江島 敬三⁴・石河 雅典⁵・永澤 豪³

¹正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)
E-mail: watanabe-k92tc@nilim.go.jp, suwa-y22aa@nilim.go.jp, noguchi-k92fu@nilim.go.jp

²正会員 元国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室 (前田工織株式会社)
(〒103-0005 東京都中央区久松町9番9号SCI日本橋ビル5F)

E-mail: sekiguchi@mdk.co.jp

³正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒206-8550 東京都多摩市関戸一丁目7番地5)
E-mail: hiroshi.shimada@ss.pacific.co.jp, tsuyoshi.nagasawa@ss.pacific.co.jp

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 筑波実験場 (〒300-4204 茨城県つくば市作谷642-1)
E-mail: keizou.ejima@tk.pacific.co.jp

⁵正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社
(〒541-0052 大阪市中央区安土町二丁目3番13号大阪国際ビルディング)

E-mail: masanori.ishikawa@os.pacific.co.jp

サンドバックが地形変化に追従して変形した時および波浪を受けて揺動した時にサンドバック袋材に働く張力の特性を明らかにするため、実物大実験および1/10スケールの縮小模型実験を実施した。完成時に計測された長手方向の相対的な歪みは理論値よりも高く、この違いは理論的な算定方法に袋材の伸縮が考慮されていないことに起因すると考えられた。サンドバックを変位させた時には、長手方向の歪みが増大することが確認されたものの、側方変位では変位の増加に比べて歪みの増加は停滞していた。縮小模型実験では波浪作用によって目に見えるサンドバックの変形は起こらなかったものの、波浪作用に対応した張力変動が計測された。これらの結果にもとづいてサンドバックに用いる袋材の張力を設定する際に望ましい安全率の考え方について考察した。

Key Words : geosynthetics, tensile force, real scale experiment, tank experiment, wave attack

1. 研究の背景と目的

日本の海岸事業では最近、海岸保全事業におけるコスト削減や景観の向上に対する要求から、サンドバックや袋詰め玉石等のコンクリート以外の素材も利用されるようになってきた¹⁾。サンドバックは設置場所に多少の地形変化が起きた場合でも追従して機能を発揮できる点が利点の一つであるため、使用する袋材を選定する際には、変形時に働く張力の増加を見込む必要がある。海外では静置時の張力に対して安全率を掛け合わせる方法がとられているが²⁾、経年劣化などの他の要因も含んだ値として提示されているのみで、その内訳は明示されていない。日本の海岸における適用性の検討や今後の技術開発のためにも、現地海岸で想定される現象とそれらがサンドバックの安全性に与える影響について要素毎に明らかにし

ておく必要がある。紫外線等の気象要因による劣化³⁾や摩耗による劣化⁴⁾については、筆者らが既に日本の海岸における検討結果を報告している。本研究では、サンドバックが地形変化に追従して変形した場合や波を受けて揺動した時に袋材に働く張力を明らかにし、サンドバック袋材の強度設定について検討することを目的とした。

2. 実験方法

(1) 実物大実験

サンドバックの波浪安定性や海岸保全施設としての効果については、サンドバックが剛体として挙動するとみなせばコンクリートブロックとほぼ同じように実験が可能であるので、既に日本でも縮小模型実験が実施されて

表-1 サンドバックの中詰め材と充填率の組み合わせ

ケース	中詰め材	充填率(%)
C1	粗砂 (中央粒径1~2mm)	64
C2		70
C3		86
C4	細砂 (中央粒径0.4mm)	66
C5		70
C6		75

図-1 サンドバックの製作状況

図-2 袋材の歪み量計測に使用したテープ

図-3 歪み計測および土圧計の配置

図-4 上方変位(1)および側方変位(2)の状況

いる。しかし本研究で対象とする張力に関しては、縮小模型にした場合の袋材のひずみ特性や強度についての相似則の扱いが確立されていない。そのため本研究ではまず、実物大のサンドバックを製作して実験した。

a) サンドバックの形状、製作方法

サンドバックの形状は周長3m、長さ15mのチューブ型とし、袋材には厚さ0.9mmのポリエステル製の汎用土

木シートT-500(前田工織株式会社)を用いた。20分の1勾配のコンクリート床面上で中詰め材と充填率を変えたものを全部で6体製作した(表-1)。本稿では勾配の下手を沖側、上手を陸側と呼ぶ。表-1における充填率とは、サンドバックの断面形状が真円となった場合(体積10.6 m³)を充填率100%とした場合に、これに対する中詰め材の量である。中詰め材の量は充填後に計測したサンドバックの形状から推定した。中詰め材は水と混合させた状態でサンドポンプ(20L/s)によって充填した(図-1)。

b) 計測方法

袋材に働く張力は、長さ70mm、幅30mmの塩化ビニル製テープを袋材の表面に貼り付けてテープ上に描かれた測定線の長さを計測して、元の長さ(50mm)からの伸び率を歪み量として求める方法(以下、点間測定)で把握した(図-2)。テープの両端1cmを瞬間接着剤で貼り付けたが、湾曲する袋材の変位に対して測定線が追従するように測定線範囲も粘着性のあるものを使用した。なお、このテープは予備実験によって5種類の候補の中から、歪み、耐水性、戻り等の特性を比較して選定されたものである。

点間測定は沖側と岸側、中間部の3測線において、天端から底面までの5箇所、各箇所に縦方向と横方向の2枚のシートを貼り付けて計測した。この3測線の底面には土圧計を設置し、土圧を連続計測した(図-3)。

計測された歪み量を張力に換算出来るようにするため、予備実験として同じ袋材の縦方向と横方向それぞれ3回ずつの引張試験(JIS L 1908:2000)も実施した。

c) サンドバックの変形方法

重機によってサンドバックの先端を上方および側方に変位させることで、仮想的な変形状態を作り出した(図-4)。上方変位は局所的な海浜面の地盤高低下によってサンドバックが鉛直方向に変位した状況を、側方変位は端部等が局所的に波浪等に押されて滑動したことで変位した状況を模している。変位量は上方変位、側方変位ともに各サンドバックにつき3段階とし、重機のアームにはロードセルを取り付けて、変形に要した力も計測した。

(2) 縮小模型実験

a) 縮小模型の概要

実物大実験をおこなったチューブ型サンドバックの1/10縮尺の模型(周長0.3m、長さ1.5m)を充填率80%で製作した。袋材の厚さは1/10縮尺では0.09mmとなるが、条件を満たす素材の入手が困難であったため、実物大実験と同じ袋材を使用した。中詰め材もこの袋材の編み目から流出しないサイズとして実物大実験でも用いた中央粒径0.4mm程度の細砂を使用した。

模型の表面には、沖側端から50mmの位置に高さを変えて3箇所、中間部に同じく3箇所、各箇所につき縦歪み

図-5 縮小模型実験における計測機器の配置

表-2 水理模型実験のケース（実験スケール）

ケース	実験床	波高(m)	周期(s)	水深(m)
C7	移動床	0.3	3.0	0.0
C8				0.2
C9				0.0
C10	固定床	0.6	4.0	0.0
C11				0.2
C12				0.0

図-6 袋材に働く張力とひずみの関係

図-7 完成時の袋材に働く歪み

用と横歪み用の歪みゲージ2個を取り付けた（図-5）。また、沖側端から50mmの位置、中間部、陸側端から50mmの位置の計3箇所の底面に土圧計を設置した。また、沖側端部の上面、底面、前面および岸側端部の後面には波圧計も取り付けした。実験時には側面からのビデオ撮影を行い、PIV解析による流速の推定も行った。

b) 水理模型実験の条件

国土技術政策総合研究所所有の漂砂実験水路（幅2m、長さ140m、深さ5m）に1/20勾配の移動床を製作してサンドバック模型を設置し、造波安定後の規則波を100波作用させた時のサンドバック袋材の歪みの変化を計測した。実験床の状態と波浪および潮位条件を変えた6ケースで

図-8 側方変位量と長手方向の歪みの関係

図-9 側方変位量と周長方向の歪みの関係（天端部）

計測をおこなった（表-2）。ケースC11とC12については移動床の上にベニヤ板を敷いて簡易的に固定床とした。波浪条件は実スケールで発生し得る波高・周期の中で、波形勾配がほぼ同一となるように2通り設定した。水深0.0mとは、模型の沖側端の底面が水面となる水位であり、水深0.2mとは、模型の陸側端部が水没する水位である。

3. 実験結果

(1) 実物大実験

a) 袋材の引張特性

予備実験として実施した引張試験の結果、実験に用いた袋材は、歪みが小さいときには微少な張力の増加に対しても比較的敏感に反応して歪みが増大するのに対して、歪みがある程度以上となると、張力の増大に対する感度が鈍くなる性質を持ち、その変曲点は縦方向と横方向で異なっていた（図-6）。

b) 静置時の歪み分布

静置時の歪みは、長手方向が最大でも1.9%であったのに対し、周長方向では最大で3.9%に達し、全体的に周長方向の方が歪みが大きかった（図-7）。計測箇所別では周長方向については天端付近（図-3中の計測点1）で歪みが大きくなる傾向がうかがえたが、長手方向については計測点の高さによる違いは見られなかった。充填率および中詰め材の異なるケース間では歪みの大小関係に明瞭な傾向は見られなかった。なお、底面付近の計測点（図-3中の計測点4、5）はコンクリート床に接地して

図-10 上方変位量と長手方向の歪みの関係

いる影響で計測できない場合がほとんどであった。

c) 側方変位時の歪み分布

側方へ変位させた時の長手方向の歪みは天端から側面にかけての3箇所ですべて大幅に増大し、計測点2では最大の3.4%になった(図-8)。ただし、変位し始めに歪み量が大幅に増加した後は、変位量が増加しても歪み量はあまり増加しなかった。

周長方向については、天端部(計測点1)で変位にともなう歪み量の増加は見られず、むしろ歪みが減少した(図-9)。その他の計測点については、点間計測の結果が元の長さよりも短くなるか、よじれるなどして計測できなくなった箇所がほとんどであった。

d) 上方変位時の歪み分布

沖側端を上方に変位させたところ、側面(計測点3)における歪みの増大が顕著であり、最大で5.2%にも達した(図-10)。天端と側面の中間に位置する(計測点2)および底面付近(計測点5)においても歪みが4%を超えるケースが確認された。計測点2, 3, 5では変位量の増大にほぼ比例するように歪みが増大する傾向が確認され、側方変位とは異なる応答を示した。一方で天端(計測点1)については、歪み量の増加は見られるものの最大でも2.2%に留まっており、変位量との相関は不明瞭であった。

図-11 サンドバック沖側端部における波浪作用時の波圧・土圧・張力の時間変化(ケースC11の例)

図-12 波浪作用時に働く最大張力

(2) 縮小模型実験

縮小模型を用いた水理模型実験では、実施した6ケースのいずれにおいても、波浪によるサンドバックの滑動・転動は起こらず、目視で確認できる変形もなかった。

沖側端に設置されたひずみゲージの結果によると、周長方向では張力がほとんど変動しなかったのに対して(図-11(3)中の歪み1)、長手方向には波浪に対応した張力の変動が見られた(図-11(3)中の歪み2, 4, 6)。長手方向の張力の変動幅は側面で最も大きく(歪み4)、底面周辺(歪み6)が最も小さかった。

波浪作用時に袋材に働いた張力を静置時の張力と比較すると、長手方向中央部の天端周辺では3.3倍に増大し

ていた(図-12(2))。ただし大部分の計測点では、静置時の2.2倍以下であり、こうした張力の増大は、PIV解析(沖側)および流速計(中央部)から得られたサンドバック直上の最大流速よりも、底部土圧の最大値とよく相関していた(図-13)。

4. 考察

(1) 静置時に袋材に働く張力

静置時に袋材に生じる歪みの最大値は周長方向が長手方向の2.1倍にもなっていた。実験に用いたサンドパッ

図-13 最大流速、最大土圧と波浪作用時の張力の関係

クでは、周長方向が袋材の縦方向に、長手方向が袋材の横方向となるように製作されている。予備実験で得られた袋材に働く張力と歪みの関係（図-6）を元に張力に換算すれば、周長方向が3.18kN/m、長手方向が2.47kN/mとなり、長手方向の最大張力（ $T_{\max k}$ ）は周長方向の最大張力 $T_{\max k}$ の0.78倍となる。この値はLawson²⁾が、サンドバックの有限要素モデルを用いて示した0.63倍よりも大きい。有限要素モデルでは袋材が伸長しないと仮定されていることによるものと考えられる。長手方向が周長方向よりも張力が小さくなる点は整合するので、静置時の必要張力照査において周長方向の張力が重要であることには違いはない。

袋材自体の伸び特性（図-6）を見ると、特性の変曲点はタテ方向で歪み約4%、ヨコ方向で歪み約2%となっており、本研究で得られた静置時の歪みの上限値に近い。歪み量は袋材の伸び特性に制約された可能性も考えられる。海外では、サンドバックに働く張力は理論式に基づいて算定されるのが一般的であるが、本研究で示されたような違いが生じる可能性もあることを留意する必要がある。

(2) 変形時に袋材に働く張力

a) 変形方向による歪み応答の違い

実物大実験では側方変位時に長手方向の歪みの増大が確認されたものの、変位量が增大しても歪みがほとんど増大しなかった。これは、側方変位量が大きくなると、変位の影響を受ける範囲が長手方向に広くなり、より多くの袋材で側方変位にともなう歪みを分担することになるためと考えられる。これに対して上方変位時には、変位量が大きくなっても影響を受けて変形する範囲は限られている（図-4）。特に底面の袋材の多くは接地したままであるため歪みを分散させることができず、長手方向の歪みを分担する範囲が増えないまま上方変位による作用力だけが増大し、変位量と歪みの増大に相関がみられたものと推察される。

周長方向については、側方変位時も上方変位時も多くの計測点で長さが元よりも短くなったり、捻れが生じたりして歪みが計測できなかった。これは点間測定という

測定方法にも原因があるかもしれないが、袋材の緊張状態が解消されたことには違いない。

b) 中詰め材による歪み応答の違い

本研究と同じ周長で長さが3mの俵型のサンドバックについての実物大実験では、作用外力に対する張力の応答が中詰め材の種類によって異なることが示された⁵⁾。しかし本研究では、中詰め材や充填率による応答の違いは特に確認されなかった。これは、全てサンドポンプによる施工としたため、使用できる中詰め材がサンドポンプで圧送できるものに限定され、応答の違いに結びつくほどの材料の違いがなかったためと考えられる。また、本研究を実施した2010年の時点ではサンドポンプによるサンドバックの施工経験が我が国には乏しかったため、実物大実験では充填率をあまり高くすることが出来なかった。そのため、充填率についても、歪みにあられるだけの違いを作り出すことが出来なかったと考えている。本研究だけをもって中詰め材や充填率による違いが全くないと結論できるわけではない。

(3) 波浪作用時に袋材に働く張力

縮小模型実験では、実物大実験と同じ袋材を用いたため、実スケールに換算すれば厚く固い袋材を使用していることになる。Pilarczyk⁶⁾が示した算定式によれば充填率が80%のときには、袋材からの拘束によって内部土圧が約28%増加することから、袋材の伸び特性が中詰め材の流動等にも影響を及ぼしていた可能性はある。今回の実験はサンドバックに目に見える変形が生じない範囲の波浪条件で実施されたものである。影響は少ないとも考えられるが、計測された張力の絶対値の扱いには注意が必要である。そのため本研究では、得られた張力の絶対値は極力使わず、静置時の張力に対する相対値としての扱いに留めた。しかし波浪の来襲にともなって張力変動が生じる点については、実スケールでも十分に起こり得る現象と考えていいであろう。

実験では、波浪作用に対応した土圧の変動が観測され、最大土圧と長手方向（波浪進行方向）の張力増加がよく対応していた（図-13）。土圧計の計測値上昇は波浪による水位上昇が原因と考えられるので、サンドバックの上面が水圧によって底面方向に押しつけられることで長手方向に伸びる変形が生じたものと推察される。周長方向の張力にほとんど変動が見られなかったのは、サンドバックの側方直近（沿岸方向）では上面とほぼ同期して水圧上昇が起きるため、側方（沿岸方向）への伸びが制約された結果と考えられる。

水圧による上部からの押しつけが張力増大の原因であれば、図-8のケースC12で最も高い3.3倍という張力増大が確認されたのは、固定床条件であるために底面の沈み込みが生じない分、長手方向の変形に加算されたため

と解釈される。

(4) サンドバックの設計における留意事項

本研究で得られた結果によれば、サンドバックを海岸で使用するにあたっては、気象劣化や摩耗劣化に加えて共用時に起こる変形や波浪作用も見込んで袋材の強度を選定することが必要であることは明らかである。

上方変位時には長手方向の歪みが最大で5.2%に達した。静置時の歪みが平均で $1.02 \pm s.d. 0.56 \%$ (N=22)であったことから、少なくとも5.1倍、標準偏差 (1σ) も考慮すれば11.3倍までの歪み増大は起こりえると考えねばならない。また、波浪が直接作用するような場所に設置する際には、固定床条件で得られた3.3倍は過大であるものの、少なくとも2.2倍までは波浪進行方向に張力増大が生じることも想定しておく必要がある。こうした波浪による揺動が疲労破壊に結びつく可能性も考えられるが、経時的な劣化については気象劣化や摩耗劣化の影響が非常に強いのでそれらによる劣化が考慮されていれば見込む必要はないと考える。

これらの安全率は、全て掛け合わせて用いられることが理想ではあるが、海外では気象劣化等の他の要素も含めて安全率を4.5倍とすることが基本であるので²⁾、過大設計を避けるためにも慎重な議論が必要である。

袋材の性能だけでは対処できない場合には、なるべく地盤高変動や波浪の影響を受けない場所にサンドバックの使用を限定するか、これらの影響を低減させるような何らかの工夫を施すことも対策として考えられる。

これまでのサンドバックに関する試験施工や技術開発

では、静置時には長手方向よりも周長方向に張力が働くことは良く知られているので、周長方向の力に対して袋材を強くする工夫はよく考えられてきた。しかし本研究では、地形変化に追従した変形や波浪作用による袋材の伸縮は、周長方向よりも長手方向に歪みを増大させることが多く、それによる張力の増加量も大きいことが示された。今後の設計や技術開発にあたっては、長手方向の強度についても留意せねばならない。

参考文献

- 1) 土橋和敬, 弘中淳市, 梶原幸治, 渡辺国広: 西湘海岸におけるサンドバックの現地試験施工, ジオシンセティック情報誌, 2012年3月号, pp.20-30, 岩波書店, 2012.
- 2) Lawson, C. R.: Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering, *Geosynthetics International*, Vol.15, No.6, pp.384-427, 2008.
- 3) 関口陽高, 諏訪義雄, 野口賢二, 渡辺国広, 伊藤幸義, 岩佐隆広: サンドバック工法の設計時の耐候性能決定方法の検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.68, No.2, pp.I_714-I_719, 2012.
- 4) 渡辺国広, 諏訪義雄, 関口陽高, 野口賢二, 伊藤幸義, 高田保彦, 岩佐隆広, 二階堂竜司: 礫海岸における摩耗作用を再現する摩耗促進試験方法の開発, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, 2013. (印刷中)
- 5) 関口陽高, 諏訪義雄, 野口賢二, 渡辺国広, 嶋田宏, 三浦健吾: 袋詰め工の袋材に働く張力に関する実物大模型実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_826-I_830, 2011.
- 6) Pilarczyk, K. W. : *Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering*, Taylor & Francis, 2000.

CHARACTERISTICS OF TENSION ACTING ON THE SURFACE OF A GEOSYNTHETIC TUBE DURING DEFORMATION OF FOUNDATION AND WAVE ATTACK

Kunihiro WATANABE, Kenji NOGUCHI, Yoshio SUWA, Yoko SEKIGUCHI, Hiroshi SHIMADA, Keizo EJIMA, Masanori ISHIKAWA and Tsuyoshi NAGASAWA

Large-scale (1:1) and small-scale (1:10) experiments were carried out in order to clarify the characteristics of the tensile force acting on the surface of a geosynthetic tube. The observed relative axial tension was higher than the theoretically estimated tension, and the hypothesized inextensibility of the membrane was suspected to be the cause of the difference. Although an apparent increase in axial strain was observed during horizontal and upward deformations of the tube, the strain seemed to become saturated when the horizontal deformation was large. In the small-scale experiment, the tensile force showed some fluctuations that corresponded to the wave attack; other than that, visible deformation was not observed. Desirable safety factors for designing the tensile strength of a geosynthetic tube are discussed based on these findings.