

防波護岸における防砂シートの変動特性

(独) 土木研究所寒地土木研究所 ○菅原 吉浩
北海道開発局港湾空港部 時田 恵生

防波護岸における防砂シートの変動特性として、シートのひずみに着目した水理模型実験を実施した。その結果、波高が大きく裏込石内の水圧が大きいほどシートのひずみが大きい事、堤体前面からの波に比べ堤体背後からの波によるひずみが相当大きい事、埋め立て完成後もシートは水圧変動に合わせて動いている事が分かった。また、裏込石法面上に粒径の小さい碎石を施工することにより、防砂シートのひずみを低減させる効果があることが分かった。

キーワード：防波護岸、吸い出し、防砂シート、ひずみゲージ

1. まえがき

港湾を整備する際、波当たりの強い場所には防波護岸（以下、護岸）が作られることが多い。護岸は、船舶の利用上から静穏域内に施工される岸壁とは異なり、前面波高の制約は無く、前面波高が大きい場合には越波を抑えるために天端の高い胸壁を伴う構造となる。このような護岸の背後では、埋立土砂が吸い出されることによる背後地盤の陥没被害が度々発生している。

護岸の吸い出しの原因は様々考えられる。著者ら¹⁾は、北海道開発局所管の港湾・漁港における被災事例調査を実施し、防砂シートや防砂目地板の損傷が被災原因として多いことや、護岸は係船岸に比べて被災発生年数が早く、施工後 10 年以内に吸い出し被害を受けやすい傾向にあることを確認している。

一方、護岸の吸い出しに関する既往の研究も、これまでに多く行われている。高橋ら²⁾は水理模型実験により護岸背後の裏込石内や目地板の水圧測定を実施するとともに、対策工の1つとして圧抜き口の有効性を確認している。また、渡辺ら³⁾は管理型埋立護岸の遮水シートを対象に、水圧変動と遮水シートのひずみ量の関係を検討しており、裏込石粒径が小さく場合にはひずみ量は小さくなることを確認している。しかし、港湾で一般的に防砂シートとして使用されているポリエステル製不織布の水圧変動とひずみ量の関係は明らかにされていない。

本報告では、護岸の吸い出し被害の主要原因である防砂シートの損傷に着目し、要素研究として防砂シートのひずみに着目した水理模型実験を実施し、護岸に作用する水圧変動とひずみ量の関係を確認することを目的とする。また、裏込石法面部に粒径の小さい碎石（以下、フィルター層）を設置した場合のひずみ低減効果についても確認する。

2. 実験方法

実験は図-1 に示す、大型二次元造波水路（長さ 85.0m × 幅 1.6m × 高さ 3.0m）に 1/30 勾配のモルタル固定床を設置した。実験断面は、図-2 の護岸模型を対象とし、水圧計（ch1～ch9）を堤体前面および裏込石内に全部で 9カ所に設置した。裏埋土が無いケースでは、裏込石背後には流速計（ch10～ch12）を 3カ所設置した。

防砂シート上にはひずみゲージ（ch13～ch16）を 4カ所設置し、ひずみ ϵ を計測した。 ϵ は、シートの元の長さに対する伸縮量の比で無次元数量であり、本実験では裏込石斜面（縦断）方向のひずみを示している。ひずみゲージは樹脂ベースのゲージとし、樹脂製の接着剤により防砂シートにひずみゲージを貼り付け、更にひずみゲ

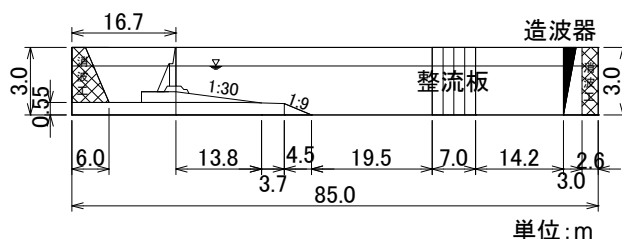


図-1 実験水路諸元

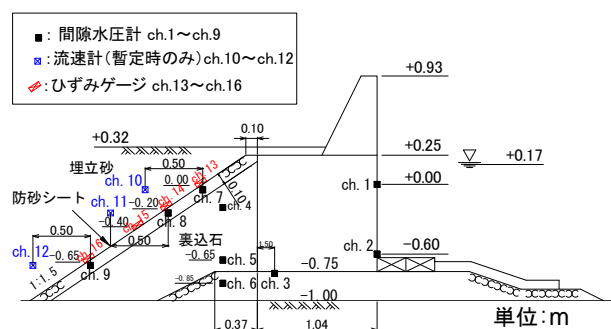


図-2 実験断面

ージが吸湿するのを防ぐためシリコン系のコーティング剤により防水処理を行った。

模型堤体の胸壁には木製の板で壁を作り、越波しない実験断面とした。なお、この実験断面は、特に対象とした現地は無いが 1/10 縮尺と仮定すると、水深 $h=10\text{m}$ 、 $H.W.L.=1.7\text{m}$ の護岸条件に相当する。(以下、現地スケールとは実験縮尺を 1/10 とした場合とする。)

実験ケースを表-1 に示す。堤体前面に作用する波によるシートひずみについて、裏埋土やフィルター層の有無による違いを確認するケース (case1~case4)、堤体背後に舗装をした場合 (case3')、堤体背後からの波による影響を確認するケース (case5~case6)、の全部で 7 断面の実験を行った。

実験波は規則波とし、波高、水圧、流速、ひずみのサンプリング間隔は 200Hz、計測時間は安定した波形が 5 波以上測定できるよう 1 ケース当たり約 60sec とした。なお、波高、水圧、流速、ひずみの測定値としては 5 波平均とした。

基礎捨石や裏込石は 88~180g (粒径 40mm~50mm) の砕石とし、フィルター層は 3~11g (粒径 13mm~20mm) の砕石を使用した。フィルター層の厚さは図-2 に示すように裏込石法面上 10cm 厚とし、裏込石内へのフィルター層の混入を防止するために、5mm 網目の金網を裏込石とフィルター層の間に敷設した。なお、実験終了後、基礎捨石の重量を測定し空隙率を求めると約 0.44 であった。裏埋土は珪砂 7 号 ($D_{50}=0.158\text{mm}$) を用いた。防砂シートは表-2 に示すように、実海域で一般的に用いられているポリエステル製長繊維不織布とし、現地スケール 5.0mm 厚に対し実験では 0.5mm 厚のものを使用し、裏込石内への砂の落下を防止した。

3. 防砂シートの変動特性

(1) 水圧およびひずみの基本特性

a) 時系列波形

図-3(a)は case1 の周期 $T=3.16\text{s}$ 、波高 $H=0.30\text{m}$ の場合の水圧と防砂シートひずみ ϵ の時系列の一例である。左側の縦軸は ϵ 、右側の縦軸は水圧を波高と水の単位体積質量で無次元化した値 $P/\rho g H$ (以下、無次元水圧) とし、横軸は時間 t である。なお、ch 番号は図-2 の ch 番号に対応している。位相は、ch3、ch7、ch13、ch14 の順となっており、 P と ϵ に位相差が見られる。ch13 や ch14 の ϵ は若干波形に乱れがあるが、概ね規則的である。また、ch13 の ϵ は ch14 よりも小さくなっているが、これは、シートの上端と下端は固定されているためであり、図示していないが、ch16 の法尻付近の ϵ も ch13 と同様に小さくなっていた。

図-3(b)は case3 の $P/\rho g H$ と ϵ の時系列の一例であるが、

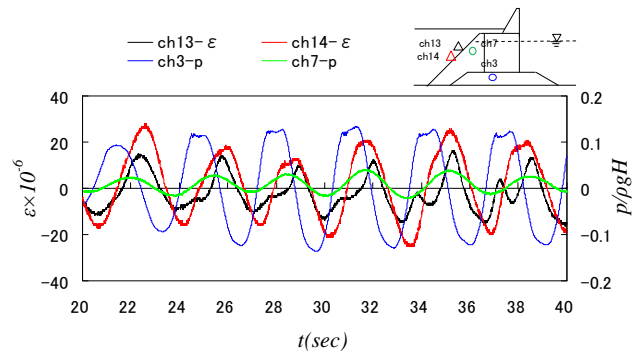
表-1 実験ケース

| case | 埋立砂 | フィルター層 | 波高 (m) | 周期 (sec) | 備考 |
|------|-----|--------|--|--|----------|
| 1 | 無し | 無し | 0.20(2.00) 0.25(2.50) 0.30(3.00) 0.35(3.50) 0.40(4.00) | 2.53(8.0) 3.16(10.0) 3.79(12.0) | |
| 2 | 無し | ○ | | 同 case1 | |
| 3 | ○ | — | | 同 case1 | |
| 3' | ○ | — | | 同 case1 | 舗装断面 |
| 4 | ○ | ○ | | 同 case1 | |
| 5 | 無し | 無し | 0.05(0.50) 0.10(1.00) 0.15(1.50) 0.20(2.00) 0.25(2.50) | 2.53(8.0) 3.16(10.0) 3.79(12.0) | 堤体背後からの波 |
| 6 | 無し | ○ | 0.05(0.50) 0.10(1.00) 0.15(1.50) | 同 case5 | '' |

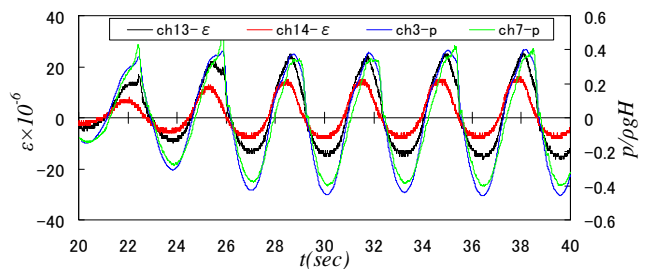
()内は現地スケールの値

表-2 実験に用いた防砂シートの物性 (カタログ値)

| 質量 (g/m ²) | 厚さ (mm) | 透水係数 (cm/s) | 引張強度 (N/5cm) | | 伸度 (%) | |
|------------------------|---------|--------------------|--------------|----|--------|----|
| | | | 縦 | 横 | 縦 | 横 |
| 60 | 0.5 | 1×10^{-1} | 147 | 98 | 55 | 60 |



(a) case1, $H=0.30\text{m}$, $T=3.16\text{sec}$



(b) case3, $H=0.30\text{m}$, $T=3.16\text{sec}$

図-3 水圧・ひずみ時系列

全ての ch で概ね規則的である。

以上より、裏埋土が無い場合では、流れが防砂シートを通過した後、シートのひずみにピークが生じるが、裏埋土がある場合では、裏込内水圧がピークに達する時に、

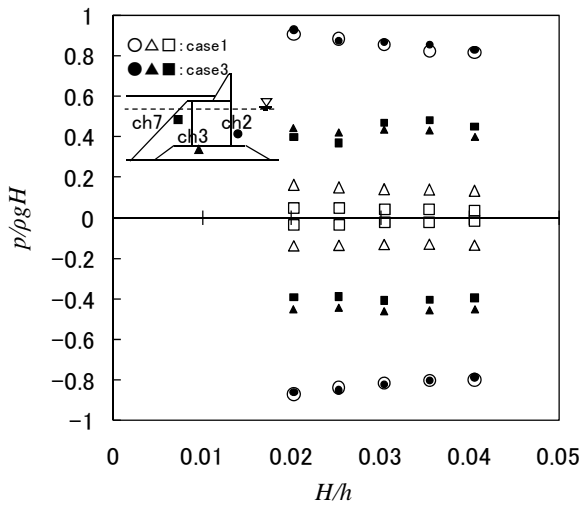


図-4 波高と水圧の関係の一例 (case1, 3 T=3.16sec)

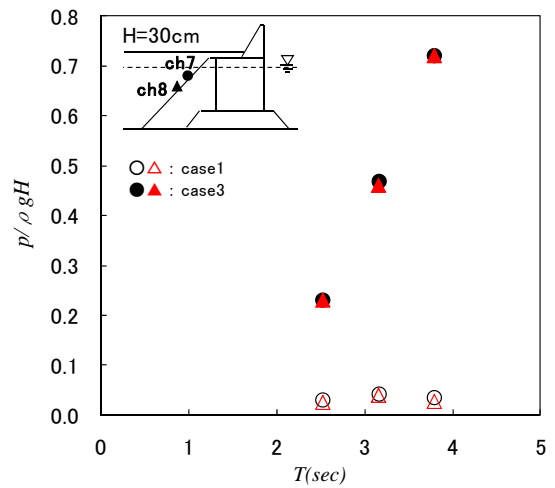


図-5 周期と水圧の関係の一例 (case1, 3 H=0.30m)

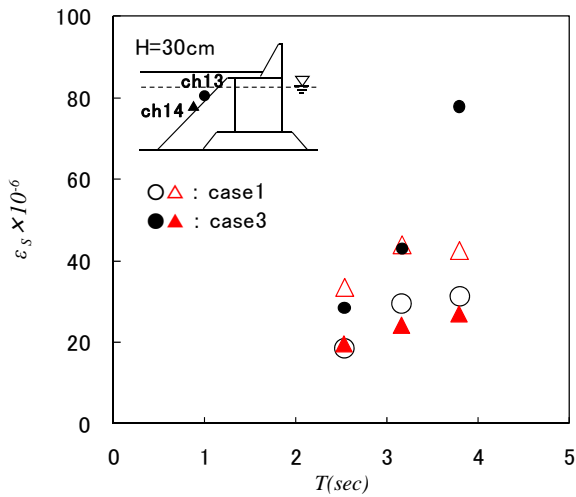


図-6 周期とひずみの関係の一例 (case1, 3 H=0.30m)

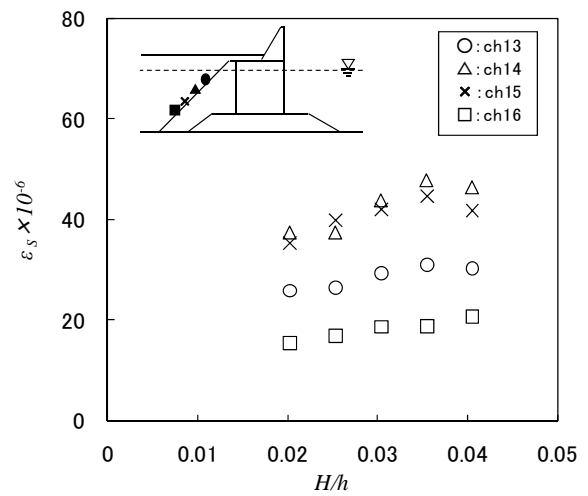


図-7 波高とひずみの関係の一例 (case1 T=3.16sec)

シートのひずみにピークが生じると考えられる。

b) 波高と水圧の関係

図-4は、case1とcase3のT=3.16sの場合の波高と水圧の関係の一例であり、縦軸は $p/\rho gH$ 、横軸は波高水深比 H/h である。case1とcase3ともに H/h の増大に伴い $p/\rho gH$ は概ね横ばいで H の増大に伴い無次元化しない場合の水圧 p は増加していることが分かる。ch別に水圧を比較すると、ケーソン前面ch2に比べ、捨石マウンド部のch3や裏込石内のch7は小さい。また、裏埋土が有ることによりcase3ではcase1に比べて水圧が大きくなっており、case1のch7はch2の約5%であるが、case3のch7ではch2の約50%の水圧を示している。

c) 周期と水圧の関係

図-5は、case1とcase3のH=0.3mの周期 T と無次元水圧 $p/\rho gH$ の関係を示したものである。

case3の裏込石表面付近のch7、ch8の水圧は、周期の増大に伴い $p/\rho gH$ が大きくなっているが、case1では周期との関係性が明確で無い。これは、case1では裏埋土

が無いと裏込石内の水圧が小さく、周期による差が顕著に表れないためであると考えられる。

(2) 裏埋土の有無によるひずみ量の比較

a) 周期とひずみの関係

図-6はcase1とcase3の周期 T とひずみの全振幅量 ϵ_s の関係で、波高H=0.3mの場合の一例である。

case3では周期の増大に伴い ϵ_s も大きくなっており、特に水面付近のch13で顕著である。これは、前述の図-5より水圧の増大に伴い ϵ_s も大きくなっているためと考えられる。一方、case1では周期と ϵ_s の関係性が明確で無く、図-5のch7とch8の水圧と同様な傾向である。

b) 波高とひずみの関係

図-7は、case1の堤体前波高とひずみ全振幅量 ϵ_s の関係の一例で、周期T=3.16sの結果である。波高が大きくなるにつれて ϵ_s も若干ではあるが大きくなる傾向である。また、ch別に見ると法尻や水面付近のch16やch13では小さく、 ϵ_s は $15 \sim 30 \times 10^6$ 程度、ch14やch15では ϵ_s は40

～ 50×10^6 程度となっている。

図-8は、case3の波高と ε_s の関係である。すべてのchでH/hの増大にともない ε_s は大きくなっている。また、ch14～ch16では、case1より ε_s は小さいが、水面付近のch13では、裏埋土があるcase3の方がひずみが大きく、 ε_s は $25 \sim 62 \times 10^6$ である。裏埋土が有る場合のひずみは小さいと想定していたが、実際は、埋立完成後もシートにはひずみが生じていることが分かった。

これは、裏埋土は水圧が作用すると変位したり、裏込石の空隙箇所においてシートは自由に動くことが可能であるためと考えられる。また、埋立後の断面case3において水面付近の ε_s が特に大きくなった理由は、図-4に示すようにcase3の方がcase1より裏込石内部の水圧が大きいこと、水面付近では土被り厚さが小さく土が変位しやすいことが考えられる。

c) 舗装施工後のひずみ

図-8中の黒く塗りつぶしたプロットは、case3の堤体背後を舗装した場合を想定したcase3'の結果である。case3'では裏埋土の上に厚さ1cmの木製合板を敷き、その上から 1m^2 当たり約100kgの錘を載せた実験（現地スケールで 10kN/m^2 に相当する）を行った。舗装を施工する事により ε_s は全体的に大きくなり、case3とcase3'の ε_s を比べると、case3'では約6%大きくなっていった。これは、図示していないがcase3'の裏込中の水圧はcase3に比べ約8%大きい（ただし、堤体前面の波圧については両者とも変化無し）であり、水圧が大きいと土の変位量も大きくなるためであると考えられる。

このように、防砂シートは施工途中だけでなく、埋立後および舗装完成後においてもひずみは生じており、堤体前面からの波によるシートのひずみ量は施工途中よりも舗装完成後の方が大きいことが分かった。

(3) 堤体背後からの波によるシートのひずみ

図-9は、case5の $T=3.16\text{s}$ の場合の波高とひずみ全振幅量 ε_s の関係の一例で、堤体背後からの波によるシートのひずみを表したものである。図-8と比べるとひずみ量が1オーダー以上大きくなっている。 $H/h=0.005$ ($H=0.05\text{m}$)のch13の ε_s は $260\mu\epsilon$ で、case3の $H/h=0.040$ ($H=0.40\text{m}$)の場合より約4倍大きい。 $H=0.20\text{m}$ の同一波高条件では、case1の ε_s は $37\mu\epsilon$ 、case5の ε_s は $1576\mu\epsilon$ で、約40倍異なる。また、波高が大きくなるにつれて ε_s は大きくなり、特に水面付近のch13では H/h が0.005から0.010にかけて急激に増大する。

このように、堤体背後からの波は堤体前面からの波に比べ、シートひずみに与える影響は相当大きいことが分かった。このため、護岸のみならず岸壁についても施工時に防砂シート部分に回折波の影響がある場合には、早期に埋め立てを行ったりシートの損傷防止対策を行う事が必要である。

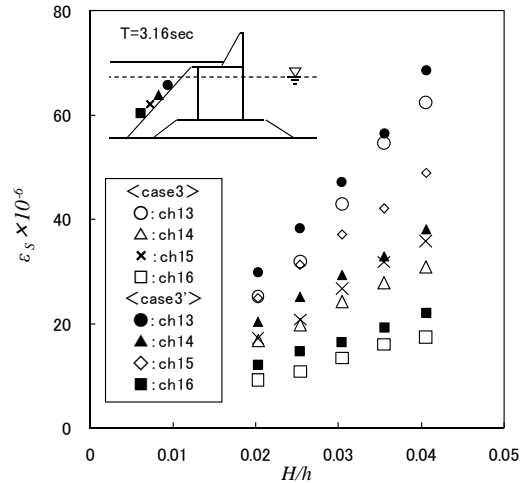


図-8 波高とひずみの関係の一例 (case3とcase3')

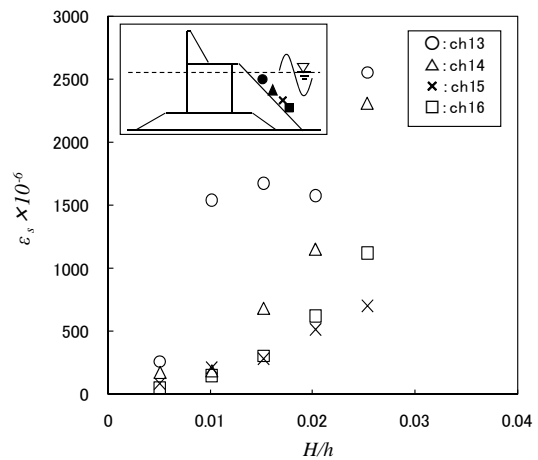


図-9 波高とひずみの関係の一例 (case5, T=3.16sec)

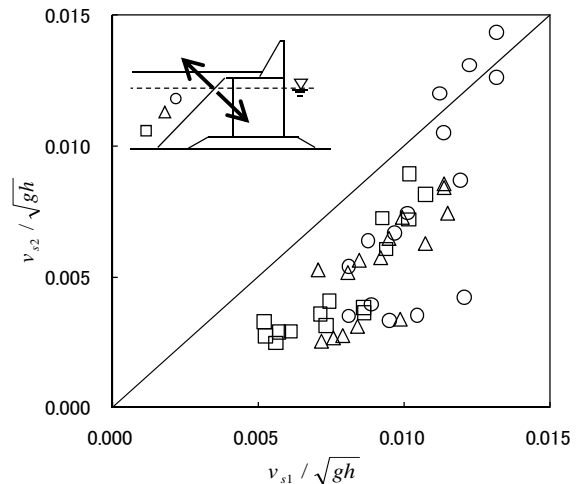


図-10 フィルター層の有無による無次元流速振幅

(4) フィルター層の効果の検証

a) 流速および水圧の比較

図-10は、case1とcase2のch10～12の裏込石法面直角方向の無次元流速の振幅を比較したものである。横軸をcase1、縦軸をcase2としているが、case2の流速はcase1に比べて全体的に小さく、裏込石背後への流速が低減さ

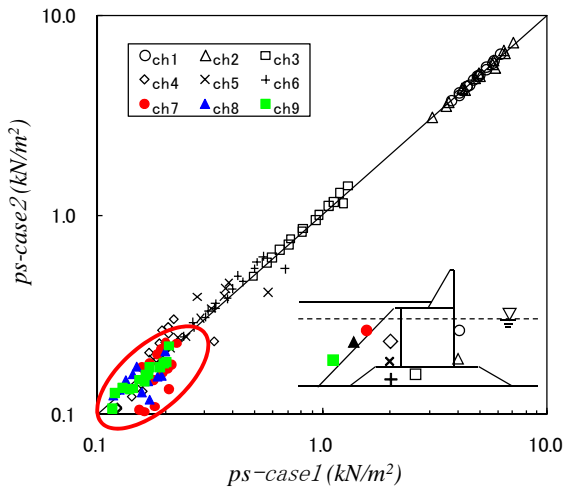


図-11(a) 無次元水圧の比較 (case1 と case2)

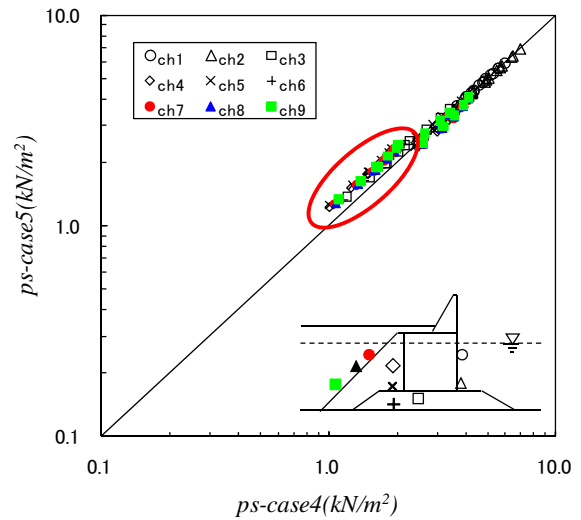


図-11(b) 無次元水圧の比較 (case3 と case4)

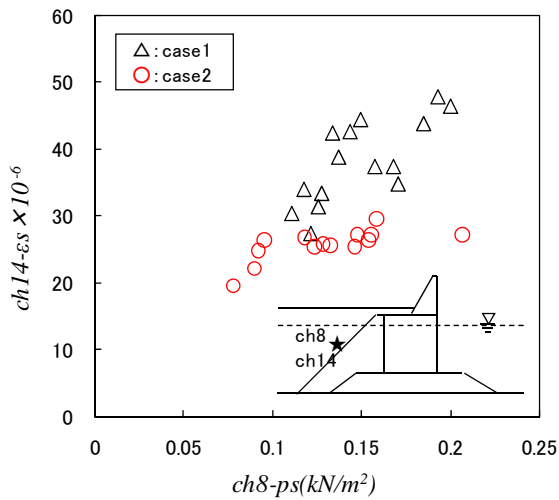


図-12(a) 水圧とひずみの関係 (case1 と case2)

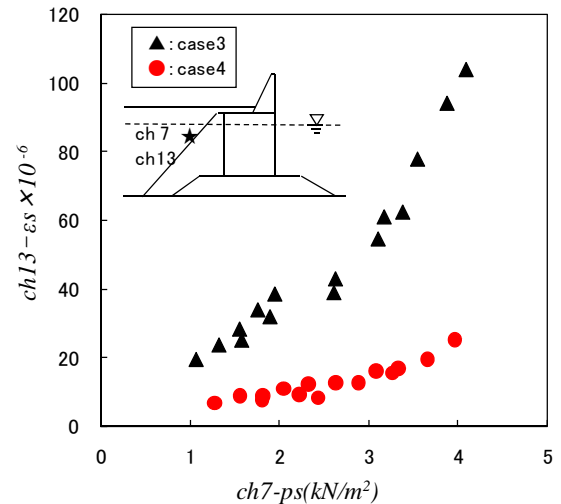


図-12(b) 水圧とひずみの関係 (case3 と case4)

れている事が分かる。

図-11(a)は、case1 と case2 の ch1～9 の水圧振幅 p_s を比較したものである。フィルター層の沖側に位置する ch1～ch6 の水圧に違いは無いが、図中の赤丸で囲ったフィルター層の中に位置する ch7～ch9 では case2 の方が若干小さく、ch7、8、9 の平均水圧振幅は、case1 に比べ約 9% 小さい。

図-11(b)は、同様に case3 と case4 の ch1～9 の水圧全振幅 p_s を比較したものである。赤丸で囲った水圧が 1.0～2.0 kN/m² の範囲では、ch3～ch9 の水圧は case4 の方が若干大きい。水圧が 2.0 kN/m² より大きい範囲での差は見られない。

以上より、フィルター層は裏込石背後に透過する流速を低減し、埋立前の断面では裏込石法面上の水圧を低減する効果がある事を確認した。

b) 水圧とひずみ全振幅量

図-12(a)は case1、2 の ch8 の裏込石内水圧の全振幅量 p_s と ch14 のひずみの全振幅量 ϵ_s の関係を示したものである。ch14 のひずみと ch8 の水圧とは同一地点で対応している。case2 ではフィルター層の効果により case1 に比べると全体的にひずみを低減出来ている。また、case1 では水圧が増加するに従って、ひずみは増大しているが、case2 では水圧が増大しても、急激なひずみの増大は見られない。

図-12(b)は、case3、case4 の ch7 の p_s と ch13 の ϵ_s の関係を示したものである。ch13 のひずみと ch7 の水圧とは同一地点で対応している。case3、4 とも水圧増加に伴いひずみが増大しているが、case4 ではフィルター層の効果により case3 に比べてひずみが小さく、case4 の最大ひずみ量は case3 の約 25% 程度である。

c) 堤体背後波によるフィルター層の効果

図-13は、case5とcase6について $H=0.05\sim 0.15m$ のch13～ch15の ε_s を比較したものである。一部、フィルター層を設置したcase6の方が大きくなっているが、全体的にcase6の方がフィルター層の効果により ε_s が小さく、堤体背後波に対してもフィルター層のひずみ低減効果が確認された。

赤井⁴⁾らは、遮水シートと不織布の積層載荷試験を行い、埋土深さ15mに相当する294kPaの上載圧を載荷した場合の2号砕石(粒径40～60mm)と4号砕石(粒径20～30mm)のシートの損傷の有無とピーク圧力値を確認している。その結果、2号砕石ではシートに貫通孔が発生したが、粒径の小さい4号砕石では貫通孔は発生せず、シート面に作用する最大圧力も半分程度となっている。

このように、フィルター層を設置することは、ひずみ量の低減だけでなく、シートに作用するピーク圧力の低減の効果も有ると言える。

ただし、case6のフィルター層に堤体背後波を与える実験では、波高 $H=15cm$ 以上でフィルター層の法崩れが発生したため、回折波が大きい条件でフィルター層を施工する場合は、施工時の法崩れに注意が必要である。

5. 主要な結論

- ①波高が大きくなるにつれて、防砂シートのひずみは大きくなる傾向である。
- ②埋立完成後も防砂シートにはひずみが発生し、特に水面付近のひずみが大きい。
- ③ひずみは堤体背後からの波の方が、堤体前面からの波に比べて相当大きい。
- ④裏込石法面上のフィルター層には、ひずみ低減効果が有ることを確認した。ただし、堤体背後からの波が大きい場合には、フィルター層の法崩れが発生した。

6. あとがき

シートのひずみに与える影響が、マウンド透過波に比べ回折波の方が大きいということは、これまでも経験的に知られていた事である。しかし、本報告によりひずみ量を定量的に把握をする事ができ、1オーダー以上も異なるという事が分かった。また、施工完成後においても、ひずみ量は小さいが防砂シートにひずみが発生している事が明らかとなった。しかし、埋土中の防砂シートの長期的な繰り返しのひずみによるシート損傷の程度や物性の変化については明らかとなっていない。

今後は、現地のシート損傷条件(シートが損傷する波の大きさや作用期間)を明らかにし、現行のシート規格が施工時の10年確立波程度の小さな波で損傷するの

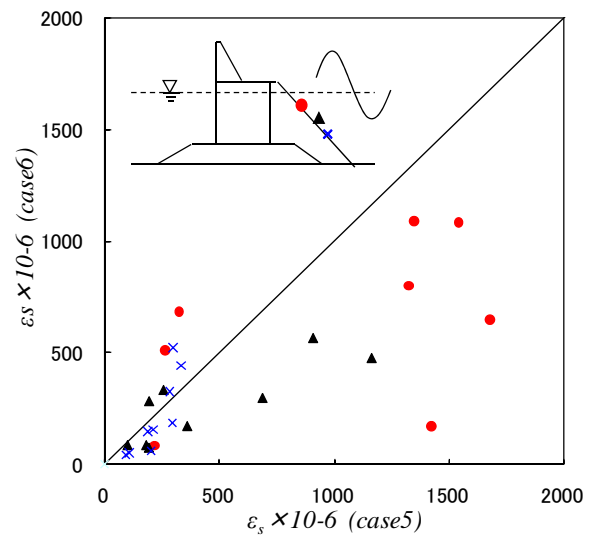


図-13 ひずみの比較 (case5とcase6)

れば、シートの規格を見直すことも視野に入れた研究を行っていく事が必要であると考えられる。

謝辞: 本研究は北海道開発局港湾空港部港湾建設課からの受託研究として行われたものである。研究を行うに当たり、関係者の方々に多大なる御支援を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)菅原吉浩・森昌也・阿部勝彦：護岸における吸い出し被害の事例調査と原因の考察，北海道開発局技術研究発表会論文集，第52回，2009。
- 2)高橋重雄・鈴木高二朗・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・善功企・山崎浩之：護岸の吸い出しに関する水理模型実験，港湾技術研究所報告，第35巻，第2号，pp.3-63，1996。
- 3)渡辺将光・下迫健一郎・徳淵克正・織田朋哉・中野史丈・生駒信康：管理型埋立護岸における遮水シートの耐波安定性および耐久性に関する検討，海洋開発論文集，第21巻，pp.849-854，2005。
- 4)赤井智幸・松本哲・村上豊・近藤清誠二・石田昌利・松下正樹・上田滋夫・嘉門雅史：海面処分場保護マットに用いる不織布の保護性能，地盤工学研究発表会論文集，第38回，pp.2457-2458，2003。
- 5)菅原吉浩・熊谷直哉・時田恵生：防波護岸におけるボーリング被害に関する一考察，土木学会第64回年次学術講演概要集，II-083，pp.165-166，2009。
- 6)菅原吉浩・阿部勝彦・熊谷直哉・小川渉・前田優・牧野昌史：防波護岸背後地盤の陥没被害に関する研究，寒地土木研究所月報第674号，2009。