防波護岸における防砂シートの損傷要因と対策に関する現地実験

A Field Experiment concerning the Causes and Measures against Damage to Erosion Control Sheets on Seawalls

菅原吉浩¹・上久保勝美¹・山本泰司²・時田恵生³・岸 哲也⁴・西村智美⁵

Yoshihiro SUGAWARA, Katsumi KAMIKUBO, Yasuji YAMAMOTO
Akio TOKITA, Tetsuya KISHI and Tomomi NISIMURA

Effects of waves on erosion control sheets on seawalls under construction, and measures to prevent damage to the sheets were examined in hydraulic model and field experiments. The strain applied to the sheets by back waves was approximately 70 times larger than that applied by front waves. It was also confirmed that the measures were effective in reducing the sheet strain and number of damaged parts on the sheets. In addition, it was found that sheets were damaged even with diffracted wave height of approximately 0.1 m, and that the influence of the diffracted waves that struck at the during the field test was approximately three times larger than that of front waves.

1. はじめに

港湾等の護岸は一般的に、本体背後に裏込石を設置し、その上にポリエステル製の不織布（以下、防砂シート）を敷設することにより土砂の落下を防止している。しかし、このような護岸では背後地盤が陥没する被害がしばしば報告されている（たとえば、菅原ら，2010）。陥没被害の要因は様々考えられるが、護岸設置後早期に埋め立てを行わない場合には、施工途中の波によりシートが損傷する事が経験的に知られている。施工現場では工程上、早期の埋め立てが困難な場合も多く、その場合の効果的な対策が求められている。

本研究では、水理模型実験により護岸前面および背後からの波が防砂シートに与える影響を調べるとともに、防砂シートの損傷防止対策工の効果を検討する。また、実海域で施工中の混成堤式防波護岸において現地実験を行い、対策工のシート損傷防止効果を検討する。

2. 水理模型実験による検討

(1) 実験概要

実験は、比較的大型の二次元造波水路（長さ85.0m×幅1.6m×高さ3.0m）で行った。図-1は実験対象とする現地護岸断面であり、縮尺1/10で造波水路内に再現した。堤体前面には小型波圧計を2箇所、基礎捨石内や裏込石

内には間隙水圧計を7箇所設置した。防砂シート上には樹脂ベースのひずみゲージを4箇所貼り付け、裏込石斜面方向のひずみを測定した。模型堤体の胸壁上には木製の板で壁を作り、越波をさせない条件で実験を行った。

実験ケースを表-1に示す。case1は対策を行わない通常断面、case2は裏込石法面上に粒径の小さい碎石からなる

図-1 実験対象断面

表-1 実験ケース

case	フィルター層	Coマット	波高(m)	周期(sec)	波の方向
1	無	無	0.20 (2.00)	2.53 (8.0)	前面波
			0.25 (2.50)		
			0.30 (3.00)		
			0.35 (3.50)		
			0.40 (4.00)		
2	○	無	〃	〃	〃
3	○	○	〃	〃	〃
4	無	無	0.05 (0.50)	2.53 (8.0)	背面波
			0.10 (1.00)		
			0.15 (1.50)		
			0.20 (2.00)		
			0.25 (2.50)		
5	○	無	0.05 (0.50)	〃	〃
			0.10 (1.00)		
			0.15 (1.50)		

() 内は現地スケール

1 正会員 (独法)土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム
2 正会員 博(工) (独法)土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム 上席研究員
3 北海道開発局 函館開発建設部
4 北海道開発局 港湾空港部
5 北海道開発局 室蘭開発建設部 苫小牧港湾事務所

写真-1 実験状況の一例 (case4, $H=0.15\text{m}$, $T=3.16\text{sec}$)

フィルター層（以下、F層）を設置する断面、case3は、基礎捨石と裏込石の間にコンクリート製のブロック（現地スケールで厚さ $t=0.2\text{m}$ 、一辺の長さ 0.5m の正六角形、以下、Coマット）を設置する断面とした。Coマットは、基礎捨石から背後に透過する水圧変動を抑制することにより、施工中のシートの損傷防止を目的としている。F層は、堤体前面からの流れを抑制することや、裏込石表面の凹凸を少なくし、シートひずみを低減させることを目的としている。また、case1～case3では堤体前面側から波を作用（以下、前面波）させるが、case4～5では水路内で堤体を前後に反転し、堤体背後側から波（以下、背面波）を作用させ、背面波がシートに与える影響を調べるとともに、F層によるひずみ低減効果を確認する。

基礎捨石と裏込石は88～180g（粒径40mm～50mm）の碎石とし、F層は3～11g（粒径13mm～20mm）の碎石を使用した。F層の厚さは図-1に示したように裏込石法面上10cm厚とし、裏込石内へのF層の混入を防止するために、5mm網目の金網を裏込石とF層の間に敷設した。なお、実験終了後、基礎捨石の空隙率を求めると約0.44であった。防砂シートは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厚のシートを使用した。ただし、シートの材質は現地材料と同一であることや、ひずみゲージの樹脂部分とシート剛性は異なるため、シートひずみの相似則は成立しない。

実験波は規則波とし、波高、水圧、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60sとした。なお、波高、ひずみの測定値としては5波平均とした。

写真-1は実験状況の一例である。シートは波の作用に追従するように変動する。写真に示すように、シートにひずみゲージを貼り付けてあり、ひずみの測定波形はシートの変動にあわせた比較的周期的な波形を示していた。

(2) 背面波がシートひずみに与える影響

図-2は、case1とcase4の波高水深比とシートひずみ全振幅の関係の一例である。直接シート部分に波が作用する背面波の場合は、波高が大きくなるとひずみは急激に増大するが、前面波では変化が少ない。また、ひずみは

図-2 波高水深比とシートひずみ

図-3 前面波に対する対策工のひずみと水圧低減効果

図-4 背面波に対するフィルター層のひずみ低減効果

前面波より背面波の方が相当大きく、波高や周期が同一条件においては、背面波のひずみは前面波に比べて約70倍大きい結果であった。なお、ひずみの大きい位置は、前面波では裏込石の法面中腹、背面波では水面付近となっている。

(3) 対策工の効果の検討

図-3は、横軸を波高水深比、縦軸をシートひずみ全振幅とし、前面波に対する対策工のひずみ低減効果を表している。対策無しと比べF層だけでもひずみは低減されているが、CoマットとF層の両方を行った場合において効果が大きい。これは、図中にCoマットとF層による裏込石内水圧とひずみの低減率を示すように、水圧低減に伴いひずみが低減されたためと考えられる。

図-4は、横軸を波高水深比、縦軸をシートひずみ全振幅とし、背面波に対するF層の有無によるひずみを表している。F層を設置することによりひずみが低減されている。これは、F層によりシートに接する裏込石点数が多くなり、シート支持点間距離が小さくなるためと考えられる。なお、F層を設置しても背面波に対する裏込石内の水圧低減効果はみられなかった。

3. 現地実験

(1) 現地実験の概要

現地実験は、図-5に示す北海道の太平洋に面する白老港第3商工区の防波護岸（試験区間135m）で実施した。現地実験箇所の背後は岸壁が200m延伸されており、回折波の影響が少ない条件である。

図-6は、現地実験箇所における対策工の平面配置であり、沖合から順番にアスファルトマット（以下、Asマット）区間、Coマット区間、対策無し区間の3区間とした。Asマットは厚さ $t=80\text{mm}$ のアスファルト製のマットであり、Coマットと同様に基礎捨石と裏込石の間に敷設し、施工時の浮き揚げを防止するため全面積に対して5%の開口率となるように、縦横40cm間隔に $\phi 100\text{mm}$ の穴を開けた。また、Asマット区間とCoマット区間には、F層の有る区間（断面①、④）とF層の無い区間（断面②、③）を設けた。F層の粒径は、裏込石（ $\phi 5\sim 50\text{cm}$ ）より小さい $\phi 6\sim 15\text{cm}$ とした。裏込石法面勾配は、F層が無い断面②③⑤では1:1.2とし、F層が有る断面①④では1:1.5とした。

2008年10月20日には断面①から④に防砂シートを敷設し、2009年4月7日にシートを引き揚げた後に5回の潜水調査とシート引き揚げ後の陸上調査により、シートの損傷状況を調べた。防砂シートの材質は一般的に使われている5mm厚のポリエステル製不織布とした。

沖合水深25mの地点では、超音波式波高計（Wave Hunter 94 Σ WH-103）による波浪観測を実施した。波浪観測期間は2008年12月16日～2009年2月17日までの64日間で、サンプリング間隔は0.5sの連続観測とした。

Coマット区間の断面④と対策無し区間の断面⑤では、裏込石内-6.5mに間隙水圧計を設置し、2009年2月10日～2月17日の期間に水圧観測を行った。水圧計のサン

図-5 現地実験箇所

図-6 現地実験箇所の対策工の平面配置

図-7 通常断面と対策工の水圧の比較

リング間隔は20Hzの連続観測とし、計測データは20分毎に区切り潮位変動分を差し引いた上で、ゼロアップクロス法により有義振幅値に統計処理を行った。

(2) Coマットによる間隙水圧低減効果

図-7は、20分毎の正負の水圧全振幅の有義値の観測期間中の全データについて、Coマット区間と対策無し区間を比較したものである。両者には線形関係が見られ相関が高い。また、Coマット区間では対策無し区間に比べて約20%圧力が低減されており、水理模型実験と同程度の水圧変動低減効果であった。

(3) 各区間のシートの損傷状況

図-8は、シート敷設から約4ヶ月経過後の2月19日と、約5.5ヶ月経過後の4月7日の各区間のシートの損傷個数を比較したものである。損傷とは、シートに穴が空いたりシートが裂けた状態のことで、目視により確認可能な損傷は、全て損傷個数として計上している。

F層が無い断面②③では、F層が有る断面①④に比べて損傷個数が多く、最大損傷孔径も大きい。このように、F層を設置することによりシートの損傷個数や損傷孔径の低減効果が確認されたが、約5.5ヶ月経過後ではシートに損傷が多く発生していることから、F層などの対策を行ったとしても早期に埋め立てを行う必要があると言える。

図-8 各区間の防砂シート損傷個数

4. 防砂シート損傷に与える回折波の影響

(1) 波高分布計算の概要

シート損傷調査期間中の沖波波高2m以上の条件を対象に、数値計算により港内波高分布を求め、回折波がシート損傷に与える影響を検討する。

波高分布計算はMadsen型Boussinesqモデル (NOWT-PARI Ver.4.6) を使用した。格子間隔 Δx および Δy は10mとし、エネルギー吸収層は波長の2倍以上として300mとした。計算時間間隔 Δt は0.05sとした。方向集中度パラメータは、計算沖波の波形勾配から、全ての計算ケースで $S_{max}=10$ とした。

なお、シート損傷調査期間中 (2008年10月20日～2009年4月7日)、白老港沖の水深25m地点では一部の期間 (2008年12月16日から2009年2月17日) しか波浪観測は実施していない。このため、白老港から東へ約10kmに位置するナウファス苦小牧 (波高計水深-50m) と白老港沖の波浪データの相関を取り、白老港沖で波浪観測を実施していない期間については、ナウファス苦小牧の波浪データとの相関関係から白老港沖の波高を求め、数値計算の入力波高条件とする。

図-9は、有義波高1.5m以上を対象とした、白老港沖とナウファス苦小牧の有義波高と有義波周期の相関を示している。有義波については相関係数は0.88と比較的良好く、白老港では浅水変形等により苦小牧に比べて波高が小さくなっている。また、有義波周期については白老港沖とナウファス苦小牧と同程度であった。

以上より、白老港沖で波浪観測を実施していない期間の白老港沖水深25m地点の数値計算の入力波高条件は、有義波高 $H_{1/3}$ についてはナウファス苦小牧の有義波高に0.87を乗じた波高とし、有義波周期 $T_{1/3}$ についてはナウファス苦小牧と同一周期とした。なお、波向きについては、白老港からナウファス苦小牧の間は単調で直線的な砂浜海岸であり、観測波浪データからも屈折による波向

図-9 白老沖と苦小牧沖の有義波高の相関

図-10 波高分布計算結果の一例

きに違いが見られなかったことから、白老港沖の波向きはナウファス苦小牧と同一波向きとした。

(2) 数値計算による回折波とシート損傷個数

図-10は、数値計算結果の一例で、白老港の沖波最大

時 ($H_{1/3}=3.1\text{m}$, $T_{1/3}=7.4\text{s}$) の波高分布である。現地調査箇所前面の有義波高は1.0～2.0m程度である。また、現地実験箇所は背後の岸壁により遮蔽域となっているが、回折波により0.3～0.5m程度の比較的大きな波高分布となっていることが分かる。

図-11は、現地実験5.5ヶ月間のナウファス苦小牧沖水深50mの有義波高、波高分布計算による現地実験箇所の港外側と港内側の波高、各区間のシート損傷個数を示している。シート損傷調査期間中、波高が2m以上の沖波は全部で14回出現しており、その間シートの損傷箇所数は増加する傾向にある。シート損傷調査1回目～2回目の期間 (H20.12.9～H21.1.9の32日間) に着目すると、この期間中には2mを越える沖波は発生しておらず比較的静穏であった。また、波高分布計算からも港内側の回折波高は0.10mと静穏であるが、F層が無い断面②③ではシートに1個の損傷が発生している。

次に、シート損傷調査2回目～4回目の期間 (H21.1.10～H21.1.26の17日間) に着目すると、17日の間に3.2mの波が1回と2.0m以上の波が2回と大きな波が発生しており、シートの損傷個数は断面②では6個、断面③では4個と損傷個数が急激に増えた。また、波高分布計算による回折波高の最大値は0.29mであり、比較的大きな回折波が堤体背後にも来襲していたと考えられる。

一方、シート敷設開始～1回目の期間 (H20.10.20～H20.12.8の50日間) では、苦小牧沖では2m以上の波が5回と荒天が続く、波高分布計算による回折波高も最大で0.22mであるが、断面②ではシートに損傷が発生せず、断面③でも2個の損傷であった。この理由は、シート自体の耐久性により、ある程度の日数迄ではシートに損傷が発生しないためと考えられる。

なお、断面① (Asマット+F層) では3回目のシート損傷調査迄の86日間は損傷が発生しておらず、対策による効果が確認されたが、4回目調査時点 (シート敷設後99日経過後) では損傷が発生していることから、対策を行っても早期に埋め立てを行うことが必要である。

(3) 回折波がシート損傷に与える影響

波高分布計算結果から、1月23日の白老港の沖波最大時における護岸前面波高は1.52m、回折波高は0.29mであった。この内、図-3や図-4に示した結果から、F層を設置した場合の回折波高0.29mによるひずみは52 $\mu\epsilon$ 、マットとF層を行った場合の堤体前面波高1.52mによるひずみは18 $\mu\epsilon$ となり、堤体前面からの波に比べて回折波によるシートひずみが約3倍大きかったと考えられる。

また、卓越波向であるSE方向4ケースの護岸前面の平均波高は0.65m、平均回折波高は0.13mであり、堤体前面

図-11 現地の波浪状況と防砂シート損傷箇所数

からの波に比べて回折波によるひずみが約2.5倍大きいと推定される。

5. おわりに

本研究では、施工途中の防波護岸に作用する波が防砂シートに与える影響を調べるとともに、防砂シートの損傷防止対策工の効果について、水理模型実験と現地実験により検討した。その結果、波高や周期が同一条件においては、背面波によるシートひずみは前面波に比べて2オーダー近く大きい事が確認された。また、シート損傷防止対策工として、Coマットやフィルター層による水压低減効果やひずみ低減効果が確認された。さらに、現地実験では対策工のシート損傷防止効果が確認され、マット単独で施工するよりも、フィルター層を組み合わせた断面で効果が大きかった。

しかし、護岸背後をあらかじめケーソンで囲った現地実験条件でも、回折波は前面波に比べてシートへの影響が約3倍大きく、0.1m程度の小さな回折波でもシートには損傷が発生した。このことから、シートの損傷を防止するためには施工時の回折波の影響を極力排除するとともに、対策を行っても早期に埋立を行うように努める必要がある。

参考文献

- 菅原吉浩・山本泰司・上久保勝美・大井啓司・時田恵生 (2010) : 護岸の吸い出し被災事例調査と被災要因の検討, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.867-872.