

越流のエネルギー減衰に及ぼす堤防裏法被覆工の相対粗度間隔に関する研究

Evaluation of energy reduction by changing relative spacing of protection blocks on back slope of sea embankment

埼玉大学 准教授 八木澤 順治

1. 研究背景と目的

2011年東日本大震災時には、多くの地点で津波が海岸堤防を越流し、裏法尻の巨大な洗掘、高速流による裏法被覆工の流失によって堤体に大きなダメージを与えた。こうした大きな越流を伴う状況下においても、内陸への越流量・流体力を最小限に抑えるために、越流に対して粘り強い堤防を構築することが減災上非常に重要である。海岸堤防の裏法面は凹凸のあるコンクリートブロックを被覆することが多く、岩手県の小本川河口の海岸堤防では裏法地盤との落差が10m程度と大きく、震災時に2-3mの越流水深があったにもかかわらず、それほど大きな洗掘が生じていなかった。このことから越流によるエネルギーを効果的に減少させる粗度間隔があることが示唆される。しかしながら、従来の研究では底面の凹凸によってエネルギー減衰を促す研究は数多くなされているものの、常流・緩勾配条件化での検討が多く、海岸堤防の裏法面のように急勾配で射流が発生するような条件下での検討はあまり例を見ない。そこで、本研究では裏法被覆工の粗度形状がエネルギー減衰・洗掘軽減に及ぼす効果を明らかにするため、水理模型実験により最適な粗度間隔、高さを種々の越流条件化で把握することを目的とする。

2. 研究手法

津波襲来時には津波の規模、海岸堤防高に応じて、様々な越流状況が想定される。このように条件が大きく異なる津波特性・海岸堤防の形状特性に応じて広く適用可能な裏法被覆工の形状(粗度間隔や高さ)を明らかにするためには、「裏法面での越流水深(相対水深)」と「堤防形状(堤防高、法面勾配)」という両者の影響を把握することが重要である。また、津波時には堤防天端においてフルード数が1を大きく上回る流れが越流するが、このような条件下でのエネルギー減衰特性については特に未解明な部分が多い。

上記を踏まえ、以下の2つの検討を実施した。

2-1 相対粗度間隔によるエネルギー減衰効果把握のための水理模型実験 (実験1)

実験モデルは実スケールの1/30を想定し、長さ400 cm、幅40 cm、高さ50 cmの水路に、高さ30cm、裏法勾配が1/3の木製堤防モデルを設置して実験を実施した(図-1)。堤防モデルの裏法面に一辺の長さ3.0mmの正方形断面の棧粗度モデルを一定間隔で設置し、相対粗度間隔 s/k が7ケース、相対水深3ケースの計21ケースを実施した(表-1)。

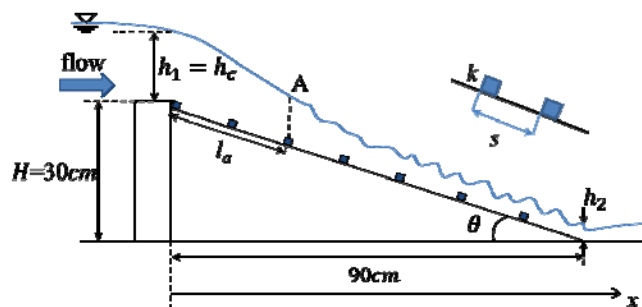


図-1 実験1の実験装置概要図

表-1 実験1および2の実験条件一覧

相対粗度間隔 s/k	相対水深比 h/H					
	0.1		0.15		0.2	
	実験1	実験2	実験1	実験2	実験1	実験2
0(粗度無し)	○	○	○	○	○	-
4	○	-	○	-	○	-
6	○	○	○	○	○	-
8	○	-	○	-	○	-
10	○	-	○	-	○	-
12	○	○	○	○	○	-
14	○	-	○	-	○	-

本実験では、コントロールとして裏法面に粗度を配置しない実験も合わせて実施し、粗度配置の変化がエネルギー減衰、に及ぼす効果を浮き彫りにする。

裏法肩の相対水深が実験条件を満たし定常流となった状態で、ポイントゲージを用いて法肩から下流190cmまでの水面形を測定した。その際、ポイントゲージを落とした際の波の伝播から擾乱の開始点Aを測定し、Aと最も近い水面形の測定点から法肩までの長さ l_a を測定した。また、堤防頂部において限界流が生じる条件とベルヌーイの式、連続式より、裏法肩と裏法尻それぞれの水深を用いてエネルギー減衰率 E_{loss} を $E_{loss}=(E_1-E_2)/E_1$ より算出した。ここで、 E_1 は裏法肩のエネルギー水頭、 E_2 は裏法尻のエネルギー水頭である。

2-2 裏法尻付近の局所洗掘実験（実験2）

1)と同様の水路を用いて定常流条件下で実験を行う。1)で明らかとなったエネルギー減衰特性が大きく異なる水理条件・粗度条件下において、裏法尻以降に移動床($d_{50}=4\text{mm}$)を設置し、静的洗掘が生じる条件下で実験を実施した。実験では、移動床部分が平衡状態になるまで実験を継続し、どのケースでも概ね30分程度で平衡状態に至ったことを確認している。

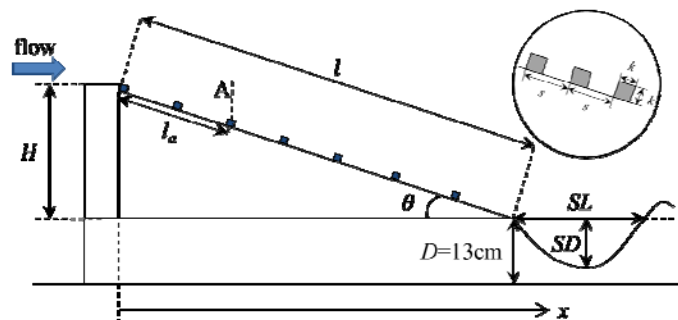


図-3 実験2の実験装置概要

3. 実験結果

3.1 射流条件下での s/k によるエネルギー減衰率の相違

相対粗度間隔 s/k によるエネルギー減衰率の変化を表したグラフを図-4に示した。 h/H が0.1, 0.15, 0.2ともに、 s/k が増加するとエネルギー減衰率も増加していき、エネルギー減衰率が最大となる点、つまり最も減勢に効果的な s/k が全ての h/H のケースで12となった。それより s/k が増加し、 $s/k=14$ になるとエネルギー減衰率は小さくなっていった。この図より、 s/k が小さすぎると粗度間の凹部が死水域となり抵抗が小さくなる一方、 s/k が大きすぎると単純に粗度要素の抵抗が小さくなるという常流条件で確認されている傾向が射流条件でも確認できた。また、射流条件ではエネルギー減衰率が大きくなる s/k の範囲が、常流条件よりも大きくなる方向にシフトした。この現象におけるエネルギー減衰の要因は、粗度の抗力と、粗度後背で生じる剥離流による運動量交換の二つである。エネルギー減衰率が大きくなる s/k の範囲が常流条件の場合と変化した理由として、射流となり常流条件よりも粗度上部の流速が大きくなったことで、粗度後背で生じる剥離流が再付着し十分に運動量交換を起こすのに必要な長さが伸び

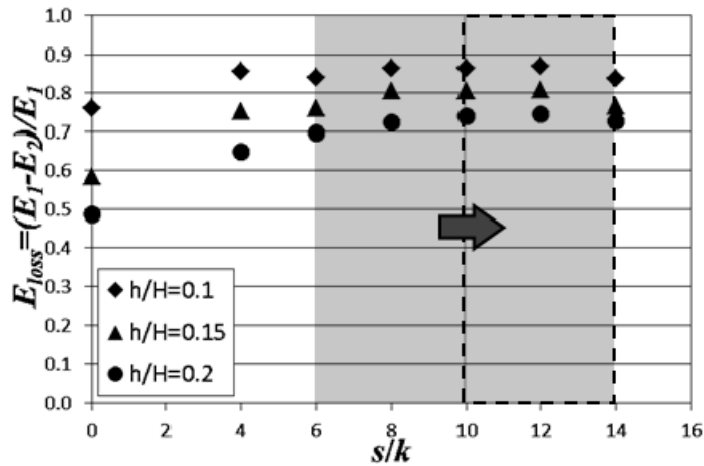


図-4 相対粗度間隔によるエネルギー減衰率の比較

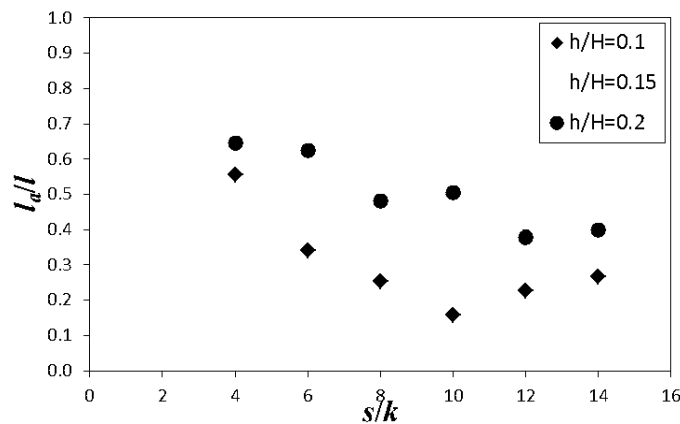


図-5 相対粗度間隔による l_d/l の比較

表-2 擾乱前後での平均エネルギー勾配の比較

s/k	10			12			14		
h/H	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2
1A間	0.25	0.18	0.22	0.30	0.26	0.22	0.24	0.23	0.23
A2間	0.35	0.41	0.43	0.55	0.64	0.74	0.35	0.37	0.38

たためと考えられる。

また、 s/k による l_d/l の変化を図-5に示した。擾乱開始位置がケースによって異なっていることがわかる。 h/H が0.1, 0.15の場合は s/k が10から12で l_d/l は最も小さくなり、その後は s/k の増加とともに l_d/l は増加した。 h/H が0.2ではピークは見られず s/k の増加とともに l_d/l は減少した。 E_{loss} が最大となる s/k の範囲について、擾乱開始位置であるA点を境界とした1A間(上流側)とA2間(下流側)の平均エネルギー勾配の s/k と h/H による変化を表-2に示した。比較した全ケースで1A間よりA2間の方が、平均エネルギー勾配が大きいことがわかる。エネルギー減衰率が最大となる $s/k=12$ の場合、1A間とA2間の平均エネルギー勾配の比は h/H が0.1, 0.15, 0.2のとき、それぞれ1.83, 2.46, 3.36となり、比較したケースの中で最も勾配の変化が大きかった。2011年の東北地方太平洋沖地震津波以降、海岸堤防本体を可能な限り維持するため、裏法面上に裏法尻保護のために盛土する試みがある。裏法尻をできるだけ長く保護するという目的上余盛り高さはなるべく大きく取るべきだが、図-3で示すA点よりも上部に盛土した場合、エネルギー減衰が十分生じる前の高エネルギーの越流水によって大きく洗掘され、内陸への土砂流入量を増

加させてしまう可能性がある。

3-2 エネルギー減衰率が大きく異なる条件下での裏法尻の局所洗掘

3-1でエネルギー減衰率および流れの構造が大きく異なる $s/k=0$ (粗度無し), 6, 12のケースにおいて, 裏法尻での局所洗掘特性を調べた。ここでは, 図-3に示すように形成された洗掘孔のうち最大洗掘深を S_D , 裏法尻から原河床高さまで堆積した点までの距離を洗掘長 S_L と定義し, s/k による相違を把握した。図-6に s/k による無次元洗掘深(S_D/E_1), 無次元洗掘長(S_L/E_1)の変化を示す。

洗掘深についてみると, s/k が大きくなるにつれて無次元洗掘深が減少していることがわかる。この傾向は相対水深比が0.1でも0.15でも同様の傾向であった。一方, 洗掘長についてみると, $s/k=0$ のケースでは洗掘長が最も小さくなった。その後, $s/k=6$ で最大となり, $s/k=12$ でやや減少するという傾向が見て取れる。このことは, $s/k=0$ のケースでは他の2ケースと比較して裏法尻付近の鉛直方向への洗掘により多くのエネルギーを消費していることが考えられる。また, この結果から, エネルギー減衰率が最も高かった $s/k=12$ のケースでは, 洗掘深, 洗掘体積ともに最小化できるケースであることが示唆される。しかしながら, 相対水深比が0.15の場合, 0.1の場合と比較して急激に洗掘長が大きくなる傾向にある。そのため, より大きな越流水深を想定した場合, 侵食体積の観点から $s/k=12$ でも効果が得られなくなる可能性もあるため, この点については今後の課題としたい。

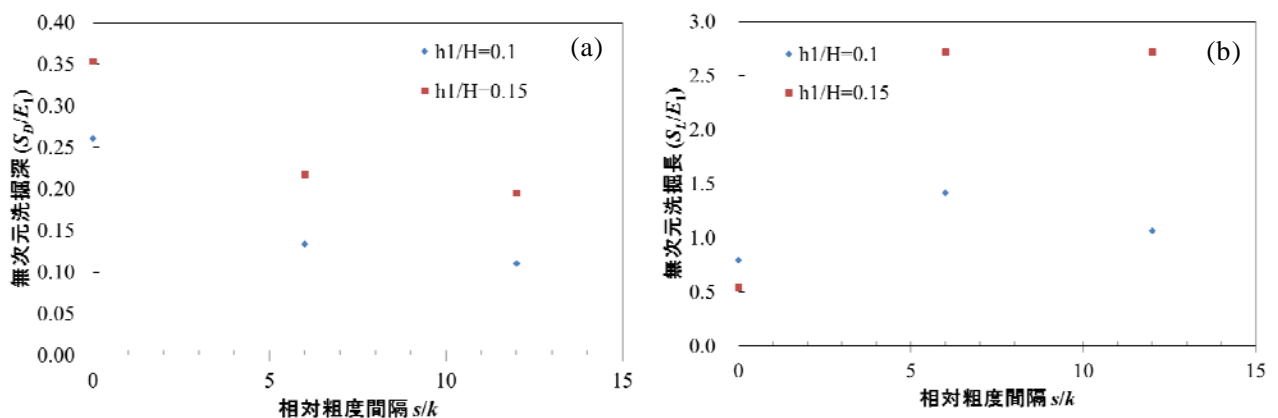


図-6 相対粗度間隔と無次元洗掘深(a), 無次元洗掘長(b)との関係

4. おわりに

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 相対粗度間隔 s/k が10-12でエネルギー減衰率が最大となり, その範囲は常流条件の場合($s/k=6-10$)よりも大きくなることがわかった。
- 2) 越流による裏法尻周辺の局所洗掘特性を調べたところ, $h_1/H=0.1-0.15$ の範囲では, エネルギー減衰率が大きかった $s/k=12$ で無次元洗掘深, 無次元洗掘長ともに最小化し, 洗掘規模を小さくできることがわかった。

(発表論文)

狩野匠, 八木澤順治: 堤防裏法被覆工の相対粗度間隔が越流のエネルギー減衰に及ぼす影響, 平成28年度土木学会全国大会第71回年次学術講演会 (2016年9月発表予定)