

防波堤のマウンド被覆におけるフィルターネットの効果

志村 豊彦*・五明美智男**・大 中 晋***・堀 沢 真人****

1. はじめに

1層被覆ブロックは, その形状による噛み合わせ効果と上方に設置されるブロック自重による抑え効果等によって高い耐波安定性を示すことが知られている。そのため, 防波堤の新規立地に際し, 1層被覆ブロックを適用して設計・施工の合理化を図ろうとする試みがなされるとともに, 傾斜堤等への適用実績も増えつつある(例えば千田ら, 1992)。しかしながら, 従来多く採用されてきた2層被覆と比較した場合, 1層で被覆するという特徴を持つが故に, 被覆ブロックの下層の安定性にも十分留意する必要があることは言うまでもない。特に, 高波浪海域における傾斜堤や混成堤に適用する場合には, 完成断面での安定性照査はもちろんのこと, 適切な質量比を維持するために設置されるフィルター層あるいは捨石コア・マウンドに対して, 施工途中における安定性の確保と急速施工に対する検討が不可欠と考えられる。

以上のような背景から, 著者らは1層被覆ブロック下層の設計, 施工の合理化を目的とし, 水理実験による検討を進めている。傾斜堤のコア層に注目した予備的な検討結果によれば, コア層と被覆ブロックとの質量比が1/15~1/10よりも小さくなる場合でも, コア材を拘束しコア層の変形を抑制することによって被覆ブロックの安定性を高めることができる(志村ら, 1999)。本論文では, こうした知見をふまえて考案したフィルターネットについて提案するとともに, 急勾配海底上の傾斜堤と混成堤マウンドに適用した際の水理実験結果を示し, フィルターネットの機能と効果について考察する。

なお, 本文では, 傾斜堤, 混成堤の断面形状の各部について, 総称として被覆層・フィルター層・コアまたはマウンド層, 材料として被覆ブロック, フィルター材, コアまたはマウンド材と呼ぶこととする。

2. フィルターネットの特徴

フィルターネットは, 傾斜堤, 混成堤の被覆層の耐波

安定性と急速施工を両立させることを意図としたものであり, 水理学的には以下に示すような機能と効果を期待している。

- ①捨石コア・マウンド材粒径と同程度の目合を持ち, コア・マウンド材の移動, 吸出しを低減する。
- ②被覆ブロックとの質量比が1/15~1/10よりも小さくなる捨石コア・マウンド材を用いた場合でも, ネットの効果によって捨石コア・マウンドおよび被覆ブロックの安定性を確保する。
- ③被覆ブロックと捨石コア・マウンドとの間に敷設され, フィルターブロックや被覆石の代替となる。
- ④捨石コア・マウンドの施工後に敷設され, その後の施工途中において捨石コア・マウンドの保護の役目を有する。

3. 実験方法

3.1 実験施設および実験模型

実験は, 片面ガラス張りの2次元造波水槽内に勾配1/20の固定床を設け, 図-1に示すような捨石傾斜堤および混成堤模型を設置して行った。1層被覆ブロックには使用実績の多いアクロボッドを, コア・マウンド材には粒度調整した碎石を用いた。また, フィルターネットには, 捨石粒径と同程度の目合を持ち, 碎石の表面の凹凸

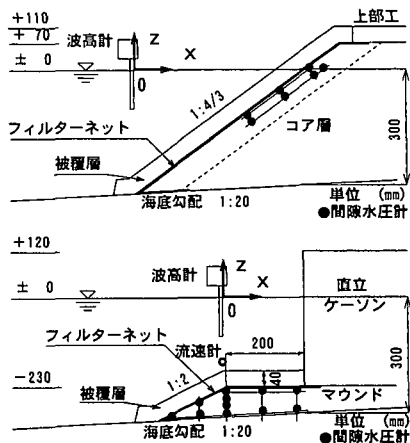


図-1 堤体断面および計測位置

* 正会員 工修 東亜建設工業株式会社技術研究所
** 正会員 水修 東亜建設工業株式会社技術研究所
*** 正会員 工修 東亜建設工業株式会社土木本部設計部
**** 正会員 東亜建設工業株式会社土木本部設計部

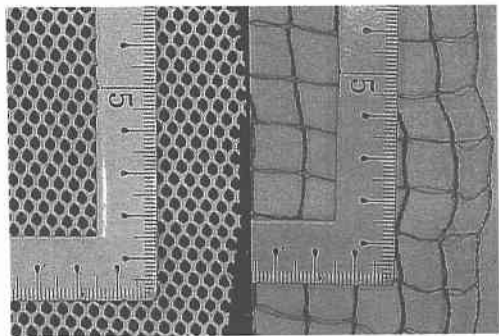


写真-1 フィルターネット

に馴染む布状および網状のネットを用いた（写真-1）。

3.2 実験条件

実験の実施にあたっては、①コア・マウンド材の質量（粒径）、②作用波の波高・周期、③フィルターネットの有無をパラメーターとした。ここで、コア・マウンド材としては、質量加積曲線の中央値が被覆ブロック質量の約1/12、1/50、1/220 となる碎石を用いた。その理由としては、Shore Protection Manual（CERC, 1984）あるいは港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会, 1989）において傾斜堤のコア材質量比として1/15～1/5、1/15～1/10 が推奨されていることから、十分な安定性が期待できる1/12 を基本として比較するためである。主な実験条件は表-1 に示すとおりである。

表-1 実験条件

被覆ブロック			アクロボッド $M_a=77.6\text{ g}$
コア・マウンド材碎石			$M_{50}=0.35, 1.57, 6.67\text{ g}$
			$D_{90}=5.1, 8.4, 13.6\text{ mm}$
ネット			目合 3×3 mm, 10×10 mm
作用波	規則波	傾斜堤	周期 1.7, 2.3 s 波高 5～25 cm
		混成堤	周期 1.5, 1.9, 2.3 s 波高 5～25 cm
	不規則波	傾斜堤	$T_{1/3}=1.7\text{ s}, H_{1/3}=15.5\text{ cm}$
		混成堤	$T_{1/3}=2.3\text{ s}, H_{1/3}=11.5\text{ cm}$

3.3 計測内容および計測方法

被覆ブロックおよび捨石コア・マウンドの変形を観察するとともに、図-1 に示す位置に容量式波高計、超音波流速計、歪みゲージ式間隙水圧計。土圧計を設置し、①ブロックの挙動及び被害率、②コア・マウンドの変形量、③被覆ブロック法肩直上での水面変動と流速、④コア・マウンド内の間隙水圧と土圧変動を測定した。4 種類の周期の規則波を用いた被覆ブロックの安定実験では小さい波高のものから順に 200 波づつ、コア・マウンドの変形

実験では不規則波を 1000 波または 3000 波作用させ、サンプリング周波数 100 Hz でデータの集録を行った。被覆ブロックの変形量については、水平または鉛直方向に被覆層厚さの 4 cm 以上移動したものを被災とした。一方、コア・マウンド材の場合には、着色した碎石をあらかじめコア・マウンド表面に並べ、波作用後にブロックを撤去し移動状況を観察するとともに、水槽横断方向中央の断面を含む 5 測線でポイントゲージを用いて地盤高を測定し、侵食・堆積量を算出した。なお、実験結果の記述にあたり、被覆ブロックとコア・マウンド材の質量比を次式で定義した。

質量比 M_{50}/M_a

$$= \frac{\text{コア、マウンド材の質量加積曲線の中央値 (g)}}{\text{被覆ブロックの平均質量 (g)}}$$

.....(1)

4. 実験結果

4.1 ネットがない場合の被災特性

フィルターネットが無い場合の傾斜堤、混成堤の被災特性について、それぞれ規則波を用いた安定実験時の観察結果から概説する。

傾斜堤に質量比 1/12 のコア材を用いた場合コア層の変形はほとんどなく、被覆ブロックは従来指摘されているように高い安定性を示した。この際、安定限界波高を超える波で被災を生じさせると、波の遡上時には法肩付近のブロックの移動が、引き波時には水位最下点付近のブロックの浮遊離脱が見られた。しかしながら、質量比が 1/50、1/220 のコア材を用いた場合には、コア層の変形が先行して生じブロックの被災へと伝播する形態であった。しかもその初期には 2 つの被災形態が複合しており、一つは法肩から静水面付近のコア材が掃流状態で移動を繰り返すことによりコア層が次第に侵食され、ブロックが沈下あるいはロッキングする形態であった。もう一つは、全体的に緩やかな勾配へと移行するもので、水位最下点付近でコア層の膨らみが生じる形態であった。

一方、アクロボッドを混成堤のマウンド被覆に用いた場合については報告例がほとんどないことから、被災が発生し拡大するまで波高を作用させた際の被災形態について記述する。質量比 1/12 のマウンド材を用いた条件では、傾斜堤同様マウンド層の変形はほとんどなく質量不足による被覆ブロック被災が先行し、被覆ブロックのロッキング後に被覆層からの抜け出し・移動が見られた。しかしながら、質量比 1/50 の場合には、作用波の周期によって被災状況に違いが見られた。すなわち、1.5、1.9 秒の波を作用させた場合には、マウンド層法面の変形によるブロックの滑りと散乱が発生するのに対し、2.3 秒の波の場合には被覆ブロックの被災が先行する形態で

あった。また、混成堤の場合の注目すべき現象として、高波高時の流動化が挙げられる。これは被覆ブロックおよびマウンド層上部の碎石が集団となって瞬時浮上する動きを指しており、流動化が頻繁に発生するようになると最終的には多数のブロックが沖側に散乱しマウンド層も変形する。

4.2 小粒径コア・マウンド材使用時におけるネットの効果

4.1 で示した被災状況のうち、小粒径コア・マウンドに対するフィルターネットの効果を確認するために、フィルターネットを設置して同一条件での安定実験を実施した。

a) 被災限界に対する効果

表-2 は、被覆ブロックの被災限界の波高値から被害率 0% に相当する K_D 値、 N_s 値を推定したものである。

傾斜堤、混成堤ともに、ネットがない状態では質量比 1/50、1/220 のコア・マウンド材を用いたときの K_D 値、 N_s 値は、1/12 のものよりも小さくなっている。しかしながら、ネットを設置した場合には、質量比 1/50、1/220 においても 1/12 と同程度まで K_D 値、 N_s 値が増大する。

表-2 被災限界におけるブロックの K_D 値、 N_s 値

M_{50}/M_a	傾斜堤 K_D 値		混成堤 N_s 値	
	ネットなし	ネットあり	ネットなし	ネットあり
1/12	43.9	—	3.74	4.23
1/50	22.6	43.9	2.66	3.74
1/220	7.4	51.8	2.89	4.45

b) 被災進捗に対する効果

図-2、図-3 は、コア・マウンド材質量比をパラメータとして、それぞれ傾斜堤と混成堤の波高と被覆ブロック被害率の関係を示したものである。

傾斜堤の場合、ネット無しで質量比 1/220、1/50 のコア材を用いると、コア材の変形によって比較的小さな波高で初期被災に至り、その後急速に被災が進む。しかしながら、ネットを施設すると、質量比 1/12 と同様の被災進捗状況となる。一方、混成堤で質量比 1/220、1/50 のマウンド材の条件では、傾斜堤と同様比較的小さな波高で初期被災に至るが、その後の被災の進み方は緩やかであった。ネットを敷設した場合には、a) でも述べたように被災限界波高が増大するとともに、被災の進捗もさらに緩やかになり、やはり質量比 1/12 と同様の被災状況まで改善される。

このように、ネットを設置することによって、コア・マウンド材の変形が主因となる被災が抑制され、質量不足によって被災が発生する波高レベルまで安定性が向上する。

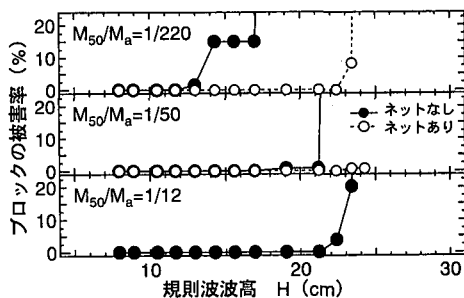


図-2 傾斜堤のブロック被害率と質量比の関係

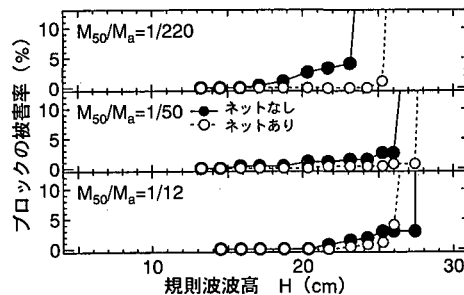


図-3 混成堤のブロック被害率と質量比の関係

さらに、こうした被覆ブロック安定性の改善効果は、コア・マウンド層さの安定性と密接な関係にあることから同一の不規則波を作用させコア・マウンド材の移動・散乱状況を確認した。図-4、図-5 は、傾斜堤コア材と防波堤マウンド材の変形量とコア・マウンド材質量比の関係を示したものである。傾斜堤コア層の変形量については、静水面付近から法肩にかけてのコア材の吸出しやコア層の侵食がブロックの安定性に大きな影響を及ぼしていることから、van der Meer (1987) が捨石堤にたいして提案した変形パラメータ $S/N^{0.5}$ ($S=A/D_{50}^2$, A : 法肩の侵食量, D_{50} : コア材質量加積曲線の中央値に対する代表径, N : 波数) を用いた。また、防波堤マウンド層の変形量については、沖向きの水平移動が卓越したため、法肩部分のマウンド材の水平移動量 x (沖向きの動きを正) をマウンド材粒径 D_{50} で無次元化したパラメータで表している。これらの図より、フィルターネットを敷設することによって明らかにコア・マウンド材の侵食量、移動量が低減している。これより、フィルターネットを敷設することによってコア材の侵食・膨らみ、マウンド材の変形が抑えられ、その結果被覆ブロックの安定性が改善されたことがわかる。

4.3 周期の異なる波作用に対するネットの効果

傾斜堤、防波堤の安定性は周期にも依存することから、質量比 1/50 の条件において周期を変えた安定実験を行い、ブロック被害率に及ぼす周期の影響について調べた。

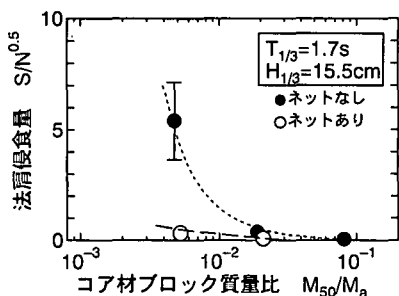


図-4 傾斜堤のコア層法肩の侵食量

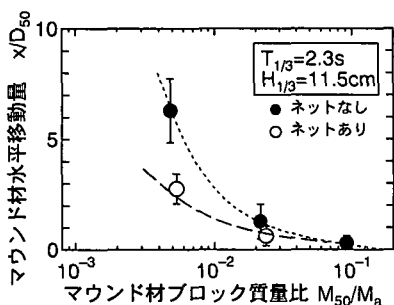


図-5 混成堤のマウンド材法肩部の水平移動量

図-6 はネットの有無，周期の違いをパラメータとして傾斜堤の被覆ブロックの被害率を示したものである。ネットを敷設しない場合，短周期の波作用時には被災限界波高が小さくなるが，ネットを敷設することによって周期 2.3 秒と同様の安定性が確保されている。アクロポッドを傾斜堤に用いたときの安定性については，周期の影響はほとんどないとされているが (van der Meer, 1988)，フィルターネットを用いることによってコア材の安定性が確保されればこうした特性が発揮される。

同様に，図-7 は混成堤マウンドの被覆ブロックの被害率を示したものである。ネットを敷設しない場合には，マウンド層法面の変形によるブロックの滑りと散乱によって，作用波の周期が小さいほど安定限界波高が小さく，しかも限界波高を越えた後の被災が速く進捗していることがわかる。一方，ネットを敷設すると，すべての周期で安定限界波高が大きくなり，被災の進捗が緩やかになることがわかる。ちなみに，ネットを敷設した場合でも，短周期で安定限界波高が小さくなる傾向があることから，混成堤マウンドの被覆材としてのアクロポッドの安定性は，周期に依存するものと考えられる。

以上より，周期による異なった被災形態に対しても，フィルターネットを設置することによって安定限界波高を増大させ，粘り強さを発揮させることができるものと確認された。

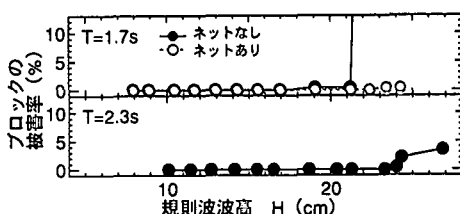


図-6 傾斜堤のブロック被害率に対する周期の影響

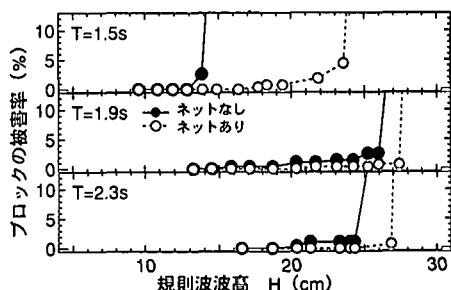


図-7 混成堤のブロック被害率に対する周期の影響

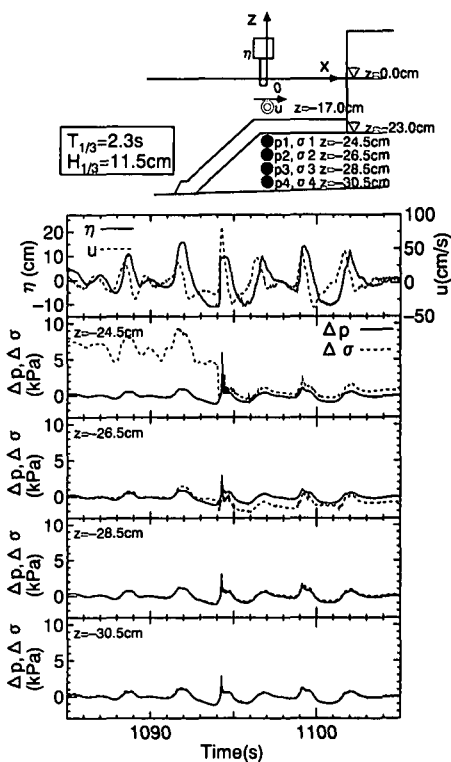


図-8 不規則波群中の流動化の一例

4.4 流動化に対するネットの効果

上述したように，混成堤の場合，作用波高が大きくなると流動化が発生する。ここでは，流動化のメカニズムとその対策としてのネットの効果について示す。

図-8 は，不規則波 ($H_{1/3} = 11.5$ cm, $T_{1/3} = 2.3$ s) を作

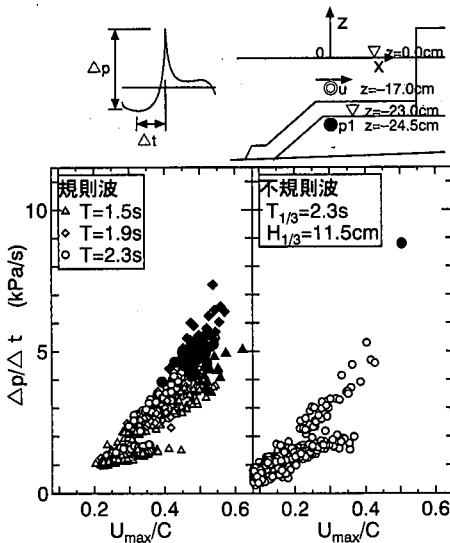


図-9 波速流速比と間隙水圧変動速度との関係

用させた時に、図中に示す位置で計測した、水位 η 、流速 u と変動間隙水圧 Δp 、変動土圧 $\Delta \sigma$ の時系列の一例を示したものである。流動化は 1000 波中、時刻 1094 s 付近で 1 回のみ見られ、前面水位が極端に低下した後に砕波が突込んだ時に生じており、非常に大きな岸向き流速と変動間隙水圧がほぼ同時に発生している。また、 $z = -24.5, -26.5$ cm では変動土圧は流動化後にゼロ点がシフトしていることから、流動化に伴ってマウンド材が動いたことがわかる。

図-9 は、規則波（左側）および不規則波（右側）による安定実験時に計測した被覆ブロック上の流速、 $z = -24.5$ cm の位置での変動間隙水圧をそれぞれ流速・波速比 ($U_{\max}/C$) と間隙水圧変動速度 ($\Delta p/\Delta t$) との関係で表したものであり、図中の黒抜きの記号が目視による流動化データを示している。今回の実験条件においては、規則波実験の結果から波速・流速比が 0.4~0.5 以上、間隙水圧変動速度が 4~5 kPa/s 以上の範囲で流動化が生じていること、不規則波実験で流動化が生じた波では、波速・流速比、間隙水圧変動速度ともに規則波で示された流動化範囲にあることがわかる。また、空隙率の大きな被覆ブロック層において流動化が発生していること、および流動化範囲がフィルターネットの有無によって大

差ないことから、ネットの有無は流動化の発生には影響しないことがわかる。言い換えれば、フィルターネットを設置しても流動化を防ぐことは困難であるが、フィルターネットによってマウンド材が拘束されるため流動化後の散乱は抑制することが可能である。

4.5 被覆ブロック被災後や施工中のコア・マウンドの保護効果

フィルターネットの設置に際しては、コア・マウンドの法先とケーソン下端を両端部として一枚のネットを設置し、法線方向に重複部分を設けることによって、施工途上や一部ブロックが被災した個所でもコア・マウンド材の流出を防ぐことが可能と考えられる。固定方法については今後検討を要するものの施工途上の被災対策としても十分有効であると考えられる。

5. おわりに

急速施工を要求されるような高波浪海域において、フィルターブロックや被覆石の代替として、水理特性面でのフィルターネットの効果が確認された。今後は大縮尺実験で安定性を確認するとともに、水理特性のみならずフィルターネットの材質等構造面での検討を実施していく予定である。

なお、本研究の実施にあたり、ご助言を頂いた東北ポール株式会社庄司氏、亀岡氏ならびに遠藤氏に感謝の意を表します。

参考文献

- (社)日本港湾協会 (1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 改訂版, 下巻, p. 28.
- 志村豊彦・五明美智男・大中晋・堀沢真人 (1999): フィルター層が 1 層被覆ブロックの安定性に与える影響, 第 54 回土木学会年次学術講演会概要集, 第 2 部, pp. 40-41.
- 千田壽一・開発澄夫・小林正典 (1992): 新型消波ブロック (クロボッド®) の導入, 電力土木, No. 236, pp. 90-99.
- Coastal Engineering Research Center (1984): Shore Protection Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Vol. 2, pp. 7-239-7-240.
- van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armor layers design formulae, Coastal Engineering, Vol. 11, pp. 219-239.
- van der Meer, J. W. (1988): Stability of Cubes, Tetrapods and Accropode, Proc. Conf. Breakwaters '88, pp. 71-80.