

消波ブロック被覆堤マウンド被覆 ブロックの安定性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON STABILITY OF ARMOR BLOCKS OF MOUND
IN BREAKWATER COVERED WITH WAVE-DISSIPATING BLOCK.

小泉哲也¹・小椋進¹・橋本雷士¹

Tetuya KOIZUMI, Susumu OGURA, Raishi HASHIMOTO

西村正²・金田研一郎²・森川高德²

Tadashi NISHIMURA, Kenichiro KANETA, Takanori MORIKAWA

¹国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所（〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町一丁目
57番地の2）

²玉野総合コンサルタント（株）海洋部（〒461-0005 名古屋市東区東桜二丁目17番43号）

The weight of the armor block on the mound of the breakwater covered with wave-dissipating blocks might be smaller than that of the breakwater without wave-dissipating blocks, however the fit weight has not been studied so much. Therefore, the water velocity around the armor blocks and the damage rates of the armor blocks, of the breakwater covered with wave-dissipating blocks are studied in experiments and are compared with those of the breakwater without wave-dissipating blocks. Additionally, the diagram giving the fit weight of the armor block on the mound of the breakwater covered with wave-dissipating blocks for an allowable damage rate of 1% by using the N_s value is proposed.

Key Words : breakwater covered with wave-dissipating block, armor block of mound,
the diagram giving the fit weight, hydraulic experiment

1. はじめに

外洋に面した海域や大水深域など高波浪、長周期の波浪が来襲する場所では、ケーソン前面を消波ブロックで被覆したタイプの混成堤（以降、消波ブロック被覆堤と呼ぶ）が多く建設されている。ここで、消波ブロックの無い通常の混成堤基礎マウンドにおける法肩被覆材の安定性は、来襲波の波高、周期（波長）やマウンド天端幅等に支配され、その所要質量は「 N_s を用いたハドソン式」を基に算定することが可能であるが、これを消波ブロック被覆堤に当てはめた場合、かなり過大な質量を与えることが知られており、結果、消波ブロック被覆堤に対する法肩被覆材の所要質量を適切に推定することができない現状にある。

そこで、本研究では、消波ブロック被覆堤について流速及びマウンド安定実験を実施し、混成堤と比較しながら、被覆ブロックの所要質量を軽減できる要因やその安定特性を明らかにするとともに、設計

等の基礎資料に資することのできる「マウンド被覆ブロックの概算所要質量推定手法」を提案することを目的とする。

2. 実験内容

(1) 実験装置

実験は、国土交通省中部地方整備局伊勢湾水理環境実験センターの二次元水路で行った。実験水路は、図-1に示すように、長さ30m、幅1m、深さ1.2mからなり、水路の一端に設置されている吸収制御方式のピストン型造波装置で、単一方向不規則波を造波することができる。

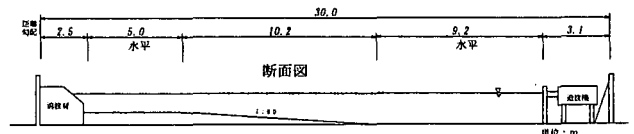


図-1 実験水路

(2) 実験条件

実験波は、流速実験では $H=2.0\text{m}$ 、 $T=14.0\text{s}$ の規則波一種類を用いた。一方、マウンド安定実験では外洋や大水深域の設計波を参考に $H_{1/3}=8.0\text{m}$ 、 10.0m の2種類、 $T_{1/3}=13\sim 14\text{s}$ 、 $17\sim 18\text{s}$ の2種類を組み合わせた計4種類の不規則波を対象とし、周波数スペクトルは、いずれも、修正ブレットシュナイダー・光易型を目標とした。

防波堤マウンドの条件は、天端水深 -15m 、肩幅 32.56m 、法面勾配 $1:2$ を基本形とし、前面水深は流速実験が -23m の1種類、マウンド安定実験では -28m 、 -36m も加えた3種類に変化させてマウンド高さの違いを考慮し、各々、消波ブロックの有無による特性を検討した（図-2参照）。

被覆ブロックは、両実験ともマウンド天端の一部及び法面の水深 -20m 前後まで配置した。

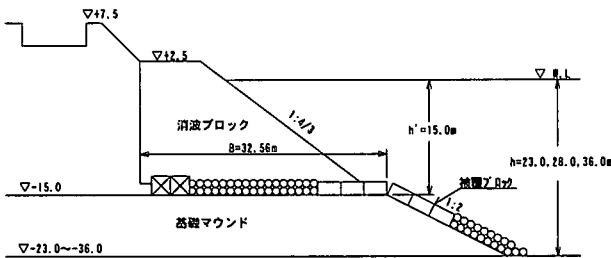


図-2 実験対象防波堤

(3) 実験及び解析方法

a) 流速実験

図-3は、実験に使用した模型断面及び流速測定位置を示したものである。流速は、水平的に、マウンド法肩付近から沖方向へ現地約30m程度まで伸ばした範囲を1つのラインとして、水深 -6m 、 -9m 、 -12m 、 -15m の計4ラインを設け、各ライン毎に、図中に示す7～8点の測点を設置し、計31測点において、超音波式流速計により測定した。同時に、目視観察を行い、重複波の節の形成位置を探った。測定の繰り返し回数は3回とし、各測定時の解析対象波は、造波後の第1波が堤体に反射して造波板に戻った時刻から、その再反射波が再び堤体に到達する間における目標波1波とした。

解析に際しては、目標波1波における押し波時、引き波時の各最大流速値（絶対値）を平均して当該波の代表流速とし、さらに、繰り返し回数3回の平均をもって、最終的な測定流速値とした。

各測点で得られた実験結果より、各ライン毎に流速分布を作成し、混成堤と比較しながら、消波ブロック被覆堤の流速特性を把握した。

b) マウンド安定実験

図-4は、実験に使用した模型断面及び平面を示したものである。安定実験の対象範囲は、水路幅1mの中央50cm幅分において、マウンド法肩を挟んだ

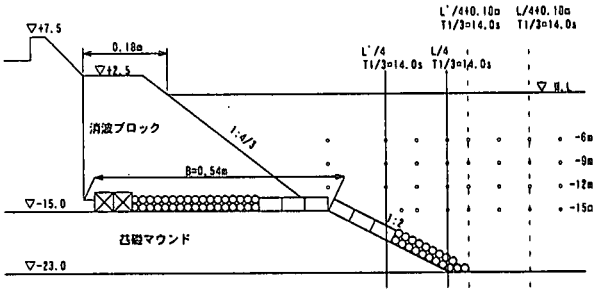


図-3 流速実験模型及び測点

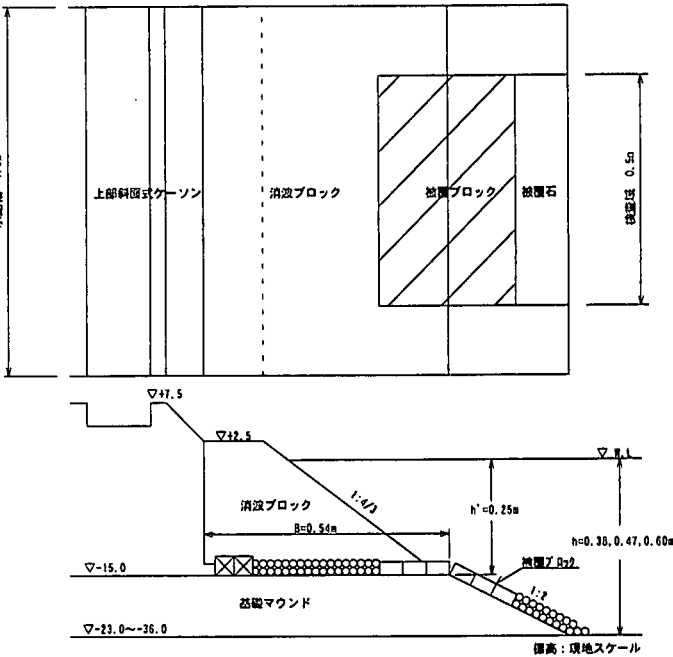


図-4 安定実験模型及びブロック被覆範囲

表-1 主な実験条件

項目	流速実験	安定実験
模型縮尺	1/60	
波高(H, H _{1/3})	2m(規則波)	8m, 10m(不規則波)
周期(T, T _{1/3})	14s	13~14s, 17~18s
作用波数	1波	1000波以上
防波堤タイプ	消波ブロック被覆堤(上部斜面式)	
	混成堤(上部斜面式)	
前面水深h	-23m	-23m, -28m, -36m
マウンド水深h'	-15m	
マウンド肩幅B	32.56m	
被覆ブロック質量	6t	2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 25t

天端、法面各々3列分の被覆ブロックとした。各ケースの実験作用波数は1000波以上、繰り返し回数は3回とした。

被覆ブロックの被害状況は目視観察により把握し、ブロックほぼ一個分以上の移動があったものを「被害」とみなし、それ以外は「動揺」として「被害」の対象とはしていない。実験では、2、4、6、8、10、12、16、20、25tの計9種類の被覆ブロックを準備し、各波浪諸元毎に、任意の質量のブロックを

設置して、繰り返し回数3回の平均被害率が、設定した許容被害率1%未満となる最小質量の被覆ブロックを探った。ここに、被害率は、被害個数を50cm幅内の全被覆ブロック個数(母数)で除して算出するが、母数は断面によって異なり、既往の実験結果より得られている所要被覆範囲を基に、前面水深-23m時が法面水深-19mまで、前面水深-28m時が同-22mまで、前面水深-36m時が同-25mまでの範囲をカバーする所要ブロック個数を母数とした。

解析では、実験より得られた各条件における所要被覆ブロック質量について、混成堤と比較しながら、消波ブロック被覆堤の安定特性を検討した。さらに、実験結果をもとにして、安定数Nsを用いた消波ブロック被覆堤における被覆ブロック概算所要質量推定図を作成した。

3. 消波ブロック被覆堤の重複波流速特性

(1) 重複波の流速分布特性

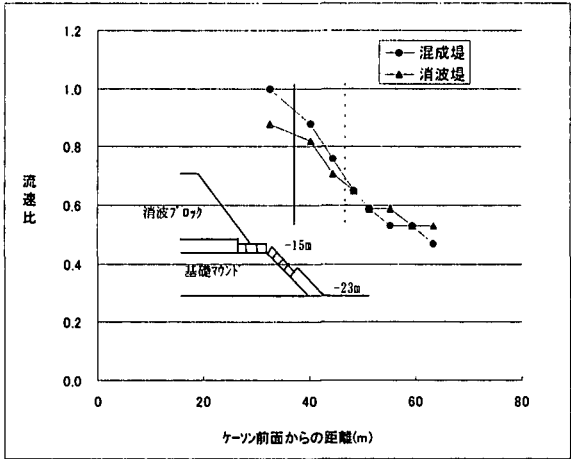
図-5は、流速を測定した水深-6~-15mラインのうち、水深-9m及び-12mラインにおける水平位置と流速の関係を混成堤、消波ブロック被覆堤で比較したもので、各ラインにおける混成堤の最強流速に対する比として示してある。これをみると、両防波堤とも、マウンド法肩直上に流速のピーク点が存在するものの、マウンド法面上での流速は、全体的に消波ブロック被覆堤の方が遅く、法肩からマウンド中腹付近までは混成堤の80~90%程度にとどまる結果となっている。

(2) 重複波の節の位置の特性

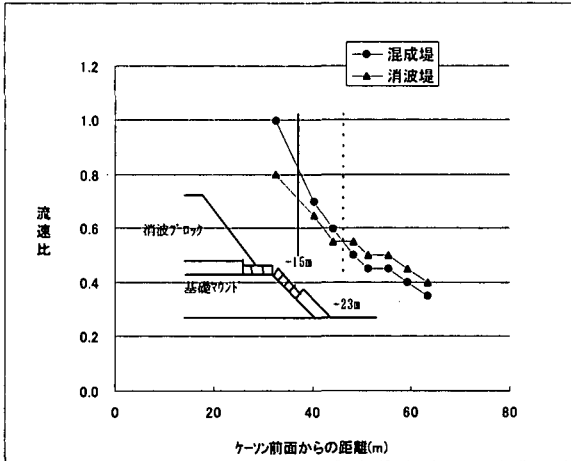
ここでは、重複波の強流速地点となる「節」の位置¹⁾に着目する。図-5中に示した実線及び破線は、実験時において目視観察により確認した混成堤及び消波ブロック被覆堤における概略的な「節」の位置を示したものである。ここに、概略的と記した理由は、特に、消波ブロック被覆堤の場合、押し波時と引き波時で節の位置が多少岸沖方向に変化し、幅をもって存在するためである。

はじめに、「混成堤」の「節」についてみると、ケーソン前端から約35mの位置にあり、これは、マウンド天端水深-15mにおける相当水深波長L'のほぼ1/4に相当する位置となる。よって、本マウンド条件の場合、「節」の位置は、マウンド水深波長に支配されていることが解る。

一方、消波ブロック被覆堤の場合、「節」の位置は混成堤に比べ沖側へシフトしていることが解る。両者の「節」の間隔は10m程度であり、これは、静水面付近の消波ブロック厚に近似する幅である。このことから、消波ブロック被覆堤の「節」が沖方向へシフトする一要因は、消波ブロックが存在することで、反射面の一部が沖にせり出すためであるものと推測される。また、消波ブロックの存在は、実質的なマウンド法肩幅を短くすることが予想され、結果、混成堤時にマウンド天端水深の影響を受けてい



(a) 水深-9mライン



(b) 水深-12mライン

図-5 消波ブロック被覆堤と混成堤の流速特性

た前面波長がマウンド法先水深方向に移動するようになったことも、「節」を沖方向にシフトさせた要因として考えられる。

なお、図-5の流速分布をみると、マウンド法先近傍より沖側では、消波ブロック被覆堤の方がわずかに速い流速となっているが、これは、消波ブロック被覆堤の場合、「節」が沖側へシフトして法先付近に形成され、その周辺の流速が速まるためと考えられる。

以上のことから、消波ブロック被覆堤のマウンド被覆ブロック所要質量を混成堤より軽減できる要因は、消波効果による前面波浪場の静穏化に加え、重複波の「節」が法肩から沖方向へ遠ざかることで、法肩付近の流速が全体的に低下するためであるものと推測される。

4. 消波ブロック被覆堤のマウンド安定特性

(1) 波高・周期と所要ブロック質量の関係

図-6は、各前面水深毎に、波高・周期の違いによる所要被覆ブロック質量を示したものである。

はじめに、波高と所要質量の関係をみると、前面水深-23m時では、 $H_{1/3}$ が8mから10mに高まることで、所要質量は4、6tから8、12tとなり、4～6t程度の質量増が必要となっている。前面水深-28m時も、 $H_{1/3}$ が8mから10mに高まることで、前面水深-23m時同様、4～6t程度の質量増が必要となっている。これに対し、前面水深-36m時では、傾向が異なり、 $H_{1/3}$ が8mから10mに高まることで、13tの質量増を要する場合も有れば、逆に、まったく同様な質量でも安定的となる例もみられる。ブロックの被害は、ほとんどが法肩を挟んだ法面及び天端1列で発生するが、許容被害率1%を指標とする「所要質量」前後の質量では、被害の発生にはかなりのバラツキがみられる。実験時の観察によれば、有義波高クラスの波で、微妙な動揺を繰り返すうちに、ブロック同士のかみ合わせが強固になる場合があり、こうした条件では、ほとんど被害が発生しない。前面水深-36m時の $H_{1/3}=10\text{m}$ 、 $T_{1/3}=13\text{s}$ では、 H_{max} 近傍の波で天端、法面のブロックが激しく動揺するが、次第に強固なかみ合わせが形成され、結果、質量20tのブロックでも被害に至らなかった例であり、安全側の観点に立てば、25t以上が実際の所要質量であったものと推測される。

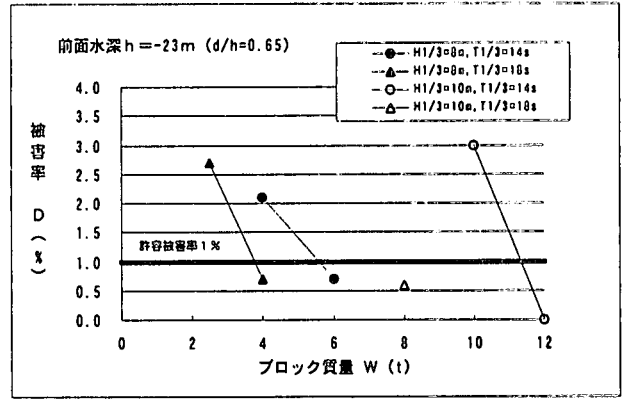
次に、周期との関係をみると、同じ波高の場合、ほとんどの条件で、 $T_{1/3}=13\sim14\text{s}$ 時の所要質量が $T_{1/3}=17\sim18\text{s}$ 時のそれを上回る結果となっている。ここで、両周期帯におけるケーソンからのマウンド肩幅Bとマウンド天端水深 h' での相当水深波長 L' の比 B/L' をみると、各々、0.20～0.22、0.15～0.16となっている。このことは、 $T_{1/3}=13\sim14\text{s}$ の場合、 $T_{1/3}=17\sim18\text{s}$ 時に比べ、重複波の強流速点となる「節」が法肩部に近いところで形成されたことを意味し、これが、当該周期帯で大きな所要質量を要する要因となっている。

(2) マウンド前面水深と所要質量の関係

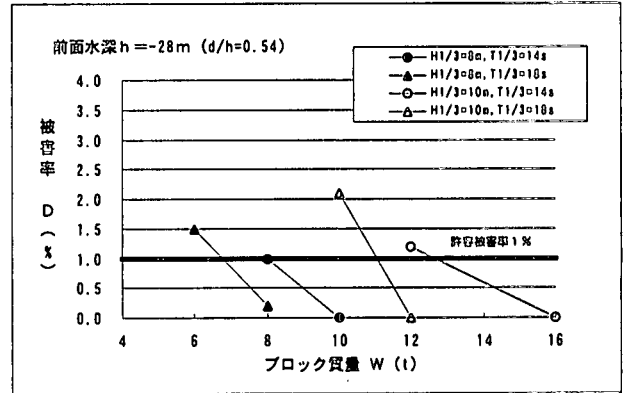
図-7は、消波ブロック被覆堤について、マウンド前面水深と所要被覆ブロック質量の関係を示したものである。これをみると、いずれの波浪条件においても、マウンド前面水深が深くなるほど、所要質量は大きくなっており、前面水深-36m時の所要質量は、前面水深-23m時の1.7～3倍程度まで増加している。前面水深が大きくなることは、すなわち、高マウンド条件となることを意味する。既往の研究によれば、混成堤の場合、高マウンド条件では、マウンド被覆ブロックの被害が増大することが指摘されており²⁾、消波ブロック被覆堤においても、同様な傾向となることが解った。

(3) 消波ブロックの有無による被覆ブロックの安定特性

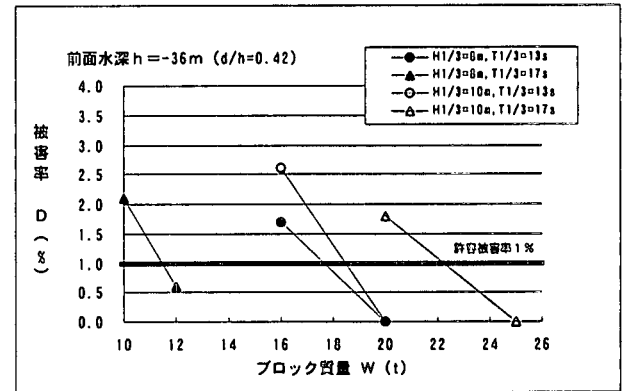
図-8は、 $H_{1/3}=8\text{m}$ 、 $T_{1/3}=17\sim18\text{s}$ の波浪諸元において、前面水深と所要被覆ブロック質量の関係を、混成堤、消波ブロック被覆堤で比較したものである。図中には、参考的に、 $H_{1/3}=10\text{m}$ 時の消波



(a) 前面水深-23m



(b) 前面水深-28m



(c) 前面水深-36m

図-6 波高・周期と被害率の関係

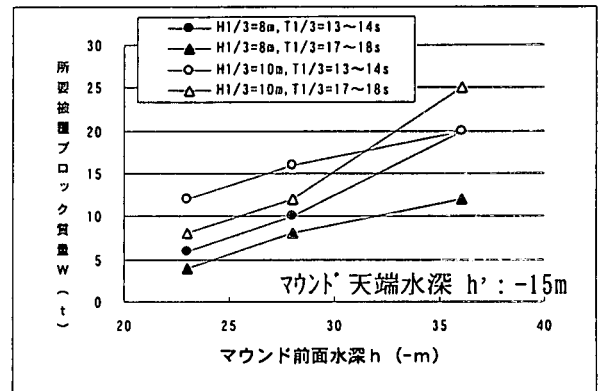


図-7 マウンド前面水深と所要質量の関係

ブロック被覆堤所要質量も併記してある。これを見ると、所要質量は、いずれの前面水深においても、消波ブロック被覆堤の方が軽く、混成堤の50%程度にとどまる結果となっている。また、別の視点で見ると、消波ブロック被覆堤における $H_{1/3}=10\text{m}$ 時の所要質量が、ほぼ、混成堤の $H_{1/3}=8\text{m}$ 時のそれに相当していることが解る。

図-9は、反射率と所要被覆ブロック質量の関係を、混成堤、消波ブロック被覆堤で比較したものである。これを見ると、反射率は混成堤が0.6~0.7、消波ブロック被覆堤が0.5~0.6の範囲にあり、消波ブロック被覆堤の反射率は相対的に低くなっている。また、各前面水深毎では、反射率の低下とともに所要質量は減少していることが解る。低反射率は、前面重複波浪場を静穏化させ、マウンド上での流速を減少させる効果がある。

このようなことから、消波ブロック被覆堤の場合、マウンド法肩付近の重複波流速が、流速実験の項で述べた「節の沖方向への移動」に加え、上述の「低反射率」によって「減衰」するため、その所要質量を混成堤に比べ低減できるものと判断される。

5. N_s を用いた消波ブロック被覆堤におけるマウンド被覆ブロック所要質量推定手法の提案

図-10は、実験より得られた各波浪諸元、各前面水深毎の所要被覆ブロック質量を基に安定数 N_s を求め、相対マウンド肩幅(B/L')をパラメータに、相対マウンド高(d/h)に対する関係を示したものである。ここに、マウンド法肩幅 B は、流速実験結果を踏まえ、反射面が消波工と静水面の接する位置と想定して、ケーソン～法肩までの距離から静水面での消波ブロック厚を差し引いた距離とした。波長 L' はマウンド天端水深での相当水深波長をとっている。また、図中の線は、安全側の観点に加え、必要に応じ、実験時の被害状況を考慮してやや詳細な所要質量を想定し(例: 25tが所要質量であっても、その状況が動揺もないほど安定的であったり、20t時の被害が1%をわずかに越える程度の被害である場合、実質的な所要質量は、25tではなく、22~23tと想定できる)、参考的に引いたものである。

この図より読みとった N_s 値をハドソン式²⁾に代入することで、本実験で対象とした被覆ブロックに関し、任意の波高、周期、マウンド肩幅、マウンド天端・前面水深に対する概算の所要質量を推定することができる。

なお、図-11は、 $T_{1/3}=17\sim 18\text{s}$ の波浪諸元において得られた混成堤の所要質量より、同様に安定数 N_s を求め、同一周期帯での消波ブロック被覆堤の N_s と比較したものである。なお、混成堤の場合のマウンド肩幅 B は、ケーソンからの距離を対象としている。これを見ると、消波ブロック被覆堤の N_s^3 は、混成堤に比べ20~90程度高くなっており、それだけ安定性が高いことがうかがえる。

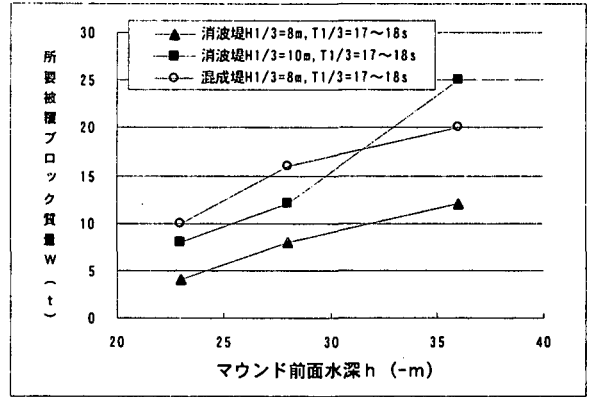


図-8 消波ブロック被覆堤と混成堤の所要質量の比較

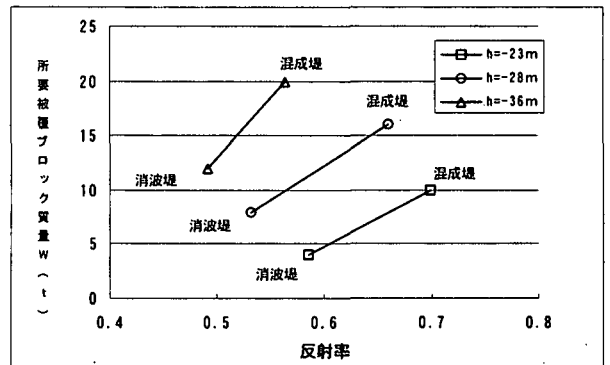


図-9 反射率と所要質量の関係

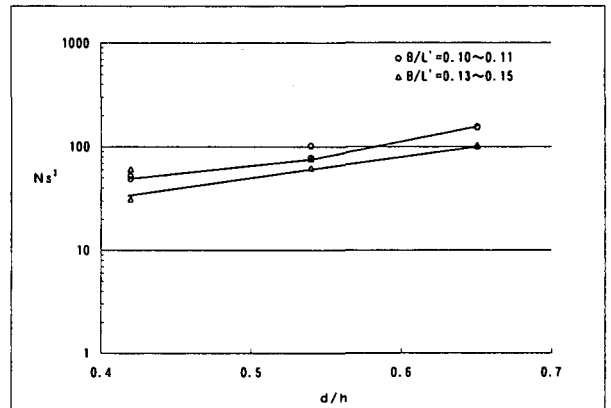


図-10 消波ブロック被覆堤におけるマウンド被覆ブロックの安定数 N_s 推定図

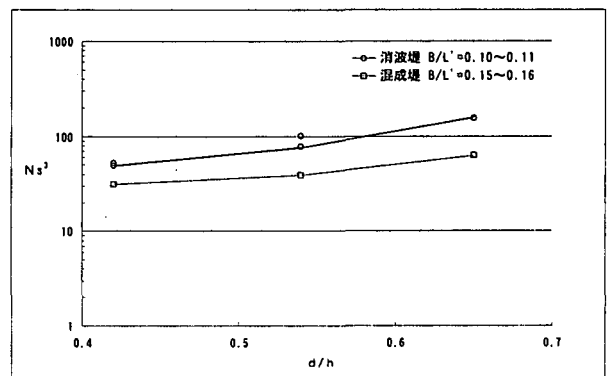


図-11 消波ブロック被覆堤と混成堤での安定数 N_s の比較

6. 主要な結論

本研究では、外洋や大水深域に建設される「消波ブロック被覆堤」について流速及びマウンド安定実験を実施し、「混成堤」と比較しながら、被覆ブロックの所要質量を「混成堤」より軽減できる要因やその安定特性を検討した。その主要な結論は以下のとおりである。

- ①マウンド法面上での流速は、全体的に「消波ブロック被覆堤」の方が遅く、法肩からマウンド中腹付近までは「混成堤」の80～90%程度にとどまることが解った。
- ②重複波の強流速地点となる「節」の位置に着目すると、「消波ブロック被覆堤」の場合、「混成堤」に比べ沖側へシフトすることが目視観察により確認された。この一要因は、消波ブロックによって、反射面が沖側にせり出したためと推測される。
- ③①、②のことから、「消波ブロック被覆堤」のマウンド被覆ブロック所要質量を「混成堤」より軽減できる要因は、消波効果による前面波浪場の静

穏化に加え、重複波の「節」が法肩から沖へ遠ざかることで、法肩付近の流速が全体的に低下するためであるものと推測される。

- ④被覆ブロックの所要質量は、いずれの前面水深においても「消波ブロック被覆堤」の方が軽く、 $H_{1/3}=8.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=17\sim 18\text{s}$ の場合、「混成堤」の50%程度にとどまることが解った。
- ⑤実験より得られた所要被覆ブロック質量を基に安定係数 N_s を求め、相対マウンド肩幅 (B/L') をパラメータに、相対マウンド高 (d/h) に対する関係を示した。この図より読みとった N_s をハドソン式に代入することで、本実験で対象とした被覆ブロックに関し、任意の波高、周期、マウンド肩幅、マウンド天端・前面水深に対する概算の所要質量を推定することができる。

参考文献

- 1) 合田良美, 佐藤昭二: 海岸・港湾, 靖国社, 1991
- 2) 谷本勝利, 柳生忠彦, 村永努, 柴田鋼三, 合田良実: 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第3号, pp. 3～42, 1982