

透過性構造物の減勢機構に関する実験的研究

久保 弘 一*・井田 保 夫**

1. 緒 言

捨石や種々の消波ブロックによって構成された捨石堤あるいは混成防波堤マウンドや、海岸堤防前面の根固工あるいは消波工による波浪の減勢効果についてはすでに多くの研究が行なわれ、波力の減衰、遡上高、越波量の減少等の効果が大きく評価されている。しかしながら、このような透過性構造物による減勢の機構、すなわち空げきの機構については空げき内における水流の相互干渉によるエネルギー損失によって波力が減衰するという事実のほかは不明確な点が多く、空げき率あるいは空げきの絶対値と波力減衰との関係、透過層厚と波力減衰との関係、すなわち減勢に役立つ透過層の厚さ等に関しては、定量的にはもちろん、定性的にも明らかにされていない問題が多い。

また近年海岸堤防前面に消波構造物が設置される例が多くなるとともに根固工あるいは消波工前面の洗掘の問題が大きく取り上げられてきた。

海岸に構造物を設置すればその周辺に何らかの海底地形の変動を生ずることは当然で、ことにその構造物の前面には局所洗掘を生ずる場合が多く、これが構造物自身の沈下、崩壊にただちにつながって行く。捨石、ブロック等で構成された透過性構造物については、不透過性構造物ほどではないにしても、実際にはかなり著しい洗掘現象が見られる場合が多く、のり先洗掘による消波層の崩壊、ひいては構造物全体の破壊につながって行く。したがって、消波構造物自身については、その消波、越波防止機能は非常に高く評価されながらも、のり先の洗掘防止対策については苦慮している。

以上のほか、透過性構造物の問題として、理論的、現象的に不明確な点も多く、これらについて筆者らは「透過性構造物の減勢機構」に関する問題としてとり上げ、種々の観点から問題を提起し実験的に研究してきた。本論は現在までに得られた成果を取りまとめたものであり、主として前二者の問題について考察を進めたものである。すなわち、透過性構造物の空げきの機能については、構造物構成粒子の大きさおよび透過層の厚さと透過率との関係を明らかにするために定常流による検討を行

なうとともに、波動についても比較的静的な圧力条件下で、透過層内における波圧の伝達について考察を進めた。またのり先洗掘の問題については、比較的海底土砂が沖へ持去られることの多い急勾配海浜を対象として、その洗掘形態と洗掘量およびその時間的変動を追跡して洗掘機構の究明を行なうとともに、さらに洗掘防止法として最近用いられているサンドマット工法についても若干の model test を行なった。

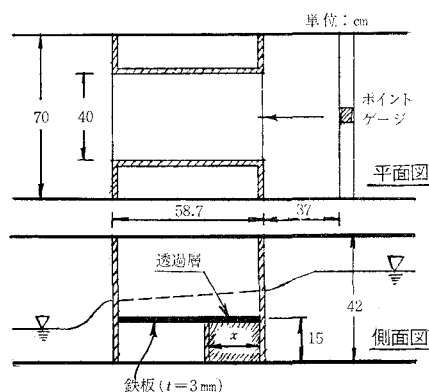
2. 透過性構造物の透過率について

(1) 実験設備および方法

幅 0.7 m、長さ 20 m のコンクリート水路中に 図-1 に示すような狭さく部 (幅 40 cm) を設け、この部分に 15 cm の高さに数種の粒径のガラス玉、砂利および消波ブロック模型 (中空三角ブロック、テトラポッド、六脚ブロック) を種々の層厚に填充し、定常流を流した時の各層の透過流量 (q_p) を求めた。実験に用いた条件は表-1 のとおりである。なお、消波ブロックの透過層については、透過層の大きさが各ブロックの大きさの整数倍ではないため、余分な空げきができるが、この部分には石こうで作ったブロックを必要な大きさに欠いて填充し、一様なブロック透過層を形成した。

透過流量は全流量から越流量を差し引いて求めたものであるが、越流した水流を透過流量と分離するため、透過層天端を鉄板で仕切った。なお、越流量はあらかじめ検定しておいた越流水深と越流量の関係から求め、さらに実験中適宜、チェックしたものである。

図-1



* 正会員 大阪工業大学助教授

** 正会員 大阪工業大学助手

表-1

	大 き さ	層 厚 x (cm)	空 げ き 率 E (%)	流 量 q (l/sec)
ガ ラ ス 玉	$d=16, 25, 40$ mm	10, 20, 30, 40, 58.5	39.5 ~ 56.6	25.2
砂 利	$d_{50}=13.5, 25.1, 44.7$ mm	10, 20, 30, 40, 58.5	39.6 ~ 45.0	25.2
ブ ロ ッ ク	中 空 三 角 $W=125, 250$ g	13.5 ~ 55.5	56.8 ~ 63.4	25.2
	テ ト ラ ポ ッ ド $W=250$ g	17.5, 18.0, 38.0, 58.5	51.5 ~ 60.8	25.2
	六 脚 $W=250$ g	19.0 ~ 57.0	53.7 ~ 64.7	25.2

(2) 実験結果と考察

実験結果から、ガラス玉、砂利、ブロックの各透過層について透過流量と全流量の比、すなわち透過率($S\%$)を求め、層厚 x 、粒径(ブロックの場合は代表的寸法) d 、空げき率 E が透過率におよぼす影響を求めた。

ガラス玉および砂利層について、 x/d と透過率との関係を示すと 図-2、3 のとおりである。図-2 から明らかなように、粒径 d のいかにかわらず、ほぼ同一の傾向を示し、 x/d の増大につれて透過率は指数関数的に減少し、 x/d がかなり大きくなると、一定値に近づくようである。

つぎに空げき率と透過率との関係について検討してみる。球を規則正しく積み上げて透過層を構成する場合、その空げき率は球径のいかにかわらず一定のはずであるが、透過層の大きさと粒径との関係から実際には条件によって空げき率が多少、異なっており、ほぼ40~50%の範囲にある。この範囲内では空げき率と透過率との間は一義的な関係は見出し得ない。すなわち、空げき

率の大きいものが必ずしも透過率が大きいということにはならない。

砂利層の場合(図-3)にもほぼ同様な傾向を示すが前の図-2と比較して見ると、一般にガラス玉透過層の場合にくらべて透過率が大きく、とくに層厚が大きくなるとその差が顕著になる。両方の相対応する粒径について見ると、空げき率はむしろガラス玉のほうが大きいにもかかわらず、透過率としては逆の結果が示された。これはある範囲内の空げき率については、透過率は空げき率よりもむしろ空げきの大きさ、形状、その配置によって支配されることが大きいことを示すもので、同一形状の空げきの規則正しい配列の場合よりも、不規則な大小混合した複雑な配置の空げきの方がエネルギーが透過しやすいことを示す。また砂利層について、粒径10~20mm(平均粒径13.5mm)の場合には、他にくらべてかなり透過率が低くなっているが、これは空げきの絶対値がある程度以上小さくなると、透過率が急激に減少する事実を示している。

つぎに実際に用いられている2、3の消波ブロックの透過率についての実験結果を示す。使用したブロック模型は中空三角、テトラポッド、六脚ブロックの3種類で中空三角ブロックは125g、250g(1tおよび2tブロックの1/20)の2種類を用い、これを層積に配列した。またテトラポッドおよび六脚ブロックはいずれも250g(2tブロックの1/20模型)のものを用い、その配置はテトラポッドについては2層目正、逆の2種類、六脚ブロックは突き合わせ式、千鳥式粗、乱積みの3種類を採用した。なお、透過層の寸法はブロックの寸法の整数倍になっていないので、不自然な空げきが生じないように石こうで造ったブロックを切り欠いて空げき部を填充したことは前述のとおりである。ブロック透過層のそれぞれについて層厚と空げき率を示すと表-2のとおりで、

図-2

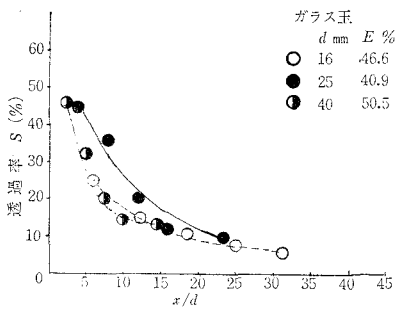


図-3

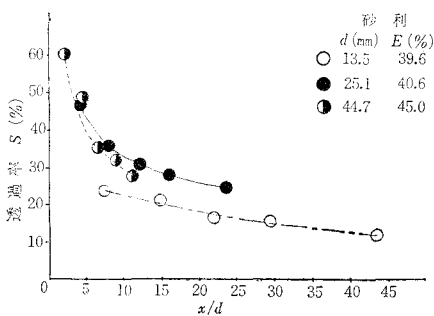


表-2

ブ ロ ッ ク 層 の 種 類	層 厚 x (cm)	空 げ き 率 E (%)
中空三角ブロック・125 g	13.5 ~ 55.5	59.3 ~ 63.4
同 ・ 250 g	16.5 ~ 50.5	56.8 ~ 61.2
テトラポッド・2層目正	17.5 ~ 58.7	60.8 ~ 51.5
同 ・ 同 逆	18.0 ~ 58.5	56.0 ~ 55.3
六脚ブロック・突き合わせ式	19.0 ~ 57.0	55.5 ~ 56.1
同 ・ 千鳥式粗	19.5 ~ 54.0	62.8 ~ 64.0
同 ・ 乱 積 み	20.0 ~ 55.0	62.9 ~ 63.6

図-4 中空三角ブロック

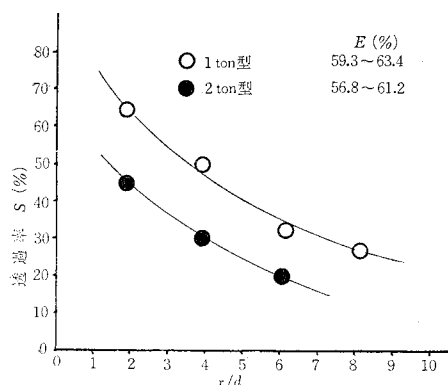


図-5 テトラポッド 2t 型

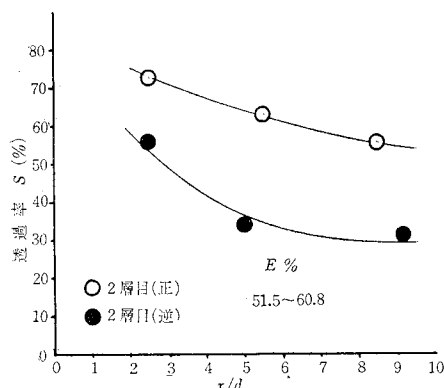
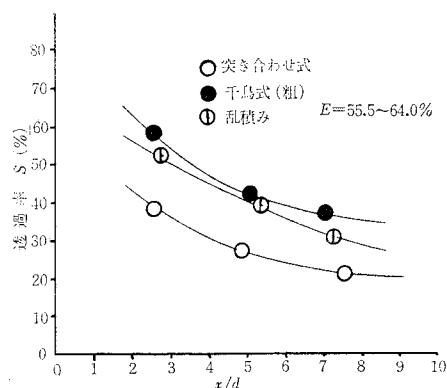


図-6 六脚ブロック 2t 型



一般にこれらのブロックの設計に用いられている空げき率より高くなっている。

実験の結果から、 x/d と透過率 S の関係を示すと、図-4、5および6のようになる。図から明らかなように、透過率はガラス玉、砂利にくらべてかなり大きく、かつ層厚の増加による減衰率も小さい。これはブロックの方が空げき率が大きく(55~65%)、かつ空げきの大きさも前者にくらべてかなり大きいことから当然のことで、層厚の増大にともなって approach する透過率の値もほぼ20~30%で、ガラス玉、砂利に比して相当大きくなる。

したがって侵入エネルギーの伝達も砂利層にくらべて相当な層厚まで伝達されることは明らかである。

つぎに各ブロックの種類および積み方による透過率の相違を同重量のブロックについて比較して見ると、最も透過率の小さいのは六脚ブロック突き合わせ式と三角ブロック(250g)の2つで、前者は六脚ブロックの他の2つの積み方に比して空げき率が最も小さいことから見て、当然の結果であると考えられる。六脚ブロックの千鳥式粗および乱積みはほぼ同一の透過率で空げき率もほぼ等しい。テトラポッド2層目逆はこれよりやや小さいがほぼ同じ傾向を示す。テトラポッド2層目・正の場合は他にくらべて非常に透過率が大きく、ことに2層目・逆の場合に比べると空げき率はあまり変わらないにもかかわらず、透過率は15~25%も増している。これは層積みによって構成される空げきの大きさおよび性質が異なることが原因で、2層目・正の場合は数の少ない比較的大きな空げきが構成されるためである。なお、表-2にも明らかなように2層目・正の場合には層厚によって空げき率が相当広範囲に変動しているが、これは実験時のブロックの配置について、やや問題があったようにも考えられるのでこの点については後刻検討してみたい。

3. 透過層内における波力の減衰

実験は長さ30m、幅0.8m、深さ0.9mの2次元波浪水槽で行ない、透過性構造物の model としては波力の透過現象を最も単純な形で捕えうるように厚さ1mの垂直な透過砂利層を設け、透過性構造物前面における反射率と水深、波の特性との関係、透過層の厚さによる波力の減衰現象を追跡した。透過層に用いた砂利は平均粒径13.3mm(10~20mm)、26.3mm(20~30mm)の2種類で、その空げき率はそれぞれ、34.3、38.3%である。波圧測定は砂利層内に沖側から、それぞれ、0、15、30、45、60および75cmの6断面に波圧計を設置して透過層内における波力の減衰についての検討を行なった。その結果の概略は第23回年次学術講演会に投稿したのでここではその結論のみを再提示する。

1) 透過性構造物に衝突する波浪の波形勾配が大きいほど反射率は大きく、したがって透過層内に伝達される波圧強度は小さくなる。また、波形勾配の増大にともなって、波圧強度は指数関数的に減少する。

2) 砂利の粒径の大きい方が反射率は小さく、したがって透過層内に伝達する波力は大きくなる。

この実験における反射率の範囲は40~60%であった。

3) 水深の大なるほど反射率は増大し、重複波的な要素を増す。

4) 透過層表面に砕波その他のじょう乱によって生ずる波圧強度の変動は層厚の増大にともなう整流作用によって減少し、静的な圧力に転化する。

5) 透過層内の各断面における最大波圧強度は被覆厚の増大にともなって指数関数的な減衰を示す。この傾向は前節に述べた定常流の場合の透過率の減少傾向と一致する。

6) 透過層内の最大同時波圧合力も、被覆厚の増大によって指数関数的に減衰する。この傾向を波圧減衰率 δ で定義し、 x/d との関係を式で示すと、

$$\delta \equiv \frac{(x/d)^{1.5}}{31.6 + (x/d)^{1.5}}, \text{ 下限 } \delta \equiv \frac{(x/d)^{1.5}}{50.0 + (x/d)^{1.5}}$$

となり、ほぼ減衰の状況を表わすことができる。ただし、 x =被覆層の厚さ、 d =砂利の平均粒径である。

なお、以上の結論は静的な波力に対して得られたものであり、透過性構造物上あるいは前面で激しく砕波する場合の波力の伝達現象および減衰率については必ずしも同一の結果を期待できない。今後さらに検討を必要とするゆえんである。

4. 透過性構造物前面の洗掘現象について

(1) 実験設備および方法

1.2 m × 1.2 m × 34 m の 2 次元波浪水槽の一端に 図-7 に示すように 1:8 の海底勾配を平均粒径 0.6 mm の砂で形造り、その上に 1:1.5 の一様勾配のマウンド模型を設置した。マウンドは粒径 10~40 mm の砂利で築造した捨石堤模型とのり面上を消波ブロック（中空三角ブロック、750 g）の 2 層積で被覆したものとの 2 種類とした。この実験ではブロックの安定問題を研究対象としていないので、波浪に対して十分、安定なものを用いたわけである。なお、捨石堤の場合にはのり面の崩壊を防ぐため 10 mm 目の金網で被覆した。

実験に用いた波浪および水深の条件は 表-3 に示すとおりである。洗掘現象は堤脚水深 h あるいはこれに関係する無次元量 h/H , h/L 等に支配されることがとくに大きいと考えられるので、水深はできるだけ広範囲を含むことが望ましい。したがって、 h および全水深 h_0 は表

図-7

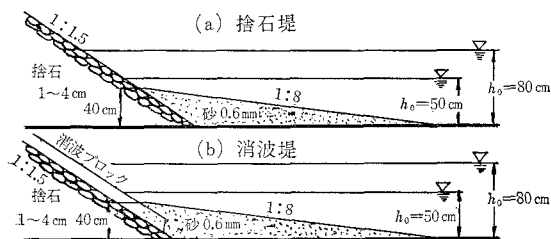


表-3 実験の条件

全水深 (cm)	h_0	50, 55, 60, 65, 70, 75, 80
堤脚水深 (cm)	h	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40
周期 (sec)	T	1.79
波高 (cm)	H	9, 13, 18
波長 (cm)	L	369 ~ 419
波形勾配	H/L	0.021 ~ 0.049
相対水深	h/L	0.024 ~ 0.108

図-8 流速計見取図

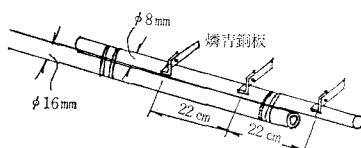


図-3 に示す 7 種類を選んだ。なお、波の周期は一定とした。

つぎに海底地形は波の継続時間とともに変動するが、初期に大きく洗掘される場合が多いこと、約 60 分で平衡状態に達することなどを考慮して波の作用時間は 75 分とし、 $t=5, 15, 30, 45, 60, 75$ 分について海底地形の変動を測定した。

波浪による堤脚の洗掘は斜面上の流れ、とくに引き波による離岸流の流況に大きく支配されることが予想されるので、のり面上の流れと洗掘諸量とを関連づけるべく、のり面上約 5 cm の位置に 図-8 に示すような銅青銅板を用いた流速計を設置して、寄せ波、引き波の流速変化をオシロプロマイド紙上に記録させた。その一例を示すと 図-9 のとおりである。

(2) 実験結果と考察

a) 海底洗掘形態の一般的特性

波動による海底形状の変動は、一般にのり先付近に最大洗掘部を有する減衰振動の形状となって現われる。その一例を示すと 図-10 および 11 のようである。図-10 は $h/H=1.67$ で堤脚の洗掘が比較的小さく、かつ消波層の効果がみられる例であり、一方、図-11 は $h/H=0.55$ で非常に危険な洗掘形態に達し、かつ消波層の効果も全く見られない例である。図-10 の砂利層の場合について見ると最大洗掘深はのり先付近に生じ、そのすぐ沖側に砂堆を発生するが、時間の経過とともにのり先の洗掘が増大することはなく、ある程度以上の時間が経過するとむしろ堆積の傾向となり、同時に最大洗掘深は沖側に移り、さらに沖側 (200~250 cm) に新しい砂堆

図-9

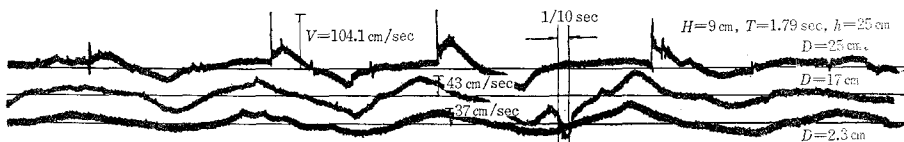
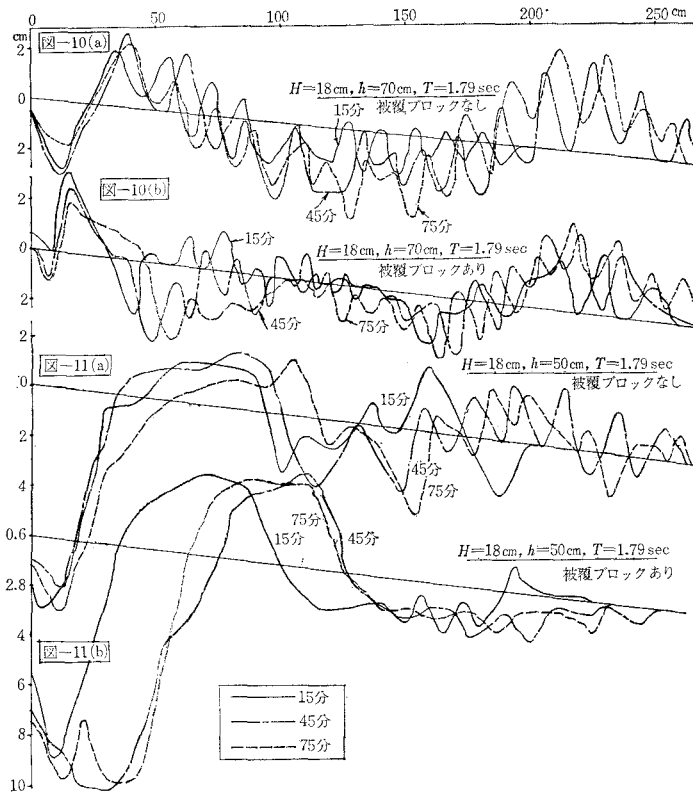
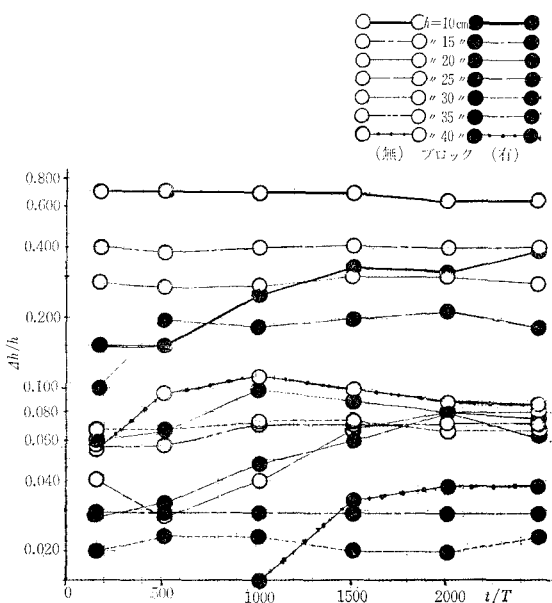


図-10 および 図-11



を発生する。一方、消波ブロックを設置した場合には、のり先の洗掘は小さくなる一方、最大洗掘位置は第1の砂堆より沖側に移り、さらに時間の経過とともに沖側へ移動する傾向を示す。沖側の砂堆は最初から発生し、時

図-12 $\Delta h/h$ と t/T の関係

間の経過とともに発達する。いずれにしてもこの場合には消波層を設置すれば最大洗掘深は小さくなり、かつ沖側へ移動する。一方、 h/H の小さな水深の浅い場合には、消波層の有無にかかわらず、最大洗掘深が短時間で堤脚に現われ、しかもこの位置は沖側へ移動せず、かつ洗掘量も減少しない。ただし、この場合、消波ブロックがある場合には第1砂堆沖側の洗掘量は減少する。

b) 最大洗掘深について

洗掘形態の時間的変化を明らかにするために、横軸に波の作用時間 t と波の周期 T との比 t/T を、縦軸に最大洗掘深 Δh と堤脚水深 h との比、 $\Delta h/h$ をとって、洗掘実験の結果を整理した。その一例を示すと図-12 のとおりで、条件のいかんにかかわらず、45~60分 ($t/T=1500 \sim 2000$) に達するとほぼ平衡状態に達する。

図-12 および類似の実験の結果から、まず捨石堤について明らかに指摘できることは、

1) 相対洗掘深 $\Delta h/h$ は水深の増加とともに減少の傾向が認められるが、

とくに $h=25$ cm ($h/H \approx 2.8$) を境として急激に減少する。ほかの資料によると $H=13$ cm では $h=30$ cm ($h/H \approx 2.3$)、 $H=18$ cm では $h=35$ cm ($h/H \approx 2.0$) くらいを境として同様な変化が見られる。

2) 水深が小なる場合には短時間で最大洗掘深が出現し、以後洗掘は進行しない ($H=9$ cm の場合には $h=20$ cm、 $H=13, 18$ cm の場合には $h=15$ cm)。

3) 水深が大なる場合には、波による洗掘作用が水底におよばないため、洗掘深も非常に小さく、かつ時間的にもほとんど進行しない。

4) この中間の水深の場合には最大洗掘深は時間とともに進行し、平衡状態に達するのに長時間を要する。

c) 消波層が最大洗掘深におよぼす効果

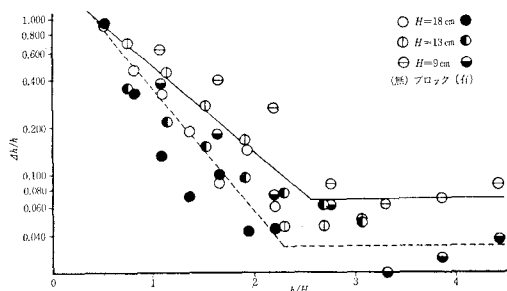
つぎに消波層が洗掘におよぼす効果について検討してみると(図-12 参照)。

1) 最大洗掘深は全般的に小さくなる。しかし、波高が大きく ($H=18$ cm)、水深小なる場合には効果はほとんどない。

2) 捨石の場合にくらべて、最大洗掘深を現出する時間がかなり遅れる。

3) 水深大なる場合には、洗掘量はほとんど変化しない(ただし、いずれも僅少である)。

など、強い流れが堤脚におよばない水深大なる場合を除

図-13 $\Delta h/h$ と h/H の関係

いては、消波層がかなり洗掘防止に役立っていることが明らかである。これは引き波時の強い流れが大なる空げき群を有する消波層に分散されるので堤脚へのエネルギー集中がさけられるためであることは明らかで、後述の流速分布の結果からも認められる。

捨石堤前面の洗掘の場合に述べたように、洗掘深は H と h の関係に支配されることが大きいので、いま、図-12 などから、75 分後 ($t/T \approx 2500$) の $\Delta h/h$ を取り出し、これと h/H の関係をプロットして見ると図-13 のようになる。図から明かなように、

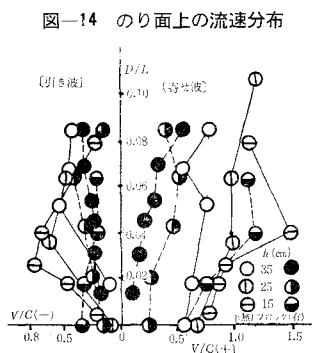
1) $\Delta h/h$ は h/H の増大にともなう、単調に減少するが、 h/H がある値、すなわち、ほぼ 2.0 くらいに達すると洗掘深は非常に小さくなり、かつ $\Delta h/h \approx$ 一定となる。

2) 同一の h/H でも H の小なる方が $\Delta h/h$ が大きくなる傾向が見られ、 h/H のみでなく、 h の絶対値にも支配される。

3) 消波層を設置することによって、 $\Delta h/h$ をかなり小さくしうる範囲が存在する ($h/H \approx 1.0 \sim 2.0$)。ただし、 $h/H < 1.0$ および $h/H > 2.5$ の範囲では消波工による洗掘量の減少は期待できない。

以上のような洗掘形態をのり面上の流速分布から検討して見よう。流速の記録は図-9 に一例を示すように、表面付近では若干、各ケースについて碎波の波圧型に近い分布が見られ、底に向かうにしたがって丸味を帯びてくる。測定結果を D/L と V/C の関係に整理した(ただし、 D は堤脚から流速測定点までの垂直距離、 V は各測点の最大流速、 C は波速とする)。

図-14 はその一例である。図および同種の資料から明らかな結果を抽出すると、



1) 寄せ波、引き波とも堤脚水深 h または h/H の減少にともなう、各水深における最大流速は増加する。

2) 最大流速点は寄せ波時には水面付近、引き波の時はそれより、10~15 cm 下の点に現われる。

3) 捨石の場合には一般に寄せ波と引き波の流速に大きな差が見られる。これは寄せ波にくらべて、引き波時の方が捨石層を通過する水量が多いからである。

4) ブロックを設置すると、被覆層中を流過する水量はかなり多くなり(流速の減少)、かつ寄せ波の場合には、 $h=25, 35$ cm で最大流速は著しく減少するが、 $h=15$ cm の浅い堤脚水深では、あまり減勢効果は見られない。一方、引き波の場合には、水面、堤脚付近ではあまり減少していないが、その中間ではかなり減勢の効果が見られる。

5) ブロックを設置した場合、堤脚水深を変化させても全般的な流速分布の相違は見られないが、ただ堤脚部においては $h=25$ cm にくらべて、 $h=15$ cm の方がほぼ 2 倍の流速を示している。この結果は、洗掘の実験結果における「堤脚水深が小さくなると消波層は洗掘の減少に役立たない。」という結果と一致している。

d) 最大洗掘の位置

最大洗掘の位置について大体の傾向を述べると、結果はつぎのとおりである。

1) 捨石の場合には最大洗掘位置はほぼ堤脚部に生じ、多少、水深を変化しても沖側へ移動しない。

2) $h/H=1.0 \sim 2.5$ の範囲では消波層を設置すれば、最大洗掘位置はかなり沖へ ($x/L=0.1 \sim 0.2$) 移動するが、これ以外の範囲では捨石の場合と変わらない。

5. あとがき

以上、透過性構造物の減勢機能、洗掘現象およびそれに及ぼす影響について、透過率、波力の減衰、洗掘深、斜面上の流速等の物理量を媒体として実験的に検討を進めてきたが、それぞれ得られた結果の関連性が十分、つかみ得ず体系的な説明ができるまでには至っていない。今後、この点についてさらに検討を進めて行きたい。

参考文献

- 1) 富永・首藤・橋本:「消波ブロックの水理的特性」, 第 14 回海岸工学講演会講演集 (42.10)。
- 2) 久保・井田:「透過性構造物の減勢機構に関する 2, 3 の実験」, 土木学会関西支部年次講演会概要 (42.11)。
- 3) 久保・井田:「透過性構造物の減勢機構に関する実験的研究(第 2 報)」, 土木学会関西支部年次講演会概要 (43.5)。
- 4) 久保:「透過性構造物内部における波力の減衰について」第 23 回年次講演会概要第 II 部 (43.10)。
- 5) 久保・玉井・井田:「消波構造物に関する 2, 3 の問題点について」, 第 22 回年次講演会概要第 II 部 (42.5)。