

## 消波工に関する二、三の問題

白石直文\*・遠藤泰司\*\*

## 1. 緒 論

近年、全国各地で防波堤や防波護岸に消波ブロックとしてのテトラポッドが使用されている。従来は、海岸構造物の根固めや、補修を目的とした使用が多かったが、最近ではテトラポッドを海岸構造物の一部と考え、根固めの機能にあわせて、テトラポッドの最大の特長である消波効果を生かし、海岸構造物の所要規模の軽減をはかるとともに、より高度の安全性を求めようになってきた。

しかしながら、このような場合に対するテトラポッドの水理特性に関する資料は必ずしも十分ではなく、特に消波効果をあげるには、テトラポッドの天端高をどれほどにすべきか、それによって護岸天端高をどの程度低くすることができるかが大きな問題である。これら諸問題の解明に対する一つの指針としてテトラポッドのマウンドにより波の遡上高がどのようになるか、また越波量はどのようになるかを知る必要がある。

今回、われわれは波返しを有する通常の護岸に対してその前面にテトラポッドをおいた場合の波の遡上高、あるいは越波量を測定することにより、テトラポッドの消波効果と護岸の所要天端高との関係について考察を試みた。

従来設計には、風の影響はほとんど考慮されていないが、越波量を問題とする場合には無視できない重要な要素であると考え、1種類ではあったが風を加えた場合についての実験も行なった。

## 2. 実験施設と実験方法

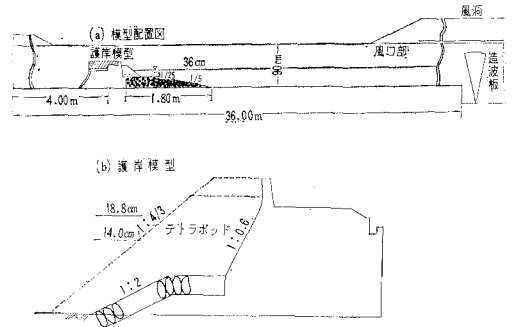
実験に使用した水路は東京大学所有の長さ 36.0 m、高さ 0.9 m、幅 0.6 m の風洞付二次元造波水槽である。造波機はフラッター式、風洞の最大吹口風速は 25 m/sec である。水槽の他端に 1/5 と 1/25 の複合斜面をつくり、その上に 1:0.6 のり面と波返しを有する護岸を設けた。模型縮尺は 1/25 とし、模型断面の概略は 図-1 に示す。また使用したテトラポッドの重量は 117 g で、現地に換算すれば 2 t 型に相当する。

波高は沖の一樣水深部に抵抗線式波高計を設置して測定し、ペン書きオシログラフに記録した。風速の測定は手持式瞬間指示風速計およびピトー管を使用した。

\* 正員 工博 日本テトラポッドKK

\*\* 正員 日本テトラポッドKK

図-1 模型概略図



越波量の測定は、護岸模型の背後に集水器を取り付け、越波した水は水槽底に設けたパイプを通して外に取り出し、水量を測定した。

実験に使用した波は、周期 1.2 sec, 1.4 sec, 1.6 sec (模型縮尺 1/25 として現地換算 6.0 sec, 7.0 sec, 8.0 sec)、沖波換算波高 7~16 cm (現地換算 1.75~4.0 m) とし、これらを適宜組み合わせた。

風速についての相似性には若干疑問があるが一つの目安として風を加えた場合についての実験を行なった。水槽内の風速分布はほぼ一様の分布であった。風速は  $V=4.0$  m/sec で、Froude の相似律がそのままあてはまるものとして、模型縮尺を 1/25 とすると現地では 20 m/sec である。

## 3. 実験結果とその考察

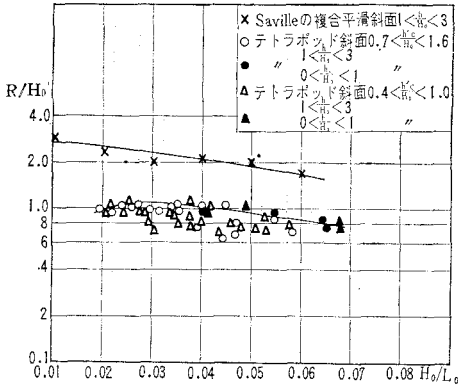
## (1) 遡上高について

テトラポッドで斜面を被覆した場合、どの程度遡上高が減少するかについてのくわしい研究はいまだ数少ない。そこで、まず 図-1 に示した護岸にテトラポッドを被覆した場合の波の遡上高を測定し、テトラポッドのない場合の遡上高との比較を試みた。

テトラポッドのない場合の遡上高を推算するために、Saville の提案した複合断面の場合の遡上高算出の方法によった。計算の結果は 図-2 に記入したように  $H_0/L_0$  が 0.01~0.06 の範囲内では相対遡上高  $R/H_0$  は 1.7~2.9 程度と推定される。ここに  $R$  は静水面から測った遡上高、 $H_0$  は沖波波高である。

一方、テトラポッドをマウンドした斜面における波の遡上高を実測した結果は 図-2 に示したとおりである。

図-2 テトラポッド斜面への波の遡上高



相対遡上高  $R/H_0$  の値は  $H_0/L_0$  の減少とともに増加しているが  $R/H_0 \approx 1$  の程度であり、Saville の複合斜面の場合の推定値と比較すれば、大体 1/2 程度に減少していることがわかる。

実験したテトラポッドの天端高は 2 種類に固定したため、静水面からテトラポッド天端までの高さ  $h'_c$  と  $H_0$  との比、 $h'_c/H_0$  は 0.7~1.6 と 0.4~1.0 の場合とであった。しかしながら図-2 に示されたように  $h'_c/H_0$  のちがひによる大きな差はみられなかった。すなわちテトラポッドの天端高がある程度以上であれば、 $H_0/L_0$  が 0.02~0.07 の範囲では  $R/H_0 \approx 0.7 \sim 1.0$  程度と見てよいであろう。

風が加わった場合には、 $R/H_0$  の値が増加することが考えられるが実験の範囲内では ( $V=4.0$  m/sec) ほとんど遡上高の増加は認められなかった。

(2) 越波量について

図-1 の護岸において、テトラポッドのある場合と、ない場合についてそれぞれ越波量を測定して比較を試みた。説明の都合上図に示した記号を一括してつぎに示す。

$h$  : 護岸前面水深,  $H_0$  : 相当沖波波高,  $T$  : 周期  
 $L_0$  : 沖波波长,  $V$  : 風速,  $Q$  : 単位幅, 1波あたりの越波量,  $h_c$  : 護岸パラペットの静水面よりの高さ,  $h'_c$  : テトラポッドの静水面よりの高さ,  $Q_0$  : 単位幅, 1波当り岸側に輸送される水量,  $H_0 L_0 / 2\pi$

模型実験の結果に対して Froude の相似則が適用されるものとすれば、原型における越波量と縮尺 1/25 の模型の越波量との間につきの関係が成立する。ここで原型に対する値にはバーをつけてあらわす。

$\bar{Q} = 625 Q$  単位幅, 1波当りの越波量

$\bar{Q}' = 125 Q'$  単位幅, 単位時間当りの越波量

図-3, 図-4 は越波量と相当沖波波高との関係を示したものである。図-3 は堤脚水深 14.0 cm, 護岸天端高  $h_0 = 13.2$  cm で、(a) テトラポッドのない場合、(b) ある場合 ( $h'_c = 9.2$  cm), および堤脚水深は同じ、護岸

図-3 越波量と相当沖波波高との関係

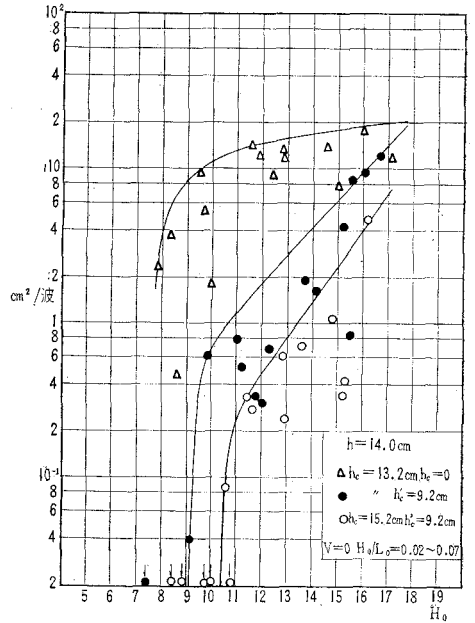
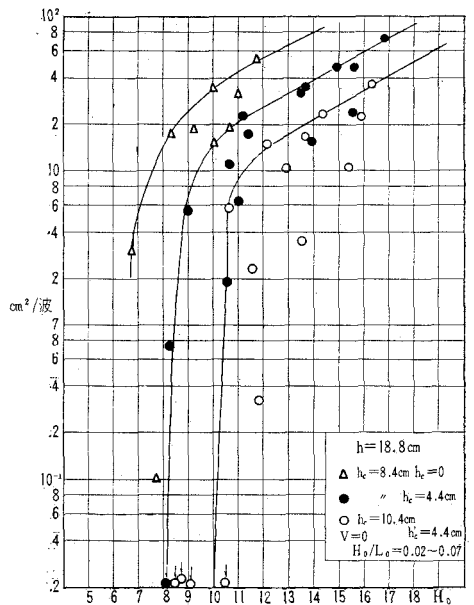


図-4 越波量と相当沖波波高との関係



天端高  $h_c = 15.2$  cm で、(c) テトラポッドのある場合 ( $h'_c = 9.2$  cm) との比較である。

沖波波高は 7 cm から 17 cm まで変化させたが、いずれの場合にも波高の増加につれて越波量が增大している。図中の曲線は実験条件内での単位幅, 1波当りの最大越波量を示したものである。

テトラポッドのない場合の単位幅, 1波当りの最大越波量は  $Q_{max} = 18$  cm<sup>3</sup>/波/cm であるが、これを原型に直すと  $\bar{Q} = 1.12$  m<sup>3</sup>/波/m である。一方、テトラポッドを

おいた場合には  $Q_{max}=12.0 \text{ cm}^3/\text{波}/\text{cm}$  となり、マウンドのない場合の2/3程度であるが、波高の減少につれて越波量の減少はいちじるしい。例えば波高 10 cm ではマウンドのない場合には  $Q=10 \text{ cm}^3/\text{波}/\text{cm}$  であるのに対しテトラポッドのある場合には  $Q=0.6 \text{ cm}^3/\text{波}/\text{cm}$  と1/10以下になる。さらにテトラポッドの天端高はそのままとし、護岸の天端を 2.0 cm 高くした場合には、高くしない場合より全体的に1/2~1/3に減少し、沖波波高 10 cm では越波量はほとんどなくなっている (図中の矢印は越波量が 0 または図に示されないほど小さいことを表わす)。

図-4 は 図-3 の条件から水位を 4.8 cm 上げた場合の越波量と相当沖波波高との関係を示したものである。護岸天端は同じであるので水位の上昇した分だけ  $h_c, h'_c$  は減少している。この場合の単位幅、1波当りの最大越波量は 図-3 の場合に比して相当多くなっている。(a) テトラポッドのない場合、(b) ある場合、(c) 護岸の天端高を 2 cm 高くして、テトラポッドを設置した場合とを比較すると、(b) の越波量は (a) の、(c) の越波量は (b) のそれぞれ 1/2 程度に減少している。

図-3, 図-4 からわかるようにいずれの場合にも、ある波高を境として急激に越波量が増大することである。このような波高を適確に知ることが大切であろう。

図-3, 図-4 とを比較するとわかるように護岸の天端が同じである場合には、越波量を支配する最も重要な要素は堤防ののり先水深である。すなわち既設護岸のように天端がきめられている場合には、潮位上昇がいちじるしく越波量を増大させることになる。このような観点から設計潮位の設定は最も基本的な問題である。

上記の条件に風を加えた場合も、護岸天端はそのままとし、テトラポッドの天端高を 4.0 cm 高くした場合について 図-3, 図-4 とほとんど同様な傾向がみられた。

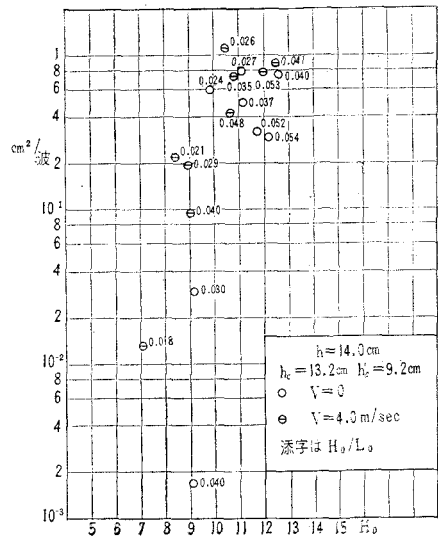
越波を生じるような波浪、潮位を生じるのは台風、あるいは激しい季節風のときであり、当然強い風が吹くと想定しなければならない。

今回われわれの実験においては  $V=4.0 \text{ m/sec}$  の風を加えて越波量の測定を行なった。図-5 はのり先水深 14.0 cm, 静水面上の護岸天端高 13.2 cm, 静水面上のテトラポッド天端高 9.2 cm として、風を加えた場合と加えない場合の比較を示した。これによるとはっきりした増加量はつかめないが全体的にみて若干増加しているようである。

California 大学での研究によれば風速が小さい場合には風によって付加される越波量は無視し得るが風速が大きくなると安全側をとって 50% 増しにするのがよいとの結果を得ている。

京都大学での実験によれば、風の影響は Froude 数

図-5 風のある場合の越波量と相当沖波波高との関係



$V/\sqrt{gH_0}$  によって表わされ無次元越波量  $Q/Q_0$  はこの Froude 数の増加とともに増大することが示されている。そして  $V/\sqrt{gH_0} \approx 5 \sim 8$  付近を境として急増し 10 付近以上になると  $Q/Q_0$  は一定値に近づく傾向があるという。

今回われわれの実験に用いた風速は、 $V=4.0 \text{ m/sec}$  で  $V/\sqrt{gH_0} \approx 3 \sim 5$  の場合のみしか行なえなかったので風速の増加による影響は検討できなかった。京都大学での実験では  $V/\sqrt{gH_0} \approx 3 \sim 5$  程度では  $Q/Q_0$  はあまり変化していない。

#### 4. 実験結果の無次元表示について

##### (1) 実験結果の無次元表示

a) グラフ ( $Q/Q_0 \sim h_c/H_0$ ) について 図-6, 図-7 は横軸に  $h_c/H_0$ , 縦軸に  $Q/Q_0$  をとり、テトラポッドのある場合とない場合の比較を示したものである。図中に示した数字は、静水面からのテトラポッドの天端高  $h'_c$  と沖波波高  $H_0$  との比  $h'_c/H_0$  である。

図-6 は風のない場合、図-7 は風を加えた場合で図に示した曲線は実験条件内 ( $H_0/L_0=0.02 \sim 0.07$ ) での最大限界を示す。

テトラポッドのない場合には  $Q/Q_0=1 \times 10^{-2}$  に対応する値は  $h_c/H_0=1.55$ ,  $Q/Q_0=1 \times 10^{-3}$  に対応する値は  $h_c/H_0 > 1.8$  である。

一方テトラポッドのある場合には、 $Q/Q_0=1 \times 10^{-2}$  に対応する値は  $h_c/H_0 \approx 1.0$ ,  $Q/Q_0=1 \times 10^{-3}$  に対応する値は  $h_c/H_0=1.3$ , である。そのときの  $h'_c/H_0$  は  $0.7 \sim 0.8$  の値となっている。この場合テトラポッドの天端高は一定としたため  $h_c/H_0$  の値とともに  $h'_c/H_0$  の値は減少し

図-6 越波に関する実験結果の無次元表示

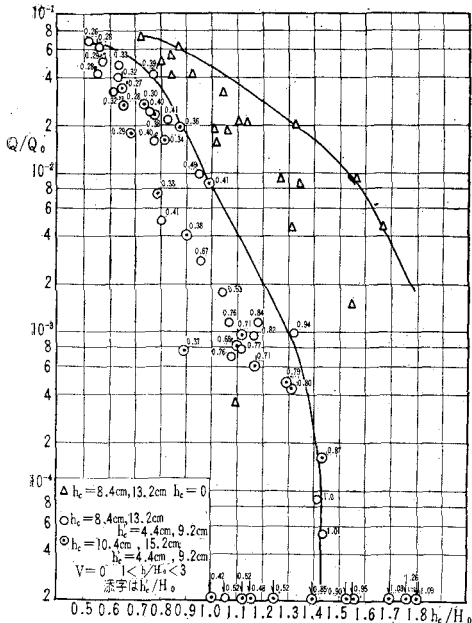
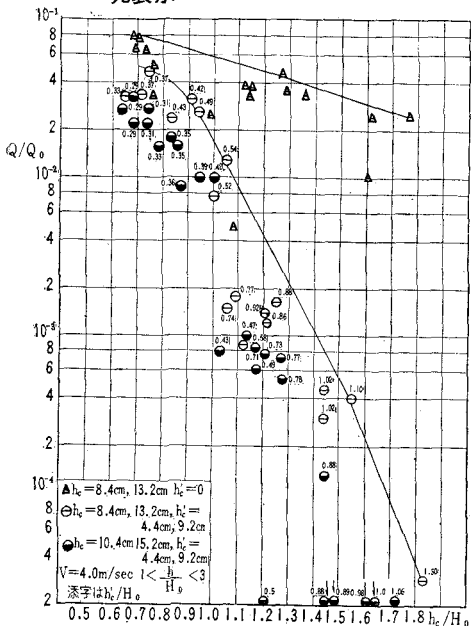


図-7 越波に関する実験結果の無次元表示



ている。なおのり先水深についてはほとんどが  $1 < \frac{h}{H_0} < 3$  の範囲内にある。

図-7 は風を加えた場合についてのグラフである。風のない場合と同様の傾向を示している。しかし同一の  $Q/Q_0$  を与える  $h_c/H_0$  は風のない場合より若干大きな値となる。

b) グラフ ( $h_c/H_0 \sim h/L_0$ ) について 図-8, 図-9

図-8 越波量に関する実験結果の無次元表示

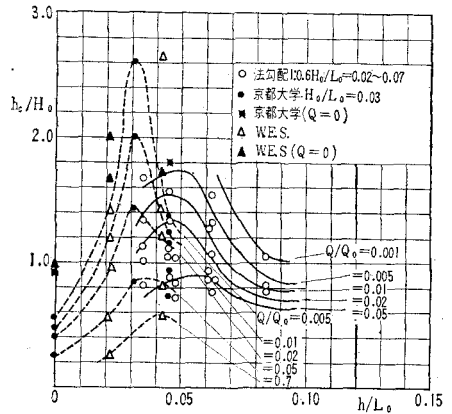
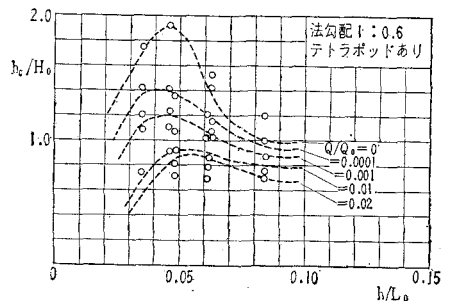


図-9 越波量に関する実験結果の無次元表示



は横軸に  $h/L_0$ , 縦軸に  $h_c/H_0$  をとり  $Q/Q_0$  をパラメーターとしてとったものである。

図-8 に点線で示した値は京都大学の実験値で  $H_0/L_0$  は 0.03 の場合であり、条件  $h/L_0 \approx 0.03$  付近でピークを形成している。

われわれの実験結果は  $H_0/L_0 = 0.02 \sim 0.07$  の範囲のものをすべてふくんだ結果であり、これによると  $h/L_0 = 0.35 \sim 0.45$  付近がピークとなっている。しかし  $Q/Q_0$  の値は大体合っているようである。

図-9 はテトラポッドのある場合の実験結果であり、 $h/L_0 = 0.035 \sim 0.045$  付近でピークとなっている。 $Q/Q_0$  の値は  $h_c/H_0$  が大きいところでは 1 桁オーダーが下がっている。その他の実験条件によって得られた結果もほぼ同様の傾向を示している。

## (2) 越波量の許容限界と天端高について

越波を完全に防ぐような構造物は経済的に見ても作り得ない。したがって、ある程度越波することは仕方ないが、その限度をどこにとるかが問題である。

越波する状態としては、(1)飛床が越える場合、(2)波の実質部分が越える場合、が考えられる。一般に越流する状態は越波量も大きく非常に危険である。しかし、飛沫の飛ぶ状況にしても台風時の強風により激しく越波する

ことも十分考えられる。

越波量をどの程度まで許容するかは、背後地の状況ならびに排水施設の能力に大いに関係する。

一般に日本で用いられている高潮対策の防潮護岸の排水溝の断面は、海岸構造物集覧により調べると、最大  $1.5 \text{ m}^2$  程度であり、対象とする波の規模により当然差があるが、普通  $0.1 \sim 0.5 \text{ m}^2$  程度のものが多いようである。

いま仮りに排水溝の断面積を  $0.16 \text{ m}^2$  ( $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ ),  $0.25 \text{ m}^2$  ( $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ),  $0.49 \text{ m}^2$  ( $0.7 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$ ), 流出口の間隔を  $50 \text{ m}$ ,  $I=1/100$  とし、実験で対象とした波(周期  $6.0 \text{ sec}$ ,  $7.0 \text{ sec}$ ,  $8.0 \text{ sec}$ , 波高  $2.5 \text{ m}$ ,  $3.0 \text{ m}$ ) について、無次元表示された値  $Q/Q_0$  に対してどの程度排水可能か検討してみる。

$I=1/100$ ,  $A=0.16 \text{ m}^2$ ,  $R=0.1335 \text{ m}$ ,  $n=0.014$ , と仮定し、簡単のために Manning の公式を適用して計算すると、

$V=1.86 \text{ m/sec}$ ,  $Q_{\text{max}}=1.86 \times 0.16=0.298 \text{ m}^3/\text{sec}$  をうる。仮りに  $T=7.0 \text{ sec}$ ,  $H_0=3.0 \text{ m}$ ,  $Q/Q_0=1 \times 10^{-3}$  とすると、 $50 \text{ m}$  あたりの水量  $Q'$  は  $1.82 \text{ m}^3/\text{波}$  となる。

このときの排水可能水量は  $Q'=0.298 \times 7=2.08 \text{ m}^3/\text{波}$  となる。したがって以上のような仮定が成り立つとすると、この場合には排水可能といえる。同様に各種断面についての排水可能状況を示すと 図-10 のようになる。

これによれば、 $0.16 \text{ m}^2$  や  $0.25 \text{ m}^2$  の排水溝では、対象とする波が、 $T=8.0 \text{ sec}$ ,  $H_0=3.0 \text{ m}$  の場合には排水可能限度は  $Q/Q_0 \approx 1 \sim 2 \times 10^{-3}$  となる。

実際には波の不規則性もあり、波の実態もつかみにくく、問題が多いが一応の目安にはなると考えられる。

実験観察からみると  $Q/Q_0 \approx 10^{-4} \sim 10^{-3}$  のオーダーの場合には、飛沫が越える程度であるか、またはわずかに越波する状態であり、完全に波が越える状態は  $Q/Q_0 \approx$

図-10 排水溝の規模と排水量との関係

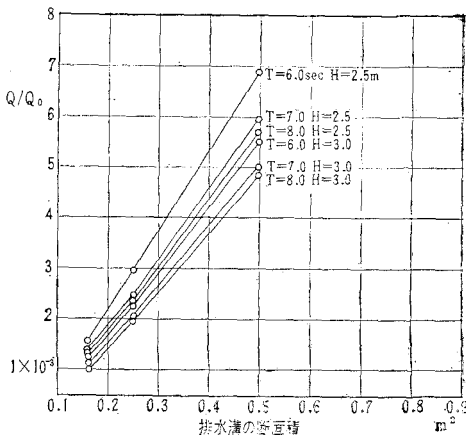


表-1

$Q/Q_0$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$
テトラポッドなし $V=0$	$>2$	$>1.8$	$>1.75$
テトラポッドあり $V=0$	1.45	1.3	1.2
テトラポッドなし $V=4.0 \text{ m/sec}$	$>2$	$>2$	$>2$
テトラポッドあり $V=4.0 \text{ m/sec}$	1.7	1.4	1.3

$10^{-2}$  のオーダーである。

従来オランダで採られてきた護岸天端高は多くの場合波の2%以上は越波をしないように決められてきた。これは2%の頻度をとる場合に越波はごく少量にとどまると考えられたからである。そしてのり勾配が2割よりゆるやかな傾斜堤に対する風浪の模型実験の結果、越波頻度2%の時は  $Q/Q_0 \approx 10^{-4}$ , 越波頻度10%のときは  $Q/Q_0 \approx 10^{-3}$  であることを示している。この実験では  $H_{1/2} \approx H_{1/3}$  にあたっている。したがって今回の実験は規則波であるので  $H_{1/2}$  と考えると、オランダの10%の波の越波量にほぼ対応することになる。

いま仮りに  $Q/Q_0 \approx 1 \sim 2 \times 10^{-3}$  を越波許容限界と考えた場合、それぞれの条件に対応した  $h_0/H_0$  は表-1のようになる。

### 5. むすび

以上の実験結果を要約すると、

(1) テトラポッドを十分な高さに積上げた場合 ( $0.6 H_0 \sim 1.0 H_0$ ) には  $R/H_0=0.7 \sim 1.0$  程度に減少する。これは  $1:0.6$  の複合平滑斜面のほぼ  $1/2$  である。ただし実験は  $H_0/L_0=0.02 \sim 0.07$  の範囲で行なった。

(2) 潮位上昇により越波量は急激に増大する。したがって設計潮位の決定はきわめて重要である。また越波量はある波高を境として急激に増大する。このような波高を知ることが大切であろう。

(3) 越波量には  $h/L_0$  が影響する。 $H_0/L_0=0.02 \sim 0.07$  の範囲では  $h/L_0=0.035 \sim 0.045$  で越波量は最大になるようである。

(4) 越波量の許容限界は波の性質、排水溝の規模などによって異なる。実験条件および、既存の排水溝の規模から考えると  $Q/Q_0=1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$  程度が限度と考えられる。これは実験観察その他から判断して飛沫が越える程度、またはわずかに越波する状態に相当し、完全に越波する状態になるのは  $Q/Q_0=10^{-2}$  のオーダーである。

(5) 越波の許容限界を上記のようにとれば必要な天端高はテトラポッドのある場合には  $1.2 \sim 1.3 H_0$  程度であろう。ただしのり先水深については  $1 < h/H_0 < 3$  の範囲にある場合についてである。

(6) 風によりかなり越波量は増大する。とくにしぶき

がとぶような状態では風の影響は大きい。

(7) テトラポッドの天端高は  $(0.6 \sim 1.0)H_0$  程度は必要である。

最後に本報告は筆者の一人遠藤が東京大学工学部土木工学科港湾研究室に研究生として在学した間に行なった実験結果を取りまとめたものである。終始実験の指導と助言をたまわった東京大学工学部 本間 仁教授, 同堀川清司助教授, 同長谷直樹助手, また実験に協力して下さった港湾研究室の方々に記して厚く感謝の意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎・岩垣雄一・三井 宏：海岸堤防の越し波防止効果について，第4回海岸工学講演会講演集，1957.
- 2) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫：風洞水槽を用い

た海岸堤防の越波に関する研究(1)，第9回海岸工学講演会講演集，1962.

- 3) 永井荘七郎・上田伸三：風と波を考慮した海岸堤防の形状と構造に関する研究，第7回海岸工学講演会講演集，1960.
- 4) Paape, A.: Experimental Data on the Overtopping of Seawalls by Waves, Proc. 7th Conf. on Coastal Engineering, Vol. 2, pp. 674~681, 1961.
- 5) 堀川清司：海岸堤防・海岸護岸設計のための一資料，昭和36年8月，東京大学工学部土木工学科港湾研究室.
- 6) Saville, T., Jr.: Laboratory Data on Wave Run-up and Overtopping on Shore Structures, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 64, 1955.