

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

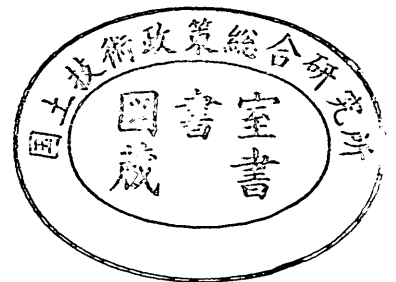
---

VOL. 14

NO. 4

DEC. 1975

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第14巻 第4号 (Vol. 14, No. 4), 1975年12月 (Dec. 1975)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究  
..... 合田良実・岸良安治・神山 豊..... 3  
(Laboratory Investigation on the Overtopping Rate of Seawalls by Irregular  
Waves.....Yoshimi GODA, Yasuharu KISHIRA and Yutaka KAMIYAMA)
2. 超軟弱粘土の圧密定数の決定法..... 梅原靖文・善 功 企..... 45  
(Determination of Consolidation Constants for very Soft Clays  
.....Yasufumi UMEHARA and Kouki ZEN)
3. 重力式岸壁の震度と地盤加速度  
..... 野田節男・上部達生・千葉忠樹..... 67  
(Relation Between Seismic Coefficient and Ground Acceleration for Gravity  
Quaywall .....Setsuo NODA, Tatsuo UWABE and Tadaki CHIBA)
4. 海水に浸漬したコンクリートのアクに関する実験的研究  
..... 関 博・善 一章・阿部正美・藤澤孝夫.....113  
(pH Change of Sea Water due to Immersion of Hardened Concrete  
.....Hiroshi SEKI, Kazuaki ZEN, Masami ABE and Takao FUJISAWA)

# 1. 不規則波による防波護岸の越波流量 に関する実験的研究

合田良実\*・岸良安治\*\*・神山 豊\*\*

## 要 旨

直立壁および前面に消波工を有する消波護岸の基本形について、模型不規則波による越波流量の測定を行ない、不規則波の碎波変形モデルを応用した越波計算と比較照合の上、海底勾配2種、波形勾配3種の組合せに対する越波流量図表12枚を作成した。

実験は、 $H_{1/3} \doteq 15$  cm,  $T_{1/3} \doteq 1.7, 2.3$  および  $2.8$  sec (深海波形勾配 0.012, 0.017, および 0.036) の不規則波を用い、前面水深 22.5~10 cm (陸上部)、模型護岸の天端高 7.5~26.3 cm の条件で行なったもので、海底勾配は 1/10 と 1/30 である。越波流量は連続約 200 波の 3 回測定 の 平均値として求め、直立壁 205 ケース、消波工 123 ケースについて測定した。入射波高は、不規則波に対する入・反射波の分離推定法で求めた。

実験および計算の結果、越波流量に及ぼす海底勾配および波形勾配の影響が明らかになり、また消波工による越波流量の減少率も求められた。今回作成された図表を用いれば、沖合から前浜部に至る任意地点の防波護岸の越波量の推定が可能である。

なお、規則波の実験データに基づく期待越波流量の計算値は、サーフビートの卓越する汀線部などを除けば不規則波による実験値とほぼ一致し、その妥当性が再確認された。

\* 海洋水理部 波浪研究室長  
\*\* 海洋水理部 波浪研究室

## 1. Laboratory Investigation on the Overtopping Rate of Seawalls by Irregular Waves

Yoshimi GODA\*

Yasuharu KISHIRA\*\*

Yutaka KAMIYAMA\*\*

### Synopsis

Series of measurements with irregular waves were undertaken for model seawalls of vertical walls with and without protection by concrete block mounds. Experimental data were compared and supplemented with theoretical calculations by the combination of the author's random wave breaking model in shallow waters and the weir type overflow model. The results have been compiled as twelve diagrams for the estimation of overtopping rate for two sea bottom gradients (1/10 and 1/30), three values of equivalent deepwater significant wave steepness (0.012, 0.017, and 0.036), and two types of seawalls.

Experiments employed irregular waves with  $H_{1/3} \doteq 15$  cm, and  $T_{1/3} \doteq 1.7, 2.3,$  and  $2.8$  sec. Model seawalls with crest heights of 7.5 to 26.3 cm were located at the water depths of 22.5 to -10 cm (above the waterline) on smooth slopes of uniform gradient. The overtopping rate was obtained as the average of three measurements, each for continuous two hundreds waves. Measurements were taken for 205 cases of vertical walls and 123 cases of concrete block mounds placed in front of vertical walls. Incident wave heights were estimated with a technique of resolving incident and reflected waves from two simultaneous records of irregular wave profiles.

The results of experiments and calculations have clarified the effects of bottom gradient and wave steepness upon the overtopping rate of seawalls. Decrease of overtopping rate by concrete block mounds has been estimated quantitatively. Twelve diagrams with two supplementary figures for the effects of bottom gradient and wave steepness enable quick estimation of the overtopping rate of seawalls at any water depth from the offshore to the foreshore.

The expected rate of wave overtopping with the data of regular wave experiments was re-confirmed to almost agree with the data of irregular waves except for the neighborhood of shoreline, where the phenomenon of surf beats is predominant.

Tables of experimental data are attached as the appendix of the present report.

---

\* Chief of the Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division  
\*\* Member of the Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

## 目 次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 要 旨 .....                     | 3  |
| 1. ま え が き .....              | 7  |
| 2. 不規則波による越波実験 .....          | 7  |
| 2.1 実験の範囲 .....               | 7  |
| 2.2 実験装置および実験方法 .....         | 8  |
| 2.3 実験に用いた不規則波の性質 .....       | 12 |
| 2.4 直立壁前面の波の性質 .....          | 15 |
| 2.5 越波流量の測定結果 .....           | 19 |
| 2.6 護岸の反射率 .....              | 21 |
| 3. 越波流量推定図表の作成 .....          | 23 |
| 3.1 不規則波の碎波変形モデルによる越波計算 ..... | 23 |
| 3.2 越波流量図表の作成方法および作成結果 .....  | 25 |
| 3.3 越波流量推定図表の適用について .....     | 33 |
| 4. ま と め .....                | 38 |
| 参 考 文 献 .....                 | 38 |
| 主 要 記 号 表 .....               | 39 |
| 付 表 1～6 越波流量の実験データ .....      | 40 |

## 1. ま え が き

防波護岸あるいは海岸堤防を乗り越えて堤内に流入する波の問題は、波の不規則性の影響が著しい現象の一つである。たとえば、有義波に対しては越波を許さないだけの天端高と構造を持つ護岸を設計したとしても、実際の波浪では有義波よりも大きな波高の波が約13%存在し、最高では有義波高の2倍以上の波高の波が出現することがあるので、その護岸の背後にはやはり越波した水塊が流入する。

越波によってどれだけの水量が堤内に流入するかについては、今までにも数多くの研究が行なわれてきた<sup>1)</sup>。しかし、そのほとんどは波高・周期一定の規則波を用いて実験的に越波量を求めたものであり、実際の不規則な波浪に対してそのままの形で適用できるかについては疑問がある。そのため、先に著者の一人は、波高の出現確率を用いて越波量を加重平均する越波流量の算定方式を提案し、これを期待越波流量と名づけた<sup>2)</sup>。そして、多くの人々の実験データを借用して不規則波に対する越波流量の算定図表を作成した。

ただ、この図表は基礎データの制約によって、水深が沖波波高の約1/2よりも浅い場所の護岸が含まれておらず、また、海底勾配や波形勾配の影響を無視した平均的な関係として作成されたものであった。このため、水深の浅い箇所や陸上部の防波護岸について、不規則波による越波流量の推定資料が要望されることが多かった。さらに、海底勾配および波形勾配の影響を吟味し、これらによる越波流量の差異を明らかにすべきであるとの声も強かった。

こうした要望に応えるため著者は、運輸省港湾局防災課からの依頼があったのを機会に、陸上部の防波護岸を含む系統的な不規則波による越波実験に着手し、このほどその成果を新しい越波流量推定図表としてとりまとめるに至った。対象とした護岸形状は、直立壁およびその前面に単純な形の消波工を有するものであって、現実の施工断面よりも形状が簡単である。また、研究期間その他の制約もあって、実験の精度の点で吟味が不足しているところも若干ある。このため、実際の防波護岸では、今回の実験結果からの推定値とかなり異なる越波量を生ずる場合もあるであろう。しかしながら、今回の研究成果は防波護岸の越波特性を包括的に示すデータとして利用価値が高いものと考え、ここに発表する次第である。

## 2. 不規則波による越波実験

### 2.1 実験の範囲

実験は、最も単純な形状の護岸型式としてまず直立壁を取り上げた。前面の根固マウンド、頂部の波返し工などは一切設けない形のものである。この直立壁の実験の終了後、施工例の多い消波護岸のモデルとして、直立壁の前面に消波工を設けた型式について一連の実験を行なった。ただし、法先の根固マウンドは設けず、消波工は碎石マウンド上に2層積み、天端は下層2列並びであり、消波ブロックは代表的なものとしてテトラポッド(模型重量480gおよび250gの2種)を使用した。

直立壁の前面水深は、汀線近傍に重点を置いて、最大水深を沖波有義波高の1.5倍とし、それから順に1.0, 0.67, 0.33, 0, -0.33(陸上部)および-0.67(陸上部)倍の水深を計画した。沖波有義波高としては、縮尺効果が現われないよう十分大きな値を選ぶことにして、 $H_{1/3}=15\text{ cm}$ を目標とした。したがって、前面水深は $h=22.5\sim 10\text{ cm}$ である。また、沖水深としては60cmを計画した。

護岸の天端高は、沖波有義波高の0.5倍から1.75倍まで0.25倍間隔で6段階に変化させた。絶対値でいえば、 $h_c=7.5\sim 26.3\text{ cm}$ である。

波形勾配としては、 $H_{1/3}=15\text{ cm}$ に対して $H_0/L_0=0.01, 0.02$ , および $0.04$ を目標として周期を選定したが、実験結果では $0.012, 0.017, 0.036$ であった。なお、波形勾配は当初 $H_0/L_0=0.01$ と $0.04$ の2種類について実験を行なったところ、その影響の著しいことが明らかになったため、その中間の値を追加したもので、これについては実験ケースの数を減らしてある。また、波高としては $H_{1/3}=15\text{ cm}$ のほか、 $H_{1/3}=5\sim 11\text{ cm}$ の小さなものについても補助的に使用している。

最後に海底勾配としては、急勾配の代表として1/10、緩勾配の代表として1/30を選定した。さらにゆるやかな勾配については、実験水路の長さの制限のため、実験することができなかった。

以上の実験条件を項目別に列記すると、次のとおりである。

- 1) 護岸模型：直立壁および前面消波工型
- 2) 波浪諸元： $H_{1/3}=15\text{ cm}$   
(ほかに $H_{1/3}=5\sim 11\text{ cm}$ 若干)  
 $T_{1/3}=1.7, 2.3$ , および $2.8\text{ sec}$
- 3) 設置水深： $h=22.5, 15.0, 10.0, 5.0, 0, -5.0$

および -10.0 cm

4) 天端高： $h_c = 7.5, 11.3, 15.0, 18.8, 22.5$ ,  
および 26.3 cm

5) 水底勾配： $\tan \theta = 1/30$  および  $1/10$ .

実験は、これらの全ての組合せについて行なったわけではなく、他の実験条件のデータから推定できそうなものは適宜省略した。越波量を測定したのは直立壁 205 ケース、消波工 123 ケース、総計 328 ケースである。なお、実験は 1973 年度に直立壁の  $T_{1/3} = 1.7$  および  $2.8$  sec について行ない、1974 年度に直立壁の残りと消波工の全ケースについて測定したものである。

## 2.2 実験装置および実験方法

### (1) 実験水路および模型斜面の配置

実験に用いた水路は、当所大型水工実験場内に仮設したブロック積み水路で、図-1 に示すように内幅 5.03 m、

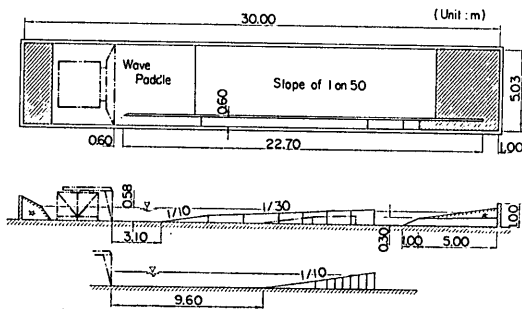


図-1 実験水路および模型斜面の配置

長さ 30.0 m、深さ 1.0 m のものである。水路内には、片側の側壁から 60 cm 離して長さ 22.7 m の仕切壁を設けて大水路と小水路に 2 分してあり、この実験では小水路の方を使用した。小水路の床はほぼ水平で、その端部は消波装置として小碎石を  $1/10$  勾配に敷いてある。ただし、越波測定装置を配置する長さの関係で、消波装置の先端の高さ 30 cm の部分は  $1/3.3$  勾配で落してある。

実験の対象とした 2 種類の水路勾配は、それぞれの勾配の木製斜面を水路内に設置して調整した。 $1/30$  勾配の模型斜面は、全延長を水路内に収めることができないため、先端の高さ 30 cm の部分は  $1/10$  勾配としてある。

模型斜面の設置位置は、 $1/10$  勾配斜面の場合、その先端が造波板から 9.60 m の距離、 $1/30$  勾配斜面では造波板から 3.10 m の距離にあるようにした。ただし、後者の水深 22.5 cm の実験の際には水路長に余裕があるので、斜面の先端を造波板から 9.60 m とした。この結果、護岸の模型と造波板との距離は表-1 のようになった。

表-1 造波板から模型護岸までの距離

|           |       | (単位：m) |      |      |      |      |      |
|-----------|-------|--------|------|------|------|------|------|
| 設置水深 (cm) | 22.5  | 15     | 10   | 5    | 0    | -5   | -10  |
| 1/30 勾配   | 14.85 | 10.6   | 12.1 | 13.6 | 15.1 | 16.6 | —    |
| 1/10 勾配   | 13.35 | 14.1   | 14.6 | 15.1 | 15.6 | 16.1 | 16.6 |

なお、模型斜面の上面は耐水合板を水路側壁の形状に合わせて形取りしたものを用いた。

実験水深は模型護岸の設置位置で所定の値になるように調整した。ただし、小水路の床面が造波板側で 2 cm ほど高いため、造波板前面の水深は 57.1~59.3 cm であった。

### (2) 実験波の発生方法

実験に用いた波は、大型水工実験場に付設する可搬式造波機で発生した。この造波機はピストン型で、幅 5.0 m、高さ 1.3 m の造波板をサイリスタ制御の低慣性直流電動機で駆動するようになっている。造波板の最大振幅は 300 mm、最高速度 500 mm/sec であり、入力信号の波形に追従して運動する。

本実験では、入力信号として規則波および不規則波の波形を用いた。規則波としては超低周波発生器による正弦波を用いた。不規則波の入力信号は、図-2 のブロック図の方式で発生している。まず、2 台の白色雑音発生器によって白色雑音を発生させ、これを 10 チャンネルのバンドパスフィルターに通してスペクトル形状を修正する。この修正は、造波板の造波特性を考慮し、水路内に所定のスペクトルを持つ波が生成されるように、フィルターの出力ダイヤル値を計算し、設定する。

不規則波形発生装置で作られる入力信号は周波数が高

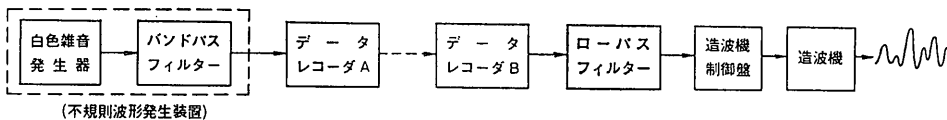


図-2 不規則波発生方法のブロック図

くてそのままでは実験に用いることができないため、テープ速度の大幅な変換ができるデータレコーダ A にいったん記録する。記録した信号は、記録時のテープ速度の 1/10 で再生させ、これを小型軽量のデータレコーダ B に記録する。この信号は、さらに 1/2 の速度で再生させ、50 Hz 以上の高周波部分をカットするローパスフィルターを通して造波機制御盤へ入力する。造波板はこの信号に追従して運動し、所定の波を造波することになる。以上の手順のうち、データレコーダ A に記録した入力信号はマスターテープに保存し、実験のつどデータレコーダ B のテープに書き写した。これによって、約 2 年間にわたる実験期間中、同一の入力信号を用いて実験波を発生することができた。

なお、ローパスフィルターにはマルチ回転のポテンシオメータが取り付けられており、波高レベルの微調整ができるようになっている。

### (3) 波の測定および解析方法

規則波の実験の場合と同様に、不規則波の場合でも模型からの反射波が造波板で再反射されて発生波をひずめる現象は、実験遂行上の重大な障害である。しかし、測定時間を反射波の往復時間内に制限する通常の方式では、不規則な波群を幾つもの短い波列に分割し、何回もの繰り返し測定を行わなければならない、実験の効率が低下する。さらに、不規則波の中に含まれる短周期の成分波は群速度が遅いため、波の先端部分から脱落しがちであり、不規則波のスペクトル形状にかたよりを生ずる欠陥がある。このため、本実験では逆に模型と造波板の間の多重反射を十分に発達させ、その状態で合成入射波と反射波の波高を分離する方法を採用した。この方法の理論的根拠は次のとおりである。なお、具体的手法については文献 3)、4) を参照されたい。

今、一定周期の規則波によって水路内に多重反射波が形成されたものとし、 $x$  の正方向に進む波の合成を入射波  $\eta_1$ 、負方向に進む波の合成を反射波  $\eta_R$  と呼ぶことにする。それぞれの振幅を  $a_1, a_R$  とすると、 $\eta_1$  および  $\eta_R$  は次のように一般的に表示される。

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= a_1 \cos(kx - \sigma t + \epsilon_1) \\ \eta_R &= a_R \cos(kx + \sigma t + \epsilon_R) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 $k = 2\pi/L$  : 波数 ( $L$  は波長)

$\sigma = 2\pi/T$  : 角周波数 ( $T$  は周期)

$\epsilon_1, \epsilon_R$  : 位相 (任意である)。

このような合成波に対して、水路内で距離  $dl$  だけ離

れた 2 点で水面変動を同時に測定したとする。この測定波形を  $\eta_1, \eta_2$  で表わすと、これは一般に

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= (\eta_1 + \eta_R)_{x=x_1} = A_1 \cos \sigma t + B_1 \sin \sigma t \\ \eta_2 &= (\eta_1 + \eta_R)_{x=x_1+dl} = A_2 \cos \sigma t + B_2 \sin \sigma t \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= a_1 \cos \epsilon_1 + a_R \cos \epsilon_R \\ B_1 &= a_1 \sin \epsilon_1 - a_R \sin \epsilon_R \\ A_2 &= a_1 \cos(kdl + \epsilon_1) + a_R \cos(kdl + \epsilon_R) \\ B_2 &= a_1 \sin(kdl + \epsilon_1) - a_R \sin(kdl + \epsilon_R) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

と書くことができる。ただし、位相  $\epsilon_1, \epsilon_R$  は元の値から  $kx_1$  だけずらした値である。

式 (3) は、四つの未知数  $a_1, a_R, \epsilon_1$  および  $\epsilon_R$  に対する四つの方程式群であるから、これを解くと、振幅  $a_1$  および  $a_R$  が次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{2|\sin kdl|} \left[ (A_2 - A_1 \cos kdl - B_1 \sin kdl)^2 \right. \\ &\quad \left. + (B_2 + A_1 \sin kdl - B_1 \cos kdl)^2 \right]^{1/2} \\ a_R &= \frac{1}{2|\sin kdl|} \left[ (A_2 - A_1 \cos kdl + B_1 \sin kdl)^2 \right. \\ &\quad \left. + (B_2 - A_1 \sin kdl - B_1 \cos kdl)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

したがって、2 点の同時波形記録からそれぞれのフーリエ級数を求めれば、入射波および反射波の振幅が式 (4) で推定される。不規則波の場合にも FFT 法によってすべてのフーリエ級数が求められるので、式 (4) を用いて入射波および反射波のスペクトルが推定できる。ただし、このスペクトルの推定値は  $|\sin kdl| \rightarrow 0$  の近傍では精度が低下する。このため、あらかじめ周波数の有効範囲を設定し、この範囲で入射波と反射波のエネルギー比を求め、反射率を推定する。そして、多重反射系の合成波高 (有義波高) の測定値を基準にして入射波高および反射波高を推定する。

この方法を用いるにあたり、本実験では 2 測点の間隔を  $dl = 20$  cm に固定し、周波数の有効範囲を  $f = (0.3 \sim 1.4)$  Hz に設定した。これについては、模型斜面を設置しない状態で波の検定を行ない、その妥当性を確認した。

波高の測定に用いたのは抵抗線式波高計で、上記の入射波分離用に 2 台、直立壁前面 1 cm に 1 台の計 3 台を配置した。ただし、消波工の場合には前面波形を計測せず、直立壁でも  $T_{1/3} = 2.3$  sec の波については前面波形の測定を省略した。



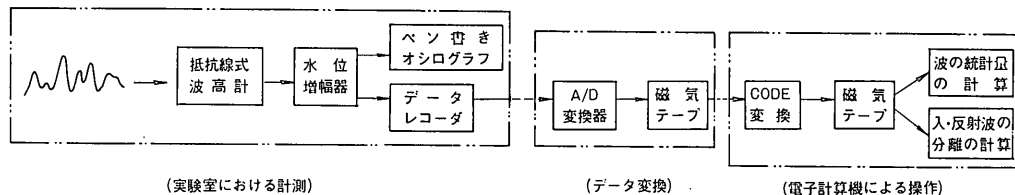


図-3 データ記録・解析のブロック図

合成波測定用の波高計は、1/30 勾配斜面上の直立壁の実験の際には造波板から 3.1 m の位置、その他のケースは造波板から 5.2 m の位置に設置した。したがって、測定水深は 57~59 cm である。ただし、1/30 勾配斜面の消波工の場合のみは、斜面上の水深 35.5~36.9 cm で合成波を測定した。

不規則波の場合の波のデータの記録および解析は、図-3 のブロック図のようにして行なった。計測から A-D 変換、およびそれから電子計算機への接続部はオフラインによる操作である。

実験にあたっては、まず模型斜面を設置しない状態で検定を行なって波高レベルの調整を行なった。それから、直立壁の実験のうち 1/30 勾配の測定が終了するとき、同じく 1/10 勾配の測定が終了したとき、および消波工の実験のうち 1/30 勾配の測定が終って 1/10 勾配に移るときのそれぞれについて波の検定を行なった。

不規則波の実験は、波の検定も含め、すべて各スペクトルごとに入力信号波形の異なる 3 種類の発生波について行なった。各発生波は約 200 波を含む長さであり、越波量は合計 600 波に対するものを測定した。ただし、波形の測定時間は前面波については、196 sec ( $T_{1/3} \approx 1.7$  および 2.3 sec の波) あるいは 392 sec ( $T_{1/3} \approx 2.8$  sec の波) であり、3 回の各記録ごとに得られた波高、周期その他の統計量の平均値を求め、これをデータとして使用した。データ解析のサンプリング周期は 1/15 sec あるいは 1/7.5 sec で、データ個数は 2,940 である。合成波についてはデータ個数 2,520 で測定・解析を行なった。

なお、越波実験の際、越波量が非常に多いケースやその他一部のケースでは、波の測定を省略した。これらの未測定の場合については、他の天端高や前面水深の波高と大差ないと考えられるので、他の測定結果に基づいて、適宜、波高の推定を行なった。

越波量の測定は不規則波ばかりでなく、一部の模型護岸については規則波でも実験した。この場合は、模型斜面を設置しない状態で波の検定を行ない、各周期ごとに

造波板の振幅を 10~15 通りに設定したときの波高値を求めておいた。波高は、記録波形がほぼ定常となる状態の 5~8 波の平均として求めた。規則波の越波量は、反射波の往復時間以内の波による総量として計測した。

最後に、入射波高の測定値あるいは推定値は、これを浅水係数で割って深水波高  $H_0$  に換算した。本報告における不規則波の場合の  $H_0$  は  $(H_{1/3})_0$ 、すなわち深水有義波高を表示している。浅水係数は、首藤の理論<sup>5)</sup>に基づいて作成した非線型浅水係数の図表<sup>6)</sup>で算出した。ただし、合成波の波高測定水深が  $h \approx 36$  cm であった 1/30 勾配斜面上の消波工の場合以外は非線型効果が現われず、微小振幅波理論による値に等しい、またはほとんど同一であった。

#### (4) 護岸の模型および越波量の測定方法

模型護岸のうちの直立壁は、厚さ 12 mm の鋼板を主材とし、50×50×6 および 75×75×6 の山形鋼を補強材として製作した。直立壁は図-4 の組立図に示すように

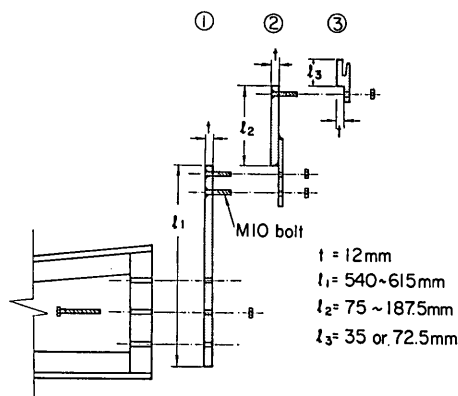


図-4 直立壁の模型の組立

三つの部分からなっている。①は木製斜面への取付部であり、模型の設置水深ごとに専用のものを用意した。②は天端高の調整部で、高さの異なるものを 2 個使用した。最後の③は直立壁頂部であり、越水を流すための導水路の刃口を落とし込む溝を切っている。これは高さの異なるものを 2 個製作した。そして、これらの部品の組み



写真-1 消波護岸の模型

合せによって、所定の  $h_c=7.5\sim 26.3$  cm の天端高を実現した。なお、各部の結合は 10 mm ボルトによった。

消波護岸の模型は、上述の直立壁の前面に碎石をマウンド状に積み、その上に模型テトラポッドを 2 層積みにして消波工とした。写真-1 に見られるように、天端部は 2 列の整積みである。また、消波工の法面勾配は一般に施工されている 1 : 4/3 とした。消波工の天端高は直立壁の頂部から  $0.1 H_{1/3}$  程度低い高さを目標とした。実際に積み上がった状態では、直立壁との天端高の差が 1.0~2.0 cm であった。模型テトラポッドの重量は、波高 15 cm に対する安定重量に最も近いものとして約 480 g を採用した。このブロックは 1 個の高さが約 9 cm であり、水深 5 cm および浅では天端高の低い場合に 2 層に積むことができないため、 $h=5$  および 0 cm については 1 個の重量が約 250 g のものを使用した。

実験中の観察によれば、これらの模型テトラポッドは実験不規則波の作用に対しても安定であった。ただし、水底勾配 1/10 の水深 10 cm の場合には法先のテトラポッドが前方へ抜け出し、これによって消波工が崩れる場合があったので、法面の先端に止め木を打ってこれを防止した。

越波水量の測定には、図-5 のように模型護岸の背後に吊り下げた受け箱を使用した。すなわち、直立壁の天端を越えた水塊は導水路を流れて測定箱に流れ込む。導水路の先端の下面には  $30\times 30\times 4$  の山形鋼が溶接され、直立壁頂部の溝にはまり込むようになっている。これに

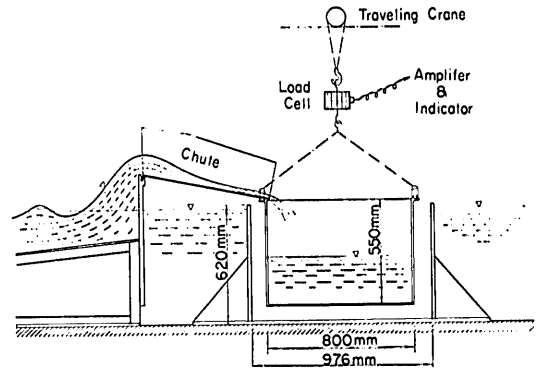


図-5 越波量の測定方法

よって、受け口における漏水を最小に抑えながら導水路のはめ込み、取り外しを迅速に行うことが可能になった。測定箱はその全体が大型土工実験場に付設された天井クレーンから吊り下げられてあり、その中間に挿入した荷重変換器によって自重および越波水塊の重量の合計が測定できるようになっている。この荷重変換器はストレインゲージ利用の容量 200 kg、精度 0.05% の精密型で、専用の自動平衡指示器に測定重量が表示される。測定箱の自重は約 50 kg なので、1 回に測定できる越波水量は重量換算で約 150 kg であった。模型護岸の設置水深が大きく、天端が低くて連続 200 波の総越波量が 150 kg を超える場合には、200 波を数回に分けて越波量を測定し、その合計を求めるのを原則とした。

越波量が少ない場合には測定箱を小型軽量のものに取り替え、容量 50 kg (精度 0.05%) の荷重変換器を使用

した。越波量がさらに少ない場合にはメスシリンダーで測定した。この結果、越波量は  $10 \sim 10^6 \text{ cm}^3$  の範囲で計測することができた。なお、図-5 に示すように越波水量の測定箱の外側には一回り大きい外箱を設置し、測定箱が水面に浮くことのないようにしてある。

越波量の測定結果は、その計測時間で割って平均流量とし、さらに模型幅 60 cm で割って単位幅・単位時間当りの平均越波流量  $q \text{ (cm}^3/\text{cm}\cdot\text{sec)}$  を算出した。前述のように実験は波形の異なる不規則波 3 回の繰り返し測定であり、各測定ごとに算出した越波流量の総平均を求めてこれを越波流量の実験データとして使用した。なお、越波量の計測時間は越波の始まりから約 200 波相当の継続時間 ( $T_{1/3} \approx 1.7, 2.3, 2.8 \text{ sec}$  の波でそれぞれ 290, 400, および 500 sec 程度\*) のあと、導水路を上へ跳ね上げて越水の流入を中止するまでの時間である。

規則波の実験の場合は、各波高ごとに有効測定時間内数波の越波量を 1 回ずつ測定し、これから平均越波流量を求めた。ただし、規則波の波列の先端では波高が大きい部分が現われることが多いため、この部分は越波量の測定から除外した。

### 2.3 実験に用いた不規則波の性質

#### (1) 波のスペクトルおよび波形の非線型性

不規則波のスペクトル形状は Bretschneider・光易型の式(5)のものを目標とし、 $H_{1/3} = 15 \text{ cm}$  のまま  $T_{1/3}$  を 1.7, 2.3, 2.8 sec と 3 種類に変化させた。

$$S(f) = 0.256 \left( \frac{H_{1/3}}{T_{1/3}^2} \right)^2 f^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3}f)^{-4}] \quad (5)$$

実際に水路内に発生された波のスペクトルは図-6 に示すとおりである。図中に示すように、3 種類のスペクトルは周期の短い方から順に S, M, および L 型と名付けた。深水波に換算したときの波形勾配は、それぞれ  $H_0/L_0 = 0.036, 0.017, \text{ および } 0.012$  である。スペクトルの高周波側の勾配は、 $T_{1/3} \approx 1.7 \text{ sec}$  の S 型スペクトルの波でほぼ  $-4.7$  乗、 $T_{1/3} \approx 2.8 \text{ sec}$  の L 型スペクトルで  $-4.1$  乗となっている。この勾配が  $-5$  乗よりもゆるやかなのは、浅水波であることの影響と思われる。波高を  $5 \sim 11 \text{ cm}$  に下げた場合には、ほぼこの形状のまま下方に移動したようなスペクトルを示した。

一方、波形の非線型性のパラメーターとして、skewness (歪度) および kurtosis (尖鋭度) を検定波の全てについて調べた結果は表-2 のとおりである。波の周期

\* この場合は  $T_{1/3}$  ではなく  $\bar{T}$  で計算される。

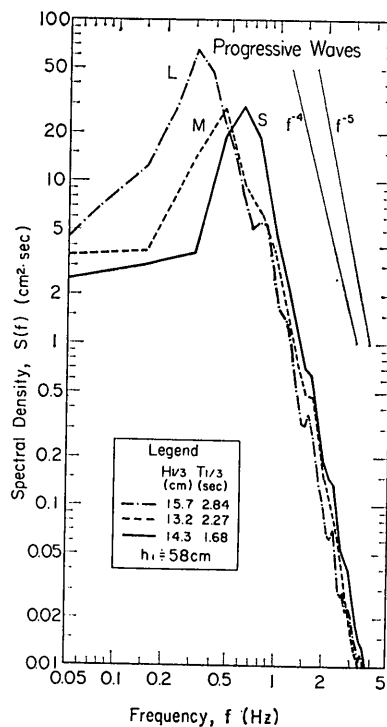


図-6 実験に用いた波のスペクトル

表-2 実験不規則波の非線垂性

| スペクトル型 | skewness          | kurtosis        |
|--------|-------------------|-----------------|
| S 型    | $0.277 \pm 0.085$ | $2.86 \pm 0.38$ |
| M 型    | $0.487 \pm 0.109$ | $3.21 \pm 0.49$ |
| L 型    | $0.636 \pm 0.110$ | $3.44 \pm 0.44$ |

注：数値は [平均値 ± 標準偏差] を表わす。

の増加につれて skewness が增大するのは、浅海域における波浪の特性の一つであり、上記の skewness の値は  $h^2/H_0' L_0$  をパラメーターとして表示したときの一般的傾向<sup>6)</sup> とほぼ同じである。これに対して kurtosis の値は低目であり、特に S 型スペクトルの波は  $\beta_2 < 3$  であって非線型性が弱い。このことは、後述の波高分布の幅が狭いことにも関係しており、波高の大きな波が造波板の前で時々碎けていたことに起因すると推測される。

#### (2) 波の安定性

不規則波の実験では、波の不規則性のために  $H_{1/3}, T_{1/3}$  などの統計量が測定記録ごとに変動する。したがって、実験は何回か繰り返し、その平均値を求め、かつ変動の幅を把握しておく必要がある。今回の実験においては、時期を変えて 3 回の波の検定を行っており、その際は

スペクトル型ごとに3種類の波形について水路内の3地点で波を測定している。そこで、これらの記録から解析された有義波高および有義波周期の全データについて平均値および標準偏差値を求めた。

一方、越波の実験の際は大半のケースについて入・反射波の合成波の波形を記録し、入射波高および反射波高を推定している。そこで、各測定時の入射波高(有義波)の推定値、および合成波形の有義波周期について平均値および標準偏差値を求め、検定波の統計量と比較したのが表-3, 4である。ただし、波高は浅水係数を用いて換算した深水波高で表示してある。

表-3 入射波高の統計計算結果

(単位: cm)

| 護岸型式 | 水底勾配 | 波の種別       |            |            |
|------|------|------------|------------|------------|
|      |      | S型         | M型         | L型         |
| 直立   | 1/30 | 15.85±0.83 | 12.94±0.65 | 14.35±1.02 |
| 直立   | 1/10 | 15.64±0.69 | 13.43±0.66 | 14.02±0.88 |
| 消波   | 1/30 | 15.79±0.65 | 13.64±0.83 | 14.04±0.83 |
| 消波   | 1/10 | 15.67±1.32 | 13.30±0.94 | 14.52±0.93 |
| 検定波  |      | 15.67±0.54 | 13.65±0.65 | 15.09±0.57 |

注: 数値は〔平均値±標準偏差値〕を表わす。

表-4 入射波の周期の統計計算結果

(単位: sec)

| 護岸型式 | 水底勾配 | 波の種別      |           |           |
|------|------|-----------|-----------|-----------|
|      |      | S型        | M型        | L型        |
| 直立   | 1/30 | 1.66±0.05 | 2.22±0.15 | 2.77±0.13 |
| 直立   | 1/10 | 1.65±0.06 | 2.15±0.16 | 2.67±0.18 |
| 消波   | 1/30 | 1.72±0.05 | 2.33±0.09 | 3.00±0.10 |
| 消波   | 1/10 | 1.72±0.06 | 2.27±0.12 | 2.82±0.15 |
| 検定波  |      | 1.68±0.05 | 2.27±0.10 | 2.84±0.08 |

注: 数値は〔平均値±標準偏差値〕を表わす。

表-3, 4の結果を見ると、検定波は波高・周期ともに標準偏差で±3~5%の変動を示している。この変動のうち約1/2は発生波の波形の差に基づくもので、残りは実験時期が異なるデータ間の系統的な差異である。後者の差異の原因を究明することはむずかしいが、図-2のローパスフィルターのアテネターのダイヤル設定、データレコーダの出力レベルの調整などの段階で生じたものかも知れない。

検定波に対し、合成波から推定した波高および周期の

平均値は、L型スペクトルの波を除き、検定波の標準偏差値の1倍の変動幅の中に入っている。特に、周期の短いS型の波の変動が小さい。一方、周期の長いL型スペクトルの波の場合には波高が平均的に小さく、また周期が護岸型式によってかなりずれている。この理由として、一様水深部における水深波長比が小さいために、入・反射波の非線型干渉が強く現われた可能性が考えられるが、正確に何が原因であるかは不明である。

合成波から推定した波高と周期の値は、模型護岸の設置水深によっても若干影響されている。実験を行なった全ケースの波高の推定値は、反射率および越波流量とともに付表-1~4に記載されており、これを調べると、模型護岸の設置水深が浅くなるにつれて推定入射波高の値が緩やかに増加するケースが多いことが分る(最大20%程度)。データを調べると、入射波高の推定値のみでなく合成波の有義波高そのものが増加している場合が少なくない。模型の設置水深が大きい場合には一般に反射率が大きいので、図-1に示した水路配置の場合には、反射波が大きいときには小水路への波の侵入が阻止される傾向があるのかも知れない。また、今回用いた不規則波の入・反射波の分離推定法が微小振幅波理論に基づくため、有限振幅の非線型干渉効果によって反射率が見掛け上やや大き目に現われ、このため入射波高が低目に推定されたのかも知れない。

また、周期については付表には示していないけれども、データを調べてみると、直立壁では設置水深が大きい

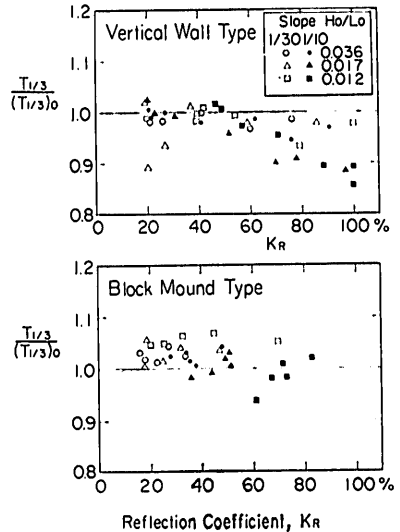


図-7 合成波の周期の変化比と反射率の関係

いときに周期が短かく現われる傾向が認められる。この周期の変化を反射率に対してプロットしたのが図-7である。データは、各設置水深ごとの有義波周期の平均値と基準値である検定波の平均値(表-4参照)との比である。図から明らかなように、水底勾配1/10上の直立壁のときに周期比と反射率の逆相関が明瞭である。しかし、消波工の場合には反射率の範囲が狭いこともあってほとんど認められない。反射率が大きいときに周期の代表値が短くなるのは、入射波と反射波の非線型干渉によって、スペクトルの各成分波の周波数の和の周波数を有する二次波が発生するためと思われる。

(3) 波高および周期の分布

次に、検定波について波高および周期の分布を調べた結果が図-8, 9である。いずれも縦軸は確率密度、横軸は平均波高または平均周期に対する比で表示してある。図中に細線で示した曲線は、波高については Longuet-Higgins による理論式であるレーリー分布の式(6)、周期については Bretschneider の提案した  $T^2$  に関するレーリー分布である式(7)を表わしている。

$$p\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \frac{\pi}{2} \frac{H}{\bar{H}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right] \quad (6)$$

$$p\left(\frac{T}{\bar{T}}\right) = 2.7 \frac{T^3}{\bar{T}^4} \exp\left[-0.675\left(\frac{T}{\bar{T}}\right)^4\right] \quad (7)$$

実験値は、各波形記録ごとに  $\Delta H/\bar{H}=0.25$ ,  $\Delta T/\bar{T}=0.25$  の区間別の度数分布が求められているので、これを

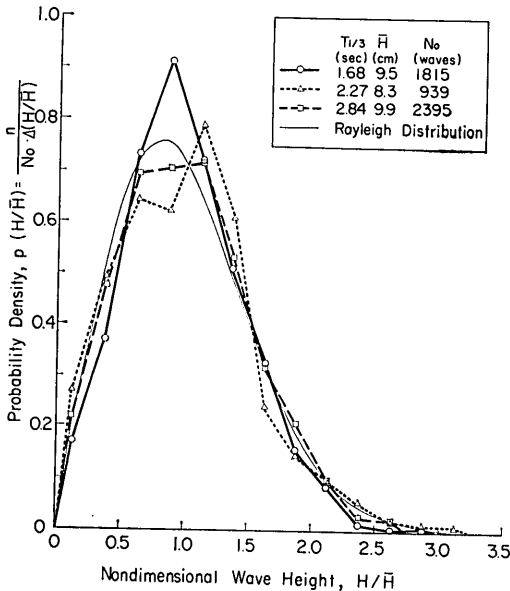


図-8 検定波の波高分布

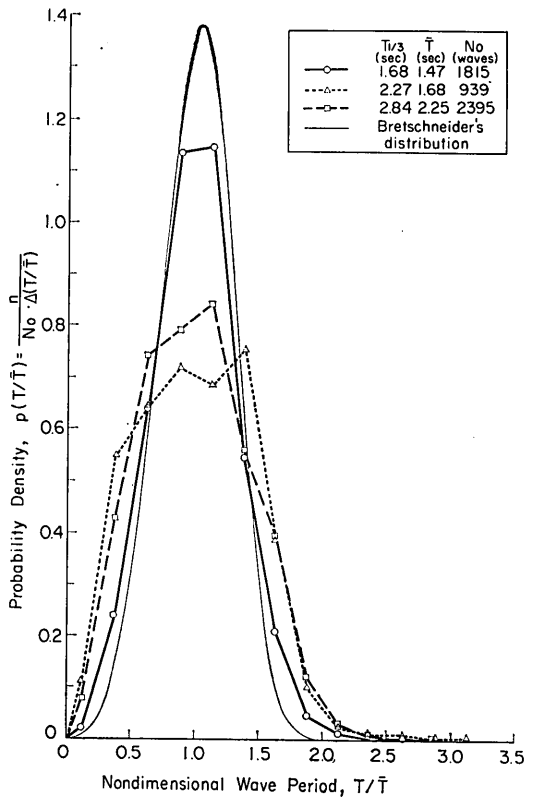


図-9 検定波の周期分布

集計し、計算したものである。

まず波高分布を見ると、M型およびL型スペクトルの波はほぼレーリー分布をしていると見なせるけれども、S型スペクトルの波はレーリー分布よりも分布幅が狭く、平均波高の付近に波高がやや集中している。この原因は不明であるが、発生波の波高が  $H_{1/3} \approx 15$  cm とかなり大きく、一方、周期が比較的短かったために、造波板の前で波が砕けやすくなり、 $H/\bar{H}$  の大きな部分の波の数が減少したのではないかと推察される。

代表波間の波高比を計算した結果は表-5のとおりである。S型スペクトルの波の波高分布の幅がレーリー分布よりも狭いことは、この波高比の計算結果でも明らかである。また、L型スペクトルの波もやや分布幅が狭い。なお、括弧内に示した合成波についての波高比は検定波よりも減少しているケースがあるけれども、この程度の差異は不規則波の変動範囲内であり、波高分布の特性が変化したと見なすことはできない。

次に周期の分布を見ると、S型スペクトルの波は Bretschneider の提案式に近いが、M型およびL型スペ

クトルの波は分布幅がかなり広い。また、S型スペクトルの波にしても、周期の長い波の出現ひん度が式(7)によるものよりも相当大きくなっている。こうした周期の分布幅の広がり、現地波浪<sup>7)</sup>におけるよりもさらに著しい。

表-5 代表波間の波高比

| スペクトル型 | $H_{1/10}/H_{1/3}$       | $H_{1/3}/\bar{H}$        |
|--------|--------------------------|--------------------------|
| S 型    | 1.23±0.03<br>(1.21±0.04) | 1.53±0.07<br>(1.51±0.08) |
| M 型    | 1.31±0.03<br>(1.27±0.04) | 1.61±0.05<br>(1.59±0.08) |
| L 型    | 1.25±0.04<br>(1.25±0.03) | 1.58±0.05<br>(1.54±0.07) |

注: 1) 数値は〔平均値±標準偏差値〕を表わす。  
2) 括弧内は合成波の波形記録のうちの  $h=22.5$  および  $15.0$  cm の直立壁のデータである。

表-6 代表波間の周期比

| スペクトル型 | $T_{1/10}/T_{1/3}$ | $T_{1/3}/\bar{T}$ | $r(H, T)$ |
|--------|--------------------|-------------------|-----------|
| S 型    | 1.00±0.04          | 1.15±0.05         | 0.49±0.08 |
| M 型    | 1.00±0.05          | 1.35±0.07         | 0.67±0.04 |
| L 型    | 1.06±0.04          | 1.27±0.05         | 0.64±0.05 |

注: 数値は〔平均値±標準偏差値〕を表わす。

また、代表波間の周期比ならびに波高と周期の相関係数は表-6のとおりである。周期比  $T_{1/3}/\bar{T}$  が相関係数  $r(H, T)$  に支配されることは現地波浪でも認められており、数値的にもほぼ一致している。ただし、M型スペクトルの波の  $T_{1/3}/\bar{T}$  はやや大き目である。また、周期比  $T_{1/10}/T_{1/3}$  が平均的に1.0であることも現地波浪の特性と同じである。ただ、L型スペクトルの波は  $T_{1/10}/T_{1/3}$  の平均値が1.06であって、波高と周期の相関係数が波高の大きな部分にまで続いていることを示唆している。

## 2.4 直立壁前面の波の性質

### (1) スペクトル形状

直立壁の越波実験のうち、S型およびL型スペクトルの波については壁前面の波形記録を取得した。水深が浅い箇所での波は碎波の衝突による跳波を相当数含んでいて、横方向の一様性が失われているケースが少なくないが、ともかく得られた波形記録からエネルギースペクトルを計算した1例が図-10である。これはS型スペクトル ( $T_{1/3} \approx 1.7$  sec) の波を勾配1/30の斜面上の直立壁に

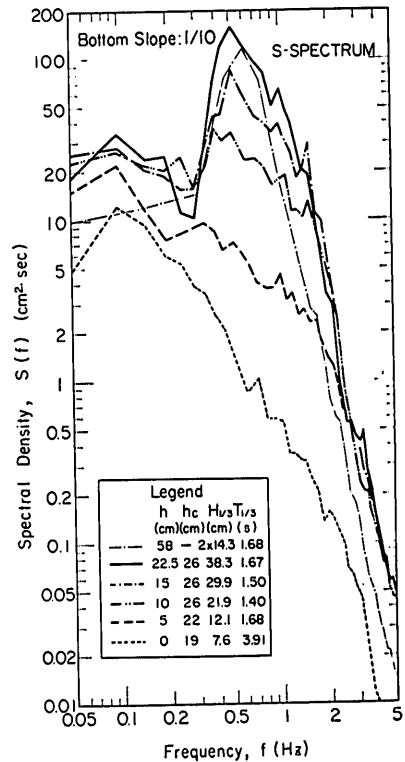


図-10 直立壁前面の波のスペクトル

作用させた場合であり、各水深において直立壁の天端高が最も高いケースについて3回の平均値を示してある。また、比較の意味で、進行波が重複波を形成して壁面において波高が2倍になるものとして、検定波のスペクトル密度を4倍したものを細い1点鎖線で示してある。

直立壁前面の波のスペクトルは、設置水深が浅くなるにつれてピークの値が次第に低下するが、低周波部分はほとんど変わらない。また、高周波側も減衰がゆるやかである。この結果、スペクトルのピークが台地状になられたような形になる。さらに、主ピークの周波数の2倍および3倍周波数における2次ピークが顕著であり、進行波の場合よりも非線型干渉の度合いが著しい。これは、重複波の形成によって、それに特有な束縛波が発生するためであろう。スペクトルの主ピークの高周波側に見られる全体的なふくらみは、こうした非線型干渉によるものと考えられる。

### (2) サーフピートおよび平均水位の上昇

直立壁前面の波のスペクトルのもう一つの特徴は、低周波部のエネルギー密度が高いことで、検定波のエネル

ギ一密度を4倍したものよりもさらに2倍程度大きくなっている。障害物のない斜面上に不規則波が入射して碎波するとき、波高の不規則性のために radiation stress に起因する平均水面の不規則動揺が生じ、これはサーフビートと呼ばれている。著者らは現地海岸の汀線近傍での波形の観測データに基づいて、次の経験式を設定した<sup>6)</sup>。

$$\frac{\zeta_{rms}}{H_0'} = \frac{0.01}{\sqrt{\frac{H_0'}{L_0} \left(1 + \frac{h}{H_0'}\right)}} \quad (8)$$

ここに、 $\zeta_{rms}$ ：サーフビートの波形の標準偏差値。

そして、今回用いたのと同じの水槽内での不規則碎波の実験においては、水槽内の多重反射その他のためにサーフビートの振幅が平均で式(8)の値の1.7~2.1倍になっていることを明らかにした。今回の実験条件に式(8)をそのままあてはめると、S型スペクトルの波の場合には $\zeta_{rms} \approx 0.5 \sim 0.8$  cm、L型では0.9~1.4 cmと計算される。実際に直立壁前面におけるサーフビートの標準偏差値をスペクトルの低周波部分の積分によって求めた結果は表-7のとおりである(直立壁の天端高の異なるものも、設置水深が同一のものは一緒に平均してある)。サーフビートの周波数帯の定義(S型は $f=0 \sim 0.3$  Hz, L型は $f=0 \sim 0.15$  Hz)によるためかスペクトルによる差は見られず、式(8)による値の1.5~4.0倍になっている。今回の実験のように浅水域に直立壁が設けられた場合のサーフビート現象については研究が行なわれてい

ないため、表-7の値が異常に大きいと即断することはできない。しかし、不規則波の碎波実験の経験から考えても、造波板と直立壁間の多重反射や小水路と広水路との間の干渉その他によってサーフビートが増幅されていたことは確かであろう。

また、直立壁の前面においては平均水位の上昇が認められる。表-7には、波高計の検定時の静水面を基準として、波形の読取値の総平均として求めた平均水位の上昇量も示してある。ただし、この方法で求めた平均水位の精度はあまり高くなく、検定波の実験結果から推定して±3 mm程度と思われる。データは、前面水深の各値ごとに各種の天端高の実験値を平均して示してある。この結果では、前面水深が大きいときに1~2 cm、汀線において2~5 cmのオーダーの水位上昇である。水位上昇の原因の一つは、重複波の形成に伴う非線型効果であり、もう一つは斜面上の碎波による wave setup の現象である。

前者について規則波の理論を援用すれば、有限振幅重複波の第2次近似解における重複波の腹での平均水位の上昇量が次のように与えられる<sup>8)</sup>。

$$\bar{\eta} = \frac{1}{8} \left( \tanh kh + \frac{1}{\tanh kh} \right) k H_s^2 \quad (9)$$

水位上昇は波高の自乗に比例する量であるから、不規則波に対しては波高の自乗平均値を使うことにすると、 $h = 22.5 \sim 10$  cm においては1/30 勾配の場合に $\bar{\eta} = 1.0 \sim 1.2$  cm、1/10 勾配の場合に $\bar{\eta} = 1.4 \sim 2.1$  cmと計算される。周期による差異は、結果として現われない。水底勾配の影響が実測値と逆なのは、1/10 勾配の場合には radiation stress による wave setdown 現象が現われるためではないかと思われる。実測値と計算値に若干の差はあるが、オーダーとしては合っており、 $h \geq 10$  cm の領域における平均水位の上昇は、重複波の非線型効果として説明できよう。

第2の原因である wave setup は、筆者の一人が先に計算したところによると、 $H_0/L_0 = 0.012 \sim 0.036$  に対して汀線における値が水底勾配1/30の場合に $\bar{\eta}/H_0 = 0.12 \sim 0.15$ 、水底勾配1/10の場合に $\bar{\eta}/H_0 = 0.16 \sim 0.21$ と推定される(下限はS型、上限はL型の波形勾配に対応)。したがって、 $\bar{\eta} = 1.9 \sim 2.3$  cm (1/30 勾配)、および $\bar{\eta} = 2.5 \sim 3.2$  cm (1/10 勾配)である。実測値に比べてやや小さく目であり、特に水底勾配1/10のときの差が著しい。しかし、傾向としては表-7の値と一致しており、水深の小さい箇所での水位上昇が wave setup によるこ

表-7 直立護岸前面の平均水位およびサーフビートの推定値 (単位: cm)

| 水深<br>$h$ | 水底勾配 1/30 |         | 水底勾配 1/10 |          |
|-----------|-----------|---------|-----------|----------|
|           | S 型       | L 型     | S 型       | L 型      |
| 22.5      | 1.7 2.2   | 1.6 2.3 | 1.3 2.1   | 1.3 2.2  |
| 15.0      | 1.5 2.4   | 1.7 2.8 | 1.2 2.4   | 1.0 2.3  |
| 10.0      | 1.3 2.4   | 1.7 2.6 | 1.6 2.3   | 1.9 2.3  |
| 5.0       | 1.3 2.1   | 1.9 2.3 | 2.0 2.2   | 2.9 2.3  |
| 0.0       | 2.0 1.6   | 2.6 1.9 | 3.5 1.9   | 5.0 2.2  |
| -5.0      | — —       | — —     | 6.3* 1.1  | 7.6* 1.6 |

注: 1) \* 印は、水路床上の平均水位に静水面上の床面高を加えた値である。

2) サーフビートの周波数帯は、S型スペクトルでは $f=0 \sim 0.3$  Hz, L型スペクトルでは $f=0 \sim 0.15$  Hzとして定義した。

とを示唆している。なお、勾配1/10の斜面上の  $h = -5$  cm (静水面上5 cm) のデータは、計測上の最低水位が模型斜面上の上面となるようにして取得されたものであり、ときどき打ち上る波を対象にして平均した水位を静水面上の斜面上面高に加えた高さであって、参考として示したものである。

(3) 波高および周期の場地的変化

今回の実験は越波量の測定が目的なので、天端が十分に高く越波を生じないようなケースについては実験していない。そこで、天端高と前面波高の関係をプロットし、その外挿として天端高が十分に高い場合の前面波高の1/3最大値を推定した。この結果を深水波高の2倍値(重複波としての値)に対する比率として表示したのが図-11である。予想されるように、周期の長いL型スペクトルの波 ( $H_0/L_0 = 0.012$ ) の波の方が波高比が大きく、また、水底勾配の急な方が波高比が大きい。波高比  $H_s/2H_0$  が1を超えるものがあるのは、主として波の浅水効果によるものである。図中に示した細実線および細1点鎖線は、不規則波の碎波変形モデルによる理論値である。

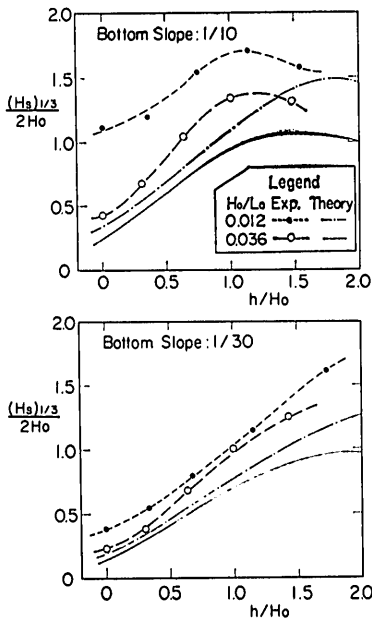


図-11 直立壁前面の波高の水深による変化

理論値は実験値に比べてその絶対値がかなり小さい。この理由は、波の非線型効果のために直立壁前面の波高が重複波領域においても入射波高の2倍よりも大きく、

碎波領域においてはこの差がさらに増大するため<sup>9)</sup>と考えられる。また、汀線近傍においては波というよりも流れの様相が強くなり、碎波変形モデルの適用にやや無理があり、理論値が過小になるものと考えられる。しかし、理論値は全体として実験値の傾向を良く説明しているといえよう。

次に、直立壁前面の波形について有義波周期を求め、検定波の周期に対する比を計算した結果が図-12であ

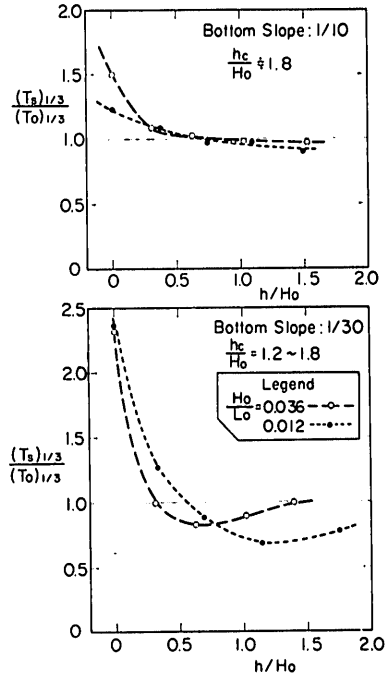


図-12 直立壁前面の波の周期の水深による変化

る。水底勾配1/10の場合には周期の変化がゆるやかであるが、1/30勾配の場合には  $h/H_0 = 0.6 \sim 1.2$  において前面波形の周期が検定波の70~80%にまで減少し、さらに水深が浅くなるにつれて急激に増加して、汀線においては検定波の周期の2倍以上になっている。初期の周期の減少は、図-10のスペクトルに見られる非線型干渉に基づく高周波側のエネルギー密度の増大によるものであり、汀線近傍での周期の増大はサーフビート現象が卓越することによるものである。もっとも、後者の増大にしても、一様斜面上の碎波変形の実験値<sup>9)</sup>に比べるとまだ低目であり、直立壁による反射波との干渉効果のために本来の周期よりも短くなっていることをうかがわせる。



(4) 波のうちあげ高

前面波高と同様に、天端高のうちあげ高の関係を外挿して天端高が十分に高い場合のうちあげ高の1/3最大値を推定した結果が図-13である。汀線も含めその陸側については、波高計で測定する最低水位が模型斜面の上面に一致させてあるため、波高がそのままうちあげ高となる。ただし、個々のうちあげ高の定義は波形記録のゼロアップクロス点の間の最高水位であり、ゼロ線としては波形の読取値の全体に対して最小自乗法によってあてはめた放物線<sup>10)</sup>を用いている。したがって、図-13に示したデータは以上で求めたうちあげ高に静水面からの平均水位の上昇量を加算してある。

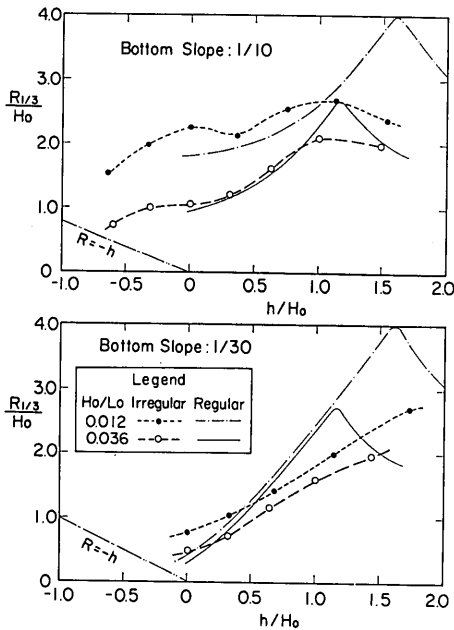


図-13 直立壁に対する波のうちあげ高の推定値

うちあげ高の傾向は前面波高と同様であり、波形勾配が低いほど、また水底勾配が急なほど、うちあげ高比が大きくなっている。図中には、豊島ほかの実験データに基づくうちあげ高の図表<sup>11)</sup>および Saville の実験データの図表<sup>12)</sup>を参照して推定した規則波のうちあげ高比を示してある。この推定にあたっては、検定波の有義波高および有義波周期をそれぞれ規則波の波高および周期と同等と見なした。

不規則波によるうちあげ高は、水底勾配1/10で  $h/H_0 < 1.0$  の範囲では規則波によるうちあげ高とほぼ等しいけれども、規則波の場合に見られる砕波点付近のうち

あげ高の急増現象が認められない。これは、不規則波の場合には砕波が広い幅にわたって起り、波が徐々に減衰するためである。また、うちあげ高のひん度分布の例として、水底勾配1/30で  $h=0$  におけるL型スペクトルの波の場合を図-14に示す。図の上段は、模型設置前の通

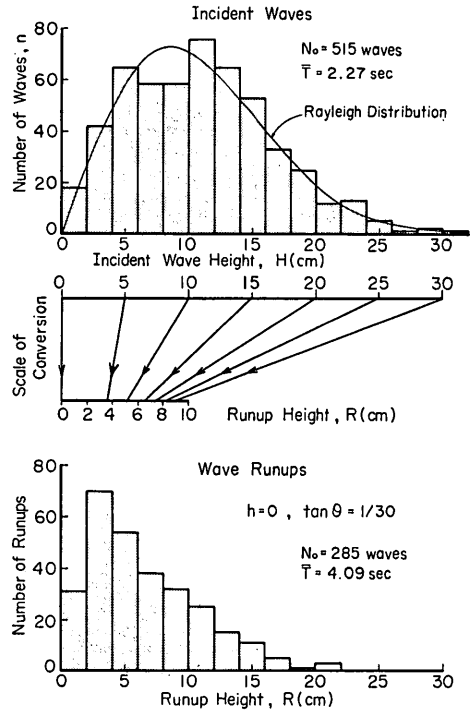


図-14 波のうちあげ高のひん度分布

過波について3回繰り返し測定記録から求めた波高分布である。この分布の各波の周期が  $T_{1/3}$  に等しいものと仮定すると、各波高値は規則波の実験曲線を使って図の中段のようにうちあげ高に換算され、最大うちあげ高は9 cm以下となる。若し、最高波の周期が  $T_{1/3}$  の50%増であるとすると、最高うちあげ高は14 cm程度と推定される。これに対して実際のうちあげ高は最大値で21 cmにまで達している。S型スペクトルの場合でも、規則波の実験曲線による最高うちあげ高の推定値が6~8 cmであるのに対し、実際のうちあげ高は約15 cmである。このように、 $h=0$  における不規則波のうちあげ高が規則波の場合よりもかなり大きくなるのは、サーフビートの影響が強いためである。水底勾配1/10の場合には、Saville のデータから推定すると、不規則波中の最高うちあげ高は  $T_{max} = 1.5 T_{1/3}$  としたときの規則波のうちあげ高にほぼ等しく、水底勾配1/30のときのよ

うな著しい差は見られない。これは、勾配が急なときには  $h=0$  においても波としての勢力を十分に保持している、サーフビートの影響が相対的に弱いためと思われる。

2.5 越波流量の測定結果

前述のように、越波量は約 200 波ずつ 3 回の入射波について測定し、越波流量の平均値を算出している。したがって、この報告で用いているデータは、約 600 波に対する平均越波流量である。データは波高および反射率とともに付表-1~4 に記載してある。このうち、天端高  $h_c \approx 15$  cm のケースを抽出して模型護岸の設置による越波流量の変化を図示したのが 図-15 である。この図から次のような越波流量の特性が明らかである。

- 1) 波の周期が長いほど越波流量が増える傾向にある。ただし、直立壁で水深が 10 cm 以上の場合には、周期が著しく長くない限り、周期の影響が小さい。
- 2) 水深が浅い箇所では、水底勾配が急になるほど越波流量が増加する。たとえば、汀線においては水底勾配 1/10 の方が勾配 1/30 の場合の 100 倍以上の越波流量を生ずる。ただし、 $h=22.5$  cm では水底勾配の影響が見られず、消波工の場合など実験条件に

何か問題があったためか、水底勾配 1/30 の方が大きな越波流量となっている。

- 3) 消波工による越波流量の減少効果は、周期が短いほど、また水底勾配がゆるやかなほど著しい。
- 4) 今回の実験の範囲では、水深が浅くなるほど越波流量が減少する。ただし、消波工を勾配 1/10 の斜面上に設けた場合には  $h=5$  cm で越波流量が極大値を示し、 $T_{1/3} \approx 2.8$  sec の波では直立壁よりも多量の越波を生ずる。

以上のうち、第 1~3 項は越波量に関する既往の諸研究の成果から類推できるものであり、また前面波高やうちあげ高の実験結果の傾向とも一致している。しかしながら、第 4 項の後段の現象は従来の諸研究からは予測することが困難である。そこで、規則波を用いて越波流量-波高曲線を求め、直立壁と消波工の場合を比較してみた。その 1 例が 図-16 であり、直立壁は白抜き記号、消波工は黒塗り記号で示してある。波高は、模型斜面設置前の  $h=60$  cm における通過波高である。この図から、波高が小さい間は消波工によって越波が阻止あるいは減少させられているが、波高が大きくなると消波工の存在によって越波量が増加することが分る。水路内の波の状況

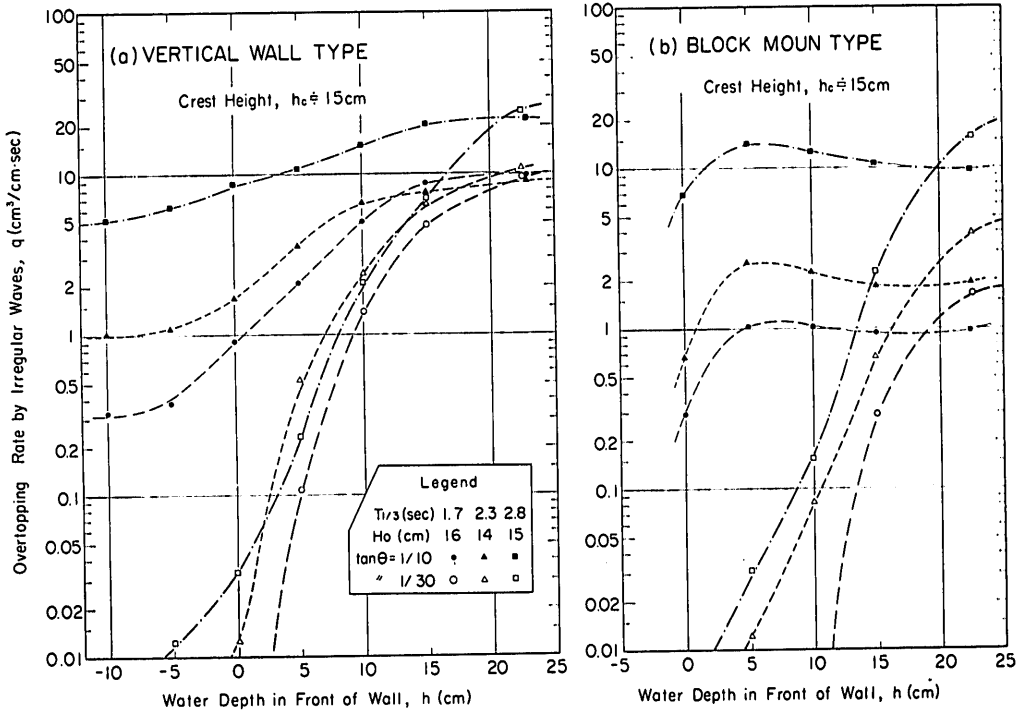


図-15 不規則波による越波流量の測定例

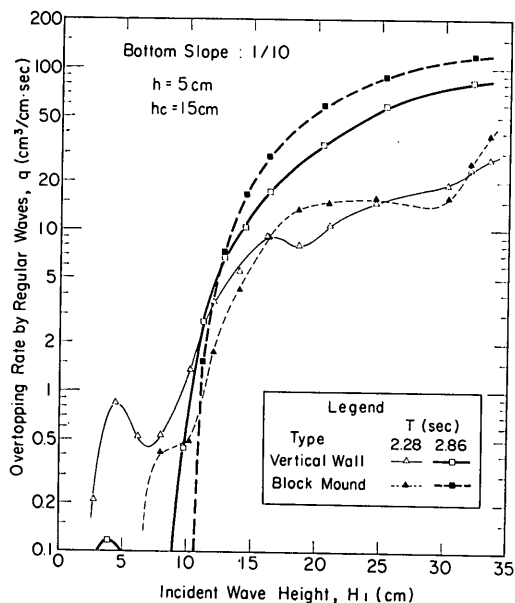


図-16 規則波の越波流量曲線の測定例

を観察していると、護岸設置地点では砕波した波が流れとなって護岸にぶつかり、その勢いが強いために消波工に吸収されずにその上を乗り越えるように見える。

規則波の場合に越波流量曲線がこのような特性を示すのであれば、不規則波の平均越波流量が直立壁よりも消波工を設けたときの方が大きくなることは十分に理解できよう。もちろん、消波工の効果はその先端幅や法先形状などにも関係するものであり、図-16の結果は実験を行なった条件では消波工の断面が不足であったためと考えられる。2.2(4)で述べたように、 $h=5\text{ cm}$ では模型テトラポッドの高さの制限のために1個の重量を480gから250gに変更しており、このため消波工の断面の不足が顕著になり、越波流量の極大値が $h=5\text{ cm}$ に現われる結果になったのかも知れない。しかし、いずれにしても海底勾配が急で水深が浅い場所では消波工の効果が十分に発揮されない場合があることは間違いなく、このような場所では消波工の断面について十分検討することが必要と思われる。

越波の問題では、越波量の時間的変動も留意すべき事項である。今回の約200波ずつ3回の測定について、各平均越波流量の最大値と最小値の差を求め、全体の平均値に対する比率を調べてみたのが図-17である。図の横軸は、先に著者の一人が期待越波流量の算定図表を作成した際に用いた無次元越波流量  $q/\sqrt{2gH_0^3}$  である。データはばらつきが非常に大きいもの、全体として右

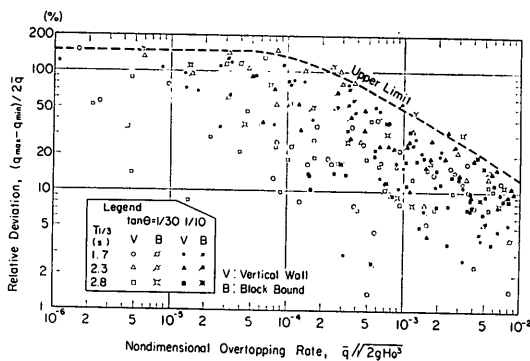


図-17 越波流量の測定値の変動幅

りの傾向を示している。これは、越波量が相対的に増えるにしたがって越波する波の数が増し、波高の出現度数にかたよりがあってもそれが平均化されやすくなるためである。これに対して越波量が少ないときは、越波が波高の大きな波のときのみ生ずるため、波群のそのときどきの大波高の波の出現度数によって越波量が大きく変動する。したがって、無次元越波流量が少ない場合には、測定波数を非常に多くしなければ平均越波流量の測定値の信頼度を上げることができない。この意味で、今回の実験における200波3回の測定は波数がまだ不足であったかも知れない。なお、この表示における相対変動量の最大値は150%である(3回のうち2回が越波なしの場合)。

不規則波についての越波実験を進めていく過程においては、図-16に例示したように、規則波を用いた比較測定を40ケースほど行なっている。測定ケースおよび測定結果は付表-5, 6のとおりである。これらの結果から図-16のような越波流量曲線を作成し、不規則波の各測定値に対応する期待越波流量を計算して比較したのが図-18である。図中の大きな記号は $H_0=15\text{ cm}$ 級、小さい記号は参考として実施した $H_0=5\sim 11\text{ cm}$ 級の波の場合である。また計算にあたり、波高の出現確率はレーリー分布をそのまま使用し、規則波の周期は不規則波の有義波周期に対応させている。

図-18によると、不規則波の実験値の方が期待越波流量の計算値よりも全般にやや大きいように見える。しかし、両者の差が著しいのは $T_{1/3}=2.8\text{ sec}$ のケースであり、 $T_{1/3}=1.7$ および $2.3\text{ sec}$ のケースは平均的に実験値と計算値がほぼ等しい。 $T_{1/3}=2.8\text{ sec}$ の不規則波のデータが期待越波流量の計算値の2倍前後の値を示す原因としては、このような長周期の波では周期の伸びに伴

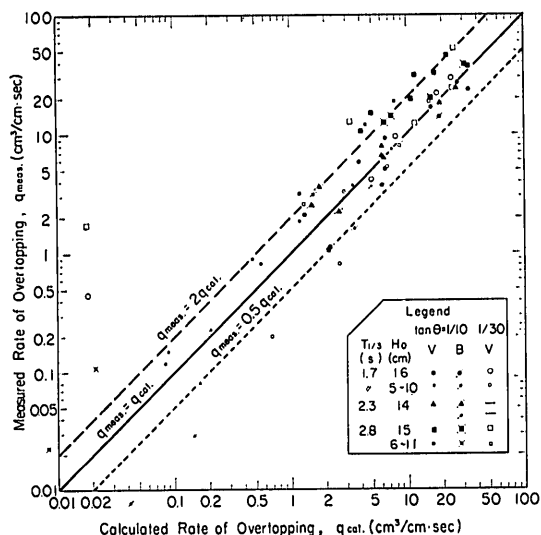


図-18 期待越波流量の計算値と測定値の比較

う越波流量の増加の度合いが著しいことが考えられる。すなわち、2.3(3)に述べたようにこのL型スペクトルの波では波高と周期の相関関係が波高の大きな部分にまで続く傾向があり、波高の大きな波の越波流量が有義波周期に対する規則波の越波流量よりも大きかったのではないかと推定される。これに対して、 $T_{1/3} \approx 1.7$  および  $2.3$  sec の波では越波流量の値が周期に影響される度合いが少なく、また波群中の波高の大きな部分では周期との相関が低かったため、不規則波の実験値と期待越波流量の計算値との差があまりなかったものと思われる。

また、波高の小さい波ではばらつきが大きく、特に越波流量の少ないときに実験値と計算値との差が著しい。この理由としては、波高の絶対値が小さいために入射波高の推定誤差の影響が大きく現われることや、前述の波の不規則性による実験値の変動の影響などが挙げられる。

なお、図-18の左側中央に、計算値から大きく外れているデータが2点ある。これは、水底勾配 1/30 の  $h=0$  におけるデータであり、2.4(3)に述べたサーフビートの影響によるうちあげ高の増大に対応している。このようなサーフビートの影響は不規則波に特有なものであり、規則波の実験データから予測することは不可能である。しかし、こうした汀線あるいは陸上部の護岸を除けば、図-18から明らかのように期待越波流量方式の計算値は不規則波の実験値の0.5~2.0倍の範囲にその大半が入っている。したがって、防波護岸の越波流量の推定

方法としての期待越波流量方式は、精度にやや問題があるものの実用的方法として有効なものといえることができる。

### 2.6 護岸の反射率

今回の実験において、入射波高の推定に際して求めた反射率(各3回の平均)は付表-1~4に記載されている。計算においては、反射率が  $K_R > 1$  のものも幾つか現われたが、これらは  $K_R \equiv 1$  として入射波高を再計算してある。反射率は一般に護岸の天端高が低くて越波量の多いものの方が小さく出ている。しかし、中には実験誤差あるいは実験の特異性によるものか、天端高が低くても反射率が大きい場合もある。そこで、各設置水深ごとに数種類の天端高のデータを平均し、これによる反射率と水深との関係を求めたのが図-19である。上から順

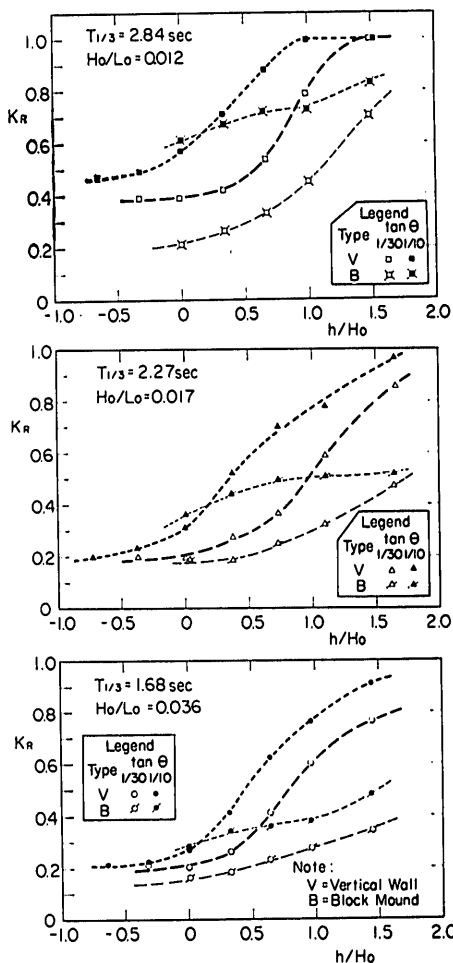


図-19 模型護岸の反射率と設置水深の関係

に  $T_{1/3} \approx 2.8, 2.3$ , および  $1.7$  sec の波の反射率で、それぞれ水底勾配および護岸型式ごとに区別して表示してある。

まず、直立壁の反射率についていえば、これは不規則波が直立壁に到達するまでの砕波による減衰、および越波による反射波の減少効果を表わしている。ただし、後者の効果は、今回の実験の範囲では少ないと思われる。たとえば、 $T_{1/3} \approx 1.7$  sec の波 ( $H_0/L_0 = 0.036$ ) は不規則波の砕波変形理論によれば  $h/H_0 = 1.5$  において水底勾配  $1/10$  のときに約  $5\%$ 、水底勾配  $1/30$  のときに約  $15\%$  波高が減衰するはずである。反射率のデータはこの条件のときに  $92\%$  および  $77\%$  であるから、越波による減少効果は数%と推定される。

図-19によると、水底勾配が急なほど、また波の周期が長いほど直立壁の反射率が大きくなっており、一般に認められている反射率の傾向に一致している。ただし、直立壁が汀線あるいは陸上部に設置されているときのデータを規則波による一般的な斜面の実験データと比べてみると、今回の実験値の方がやや大きく出ている。特に  $T_{1/3} = 2.8$  sec の波の反射率が大きい。この理由としては、i) 直立壁があるために波の自由なうちあがり阻害され、反射波が増大した、ii)  $T_{1/3} = 2.8$  sec の波の波長 ( $L_0 = 12.6$  m) に比べて斜面の長さ ( $1/10$  勾配で約  $6$  m,  $1/30$  勾配で約  $12$  m) が短く、地形急変の効果で反射率が増大したのではないかと、iii) ここで採用した不規則波に対する入・反射波の分離法がやや過大な値を与える傾向があるのではないかと、などが考えられる。今回は越波量のデータの解析が主であったため、これらの要因については詳しく検討していない。今後さらに検討の必要があるものと思われる。

次に、消波工を設けた場合の反射率を調べてみると、 $h/H_0 \approx 1.5$  においては  $H_0/L_0 = 0.036$  のときに  $K_R \approx 0.4$ 、 $H_0/L_0 = 0.017$  で  $K_R \approx 0.5$ 、 $H_0/L_0 = 0.012$  の波で  $K_R \approx 0.8$  であって、波形勾配の影響が著しい。また、水底勾配の影響も若干あり、勾配  $1/10$  の方がやや大きくなっている。これは、急勾配の方が砕波限界波高が大きいことに関係しているのであろう。結局、水深の大きな場所での消波工の効果はその上での砕波促進機能に依存しており、これが波形勾配や水底勾配に影響されると考えることができる。一方、水深が浅い場合には、斜面上での砕波減衰があるため、反射率に対する消波工の効果があまり目立たなくなる。特に水底勾配が  $1/10$  の場合、 $h=0$  において消波工の方が直立壁よりも僅かなが

ら大きな反射率を示しているのは、原因が不明ながら特異な現象と思われる。

なお、不規則波の分離計算によって推定された入射波および反射波のスペクトル密度  $S_I(f)$  および  $S_R(f)$  から、周波数ごとの反射率を次式で推定してみたのが図-20, 21 である (図-19と同様に天端高の違いは平均化してある)。両図とも、分離計算の有効周波数範囲のみを示してある。

$$K_R(f) = \sqrt{S_R(f)/S_I(f)} \quad (10)$$

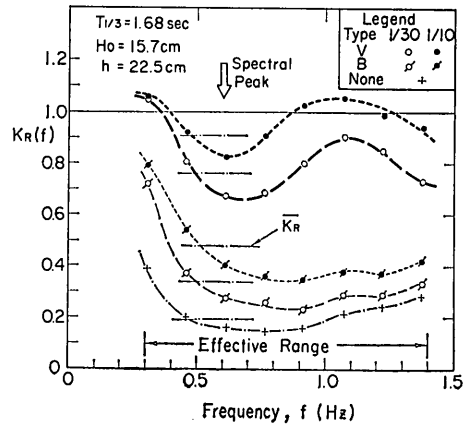


図-20 周波数による反射率の変動 ( $T_{1/3} = 1.68$  sec)

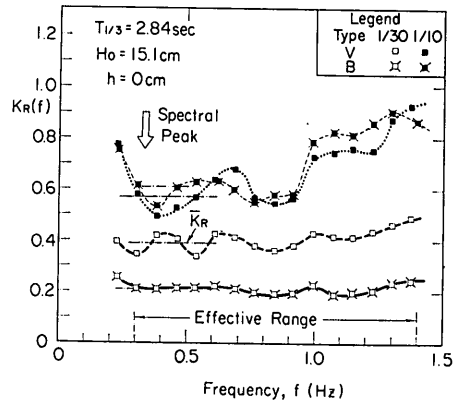


図-21 周波数による反射率の変動 ( $T_{1/3} = 2.84$  sec)

図-20は、 $T_{1/3} \approx 1.7$  sec の波を  $h = 22.5$  cm に設置した模型に作用させたときのもので、参考のために模型斜面を設けずに進行波の状態で測定したときの反射率も +印で示してある。この波のスペクトルは図-6に示したとおりで、スペクトルのピークは  $f_p \approx 0.6$  Hz にある。

直立壁（図中のV）の場合にはピークよりも若干高周波側で反射率の推定値が最小となり、ピーク周波数の2倍付近で一つの極大値を示す。消波工を設けた場合（B）および検定波のときは低周波部分の反射率がかなり大きく、それから次第に減少したあと  $2f_p$  の付近で極大値を示すような形勢をやや見せながらゆるやかに増大する。

一方、図-21は  $T_{1/3} \approx 2.8$  sec の波を  $h=0$  の模型に作用させた場合のもので、スペクトルのピークは  $f_p \approx 0.34$  Hzにある。水底勾配 1/10 の場合には  $2f_p$  および  $3f_p$  の付近にそれぞれ極大値が認められる。一方、水底勾配 1/30 の場合には不規則な波打ちはあるものの比較的一様である。

こうした周波数ごとの反射率がどれほど波の反射の実体を表わしているかは不明である。ただ、全体としての反射率が高いときに見られる  $2f_p$ ,  $3f_p$  付近での反射率の高まりは、波の非線型干渉現象と結びついていると思われる。すなわち、こうした点の反射波高は、入射波と逆方向に進む自由な波ばかりでなく、非線型干渉系の内部にのみ見られる定常波としての束縛波も加わった見掛けの値である可能性がある。こうした意味では、反射率としてスペクトルのピーク付近のもののみを使用する方法も検討する価値があろう。ただし、図中に水平な1点鎖線で示したように、今回推定した全体の反射率と、ピーク付近の反射率との差はあまり大きなものではない。

### 3. 越波流量推定図表の作成

#### 3.1 不規則波の砕波変形モデルによる越波計算

不規則な波浪が斜面上で砕けて変形する過程について先に著者の一人は、選択的砕波の現象をモデル化した波高変化の計算方法を発表した<sup>6)</sup>。今回の実験においても、直立壁前面の波高などは図-11に示したように、この砕波変形モデルによってその変化傾向を説明することができる。そこで、このモデルを用いて護岸の越波流量の計算を行なってみた。

越波流量の基本式としては、吉川ほか<sup>13)</sup>による越流モデルを若干変形した次式<sup>2)</sup>を用いる。

$$\frac{q}{\sqrt{2g}H^3} = A \left(1 - \frac{h_c}{KH}\right)^{5/2} \quad (11)$$

ここに、

$$A = A_0 \left(\frac{K}{1+K}\right)^{3/2} \quad (11.1)$$

$K = \eta_c/H$  : 波頂高比

$A_0$  : 越流係数に対応する定数。

この式の原因は、波の山が1/2周期の間続き、水位変化が三角波で近似できるものとして、二次元刃形せきの越流計算で求められたものである。ここでは、波頂高比が高まるにつれて波の山の継続時間が短縮されることを考えて、原式の係数に  $2/(1+K)^{3/2}$  を乗ずるものとした。なお、刃形せきの越流量を  $q = C\sqrt{2g}h^3$ （ここで  $h$  は越流水深）の形で表わしたときの越流係数は、刃形せきの公式から換算すると  $C = 0.60 \sim 0.64$  である。また、水位波形の三角近似による越波量計算では係数が  $2C/15$  であり、 $A_0$  に換算すると  $4C/15 = 0.16 \sim 0.18$  である。

式(11)は波高  $H$  の規則波に対するものである。不規則波については期待越波流量の考え方に従い、各波高の出現確率を重みとして越波流量の平均値を求め、この結果を基準となる波高を用いて無次元化すればよい。この波高としては、相当深小有義波高  $H_0'$  をパラメータに使うのが便利である。したがって、

$$\frac{q_{\text{exp}}}{\sqrt{2g}(H_0')^3} = \int_0^\infty q^*(x) p(x) dx \quad (12)$$

ここに、

$$q^* = \frac{q(x)}{\sqrt{2g}(H_0')^3} = A_0 \left(\frac{K}{1+K}\right)^{3/2} x^{3/2} \left[1 - \frac{h_c}{H_0'} \cdot \frac{1}{Kx}\right]^{5/2} \quad (12.1)$$

$$x = H/H_0'$$

$p(x)$  : 無次元波高  $x$  の確率密度。

護岸が水深の十分に大きな場所に設置されている場合、 $p(x)$  はレーリー分布の確率密度で表わされるが、砕波の影響を受けた砕波帯内ではレーリー分布からかなり外れた値をとる。こうした浅海域における波高の確率密度を、非線型浅水効果、砕波減衰、radiation stress による平均水位の変化、ならびにサーフビートを考慮に入れて算出するのが前述の不規則波の砕波変形モデルであり、計算の上では沖合から汀線までの波高分布の変化が求められる。実際計算にあたっては、式(12)の積分を50区間の級数で置き換えている。

具体的に不規則波の越波流量を計算するためには、波頂高比  $K$  を与えなければならない。重複波の場合、波頂高比は一般に波高の増大につれて上昇する。波高がさらに増大して砕波状態になると跳波を生ずるため、波頂高を明確に定義することがむずかしくなる。また、重複波の場合であっても有限振幅効果のために前面波高が入射

波高の2倍よりも大きくなる現象があり、波頂高比を正確に推定することは容易でない。もっとも、この越波計算におけるパラメーター  $K$  は波頂高  $\eta_c$  と波高  $H$  の単純な比率というよりも、砕波を含めた越波の現象を刃形せきでの越流現象で近似することに対する補正を含むものと考えることができよう。この意味では、パラメーター  $K$  は比較的簡単な関数で表示し、その係数値を調整することによって越波量の計算値を実験値に合わせる方式の方がよいと考えられる。こうした観点から、今回の計算では波頂高比を次式で与えることにした。

$$K = \frac{\eta_c}{H} = \min \left\{ \left[ 1.0 + a \frac{xH_o'}{h} + \frac{b}{K_{sb}} \left( \frac{xH_o'}{h} \right)^2 \right], c \right\} \quad (13)$$

ここに、

$K_{sb} = H_{1/3}/H_o'$  : 非線型浅水効果および砕波減衰による1/3最大波高の変化率

$\min\{A, B\}$  :  $A$  または  $B$  のいずれか小の値。

上式において、水深  $h$  はサーフピートおよび平均水位の上昇を考慮しない静水深とする。また、変数は  $xH_o'/h = H/h$  であり、角括弧中の第2項は重複波的に  $H/h$  に比例して  $K$  が増大する効果を表わし、第3項は砕波後の波の流れに似た性質をいくらかでも表示するために導入したものである。係数の値としては、 $a$  は重複波の平均的な波頂高比<sup>9)</sup>を参照し、数値として単純な  $a=1.0$  を採用した。 $b$  は越波流量の実験値との比較による試行の結果として、 $b=0.8$  を選定した。係数  $c$  は、 $H/h$  が大きな場合に  $K$  の値が極端に大きくなることを避ける目的で設けたものなので、 $c=10$  に設定した。すなわち、

$$\left. \begin{array}{l} a=1.0 \\ b=0.8 \\ c=10 \end{array} \right\} : \text{直立壁} \quad (14)$$

一方、消波護岸の場合には、消波工の効果によって波のうちあげ高が減少し、波頂高比が低下すると考えて越波量を計算することができる。もっとも、波頂高比の低下を的確に推定することはむずかしいので、実験値との比較結果から次のような係数値を用いることにした。

$$\left. \begin{array}{l} a=0.5 \\ b=0 \\ c=5.0 \end{array} \right\} : \text{消波護岸} \quad (14)$$

ただし、係数値の  $b=0$  は水深がかなり深い場所のみ

適合し、水深が浅くなって波が消波工に乗り上げ、越波流量が増加する場所では、係数  $b$  の値を増大させて越波流量の計算値を実験値に適合させる必要があった。

最後に、定数  $A_0$  は前述のように刃形せきの越流係数から推定すると  $A_0=0.16\sim 0.18$  となるけれども、この数値では実験値に比べて過大な越波流量を与えるので、計算にあたっては  $A_0=0.10$  を採用した。

以上のモデルにしたがって越波流量を試算した1例が図-22である。これは直立壁の場合で、波形勾配が0.01

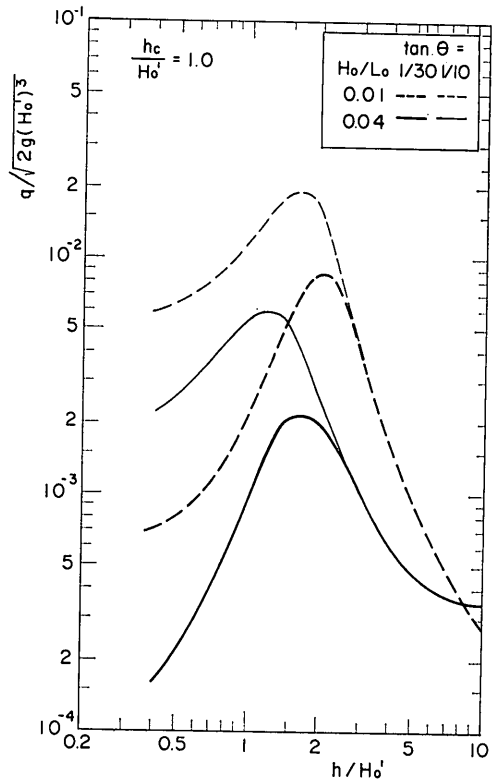


図-22 理論計算による直立壁の越波流量の変化

および0.04の波について、水底勾配が1/10と1/30のときの計算値を示したものである。この図からまず、波形勾配の影響が水深のかなり深い地点から顕著に現われることが分る。これは、 $h/L_o = (h/H_o') \times (H_o'/L_o)$  である相対水深の違いによって浅水係数に差異があるためである。これに対して、水底勾配の影響は砕波現象が始まる  $h/H_o=2.5$  付近から現われ始め、水深が浅くなるほど顕著になる。ただし、深海部においては当然のことながら水底勾配の影響がない。

著者の一人が先に取りまとめた期待越波流量の算定図

表においては、基礎データとして用いた規則波の越波流量データが多岐にわたり、データ相互間のばらつきが大きかったためこうした波形勾配および水底勾配の影響を検出することができず、これを無視した形で図表が作成された。しかしながら、図-15に例示した今回の実験データならびにこの越波流量の計算結果から判断すると、波形勾配および水底勾配の影響は相当に大きいといわざるを得ない。

3.2 越波流量図表の作成方法および作成結果

実験で得られた越波流量のデータは、まず  $\bar{q}/\sqrt{2gH_0^3}$  の形に無次元化された。そして、各水深ごとに無次元越波流量を相対天端高  $h_c/H_0$  に対してプロットして、前節の方法による計算曲線と比較された。

この際に問題となったのは、2.4(2)で述べたサーフビートおよび平均水位の上昇量である。今回の実験においては、表-7に示したようなサーフビート振幅および平均水位上昇があったものと推定されており、現地海岸において生ずると思われるものよりもかなり過大である。したがって、こうした実験水路に固有の特異性を何らか補正する必要がある。しかし、補正の方法としてどのような方式が適切か明らかでないので、ここでは表-8に示すような補正量を恣意的に選定し、これを水深に加えて計算上の水深を増加し、天端高を減少させて考えることにした。なお、この水深補正量は直立壁および消波工ともに同一の値を使用した。補正後の水深を  $h'$ 、同じく天端高を  $h_c'$  で表わす。この水深補正によって、 $\bar{q}/\sqrt{2gH_0^3}$  と  $h_c/H_0$  の関係曲線は、 $h/H_0$  が大きいとき

表-8 越波流量の実験データ解析のための水深補正量 (単位: cm)

| 水深 $h$ (cm) | 水底勾配 1/30 |     |     | 水底勾配 1/10 |     |     |
|-------------|-----------|-----|-----|-----------|-----|-----|
|             | S         | M   | L   | S         | M   | L   |
| 22.5        | 1.5       | 1.5 | 1.5 | 1.5       | 1.5 | 1.5 |
| 15.0        | ↓         | ↓   | ↓   | ↓         | ↓   | ↓   |
| 10.0        | ↓         | ↓   | ↓   | ↓         | ↓   | ↓   |
| 5.0         | ↓         | ↓   | ↓   | ↓         | 2.0 | 2.0 |
| 0           | ↓         | ↓   | ↓   | ↓         | 2.5 | 2.5 |
| -5.0        | ↓         | ↓   | ↓   | ↓         | ↓   | ↓   |
| -10.0       | ↓         | ↓   | ↓   | ↓         | ↓   | ↓   |

注: 1) この補正量は、直立壁および消波護岸ともに共通である。

2) 上記の数値は  $H_0=15$  cm の波に対するものであり、波高の小さい波に対しては、ほぼ波高に比例する補正量を用いる。

で20%ほど下方に移動することになり、 $h/H_0$  が小さい場合には同じく  $\bar{q}/\sqrt{2gH_0^3}$  と  $h_c/H_0$  の関係曲線が越波流量にして1/2~1/3の値の位置にプロットされることになる。なお、本実験のような断面実験では  $H_0=H_0'$  であるので、以下においては波高を  $H_0'$  で表示する。

直立壁、消波工ともこの補正を行なった上で、実験値を計算値と比べた例が図-23, 24である。前者は直立壁の水底勾配1/30、後者は消波工の水底勾配1/10の場合を示す。ただし、水底勾配1/10の計算値はやや過大であったので、直立壁および消波工とも水底勾配1/15の計算値を基準値として使用した。まず直立壁の場合、計算値は係数値を修正した結果もあって、全体として実験データと良く一致している。逆に計算値を基準として考えると、図-23で  $H_0'/L_0=0.012$  の場合、 $h'/H_0'=1.85$  の実験データは過大、同じく  $h'/H_0'=0.79$  のデータは過小であり、また同じ図で  $H_0'/L_0=0.036$ 、 $h'/H_0'=0.72$  のデータのうち右下の2点は計算曲線と異なる傾向を示している。

次に消波工の場合、図-24に示したものについては、実験値は計算値に比較的良く一致している。もっとも、 $H_0'/L_0=0.017$  の波で  $h'/H_0'=1.85$  の実験値は計算値よりもかなり小さく、 $h'/H_0'=1.29$  の実験データと大

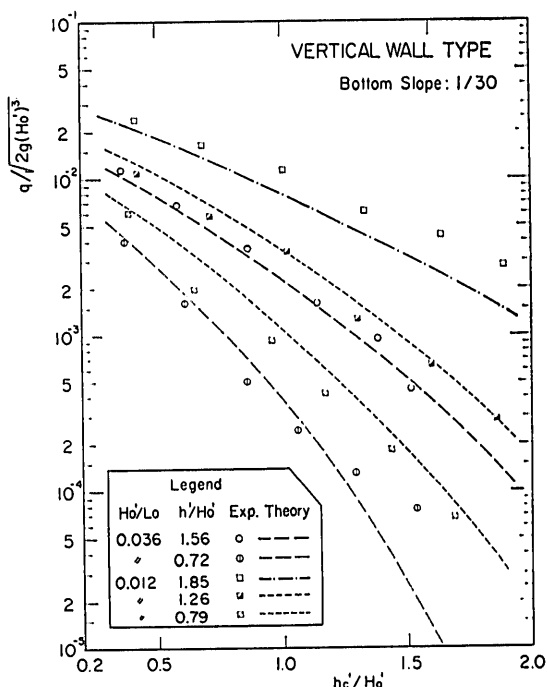


図-23 直立壁の越波流量の計算値と測定値の比較



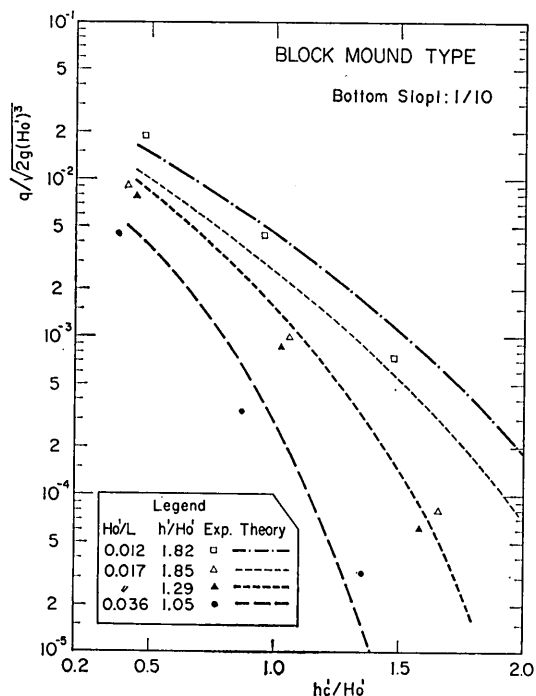


図-24 消波護岸の越波流量の計算値と測定値の比較

差ない値を示している。しかし、同じ消波工でも水底勾配 1/30 の場合の実験値は計算値とほぼ合っており、水深による変化の傾向も計算値と同様である。

いずれにしても、こうした計算値からのずれはこれらの図以外のデータを含めた実験値全体の傾向からも外れており、何らかの理由による特異傾向と見なすのが妥当と思われる。そこで、実験データの解析にあたっては、計算値およびその傾向を参照し、以上のような方針のもとに  $q/\sqrt{2g(Ho')^3}$  と  $hc/Ho'$  の平均的な関係曲線を描くことにした。

- 1) 計算曲線はできるだけ尊重する。ただし、直立壁の場合相対水深  $h/Ho' \leq 0.5$  では実験に比べて過大となる傾向があるので、そのような場合は曲線の形状のみを参考とする。逆に消波工の場合は、 $h/Ho'$  が減少するにつれて計算値が過小となるので、波頂高比の計算式の係数  $b$  の値を適宜増大させて求めた計算曲線を参考にした。
- 2) 水底勾配 1/10 の越波流量は、水底勾配 1/30 の越波流量よりも多いものとする。
- 3) 波形勾配の小さい波は、波形勾配の大きな波よりも多量の越波流量を与えるものとする。
- 4) 無次元越波流量と相対天端高の関係曲線は滑らかに

に変化するものと考え、パラメーター  $h/Ho'$  の値が隣接する曲線群にあっては曲線の形状が相似であるように関係曲線を描く。

- 5) 無次元越波流量が小さくなるにつれ、図-17 に示したようにデータの変動が増大するので、この点も考慮に入れて越波流量曲線の変化が滑らかなように描く。

実験データの解析にあたって特異傾向と見なして修正したのは次の諸点である。

- i) 消波工の  $h=22.5$  cm のデータは、水底勾配 1/10 の越波流量が勾配 1/30 のデータの 50~80% に過ぎず、また計算値と比べても過小である。このため、このデータは値を割り増して扱うことにして、水底勾配 1/30 よりも大きな値を考慮した。
- ii) 直立壁の水底勾配 1/30 のデータの中には、 $T_{1/3} \approx 2.8$  sec の波よりも  $T_{1/3} \approx 2.3$  sec の波の越波流量の方が大きいものがある(図-15 参照)。しかし、これは前記 3) の方針に沿わないので、主として  $T_{1/3} \approx 2.8$  sec のデータを割り増して考えることによって、周期に対する越波流量の逆転傾向を是正した。
- iii) 実験データの中には、図-23 の  $Ho'/L_0=0.036$ ,  $h/Ho'=0.72$  の右下の 2 点のように、天端が高いときに相対的に大きな越波流量を示すものがあった。これらは跳波の影響によるものとも考えられるけれども、前記 4) の方針に従い、これらのデータは割り引いて考えることにした。
- iv) 直立壁の水底勾配 1/30 における  $T_{1/3} \approx 1.7$  sec の波のデータのうち、 $h=0$  および  $-5$  cm のデータは、他の周期の傾向から見て過小と思われ、特にこの波は波高分布が狭いことを勘案して、若干の割り増しを行なった。

このような修正その他により、データ解析の結果設定された  $q/\sqrt{2g(Ho')^3}$  と  $hc/Ho'$  との関係曲線はデータ全体に対する平均的なものとして描かれていて、個々の実験データとは若干の不同がある。この無次元越波流量の実験値および設定曲線による推定値との相関を示したのが図-25、26 である。前者は直立壁、後者は消波護岸の場合である。いずれも、無次元越波流量の多いときは実験値と推定値の差異が小さく、越波流量が少なくなると差異が増大する。これは推定値の精度が悪いというよりも、図-17 の実験値の変動図に示されるような、波の不規則性に起因する実験値の変動によるところが大き

不規則波による防波護岸の越波流量

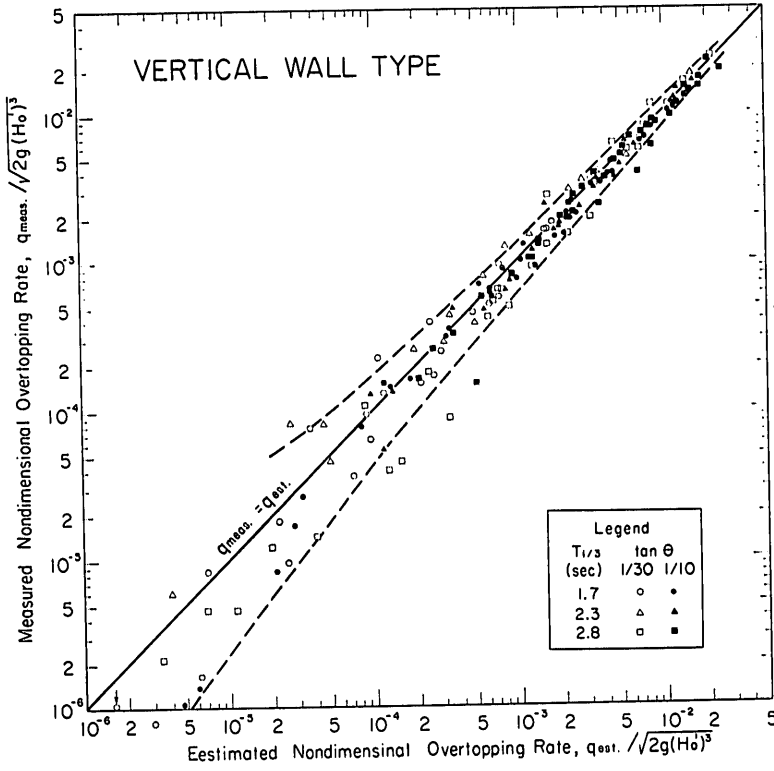


図-25

直立壁の越波流量の推定値と測定値の比較

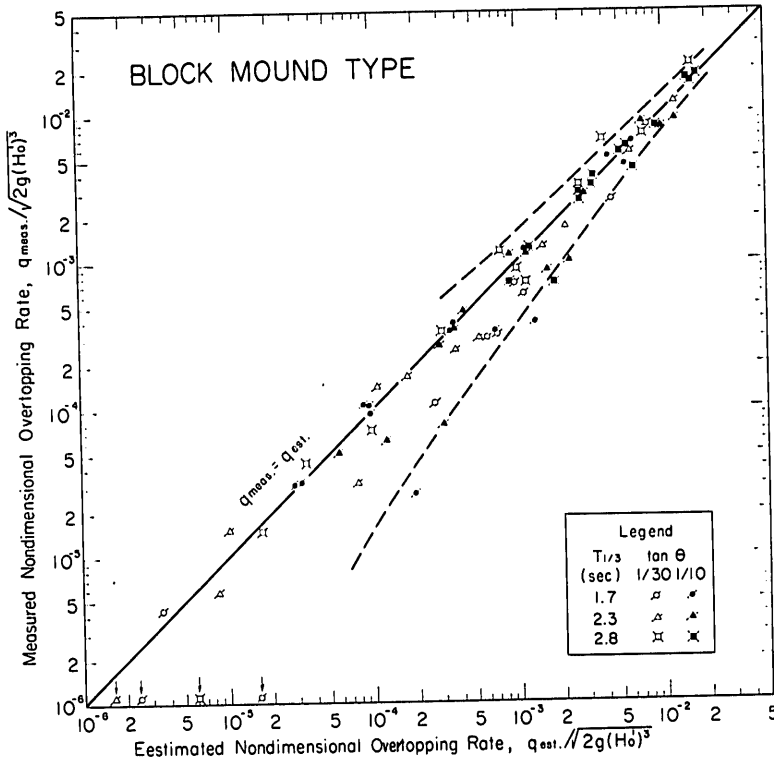


図-26

消波護岸の越波流量の推定値と測定値の比較

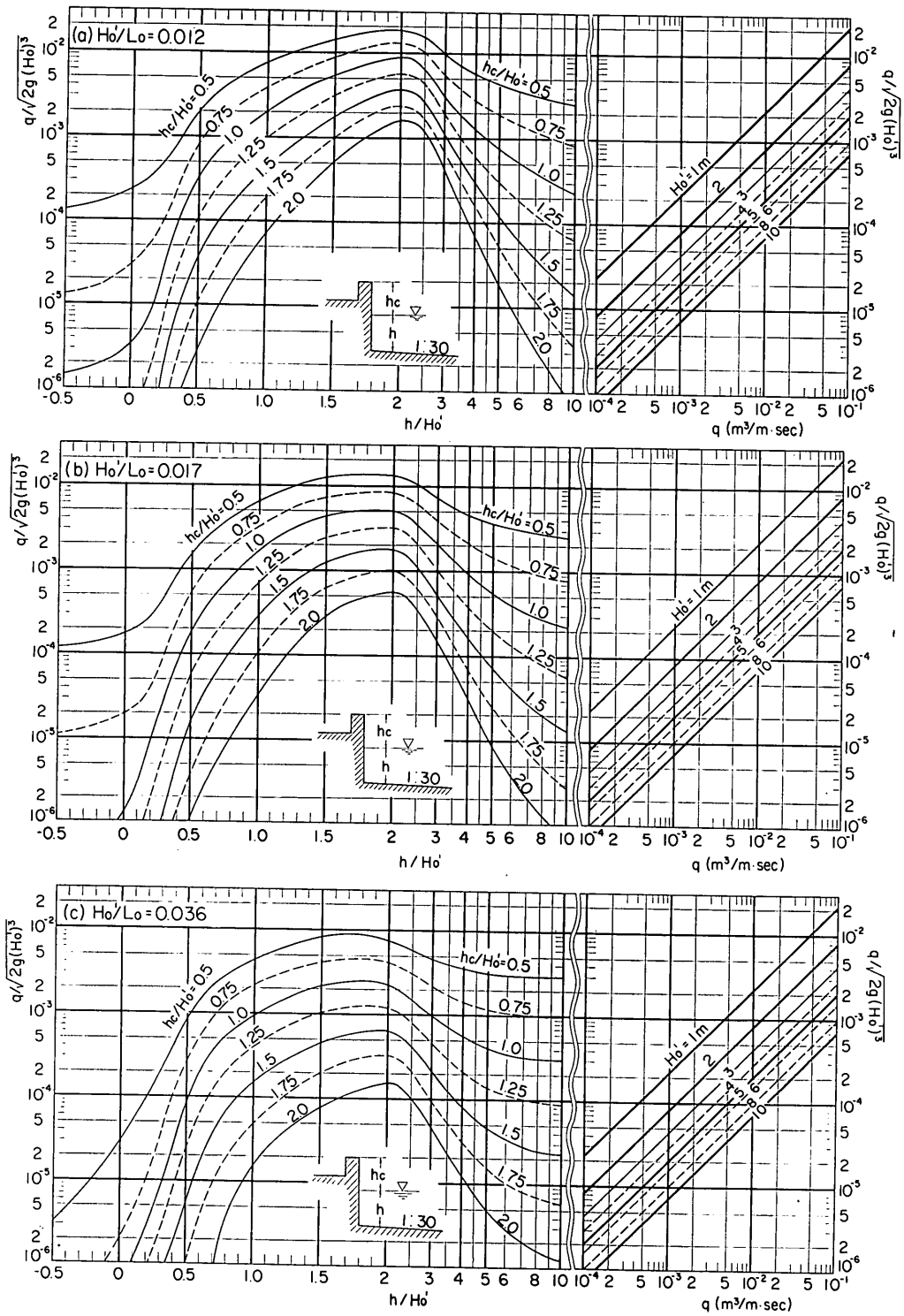


図-27 直立護岸の越波流量推定図 (海底勾配 1/30)

不規則波による防波護岸の越波流量

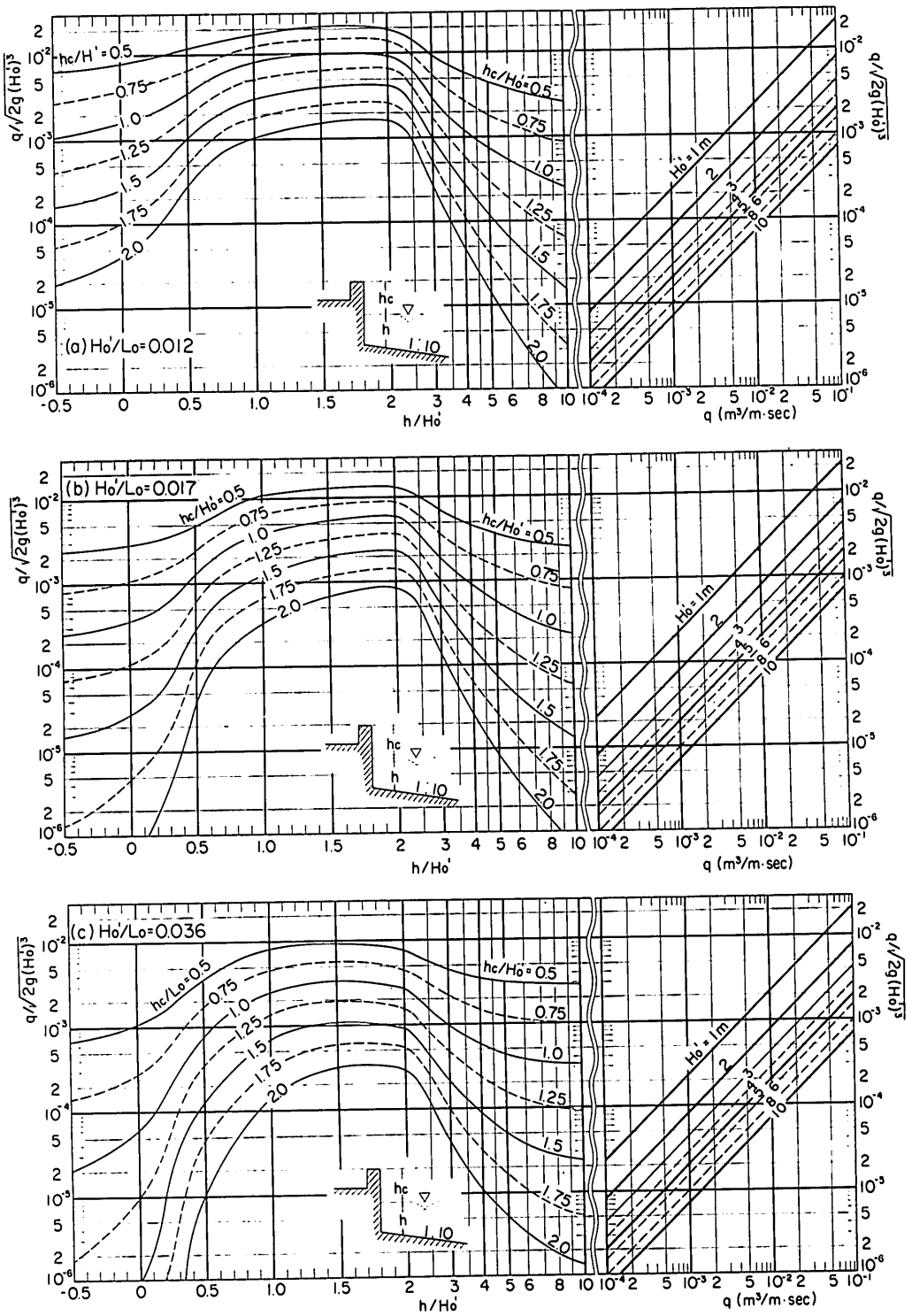


図-28 直立護岸の越波流量推定図 (海底勾配 1/10)

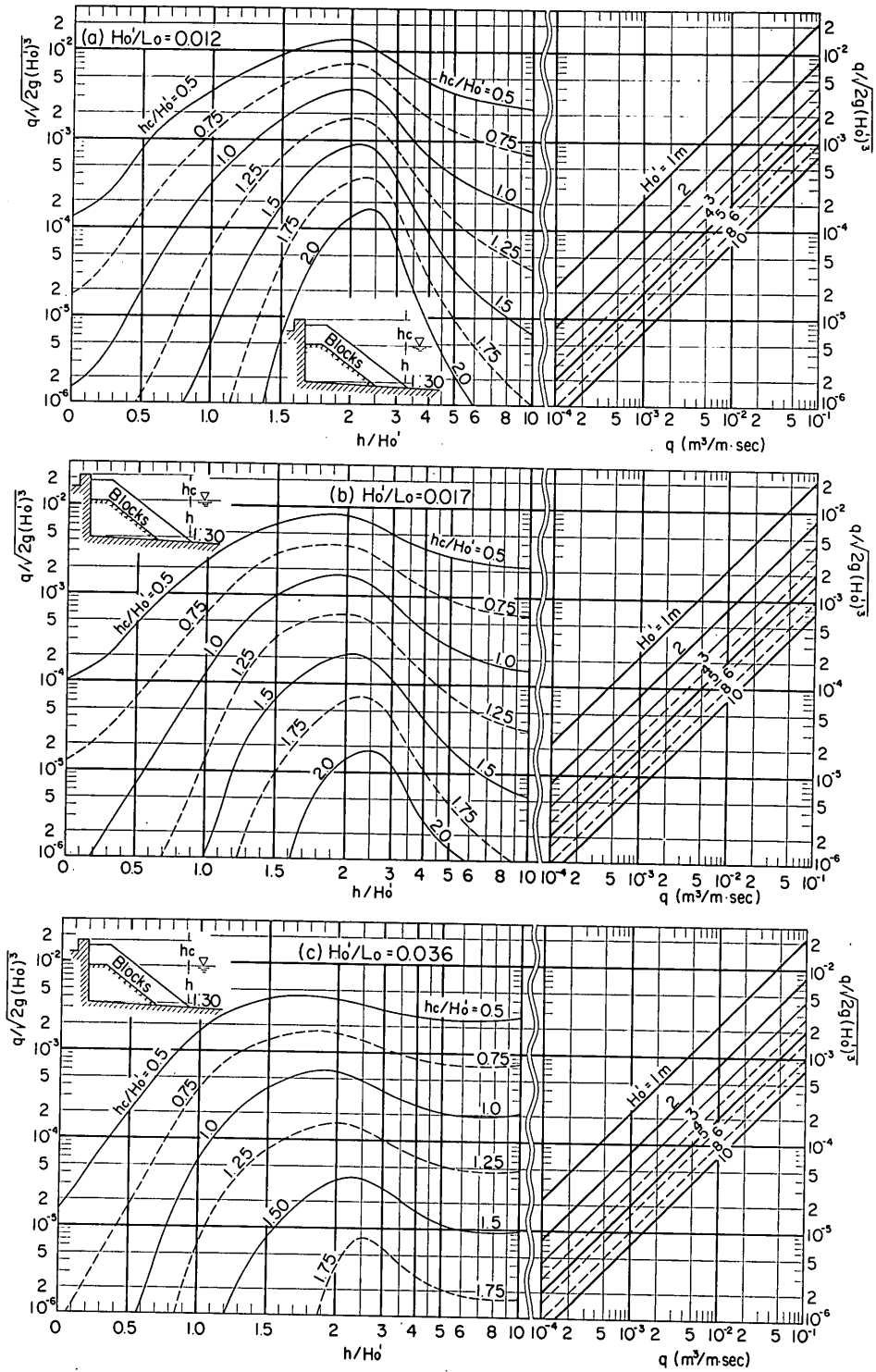


図-29 消波護岸の越波流量推定図 (海底勾配 1/30)

不規則波による防波護岸の越波流量

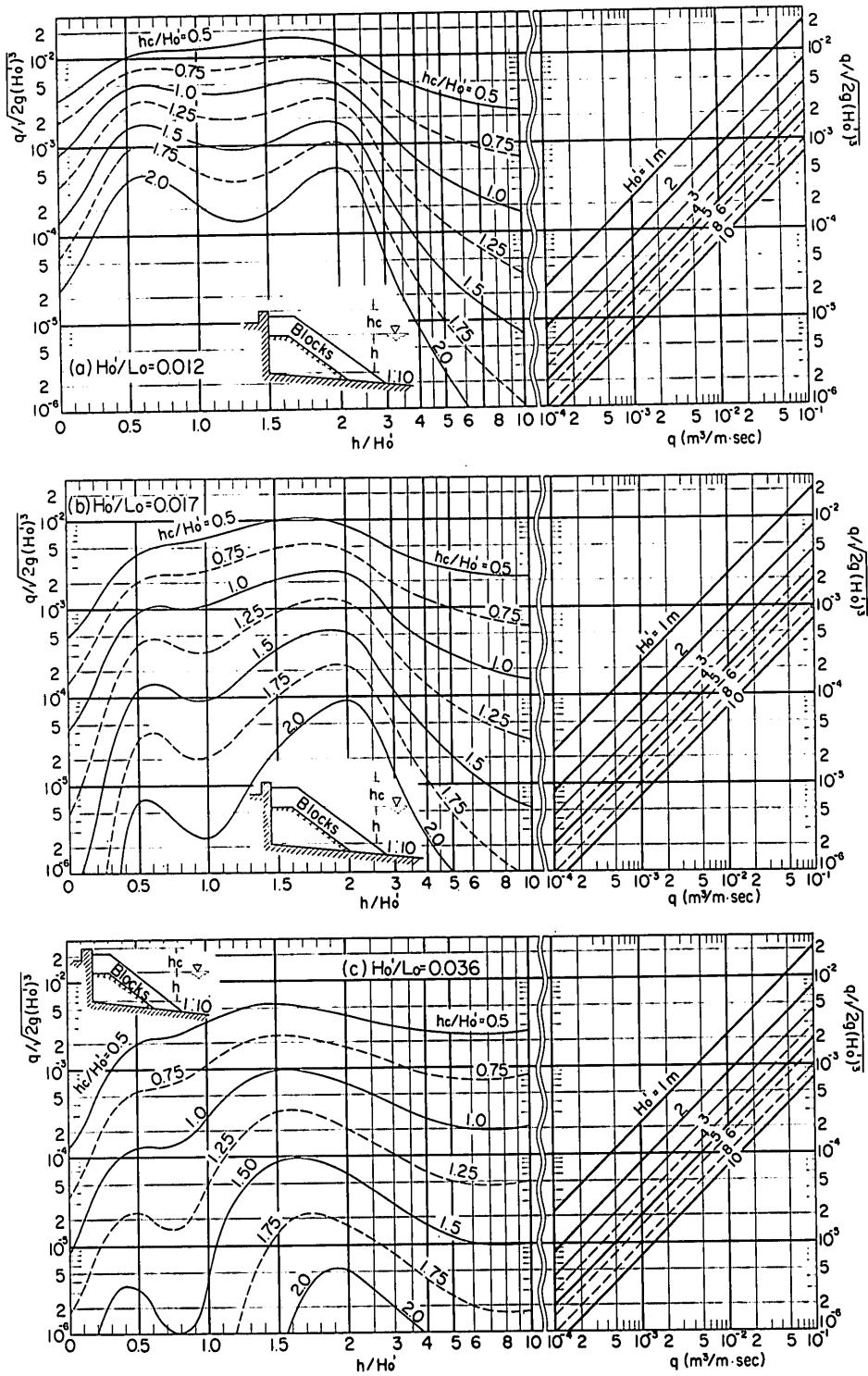


図-30 消波護岸の越波流量推定図 (海底勾配 1/10)

表-9 越波流量の推定値に対する実験値の変動幅

| $q/\sqrt{2g(H_0')^3}$ | 直立型         | 消波工         |
|-----------------------|-------------|-------------|
| $10^{-2}$             | 0.8 ~ 1.2 倍 | 0.7 ~ 1.3 倍 |
| $10^{-3}$             | 0.6 ~ 1.4 倍 | 0.4 ~ 1.6 倍 |
| $10^{-4}$             | 0.4 ~ 1.8 倍 | 0.3 ~ 2 倍   |

いのではないかと思われる。なお、図中に破線で示したのはデータのほぼ上下限と思われる範囲で、表-9のような変動幅を示す。なお、直立壁に比べると消波護岸の実験値の変動が大きい、この主要部分は水底勾配1/10の  $h=22.5$  cm における越波流量の過小な実験値によるものである。

以上のようにして無次元越波流量と相対天端高の関係曲線が定められたあとは、パラメーターを  $h/H_0'$  から  $h_c/H_0'$  に変更し、 $q/\sqrt{2g(H_0')^3}$  を  $h/H_0'$  に対してプロットした。この際、 $h/H_0'$  の十分大きな部分は実験値が得られていないが、この領域では計算値の信頼度が高いと判断されるので、実験曲線を計算曲線に滑らかに接続した。このようにして不規則波の越波流量推定図表を作成した結果が図-27~30である。最初の6枚が直立護岸、後の6枚が消波護岸に対するもので、各図とも左側が無次元越波流量の推定図、右側はこれを流量の絶対値に換算するための図表である。

〔使用例〕

沖波が  $T_{1/3}=10$  sec,  $H_0'=5.5$  m の海岸の  $h=4$  m の地点に天端高  $h_c=5$  m の護岸を設置したときの越波流量を推定する。ただし、海底勾配は1/30とする。

この条件では、深海波長が  $L_0=156$  m であって  $H_0'/L_0=5.5/156=0.035$  であるので、直立護岸の場合には図-27(c)を用いる。パラメーターの値は

$$h/H_0'=0.73, \quad h_c/H_0'=0.91$$

であるので、図の左半分より、

$$q/\sqrt{2g(H_0')^3}=6 \times 10^{-4}$$

この値を図の右半分へ水平に移動して  $H_0'=5.5$  m の内挿線と交わる点の横座標の値を読みとると、

$$q \approx 0.03 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$$

と推定される。

同一条件で消波護岸の場合には、図-29(c)により  $q/\sqrt{2g(H_0')^3}=1.8 \times 10^{-5}$ ,  $q \approx 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$  と推定される。

以上の越波流量推定図表に基づき、越波流量の特性を概観すると次のようなことが認められる。

1) 海底勾配の影響は、相対水深が  $h/H_0' \leq 2.5$  で認

められ、水深が浅いほど顕著に現われる。

2) 波形勾配の影響は  $h/H_0' \leq 5$  で認められる。この影響は、汀線から陸上部を除けば、相対水深の値にあまり関係せず比較的一定である。

3) 上記の海底勾配および波形勾配の影響は、相対天端高  $h_c/H_0'$  が高く無次元越波流量が小さい場合ほど顕著に現われる。

4) 消波工による越波流量の減少効果はほとんどすべての水深において認められ、相対天端高  $h_c/H_0'$  が高いほど効果的である。ただし、海底勾配が1/10の場合には、 $h/H_0' \approx 0.5 \sim 0.7$  において消波工への波の乗り上げ現象が発生するため、消波工の効果が小さい。

5) 無次元越波流量の最大値は、直立護岸の場合に  $h/H_0'=1.4 \sim 2.2$ 、消波護岸の場合に  $h/H_0'=1.5 \sim 2.5$  で現われる。この最大越波流量は、海底勾配が急なほど、波形勾配が大きいほど、あるいは相対天端高が低いほど、相対水深の小さい箇所に現われる。

先に著者の一人が提示した期待越波流量の算定図表は基礎データの変動幅が大きかったため、海底勾配および波形勾配の影響を無視して作成されたものである。今回の新しい推定図表と比べてみると、旧図表は海底勾配が1/10、波形勾配が0.036のものにほぼ近く、特に直立護岸については0.5~2.0倍の範囲内にあるものが多い。しかし、他の条件の場合には過小あるいは過大な値を与えるので、今後は図-27~30の新図表を使用されるようお願いする次第である。

こうした越波流量の特性のうち、消波工による越波流量の減少効果を例示したのが図-31である。この図は、緩勾配海岸の風波を対象として、海底勾配1/30の場合の  $H_0'/L_0=0.036$  の波について、直立護岸と消波護岸の無次元越波流量を比較したものである。横軸は相対天端高  $h_c/H_0'$  である。この図によると、消波工の設置によって越波流量が1/2~1/100に減少することが示される。一方、これを越波流量を所要の値以下に抑えるための所要天端高の観点から見ると、 $h/H_0'=0.5 \sim 2.0$  の範囲では消波工の設置によって天端高を直立護岸の場合の60~70%に下げられることになる。ただし、水深がさらに深い場合には、消波工による所要天端高の減少効果が小さくなる。また、急勾配斜面上の極浅海部のように、消波工による越波減少効果が極めて小さい場合もあるので、上記の結論を一般化して考えることは危険である。

いずれにしても消波護岸の場合には消波工の断面形

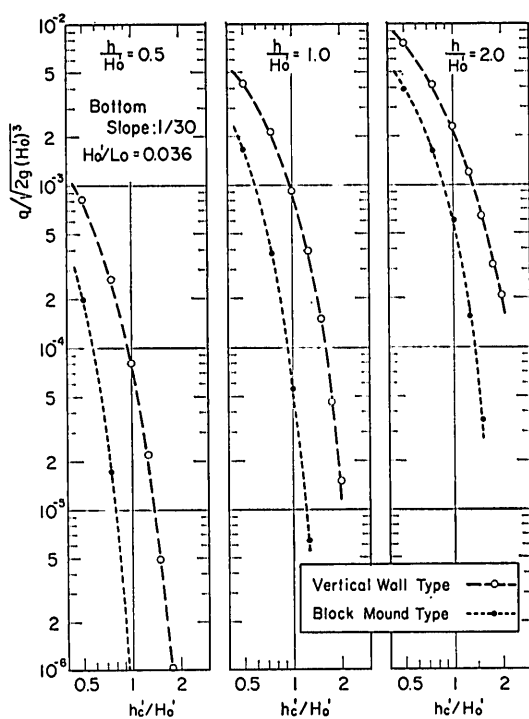


図-31 消波工による越波流量の減少効果の例

状、その寸法、ブロックの形状および積み方その他によって越波流量が微妙に変化するもので、図-29, 30 のような一般図表に全面的に依存することは危険であり、各設計断面ごとに模型実験を行って越波流量を推定するのが本筋であると考えられる。

### 3.3 越波流量推定図表の適用について

#### (1) 波形勾配および海底勾配の補正

前節に述べたように、防波護岸の越波流量は波形勾配および海底勾配の影響を受けて変化する。今回の研究では、波形勾配3種類、海底勾配2種類の組合せの6ケースのそれぞれについて越波流量の推定図表を用意したけれども、現地条件の多様性を考えると、これだけで十分とはいえない。そこで、不規則波の碎波変形モデルによる越波量計算が直立壁の実験値をかなり適切に説明できることを利用し、各種条件についての越波計算を実施して、この結果に基づいて波形勾配および海底勾配の影響について吟味してみた。

計算結果によると、波形勾配による越波流量の変化の様相は海底勾配にあまり関係しない。たとえば、 $h/H_o' = 1.0$ 、 $h_c/H_o' = 1.0$  の条件で波形勾配が  $H_o'/L_o = 0.02$  から  $0.01$  に半減すると、海底勾配  $1/30$  のときは無次元

越波流量  $q/\sqrt{2g(H_o')^3}$  が40%増加する。海底勾配が  $1/100$  のときはこの増加率が45%、海底勾配が  $1/10$  のときは同じく37%であり、差が小さい。また、 $h/H_o' = 2.0$ 、 $h_c/H_o' = 1.0$  の条件で波形勾配が  $0.02$  から  $0.04$  に増加した場合には、無次元越波流量の減少率が海底勾配  $1/100$  のときに52%、 $1/30$  で53%、 $1/10$  で56%である。そこで、海底勾配  $1/30$  を代表的な勾配としてこの場合の波形勾配による無次元越波流量の変化比率を求めた結果が図-32である。越波流量推定図表に対する補正用の目的から、波形勾配が  $0.012$ 、 $0.017$ 、および  $0.036$  のそれぞれを基準点に選んだ3通りの場合について、相対水深  $h/H_o'$  が  $0.5$ 、 $1.0$ 、 $1.5$ 、および  $2.0$  における越波流量比を表示してある。パラメータは相対天端高  $h_c/H_o'$  であり、天端が高いほど越波流量の変化が著しい。また、水深による変化は認められるものあまり大きくはない。

実験データを平滑化した越波流量推定図表のうち、直立護岸の図-27, 28 について波形勾配による越波流量の差を調べてみると、この差が海底勾配によって変わらず、一方、相対天端高が高くなるにつれて差が増大する傾向が図-32と同一である。しかも、その変化比率は計算値にほぼ等しい。したがって、直立護岸については図-27, 28 に示した以外の波形勾配に対する越波流量の推定用に図-32を使うことができよう。もっとも、計算と実験とが完全に一致したわけではなく、 $H_o'/L_o = 0.012$  と  $0.017$  の差は図-32のものよりも大きい。したがって、図-27, 28 に示した波形勾配の中間の値に対する越波流量を推定する場合には、二つの波形勾配の図表から読みとり、それぞれ図-32で補正した値が異なることが生じ得る。適宜、平均的な値を求めて使用することになる。これに対して消波護岸の場合には、図-29, 30 の(a)~(c)の図表を比べてみれば明らかのように、波形勾配による越波流量の差が図-32の計算値よりも大きく、特に相対水深の小さい所での差が著しい。このため図-32の補正値は、消波護岸については一つの目安を与えるにとどまる。

次に、同様にして海底勾配の影響に対する補正図表を計算値に基づいて作成した結果が図-33である。この場合、波形勾配が異なっても海底勾配による越波流量の変化率があまり変わらないので、 $H_o'/L_o = 0.02$  に対する計算結果を用いた。図-33は、海底勾配が  $1/30$  の場合を基準として、海底勾配が異なる場合の越波流量の比率を示してある。海底勾配の影響は水深によって異なり、相対



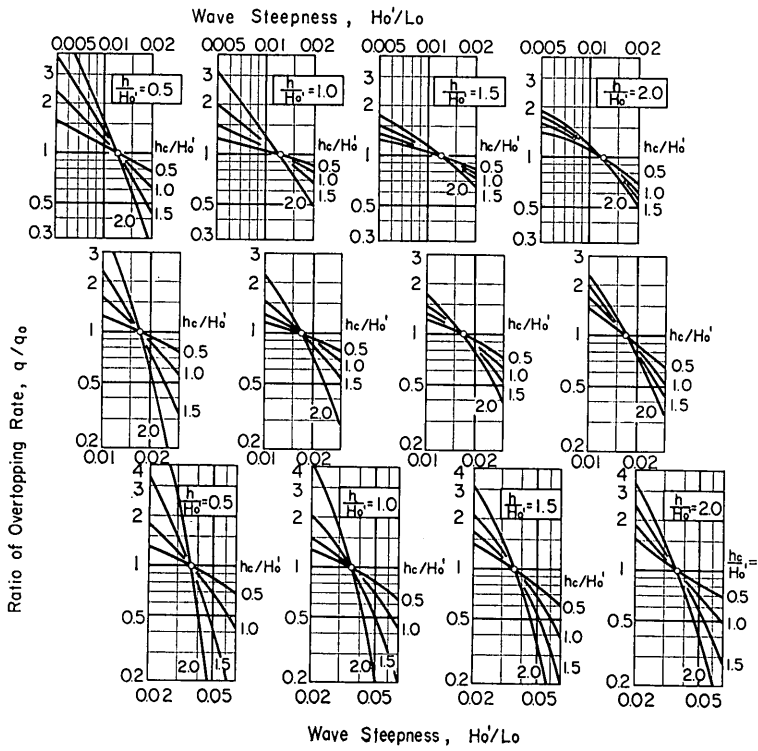


図-32 波形勾配による直立護岸の越波流量の変化の推定図

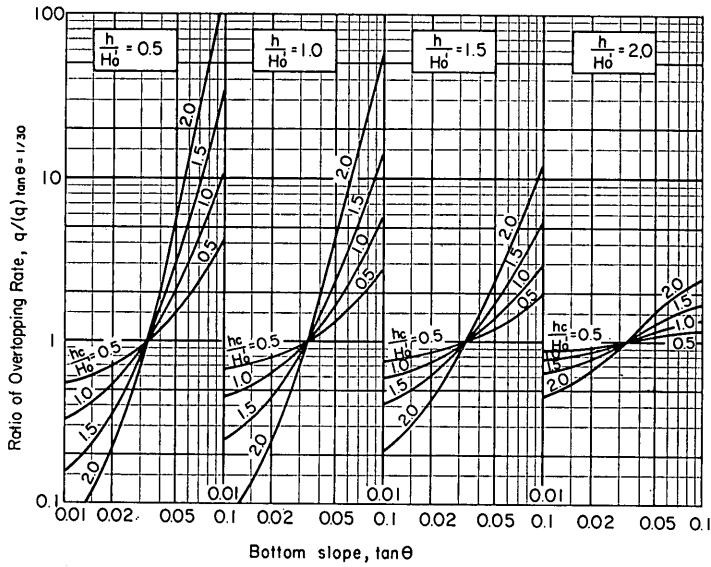


図-33 海底勾配による直立護岸の越波流量の変化の推定図

水深  $h/H_0'$  が小さいほど顕著に現われる。また、相対天端高が高いほど海底勾配の影響が強く現われる点は図-32の波形勾配の場合と同様である。

この計算による海底勾配の影響に対して、実験の場合には海底勾配が1/10と1/30の2通りしかないので詳しいことは分らないが、次のような傾向があるようである。まず、直立護岸の場合は相対水深の影響が計算によるものよりも一層著しい。すなわち、 $h/H_0'=2.0$ では1/30勾配と1/10勾配の差が計算における1/30勾配と1/15勾配の差よりもまだ小さいくらいであり、 $h/H_0'=1.0$ のときに1/10勾配の実験値が1/15勾配の計算値にほぼ等しくなる。そして、 $h/H_0'=0.5$ で初めて計算値の比率にほぼ一致する。一方、消波護岸の場合には海底勾配の影響が計算によるものよりもさらに著しく、 $h/H_0'=2.0$ でも計算値と等しいかこれよりもやや大き目である。また、直立護岸の場合には海底勾配の影響と波形勾配の影響が関連していないけれども、消波護岸の場合には波形勾配の小さい波の方が海底勾配の影響が強く現われる傾向にある。したがって、消波護岸の場合には図-33は海底勾配の影響の傾向を示すとどまり、詳しくは縮尺模型実験によって定めることが必要になろう。

海底勾配が1/30よりもゆるやかな場合には実験値がないため確言できないけれども、今までの計算値の適合性から判断すれば、直立護岸の場合には図-33の値が比較的良好な推定値を与えるのではないと思われる。ただし、消波護岸の場合には海底勾配の影響がこれよりもさらに大きいかも知れない。

結局、波形勾配および海底勾配の影響の補正としてはその適用性に疑問はあるけれども、一応、図-32、33を用いて推定し、上述のような実験値の傾向を勘案して再修正するのが適当であろう。

(2) 図表による推定の精度について

図-27~30の越波流量図表ならびに図-32、33の補正図表による防波護岸の越波流量の推定値は、何がしかの誤差を伴う。既に図-25、26に示したように、図-27~30の基礎データとして使用した実験値そのものでさえ推定値の回りにばらついており、ばらつきの範囲は表-9に示したように無次元越波流量が小さいほど広がる。しかし、これは推定誤差の最小値を示すもので、実際の誤差はこれよりも大きい。

今回の実験では、基礎データとして使用した  $H_0=15$  cm 級の波のほかに、 $H_0=5\sim 11$  cm 級の波についても越波流量を測定している。そこで、それらの実験条件に

対して図表を使った越波流量の推定を試み、測定値と比較してみたのが図-34、35である。水底勾配は図-27~30と同一なので、波形勾配の差異のみを図-32で補正してある。前者の直立壁の場合には誤差が比較的小さく、特に  $H_0=5\sim 7$  cm 級の波の場合を除けば、ばらつきの範囲は表-9の消波護岸の場合に近い。これに対して消

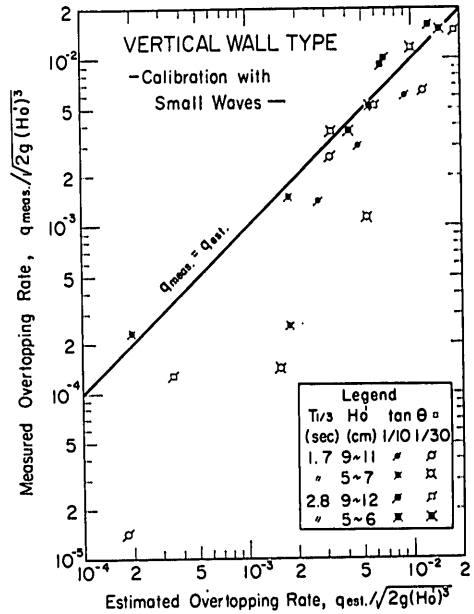


図-34 波高の小さい波に対する越波流量の推定値と測定値の比較(直立壁)

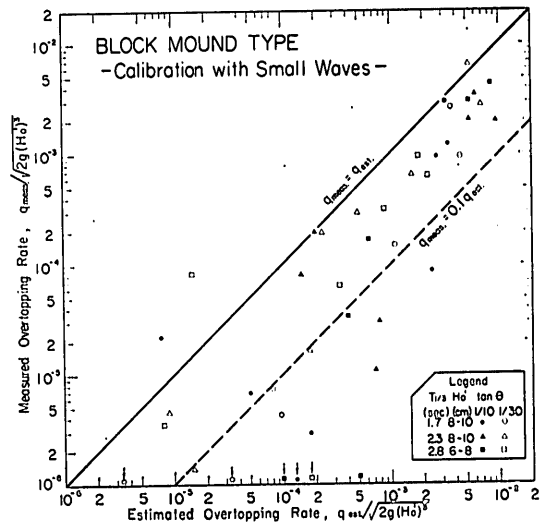


図-35 波高の小さい波に対する越波流量の推定値と測定値の比較(消波護岸)

波工の場合には誤差が大きく、図-35に見られるように実験値が推定値の1/10以下の場合も少なくない。消波工の場合に誤差がこのように大きな理由としては、消波工の断面に比して波高が小さいため波のエネルギーが消波工で吸収される割合が大きかったのではないかと推測される。実際の護岸では設計波高に対応した大きさの消波ブロックを選定するので、波高に対する消波工の寸法も今回の実験断面と相似の場合が多いであろうから、図-35のような大幅な差異は生じないと思われる。

越波流量推定の精度の最良の検討資料は現地観測値である。しかしながら、越波量の現地観測は多大の困難を伴い、実施された事例が少ない。著者らの知り得た範囲では、現在、現地観測値として利用できるものは昭和39～40年度に運輸省が海岸事業調査費で実施した和歌山北港および別府港弓ヶ浜海岸の資料<sup>14)</sup>、および昭和46～47年度に運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所が新潟東港の埋立護岸で行なった観測値<sup>15),16)</sup>である。

前者については、先回の期待越波流量の算定図表の検討データとして解析し、主要諸元が一覧表に記載されている<sup>2)</sup>。これによると、和歌山北港の護岸(水深-8.4 m地点の直立型式)では、6523号台風通過の際に0.09 m<sup>3</sup>/m・sec (11 h 30 m) および0.16 m<sup>3</sup>/m・sec (10 h 10 m)の平均越波流量(オーバーフローに対する推定を含む)が測定された。今回の図表からこのときの越波流量を推定すると、それぞれ0.07 および0.10 m<sup>3</sup>/m・secとなり、測定値の60～80%の値である。別府港弓ヶ浜の海岸護岸は、汀線部に設けたパラペット付き直立壁(天端高+5.0 m)の基部に捨石による根固工を施工した型式のものである。この海岸護岸では、6414号台風時に(1.4～7.9)×10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/m・sec、6420号台風時に1.8×10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>/m・secの平均越波流量(後者は推定を含む)が観測された。前面水深として+1.0 mを考慮、海底勾配を1/20と見なすと、今回の図表による推定値がそれぞれ3×10<sup>-4</sup> および5×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/m・secと得られる。現地データの精度や現地水深の不明確などを考えれば、推定精度として悪くないといえよう。

一方、新潟東港での現地観測については福田ほかが詳細な報告<sup>15)</sup>をしており、消波護岸に関する現地資料として貴重なものである。この護岸は、水深-4.5～-6.5 mの地点に設置された天端高+6.3 mのもので、波高2.7～5.7 m ( $H_0'/L_0=0.02\sim0.03$ )の波浪時に4×10<sup>-6</sup>～2×10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/m・secの越波流量を観測した。これに対して、観測条件に対する図表からの推定値は7×10<sup>-6</sup>～1.2

×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/m・sec とかなり大きく、個々のデータでは推定値が観測値の0.5～20倍の範囲にある。新潟東港の場合に誤差が大きい理由の一つは、越波流量の絶対値が小さいために推定精度の低い所で使う結果になったことである(推定値の一部は図表の下限以下を外挿して読みとっている)。また、現地護岸は消波工の全断面に消波ブロックを使用しており、これが越波流量を低く抑えることになったのかも知れない。

以上の実験および現地観測値との対比結果を勘案すると、今回の図表による越波流量の推定精度は表-10のようなものではないかと思われる。こうした推定精度から考えると、先の越波流量図表の精度を1/2～2倍あるいはそれ以上と見積つたのは、極めて甘い見通しであったといわざるを得ない。

表-10 越波流量の推定値に対する真値の想定範囲

| $q/\sqrt{2g(H_0')^3}$ | 直立護岸     | 消波護岸     |
|-----------------------|----------|----------|
| 10 <sup>-2</sup>      | 0.7～1.5倍 | 0.5～2倍   |
| 10 <sup>-3</sup>      | 0.4～2倍   | 0.2～3倍   |
| 10 <sup>-4</sup>      | 0.2～3倍   | 0.1～5倍   |
| 10 <sup>-5</sup>      | 0.1～5倍   | 0.05～10倍 |

なお、表-10は越波流量図表そのものの精度であり、実際問題においてはさらに潮位、波高および周期の算定精度の問題がある。たとえば、波高が20%異なるとすると、相対水深  $h/H_0'$  および相対天端高  $h_c/H_0'$  の値が変化し、このため無次元越波流量が10倍以上変化することがある。こうした変化は、相対水深が小さく、相対天端高が大きい場合に顕著に現われ、特に消波護岸の場合に著しい。

さらに越波の問題では、波の不規則性に起因する越波量の時間的変動を避けることができない。福田ほかの新潟東港の観測でも、15分間の平均越波流量が3時間の総平均値の0.25～2.2倍の範囲で変動した例が紹介されている。なお、こうした変動は図-17の実験データでも示されているように、越波流量が少ないほど大きいことに留意する必要がある。

### (3) 護岸の所要天端高について

最後に、越波流量推定図表の一つの応用として、防波護岸の所要天端高を許容越波量の観点から考察してみよう。護岸の越波量をどの程度まで許容し得るかは画一的には決定し得ない問題であり、護岸構造、高波の継続時間、背後地の利用目的など各種の要因を併せ考えなければ

ばならない。筆者の一人は、先回の越波流量図表を海岸堤防・護岸の被災事例に適用した結果として、構造上の破壊をもたらさない限界越波流量としては、たとえば三面コンクリート巻きの堤防の場合には  $q=0.05 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$  の程度であることを述べた<sup>2)</sup>。そして、これらの数値は台風による継続時間の短い波浪に対するものであって、作用時間の長い季節風による波浪に対しては限界値がさらに低くなる可能性を付言した。その後、日本海沿岸の海岸保全施設の被災例について第一港湾建設局が検討したところによると、 $q_{\text{exp}}=1.5 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$  で甚大な災害を受けた例があり、また  $q_{\text{exp}}=2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$  で天端の張りブロックが陥没し、中詰砂が流失した例が報告されている<sup>15),16)</sup>。

また、最近のように海岸沿いに道路を建設する事例が増加すると、自動車の安全通行の観点から許容越波流量を考えるケースが増えてくる。橋本<sup>17)</sup>あるいは福田ほか<sup>15)</sup>によると、こうした場合は  $10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$  が一つの目安のようである。ただ、越波流量がこのように少なくなると、たとえ模型実験を行なうにしても越波流量の推定精度が低くなり、さらに設計条件の信頼度および越波現象自体の時間的変動の問題がからんでくるため、相当に余裕を見た天端高および消波工断面にする必要が生じよう。

以上のように越波流量の許容値は極めてむずかしい問題であるけれども、ここでは現在、海岸保全施設の計画において使用されることの多い  $q=0.01 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$  を前提としてみる。そして、対象波浪は風波として、波形勾配  $H_0'/L_0=0.036$  の図表を使用して所要天端高を求めたところ、直立護岸については図-36、消波護岸については図-37のような結果が得られた。元の図表は無次元越波流量  $q/\sqrt{2g(H_0')^3}$  と相対水深および相対天端高の関係を示すものであるから、波高  $H$  の絶対値が大きいほど相対天端高  $h_c/H_0'$  を大きくとる必要が生ずる。もっともこの差は比較的小さく、波高が4mから10mに増大しても、相対天端高としては30%程度の増加にとどまる。

図-36, 37によると、風波を対象とした場合の所要天端高の特性として次のようなことが認められる。

- 1) 所要天端高が最大になる水深は、海底勾配が1/30の場合に  $h/H_0' \approx 2.0$ 、海底勾配1/10の場合に  $h/H_0' \approx 1.5$  であり、直立護岸も消波護岸も同様である。
- 2) 水深が波高の約2.5倍以深では海底勾配の影響が

現われないが、水深が浅い所では海底勾配が急なほど高い天端高を必要とする。

- 3) 消波護岸の所要天端高は直立護岸の60~70%である。ただし、相対水深が非常に大きな場合および海底勾配1/10で  $h/H_0'=0.3 \sim 0.6$  の付近では、所要天端高の差が小さい。

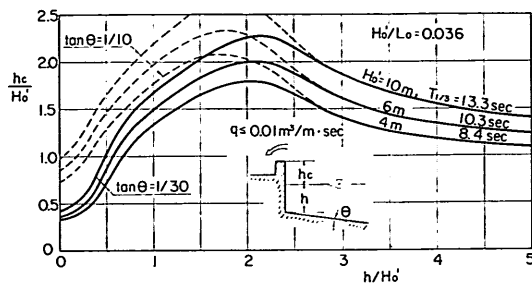


図-36 許容越波流量  $0.01 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$  に対する直立護岸の所要天端高

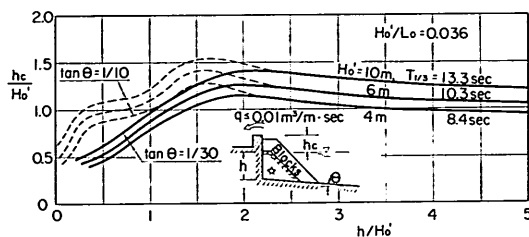


図-37 許容越波流量  $0.01 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$  に対する消波護岸の所要天端高

港湾構造物設計基準<sup>18)</sup>によると、海岸堤防(直立型)の天端高の標準値は  $h \geq H_0'$  において  $h_c = 1.5 H_0'$  とし、 $h < H_0'$  においては  $h=0$  における所要天端高に向かって直線的に変化するものとしている。汀線における所要天端高は、海底勾配1/10のとき  $1.3 H_0'$ 、海底勾配1/30のとき  $0.6 H_0'$  である。また、十分な断面を有する消波工を設けた場合には、設計潮位上の天端高を直立壁の場合の70%とすることができるとされている。この消波工の効果の見積りは、図-36と37あるいは図-31の結果から見てもほぼ妥当なものである。また、 $h < H_0'$  の浅海部における天端高の標準値は、図-36, 37の所要天端高と大差ない。しかし、 $h/H_0'=1 \sim 3$  の領域においては、 $h_c/H_0'=1.5$  (または1.05)の標準値は図-36, 37の所要天端高に比べて過小であり、越波流量が  $0.01 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$  以上となる。

許容越波流量を  $0.01 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$  以外の値に設定する

場合でも、越波流量図表の曲線の形状から分るように、防波護岸の所要天端高は  $h/H_0' \approx 1.5 \sim 2.0$  で最大となるはずである。この意味で、現行の標準天端高の設定方法は、最大値の位置を  $h=H_0'$  から  $h=(1.5 \sim 2.0)H_0'$  に変更する必要があるのではないかと思われる。

#### 4. ま と め

以上に述べた実験的研究の成果は、図-27~30の越波流量推定図表に集約されている。これをとりまとめる過程において明らかになった事項を列記すると次のようになる。

1. 直立壁前面の波高の水深に対する変化は、不規則波の碎波変形モデルによってかなり説明できる。
2. 直立壁前面の波は非線型干渉が顕著に現われ、たとえば周期が入射波の70~80%に減少する場合がある。
3. 直立壁に対する不規則波のうちあげ高は、規則波の実験値とほぼ一致する場合もあるけれども、かなり食い違う場合もあり、規則波の実験のみで推定するには無理がある。
4. 浅海部における防波護岸の越波流量は、周期および海底勾配の影響を強く受ける。無次元表示では、換算沖波の波形勾配と海底勾配が重要なパラメーターである。
5. 直立護岸の越波流量は、不規則波の碎波変形モデルと越流ぜきとしての越波計算の組合せにより、その概要を推定できる。
6. 直立護岸に比して消波護岸の越波流量は相当に小さく、特に越波流量の少ないところでその差が著しい。ただし、同一越波流量を与える天端高としては直立壁の60~70%の高さである。
7. 消波護岸の反射率は波形勾配および設置水深によって異なり、 $h/H_0' \approx 1.5$  では  $H_0'/L_0 = 0.012 \sim 0.036$  の範囲において  $K_R = 0.8 \sim 0.4$  に変化する。
8. 越波流量の推定精度はその絶対値が減少するにつれて低下し、特に消波護岸の精度低下が著しい。
9. 汀線近傍でサーフビート現象が卓越する場合を除けば、規則波による実験データに基づく期待越波流量の計算値は、不規則波による実験値とほぼ0.5~2倍の範囲で一致する。

以上のように、防波護岸の越波流量の特性は本研究によってかなり明確になったものと思われる。しかしなが

ら、越波現象は多数の要因に影響されて複雑に変化するものであって、越波流量を正確に推定することは非常に困難である。図-27~30の図表も越波流量の目安を与えるものであって、その精度は表-10の程度と推測される。海岸保全施設の設計にあたってはこうした図表にのみ依存することなく、水理模型実験を実施してより正確な越波流量の推定値を求めるようにすべきであると考えられる。

なお本報告の最初に述べたように、今回の越波実験においては幾つかの問題を残したまま、とりまとめを行なっている。たとえば、不規則な反射波が入射波に重ね合わせられた場合の非線型干渉を明らかにし、不規則波の入・反射波の分離推定法の精度を高めることがその一つである。また、消波護岸における消波工の断面の大きさおよび形状の効果をもう少し検討することも必要である。さらに、実験データの解析にあたって特異値として無視あるいは修正したものが幾つかあったが、これらについて再吟味する必要もある。なお、この報告では取り扱っていないが、現実の問題としては波向きの影響あるいは波の方向スペクトルの影響、さらに越波に対する風の効果なども重要であろう。今後、機会を見て検討して行きたい。

最後に、本研究の実施にあたって種々御助力頂いた運輸省港湾局防災課の関係各位に厚く御礼申し上げる。なお、本研究の計画、理論解析、およびとりまとめは合田が担当し、模型製作、実験の実施ならびにデータ解析は岸良が神山とともに遂行したことを付記する。

(1975年9月30日受付)

#### 参 考 文 献

- 1) たとえば、土木学会編：水理公式集（昭和46年度改訂版）、1971年11月、pp. 533~540.
- 2) 合田良実：防波護岸の越波流量に関する研究、港湾技術研究所報告、第9巻 第4号、1970年12月、pp. 3~41.
- 3) 合田良実・鈴木康正：不規則波に対する反射波の分離法について、昭和49年度関東支部年次研究発表会講演概要、土木学会、1974年5月、pp. 151~154.
- 4) 合田良実・鈴木康正・岸良安治：不規則波浪実験とその特性について、第21回海岸工学講演会論文集、1974年11月、pp. 237~242.
- 5) 首藤伸夫：非線型長波の変形一水路幅、水深の変化する場合一、第21回海岸工学講演会論文集、1974年11月、pp. 57~63.
- 6) 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形、港湾技術研究所報告、第14巻 第3号、1975年9月、pp.

不規則波による防波護岸の越波流量

- 59~106.
- 7) 合田良実・永井康平：波浪の統計的性質に関する調査・解析，港湾技術研究所報告，第13巻 第1号，1974年3月，pp. 3~37.
  - 8) たとえば，合田良実・柿崎秀作：有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第5巻 10号，1966年6月，57 p.
  - 9) 合田良実・福森利夫：直立壁および混成堤直立部に働く波圧に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第11巻 第2号，1972年6月，pp. 3~45.
  - 10) 前出文献6) の p. 75.
  - 11) 土木学会編：海岸保全施設設計便覧，1969年7月，p. 203.
  - 12) U. S. Army Coastal Engineering Research Center : Shore Protection, Planning and Design, Tech. Rept. No. 4, 1966, p. 186.
  - 13) 吉川秀夫・椎貝博美・河野二夫：海岸堤防の越波に関する基礎的研究(1)，第14回海岸工学講演会講演集，1967年10月，pp. 118~122.
  - 14) 運輸省港湾局防災課：海岸調査報告書—海岸構造物の機能効果について—，1967年3月.
  - 15) 福田伸男・宇野俊泰・入江 功：防波護岸の越波に関する現地観測(第2報)，第20回海岸工学講演会論文集，1973年11月，pp. 113~118.
  - 16) 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所：防波護岸の越波に関する模型実験および現地観測調査報告書，新調資 48-7, 1974年3月，68 p.
  - 17) 浜田徳一／光易 恒・合田良実・橋本 宏：波と構造物に関する諸問題，土木学会誌，Vol. 58-4 (増刊号)，1973年，pp. 57~64.
  - 18) 運輸省港湾局編：港湾構造物設計基準，1968年9月，pp. 7-3-6~7-3-10.

主要記号表

- $a$  : 波頂高比  $K$  の近似式 (13) の係数  
 $a_I$  : 入射波の振幅の推定値 (式. 4)  
 $a_R$  : 反射波の振幅の推定値 (式. 4)  
 $A_0$  : 越波流量の計算式 (11) の定数

- $b$  : 波頂高比  $K$  の近似式 (13) の係数  
 $c$  : 波頂高比  $K$  の近似式 (13) の係数  
 $f$  : 周波数  
 $f_p$  : 波のスペクトルのピークの周波数  
 $g$  : 重力の加速度 (= 980 cm/sec<sup>2</sup>)  
 $h$  : 水深，特に防波護岸の前面水深  
 $h_c$  : 静水面上の防波護岸の天端高  
 $H$  : 波高  
 $H_0$  : 深水波高 (有義波)  
 $H_0'$  : 相当深水波高または換算沖波波高 (有義波)  
 $H_S$  : 直立壁の前面波高  
 $H_{1/3}$  : 有義波高  
 $k$  : 波数 (=  $2\pi/L$ )  
 $K$  : 波頂高比 (=  $\eta_c/H$ ) (式. 13)  
 $K_R$  : 反射率  
 $L_0$  : 深水波長 (=  $gT_{1/3}^2/2\pi$ )  
 $p(\ )$  : 括弧内の変数の確率密度  
 $q$  : 越波流量  
 $q_{exp}$  : 規則波の実験データに基づく期待越波流量  
 $q_{max}$  : 3回の測定平均越波流量の最大値  
 $q_{min}$  : 3回の測定平均越波流量の最小値  
 $R_{1/3}$  : 波のうちあげ高の1/3最大値  
 $S(f)$  : 波の周波数スペクトル  
 $t$  : 時間  
 $T$  : 波の周期  
 $\bar{T}$  : 波の平均周期  
 $T_{1/3}$  : 有義波周期  
 $x$  : 距離，あるいは波高比  $H/H_0'$   
 $\Delta l$  : 入・反射波の分離推定のための波高計間距離  
 $\zeta_{rms}$  : サーフビートの波形の標準偏差値  
 $\eta$  : 平均水位の上昇量  
 $\theta$  : 海底面が水平面となす角度 (海底勾配は  $\tan \theta$ ).

付表-1 直立護岸の越波流量の実験結果 (水底勾配 1/30)

| h<br>(cm) | $T_{1/3} \doteq 1.7 \text{ sec}$ |               |        |   | $T_{1/3} \doteq 2.3 \text{ sec}$ |               |        |   | $T_{1/3} \doteq 2.8 \text{ sec}$ |               |       |   |
|-----------|----------------------------------|---------------|--------|---|----------------------------------|---------------|--------|---|----------------------------------|---------------|-------|---|
|           | $h_c$<br>(cm)                    | $H_0$<br>(cm) | $K_R$  | $q$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{sec}$ ) | $h_c$<br>(cm)                    | $H_0$<br>(cm) | $K_R$  | $q$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{sec}$ ) | $h_c$<br>(cm)                    | $H_0$<br>(cm) | $K_R$ | $q$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{sec}$ ) |
| 22.5      | 7.0                              | 15.3          | 0.68   | 29.49   | 6.5                              | 12.9          | —      | 36.14   | 7.0                              | 13.2          | 0.91  | 50.65   |
|           | 10.5                             | 15.3          | —      | 17.94   |                                  |               |        |   | 10.5                             | 13.1          | —     | 33.69   |
|           | 14.8                             | 15.3          | —      | 9.32  |                                  |               |        |   | 14.1                             | 13.3          | 0.85  | 10.60   |
|           | 18.8                             | 15.2          | —      | 4.17  |                                  |               |        |   | 14.8                             | 13.1          | —     | 24.04   |
|           | 22.5                             | 15.2          | —      | 2.42  |                                  |               |        |   | 18.8                             | 12.9          | —     | 12.67   |
| 25.7      | 16.0                             | 0.84          | 1.273  | 21.9  | 12.3                             | 0.87          | 2.86   | 22.5  | 12.8                             | —             | 8.65  |   |
|           |                                  |               |        |   |                                  |               |        | 25.7  | 12.8                             | 1.0*          | 5.63  |   |
| 15.0      | 7.3                              | 15.3          | —      | 21.70   | 7.0                              | 12.5          | —      | 23.77   | 7.3                              | 13.6          | —     | 24.40   |
|           | 11.0                             | 15.2          | 0.58   | 9.43  |                                  |               |        |   | 11.0                             | 13.3          | —     | 12.29   |
|           | 14.9                             | 15.3          | 0.60   | 4.74  |                                  |               |        |   | 14.9                             | 13.1          | 0.81  | 7.05  |
|           | 18.6                             | 15.0          | 0.60   | 1.924   |                                  |               |        |   | 18.6                             | 13.1          | 0.76  | 2.64  |
|           | 22.4                             | 14.5          | 0.58   | 0.950   |                                  |               |        |   | 22.2                             | 12.7          | 0.58  | 1.56  |
| 26.1      | 14.9                             | 0.62          | 0.569  | 22.4  | 13.1                             | 0.78          | 1.336  |   |                                  |               |       |   |
|           |                                  |               |        |   |                                  |               |        | 26.1  | 13.2                             | 0.80          | 0.605 |   |
| 10.0      | 7.5                              | 16.1          | —      | 11.39   | 7.5                              | 13.4          | 0.35   | 11.60   | 7.5                              | 15.3          | —     | 14.79   |
|           | 11.3                             | 15.9          | 0.41   | 4.47  |                                  |               |        |   | 11.3                             | 14.9          | 0.53  | 4.99  |
|           | 15.0                             | 15.6          | 0.43   | 1.386   |                                  |               |        |   | 15.0                             | 14.1          | 0.56  | 2.13  |
|           | 18.9                             | 16.3          | 0.37   | 0.708   |                                  |               |        |   | 18.9                             | 14.9          | 0.51  | 1.076   |
|           | 22.5                             | 16.2          | 0.38   | 0.376   |                                  |               |        |   | 22.5                             | 14.6          | 0.52  | 0.445   |
| 26.0      | 16.0                             | 0.45          | 0.215  | 26.0  | 14.5                             | 0.59          | 0.265  |   |                                  |               |       |   |
| 5.0       | 7.3                              | 16.4          | 0.28   | 2.75  | 6.8                              | 13.1          | 0.26   | 6.14  | 7.3                              | 14.9          | 0.45  | 4.06  |
|           | 10.9                             | 16.4          | —      | 0.501   |                                  |               |        |   | 10.9                             | 14.8          | —     | 1.234   |
|           | 14.8                             | 16.4          | —      | 0.106   |                                  |               |        |   | 14.8                             | 15.1          | —     | 0.232   |
|           | 18.4                             | 16.4          | —      | 0.0534  |                                  |               |        |   | 18.4                             | 15.1          | —     | 0.101   |
|           | 22.2                             | 16.4          | 0.24   | 0.0243  |                                  |               |        |   | 22.2                             | 15.2          | 0.39  | 0.0370  |
| 26.0      | 16.4                             | —             | 0.0072 | 26.0  | 15.2                             | —             | 0.0121 |   |                                  |               |       |   |
| 0         | 7.3                              | 16.7          | 0.23   | 0.458   | 6.7                              | 13.2          | 0.21   | 0.804   | 7.3                              | 15.5          | 0.41  | 1.730   |
|           | 10.9                             | 16.7          | —      | 0.0289  |                                  |               |        |   | 10.9                             | 15.3          | —     | 0.213   |
|           | 14.3                             | 16.7          | —      | 0.0024  |                                  |               |        |   | 14.3                             | 15.3          | —     | 0.0328  |
|           | 17.8                             | 16.5          | 0.17   | 0.0012  |                                  |               |        |   | 17.8                             | 15.6          | 0.36  | 0.0058  |
|           | 22.5                             | 17.9          | —      | 0   |                                  |               |        |   | 22.5                             | 16.2          | —     | 0.0006  |
| -5.0      | 6.7                              | 16.7          | 0.24   | 0.1936  | 7.0                              | 13.7          | 0.20   | 0.645   | 6.7                              | 15.5          | 0.43  | 1.428   |
|           | 10.4                             | 16.7          | —      | 0.0049  |                                  |               |        |   | 10.4                             | 15.3          | —     | 0.1206  |
|           | 14.4                             | 16.5          | 0.18   | 0   |                                  |               |        |   | 14.4                             | 15.2          | 0.35  | 0.0121  |
| 15.0      | 7.1                              | 9.8           | 0.75   | 8.60  | —                                | —             | —      | —   | 7.1                              | 9.6           | 0.85  | 19.24   |
|           | 11.0                             | 9.4           | 0.74   | 3.28  |                                  |               |        |   | 11.0                             | 10.8          | 0.79  | 8.00  |
| 0         | 6.8                              | 10.7          | 0.25   | 0.022   | —                                | —             | —      | —   | 6.8                              | 11.8          | 0.39  | 0.226   |
| 15.0      | 7.1                              | 7.0           | 0.86   | 0.821   | —                                | —             | —      | —   | 7.1                              | 6.5           | 0.99  | 5.25  |
|           | 11.0                             | 7.0           | 0.86   | 0.196   |                                  |               |        |   | 11.0                             | 6.5           | 1.0*  | 2.60  |
| 0         | 6.8                              | 5.3           | 0.13   | 0   | —                                | —             | —      | —   | 6.8                              | 6.1           | 0.30  | 0.005   |

注：反射率  $K_R$  の列で空欄となっているケースは、入・分散波の分離計算を行っていない。したがって、入射波高は他のデータからの推定値である。

また、 $K_R=1.0^*$  とあるものは、反射率の計算値が1.0以上の場合である。

不規則波による防波護岸の越波流量

付表-2 直立護岸の越波流量の実験結果 (水底勾配 1/10)

| h<br>(cm) | $T_{1/3} \approx 1.7 \text{ sec}$ |               |        |   | $T_{1/3} \approx 2.3 \text{ sec}$ |               |       |   | $T_{1/3} \approx 2.8 \text{ sec}$ |               |       |   |
|-----------|-----------------------------------|---------------|--------|---|-----------------------------------|---------------|-------|---|-----------------------------------|---------------|-------|---|
|           | $h_c$<br>(cm)                     | $H_0$<br>(cm) | $K_R$  | $q$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{sec}$ ) | $h_c$<br>(cm)                     | $H_0$<br>(cm) | $K_R$ | $q$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{sec}$ ) | $h_c$<br>(cm)                     | $H_0$<br>(cm) | $K_R$ | $q$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{sec}$ ) |
| 22.5      | 7.0                               | 15.8          | 0.82   | 27.80   | 6.8                               | 12.8          | —     | 32.16   | 7.0                               | 14.3          | 1.0*  | 46.36   |
|           | 10.8                              | 15.1          | —      | 17.70   |                                   |               |       |   | 10.8                              | 13.9          | —     | 34.44   |
|           | 14.8                              | 14.8          | —      | 9.60  |                                   |               |       |   | 14.8                              | 14.0          | —     | 22.16   |
|           | 18.3                              | 14.9          | 0.94   | 5.23  |                                   |               |       |   | 18.3                              | 14.8          | 1.0*  | 15.35   |
|           | 20.5                              | 14.9          | —      | 3.70  |                                   |               |       |   | 20.5                              | 15.1          | —     | 10.05   |
| 25.9      | 14.8                              | 0.96          | 2.22   | 25.9  | 15.1                              | 1.0*          | 6.26  |   |                                   |               |       |   |
| 15.0      | 7.4                               | 15.2          | 0.70   | 26.51   | 7.3                               | 13.0          | —     | 29.97   | 7.4                               | 12.8          | 0.95  | 46.08   |
|           | 10.8                              | 15.2          | 0.74   | 16.95   |                                   |               |       |   | 10.8                              | 13.2          | 1.0*  | 31.37   |
|           | 14.8                              | 15.0          | 0.77   | 8.68  |                                   |               |       |   | 14.8                              | 13.4          | 1.0*  | 20.12   |
|           | 18.6                              | 15.2          | 0.75   | 4.00  |                                   |               |       |   | 18.6                              | 13.1          | 1.0*  | 10.81   |
|           | 22.4                              | 14.6          | 0.81   | 2.48  |                                   |               |       |   | 22.4                              | 13.0          | 1.0*  | 6.37  |
| 26.0      | 14.6                              | 0.80          | 1.73   | 26.0  | 13.8                              | 1.0*          | 4.47  |   |                                   |               |       |   |
| 10.0      | 7.2                               | 16.2          | 0.56   | 23.20   | 7.2                               | 13.1          | —     | 24.80   | 7.2                               | 13.9          | 0.78  | 38.52   |
|           | 10.8                              | 15.4          | 0.63   | 10.23   |                                   |               |       |   | 10.8                              | 13.2          | 0.84  | 23.02   |
|           | 14.6                              | 15.1          | 0.64   | 5.01  |                                   |               |       |   | 14.6                              | 12.9          | 0.88  | 15.40   |
|           | 18.5                              | 15.9          | 0.63   | 2.56  |                                   |               |       |   | 18.5                              | 13.0          | 0.92  | 7.56  |
|           | 22.2                              | 16.0          | 0.64   | 1.766   |                                   |               |       |   | 22.2                              | 13.1          | 0.93  | 5.10  |
| 25.9      | 16.2                              | 0.63          | 0.905  | 25.9  | 13.5                              | 0.94          | 3.02  |   |                                   |               |       |   |
| 5.0       | 7.2                               | 16.1          | 0.39   | 13.27   | 11.0                              | 14.0          | 0.50  | 7.99  | 7.2                               | 14.2          | 0.69  | 33.00   |
|           | 10.7                              | 15.7          | —      | 5.77  |                                   |               |       |   | 10.7                              | 13.7          | —     | 19.68   |
|           | 14.6                              | 15.7          | —      | 2.11  |                                   |               |       |   | 14.6                              | 13.8          | —     | 10.74   |
|           | 18.6                              | 15.9          | 0.41   | 0.758   |                                   |               |       |   | 18.6                              | 14.1          | 0.71  | 4.84  |
|           | 22.3                              | 15.9          | —      | 0.461   |                                   |               |       |   | 22.3                              | 13.9          | —     | 2.41  |
| 26.0      | 16.3                              | 0.43          | 0.223  | 26.0  | 13.7                              | 0.73          | 1.282 |   |                                   |               |       |   |
| 0         | 6.6                               | 16.0          | 0.26   | 9.20  | 6.5                               | 13.7          | —     | 13.36   | 6.6                               | 14.8          | 0.51  | 31.92   |
|           | 10.4                              | 15.3          | —      | 3.40  |                                   |               |       |   | 10.4                              | 14.2          | —     | 19.03   |
|           | 14.2                              | 15.4          | —      | 0.909   |                                   |               |       |   | 14.2                              | 14.0          | —     | 8.72  |
|           | 17.9                              | 16.1          | 0.25   | 0.156   |                                   |               |       |   | 17.9                              | 14.1          | 0.59  | 3.13  |
|           | 21.6                              | 16.4          | —      | 0.050   |                                   |               |       |   | 21.6                              | 14.5          | —     | 1.389   |
| 25.4      | 16.4                              | 0.30          | 0.040  | 25.4  | 14.5                              | 0.61          | 0.628 |   |                                   |               |       |   |
| -5.0      | 7.0                               | 16.2          | 0.22   | 7.20  | 7.0                               | 13.8          | —     | 14.34   | 7.0                               | 14.4          | 0.46  | 27.01   |
|           | 10.6                              | 15.4          | —      | 1.689   |                                   |               |       |   | 10.6                              | 13.8          | —     | 15.43   |
|           | 14.5                              | 15.3          | —      | 0.381   |                                   |               |       |   | 14.5                              | 13.9          | 0.23  | 6.23  |
|           | 18.0                              | 15.7          | 0.23   | 0.0737  |                                   |               |       |   | 18.0                              | 13.8          | —     | 2.62  |
|           | 22.0                              | 16.1          | —      | 0.0244  |                                   |               |       |   | 22.0                              | 15.0          | —     | 0.392   |
| 25.7      | 16.3                              | 0.22          | 0.0031 | 25.7  | 15.1                              | 0.51          | 0.422 |   |                                   |               |       |   |
| -10.0     | 11.3                              | 17.7          | 0.26   | 1.893   | 11.1                              | 14.1          | 0.20  | 5.67  | 11.3                              | 16.1          | 0.50  | 16.56   |
|           | 15.1                              | 16.2          | 0.20   | 0.332   |                                   |               |       |   | 15.1                              | 15.6          | 0.43  | 5.26  |
|           | 18.9                              | 16.5          | 0.19   | 0.0984  |                                   |               |       |   | 18.9                              | 15.8          | 0.47  | 2.23  |
|           | 22.7                              | 16.5          | —      | 0.0403  |                                   |               |       |   | 22.7                              | 15.7          | —     | 0.904   |
|           | 26.4                              | 16.0          | 0.20   | 0   |                                   |               |       |   | 26.4                              | 15.3          | 0.47  | 0.403   |
| 15.0      | 7.4                               | 9.2           | 0.85   | 7.43  | —                                 | —             | —     | —   | 7.4                               | 8.9           | 1.0*  | 18.78   |
|           | 10.9                              | 9.2           | 0.95   | 3.73  | —                                 | —             | —     | —   | 10.9                              | 9.6           | 1.0*  | 11.91   |
| 0         | 6.6                               | 9.5           | 0.26   | 1.851   | —                                 | —             | —     | —   | 6.6                               | 9.9           | 0.57  | 14.02   |
| 15.0      | 7.4                               | 5.3           | 0.97   | 0.826   | —                                 | —             | —     | —   | 7.4                               | 5.8           | 1.0*  | 3.16  |
|           | 10.8                              | 5.1           | 1.00   | 0.120   | —                                 | —             | —     | —   | 10.8                              | 5.7           | 1.0*  | 0.901   |
| 0         | 6.6                               | 5.7           | 0.28   | 0.153   | —                                 | —             | —     | —   | 6.6                               | 5.4           | 0.67  | 2.04  |



付表-3 消波護岸の越波流量の実験結果 (水底勾配 1/30)

| h<br>(cm) | $T_{1/3} \doteq 1.7 \text{ sec}$ |               |       |   | $T_{1/3} \doteq 2.3 \text{ sec}$ |               |       |   | $T_{1/3} \doteq 2.8 \text{ sec}$ |               |       |   |
|-----------|----------------------------------|---------------|-------|---|----------------------------------|---------------|-------|---|----------------------------------|---------------|-------|---|
|           | $h_c$<br>(cm)                    | $H_0$<br>(cm) | $K_R$ | $q$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{sec}$ ) | $h_c$<br>(cm)                    | $H_0$<br>(cm) | $K_R$ | $q$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{sec}$ ) | $h_c$<br>(cm)                    | $H_0$<br>(cm) | $K_R$ | $q$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{sec}$ ) |
| 22.5      | 6.5                              | 15.4          | —     | 21.88   | 6.5                              | 13.6          | —     | 25.79   | 6.5                              | 14.0          | —     | 49.96   |
|           | 14.1                             | 15.7          | 0.34  | 1.628   | 14.1                             | 14.0          | 0.47  | 3.94  | 14.1                             | 14.0          | 0.68  | 15.60   |
|           | 21.1                             | 14.9          | 0.33  | 0.077   | 21.1                             | 13.1          | 0.47  | 0.350   | 21.1                             | 14.0          | 0.72  | 2.73  |
| 15.0      | 7.0                              | 16.5          | 0.24  | 7.69  | 7.0                              | 12.9          | 0.29  | 11.21   | 7.0                              | 13.8          | 0.42  | 16.68   |
|           | 14.7                             | 15.6          | 0.27  | 0.292   | 14.7                             | 13.6          | 0.34  | 0.665   | 14.7                             | 14.6          | 0.46  | 2.25  |
|           | 22.2                             | 15.4          | 0.29  | 0.0115  | 22.2                             | 13.3          | 0.34  | 0.032   | 22.2                             | 14.5          | 0.48  | 0.107   |
| 10.0      | 7.7                              | 15.5          | 0.26  | 1.899   | 7.7                              | 13.6          | 0.29  | 2.725   | 7.7                              | 13.1          | 0.41  | 6.86  |
|           | 11.3                             | 17.0          | 0.21  | 0.343   | 11.3                             | 14.5          | 0.22  | 0.601   | 11.3                             | 15.3          | 0.23  | 1.929   |
|           | 15.2                             | 15.6          | 0.21  | 0   | 15.2                             | 15.4          | 0.24  | 0.084   | 15.2                             | 13.4          | 0.36  | 0.155   |
| 5.0       | 10.8                             | 16.2          | 0.16  | 0.091   | 10.8                             | 13.2          | 0.16  | 0.305   | 10.8                             | 15.0          | 0.20  | 0.852   |
|           | 14.6                             | 15.5          | 0.19  | 0   | 14.6                             | 13.3          | 0.20  | 0.0123  | 14.6                             | 13.1          | 0.32  | 0.031   |
| 0         | 14.5                             | 15.8          | 0.16  | 0   | 14.5                             | 13.2          | 0.19  | 0   | 14.5                             | 14.7          | 0.21  | 0   |
| 22.5      | 6.5                              | 9.2           | 0.28  | 3.24  | 6.5                              | 8.4           | 0.42  | 7.02  | 6.5                              | 6.2           | 0.70  | 6.61  |
|           | 14.1                             | 8.9           | 0.36  | 0.0087  | 14.1                             | 8.5           | 0.49  | 0.214   | 14.1                             | 6.3           | 0.78  | 0.057   |
|           | 7.0                              | 10.0          | 0.33  | 1.291   | 7.0                              | 9.3           | 0.40  | 3.50  | 7.0                              | 7.4           | 0.62  | 2.82  |
| 15.0      | 14.7                             | 9.0           | 0.28  | 0   | 14.7                             | 8.8           | 0.36  | 0.034   | 14.7                             | 7.2           | 0.58  | 0.055   |
|           | 7.7                              | 8.9           | 0.23  | 0.1757  | 7.7                              | 8.5           | 0.25  | 0.721   | 7.7                              | 6.6           | 0.39  | 0.465   |
| 10.0      | 11.3                             | 8.9           | 0.19  | 0.0050  | 11.3                             | 8.6           | 0.21  | 0.0182  | 11.3                             | 7.3           | 0.24  | 0.0178  |
|           | 15.0                             | 8.6           | —     | 0   | 15.0                             | 8.6           | —     | 0.0052  | 15.0                             | 6.9           | —     | 0.0028  |
| 5.0       | 10.8                             | 9.9           | 0.33  | 0   | 10.8                             | 9.6           | 0.37  | 0.0018  | 10.8                             | 7.2           | 0.55  | 0   |

付表-4 消波護岸の越波流量の実験結果 (水底勾配 1/10)

| h<br>(cm) | $T_{1/3} \doteq 1.7 \text{ sec}$ |               |       |   | $T_{1/3} \doteq 2.3 \text{ sec}$ |               |       |   | $T_{1/3} \doteq 2.8 \text{ sec}$ |               |       |   |
|-----------|----------------------------------|---------------|-------|---|----------------------------------|---------------|-------|---|----------------------------------|---------------|-------|---|
|           | $h_c$<br>(cm)                    | $H_0$<br>(cm) | $K_R$ | $q$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{sec}$ ) | $h_c$<br>(cm)                    | $H_0$<br>(cm) | $K_R$ | $q$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{sec}$ ) | $h_c$<br>(cm)                    | $H_0$<br>(cm) | $K_R$ | $q$<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{sec}$ ) |
| 22.5      | 7.3                              | 12.6          | 0.67  | 12.88   | 7.3                              | 14.2          | 0.52  | 21.14   | 7.3                              | 12.0          | 0.97  | 34.01   |
|           | 14.6                             | 14.6          | 0.37  | 0.963   | 14.6                             | 12.4          | 0.51  | 1.923   | 14.6                             | 13.7          | 0.74  | 9.73  |
|           | 22.1                             | 15.2          | 0.41  | 0.070   | 22.1                             | 12.5          | 0.54  | 0.153   | 22.1                             | 13.9          | 0.78  | 1.639   |
| 15.0      | 7.3                              | 15.5          | 0.38  | 12.21   | 7.3                              | 13.1          | 0.51  | 16.34   | 7.3                              | 13.6          | 0.73  | 36.39   |
|           | 15.0                             | 15.6          | —     | 0.930   | 15.0                             | 13.3          | —     | 1.834   | 15.0                             | 13.8          | —     | 10.66   |
|           | 22.6                             | 15.6          | 0.62  | 0.087   | 22.6                             | 13.3          | 0.74  | 0.133   | 22.6                             | 13.8          | 0.89  | 1.641   |
| 10.0      | 7.2                              | 15.6          | —     | 13.85   | 7.2                              | 13.3          | —     | 18.41   | 7.2                              | 13.8          | —     | 38.72   |
|           | 14.8                             | 15.4          | 0.31  | 1.022   | 14.8                             | 12.9          | 0.45  | 2.24  | 14.8                             | 13.9          | 0.67  | 12.56   |
|           | 18.4                             | 16.1          | 0.42  | 0.301   | 18.4                             | 13.7          | 0.53  | 0.776   | 18.4                             | 13.8          | 0.77  | 6.54  |
| 5.0       | 11.0                             | 16.8          | 0.32  | 3.71  | 11.0                             | 14.1          | 0.42  | 6.51  | 11.0                             | 14.7          | 0.65  | 20.22   |
|           | 15.0                             | 16.8          | 0.35  | 1.044   | 15.0                             | 13.7          | 0.46  | 2.52  | 15.0                             | 14.4          | 0.68  | 14.32   |
|           | 18.5                             | 16.4          | 0.36  | 0.313   | 18.5                             | 13.4          | 0.44  | 1.002   | 18.5                             | 13.7          | 0.69  | 7.44  |
| 0         | 14.3                             | 17.1          | 0.28  | 0.294   | 14.3                             | 14.3          | 0.37  | 0.656   | 14.3                             | 15.2          | 0.64  | 6.86  |
|           | 17.8                             | 16.6          | 0.27  | 0.093   | 17.8                             | 13.8          | 0.35  | 0.132   | 17.8                             | 14.3          | 0.57  | 2.79  |
| 22.5      | 7.3                              | 8.8           | 0.74  | 1.020   | 7.3                              | 9.2           | 0.68  | 2.52  | 7.3                              | 7.5           | 0.90  | 2.66  |
|           | 14.8                             | 9.9           | 0.47  | 0   | 14.8                             | 9.8           | 0.58  | 0.043   | 14.8                             | 7.4           | 0.84  | 0   |
| 15.0      | 7.4                              | 8.4           | 0.32  | 1.019   | 7.4                              | 9.2           | 0.50  | 2.46  | 7.4                              | 6.4           | 0.76  | 2.22  |
|           | 15.0                             | 9.2           | 0.38  | 0.0036  | 15.0                             | 8.9           | 0.53  | 0.0128  | 15.0                             | 6.8           | 0.79  | 0.0009  |
| 10.0      | 7.2                              | 9.5           | 0.32  | 1.598   | 7.2                              | 8.5           | 0.46  | 3.73  | 7.2                              | 6.3           | 0.72  | 3.08  |
|           | 14.8                             | 8.7           | 0.41  | 0.0079  | 14.8                             | 8.3           | 0.51  | 0.082   | 14.8                             | 6.1           | 0.78  | 0.022   |
| 5.0       | 15.0                             | 9.5           | 0.39  | 0.029   | 15.0                             | 9.0           | 0.48  | 0.231   | 15.0                             | 6.4           | 0.77  | 0.111   |

不規則波による防波設岸の越波流量

付表-5 規則波による越波流量の測定値 (1)

(直立壁)

| T<br>(sec) | H <sub>1</sub><br>(cm) | q (cm <sup>3</sup> /cm·sec) |             |              |             |              |           |             |              |
|------------|------------------------|-----------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|
|            |                        | 水底勾配 1/30                   |             |              |             |              | 水底勾配 1/10 |             |              |
|            |                        | h<br>h <sub>c</sub>         | 22.5<br>7.0 | 22.5<br>18.8 | 15.0<br>7.3 | 15.0<br>11.0 | 0<br>7.3  | 15.0<br>7.4 | 15.0<br>10.8 |
| 1.66       | 4.7                    | —                           | —           | —            | —           | —            | 0.168     | —           | 0.076        |
|            | 5.9                    | 1.15                        | —           | —            | —           | —            | —         | 0.71        | —            |
|            | 7.2                    | 5.46                        | —           | 11.83        | 1.98        | —            | 9.98      | 2.15        | 0.71         |
|            | 9.4                    | 18.88                       | —           | 34.22        | 15.61       | —            | 27.83     | 15.51       | 3.19         |
|            | 10.2                   | —                           | 2.77        | —            | —           | —            | —         | —           | —            |
|            | 11.2                   | 43.43                       | —           | 33.22        | 22.41       | —            | 48.52     | 28.38       | 6.04         |
|            | 12.6                   | 69.74                       | 22.33       | —            | 11.83       | —            | 64.09     | 40.83       | 11.16        |
|            | 15.7                   | 69.99                       | 16.11       | 26.44        | 11.08       | —            | 75.16     | 53.28       | 16.70        |
|            | 18.8                   | 51.99                       | 10.89       | 31.97        | 13.34       | 0            | 62.99     | 41.84       | 16.62        |
|            | 20.7                   | 57.40                       | 11.96       | 39.28        | 18.88       | 0.363        | 67.47     | 41.29       | 20.23        |
|            | 23.9                   | 65.46                       | 20.82       | 66.47        | 26.12       | 0.436        | 78.22     | 39.78       | 31.72        |
|            | 27.0                   | 76.54                       | 20.31       | 56.40        | 35.75       | 0.734        | 79.05     | 39.95       | 28.03        |
| 2.79       | 4.6                    | —                           | —           | 4.18         | —           | —            | —         | —           | —            |
|            | 5.3                    | 1.28                        | —           | 7.62         | 2.09        | —            | 0.44      | —           | 1.00         |
|            | 6.8                    | 5.90                        | —           | 20.16        | 8.51        | —            | 5.26      | 2.69        | 3.19         |
|            | 8.2                    | 14.70                       | 0.44        | —            | 16.73       | —            | 14.54     | 6.19        | 6.37         |
|            | 9.8                    | 29.45                       | —           | 35.25        | —           | —            | 26.88     | 10.95       | —            |
|            | 10.6                   | —                           | 5.82        | —            | —           | —            | —         | —           | —            |
|            | 11.4                   | 44.80                       | —           | —            | —           | —            | 38.83     | 16.13       | 18.22        |
|            | 13.1                   | 57.10                       | —           | 41.82        | 18.22       | —            | 51.87     | 23.70       | —            |
|            | 14.3                   | 69.30                       | 12.40       | —            | —           | —            | 62.43     | 33.05       | 35.64        |
|            | 16.1                   | 78.85                       | —           | 45.20        | 21.80       | —            | 78.85     | 42.41       | —            |
|            | 17.4                   | 89.61                       | —           | —            | —           | —            | —         | —           | 56.75        |
|            | 18.2                   | —                           | 20.24       | —            | —           | —            | —         | —           | —            |
|            | 19.3                   | 98.69                       | —           | 52.57        | 26.28       | 0.0          | 107.33    | 63.92       | —            |
|            | 20.9                   | 115.65                      | —           | —            | —           | —            | —         | —           | 85.42        |
|            | 22.7                   | 124.43                      | 32.46       | 65.51        | 37.24       | 0.319        | 131.02    | 78.85       | 95.38        |
| 28.2       | 162.34                 | 56.75                       | 87.62       | 47.19        | 1.444       | 158.11       | 111.71    | 128.93      |              |
| 33.3       | 142.62                 | 58.24                       | 96.18       | 51.77        | 3.909       | 138.59       | 105.74    | 79.15       |              |

注：波高 H<sub>1</sub> の測定水深は h<sub>1</sub>=60 cm である。

付表-6 規則波による越波流量の測定値 (2)

[水底勾配 : 1/10]

| T<br>(sec) | H <sub>1</sub><br>(cm) | q (cm <sup>3</sup> /cm·sec) |        |                         |        |                         |        |                         |        |
|------------|------------------------|-----------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
|            |                        | h=10.0 cm                   |        |                         |        | h=5.0 cm                |        |                         |        |
|            |                        | h <sub>c</sub> =7.4 cm      |        | h <sub>c</sub> =15.0 cm |        | h <sub>c</sub> =11.0 cm |        | h <sub>c</sub> =14.9 cm |        |
|            |                        | V                           | B      | V                       | B      | V                       | B      | V                       | B      |
| 1.70       | 3.4                    | —                           | —      | —                       | —      | 0.857                   | —      | —                       | —      |
|            | 4.5                    | 3.21                        | 0      | 0                       | —      | 1.469                   | 0      | 1.224                   | —      |
|            | 6.9                    | 22.92                       | 0.826  | 4.32                    | 0      | 1.224                   | 0.082  | 0.734                   | 0.122  |
|            | 9.4                    | 34.61                       | 11.57  | 7.41                    | 0      | 2.57                    | 1.259  | 0.734                   | 0.326  |
|            | 11.9                   | 53.52                       | 29.44  | 9.49                    | 0.857  | 4.41                    | 7.90   | 1.224                   | 0.816  |
|            | 14.1                   | 67.80                       | 51.14  | 18.54                   | 4.13   | 11.02                   | 16.83  | 4.41                    | 4.70   |
|            | 16.0                   | 70.97                       | 67.80  | 14.08                   | 10.16  | 11.75                   | 20.01  | 3.80                    | 7.83   |
|            | 18.2                   | 76.12                       | 78.50  | 18.67                   | 16.80  | 13.83                   | 19.68  | 4.65                    | 9.30   |
|            | 21.2                   | 84.45                       | 92.77  | 18.67                   | 24.48  | 19.10                   | 23.50  | 6.99                    | 10.04  |
|            | 23.8                   | 84.45                       | 95.15  | 20.32                   | 21.91  | 25.13                   | 30.85  | 8.57                    | 28.89  |
|            | 26.0                   | 79.29                       | 86.43  | 15.12                   | 22.72  | 13.00                   | 32.87  | 9.43                    | 15.99  |
| 26.6       | 81.28                  | 83.66                       | 18.21  | 21.33                   | 23.99  | 37.88                   | 10.28  | 15.34                   |        |
| 2.28       | 2.2                    | —                           | —      | —                       | —      | 0.037                   | —      | —                       | —      |
|            | 2.7                    | 0                           | 0      | —                       | —      | 0.418                   | 0      | 0.209                   | —      |
|            | 4.4                    | 6.33                        | 0      | 0.275                   | —      | 0.735                   | 0      | 0.837                   | 0      |
|            | 6.2                    | 16.76                       | 2.01   | 3.56                    | —      | 1.517                   | 0.078  | 0.523                   | 0      |
|            | 8.0                    | 29.89                       | 12.03  | 6.07                    | 0      | 3.79                    | 0.680  | 0.523                   | 0.418  |
|            | 10.2                   | 40.93                       | 28.77  | 10.25                   | 1.18   | 7.30                    | 5.49   | 1.360                   | 0.488  |
|            | 12.0                   | 52.52                       | 44.39  | 13.76                   | 4.16   | 12.45                   | 12.29  | 3.56                    | 1.709  |
|            | 14.0                   | 58.62                       | 59.30  | 14.86                   | 11.56  | 17.37                   | 15.06  | 5.54                    | 4.29   |
|            | 16.1                   | 64.72                       | 74.88  | 16.24                   | 19.98  | 20.50                   | 26.62  | 9.10                    | 9.00   |
|            | 18.6                   | 68.11                       | 88.10  | 19.62                   | 26.86  | 26.68                   | 36.30  | 7.95                    | 13.60  |
|            | 21.0                   | 91.83                       | 97.59  | 22.62                   | 35.52  | 32.14                   | 41.85  | 10.67                   | 14.65  |
|            | 24.7                   | 96.91                       | 100.97 | 17.99                   | 29.48  | 29.92                   | 41.85  | 14.65                   | 15.90  |
|            | 30.3                   | 107.11                      | 115.54 | 30.86                   | 36.26  | 41.43                   | 48.79  | 19.04                   | 15.80  |
| 32.0       | 118.59                 | 141.63                      | 39.65  | 53.54                   | 61.75  | 64.38                   | 23.79  | 25.11                   |        |
| 33.5       | 129.10                 | 154.51                      | 53.98  | 65.40                   | 49.01  | 84.71                   | 27.41  | 38.71                   |        |
| 2.86       | 3.8                    | 0                           | —      | —                       | —      | —                       | —      | 0.116                   | —      |
|            | 5.2                    | 2.00                        | 0      | —                       | —      | 0.291                   | —      | 0                       | —      |
|            | 6.5                    | 9.84                        | 1.80   | 0.960                   | —      | 1.047                   | 0      | 0                       | 0      |
|            | 8.2                    | 20.46                       | 11.49  | 2.44                    | 0      | 3.64                    | 0.436  | 0                       | 0      |
|            | 9.7                    | 32.15                       | 26.36  | 4.77                    | 0      | 7.22                    | 4.28   | 0.436                   | 0      |
|            | 11.2                   | 49.76                       | 45.36  | 6.84                    | 0.533  | 13.06                   | 12.40  | 2.68                    | 1.51   |
|            | 12.8                   | 63.71                       | 65.97  | 9.66                    | 5.97   | 22.26                   | 24.53  | 6.75                    | 7.22   |
|            | 14.5                   | 76.53                       | 85.20  | 14.03                   | 17.31  | 28.89                   | 38.41  | 10.24                   | 16.29  |
|            | 16.3                   | 86.71                       | 104.42 | 17.11                   | 29.77  | 37.83                   | 50.90  | 17.23                   | 28.40  |
|            | 20.5                   | 125.53                      | 146.65 | 38.18                   | 64.46  | 56.25                   | 80.10  | 33.75                   | 57.85  |
|            | 25.4                   | 150.79                      | 185.47 | 63.43                   | 94.25  | 87.84                   | 124.41 | 57.86                   | 88.45  |
|            | 32.2                   | 159.84                      | —      | 91.25                   | 125.91 | 102.92                  | 155.32 | 72.16                   | 117.44 |

注：記号 V は直立壁，記号 B は消波護岸を表わす。