

# 砕波移行領域における波圧の変化に関する実験

合 田 良 実\*・吉 村 知 司\*・福 森 利 夫\*\*

## 1. ま え が き

直立壁に働く波圧については非常に多くの研究が行なわれているけれども、未解決の問題も数多く残されている。たとえば、現行の設計公式であるサンフルーと広井の波圧式は不連続であり、また両式とも波圧の測定値に必ずしも一致しない。しかし、この差を埋め、統一的な波圧公式を樹立する試みは未だ成功していない。

一つの大きな障害は、重複波から砕波への移行領域における波圧の変化が十分に把握されていないことである。そこでわれわれは、これについて系統的なデータを得ることを目的として 1969 年度から一連の実験を行っている。データ整理はまだ完了していないが、ここに実験結果の概要を報告する次第である。

## 2. 実験の方法

### (1) 実験 波

最近の防波堤工事は、船舶の大型化に伴って次第に水深の大きな箇所に移っている。実験波の選定にあたってはこの点を考慮して、水深波長比  $h/L_A$  を 0.1, 0.14, 0.2, および 0.3 の 4 種類に選び、その条件において波高を徐々に増大させて、重複波から砕波を経て砕波後の波までが作用するようにした。また、水底勾配は防波堤の建設例を参照して 1/100 とした。表—1 に実験条件を示す。

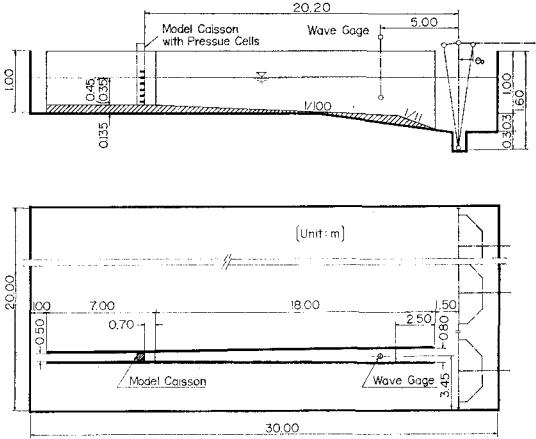
表—1 実験 波 の 要 目

| $h/L_A^*$ | $h$ (cm) | $T$ (sec) | $H_I$ (cm)** | 測定対象      |
|-----------|----------|-----------|--------------|-----------|
| 0.10      | 35       | 2.007     | 7.1~31.2     | 第 5~9 波   |
| 0.14      | 45       | 1.712     | 6.7~41.6     | 第 6~12 波  |
| 0.20      | 45       | 1.302     | 7.6~32.8     | 第 9~16 波  |
| 0.30      | 45       | 1.005     | 9.2~22.9     | 第 14~22 波 |

注 \*)  $L_A$  は微小振幅波としての波長である。  
\*\*) 砕波後の波高は、沖合の測定値から推定した仮想通過波高である。

### (2) 実験水路および実験方法

水深波長比が 0.2 程度より大きな場合は、水深の減少によって波高も減少するため、造波板の振幅を上げていくと造波板の前面でまず波が砕けてしまい、模型壁体の



図—1 実験水路の概要

所で丁度砕けるような波を作ることができない。この実験では、図—1 のように長さ 18 m にわたって幅を 80 cm から 50 cm に漸縮した水路を臨時に製作し、砕波状況をコントロールできるようにした。

実験は波の検定と波圧測定とに分けて行なった。検定には造波板中心から 5 m の位置、および模型設置予定位置をはさんで 1/4 波長離れた 2 点、の 3 箇所に波高計を置き、各水深・周期に対しあらかじめ選定した造波板の振幅ごとに測定を繰り返した。この際、振幅設定の誤差を少なくするため、各振幅ごとに 3 回繰り返して全数を終えたならば、また最初から振幅を設定し直して各振幅ごとに 3 回繰り返す、結局、各振幅について 6 回の測定記録を取得した（造波板の始動位置は一定とした）。波圧測定の場合も同様に 3 回ずつ 2 度、計 6 回ずつの記録を求めた。また、波群の到達時刻および反射波の往復時間を考慮して、測定対象の波を表—1 のように定め、各波番号ごとに平均値を求めた。

図—2 は  $T=1.712$  sec の場合の波高測定結果で、各データは波番号ごとの各 6 回の平均値を示している。模型位置の  $x=20.2$  m の波高は造波板の振幅が  $e_0=17$  cm 付近で最大で、これ以後は沖側で砕けるため波高が減少する。このため、砕波以前の波について  $x=20.2$  m の波高  $H_2$  と  $x=5.0$  m の波高  $H_1$  との比が波高によって変化する傾向を求めておき、砕波後の波についてはこの傾向を外挿した値を  $H_1$  に乗じて仮想通過波高を推定した。各振幅に対するこの推定波高の平均値は、図中の

\* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部  
\*\* 運輸省港湾技術研究所 水工部

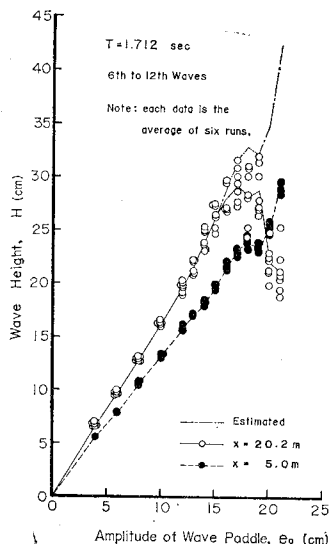


図-2 波の検定結果の例  
( $T=1.712$  sec)

一点鎖線で示されている。なお、波圧の整理にあたっては、波高としてすべて  $H_2$  または仮想通過波高を用いている。

### (3) 模型壁体および波圧計

壁体としては、以前から使用している鋼鉄製の箱（高さ 50, 30 および 15 cm）を組み合せ、重錘を入れて安定させた。壁体の先端高としては越波を許さないだけ十分高い場合および静水面上 5 cm の 2 種類とした。

波圧計は U ゲージ型の製品を用いた。受圧面の直径は 20 mm である。静水面を中心にして 10 cm 間隔で 4~6 個をねじ込みにより取り付けた。また底面にも波圧計を取り付けて揚圧力の測定を行なったが、この結果については前面波圧のとりまとめ結果とあわせて港湾技術研究所報告に発表する予定である。

なお、波圧測定の際には直立壁の前 1 cm の所にステップ型と抵抗線型を併置した自動検定式の波高計<sup>1)</sup>を置き、前面の水位変化を記録させた。

## 3. 進行波および重複波の碎波限界

進行波については、模型設置位置で測定した各波番号ごとの平均波高の最大値をもって碎波高と見なした。図-2 では 31.7 cm であり  $H_b/h=0.71$  となる。

重複波については、毎回各波ごとに壁面に作用する波形を観察し、重複波、部分碎波、碎波に分類した。部分碎波は波頂の走り上り、あるいは若干の崩れが見られるもの、碎波は明瞭な跳波を伴うものとした。波の状態は繰返し測定の各回ごとに若干変化するので、6 回の繰返し観察波形の分類が不揃いなときは、最も多い分類値を代表として用いた。この分類結果を通過波高と比較することにより、重複波と部分碎波、および部分碎波と碎波

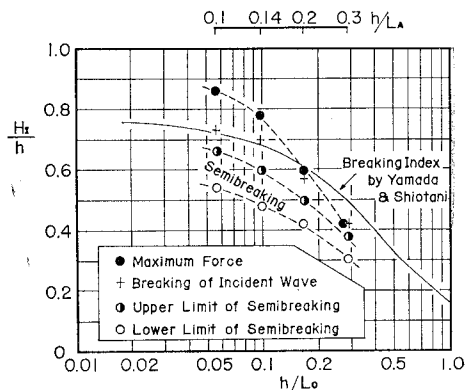


図-3 重複波および進行波の碎波限界波高比

の境界に相当する波高を決定することができた。

図-3 はこの結果を示すもので、重複波の碎波限界は進行波の碎波限界の約 70% でかなり低い。また、部分碎波と見なされる領域は碎波高の 15~20% の幅を持っている。なお、波圧波形が双峰型となり、最初のピークが第 2 のピークよりも高くなる限界は、部分碎波の下限値にほぼ相当する。進行波の碎波限界は山田・塩谷の理論計算<sup>2)</sup>に基づく一様水深部の碎波指標<sup>3)</sup>にほぼ一致する。 $h/L_A=0.3$  の場合は実験値が 16% ほど低いが、これは  $h/L_A$  が大きくなるにつれて碎波近傍の波の波高変動が大きくなり、6 回の繰返し測定の平均値をとる際に碎波前あるいは碎波後の波も含まれてしまうことに起因すると思われる。

この図にはまた、波圧の絶対値が最大となる波高も示してある。これは進行波としての碎波高よりも大きな仮想通過波高のときに生じ、この差は  $h/L_A$  が小さいほど著しい。最大の波力を示す波高が碎波高よりも大きい現象は、光易<sup>4)</sup>が指摘した「碎波点よりもやや岸側で波力が最大となる現象」と同じである。ただし光易のデータに比べると、今回の実験値は  $H/h$  の値がやや大きい。

## 4. 重複波における波高の増大現象

先に発表した重複波圧の研究<sup>1)</sup>では、前面波高の 1/2 を入射波高と見なして理論計算および実験値の整理を行なった。しかしその後の理論計算<sup>5)</sup>によって、直立壁の前面に形成される重複波の波高は入射波高の 2 倍よりも若干大きくなることが明らかになった。すなわち、第 3 次近似解においては、入射波高および前面波高が次のように与えられる。

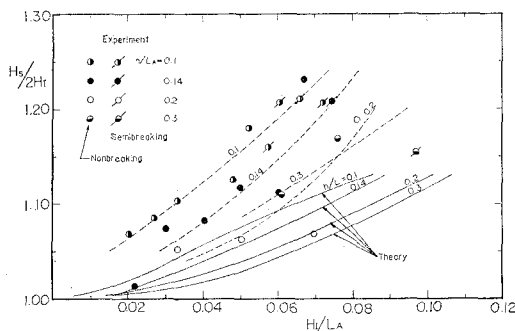
$$kH_I = 2\varepsilon + \varepsilon^3(b_{11} + b_{33}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$kH_S = 4\varepsilon + 2\varepsilon^3[(b_{11} + b_{33}) + (b_1 + b_{31} + b_{13})] \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $k$ : 波数、 $H_I$ : 入射波高、 $H_S$ : 壁前面の重複波の波高、 $b_{mn}$ :  $\coth kh$  のべき級数で表わされる係数である。式 (2) の  $\varepsilon^3$  の係数の第 2 項は常に正の値をと

るので、 $H_s > 2H_I$  となる。

今回の実験データについて前面波高と入射波高とを比較して波高の増大率を求め、理論値と比較した結果が図—4である。実験値は造波板の振幅ごとの平均値である。また理論計算では、重複波を形成することによって  $k$  が変化する現象のため取り扱いが面倒であるが、ここでは式 (1) の  $k$  は重複波の波数であると見なした。



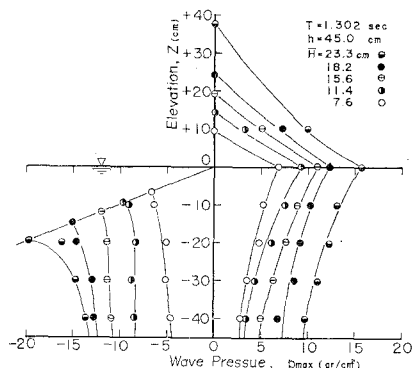
図—4 重複波の波高増大率

図—4 によると、重複波における波高の増大現象は実験的にも認められる。ただし、増大率は理論値よりも大きくて 20% 以上のこともある。このように重複波の波高が入射波高の 2 倍以上になることは、実験手法として重複波高の 1/2 を入射波高と見なす便法が成立せず、あらかじめ模型設置位置における入射波高を検定しておくことの必要性を示している。

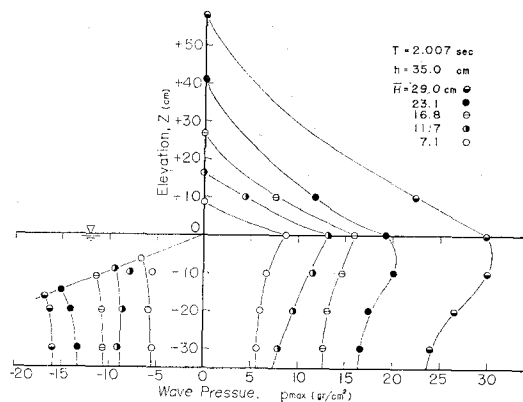
## 5. 波高増大に伴う波圧の変化

### (1) 波圧分布

壁面の各高さの波圧の最大値 (山) および最小値 (谷) の分布を求めた結果の例を 図—5, 6 に示す。データはいずれも造波板の振幅ごとに 35~54 波を平均した値である。図—5 の  $T=1.302$  sec の場合は、波高が増大しても波圧分布の形状に変化が見られず、ほぼ波高に比例して波圧が増大する。図—6 の  $T=2.007$  sec の場合は、



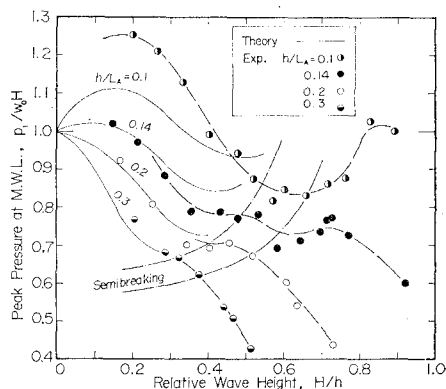
図—5 最大・最小波圧の鉛直分布 ( $T=1.302$  sec)



図—6 最大・最小波圧の鉛直分布 ( $T=2.007$  sec)

$H/h=0.6$  を超える付近から静水面よりもやや下で波圧分布の極大が現われるようになり、重複波圧とは異なる分布形状を示す。波圧分布の形のひずみは  $T=1.712$  sec の場合にも現われるが、 $T=2.007$  sec の場合ほど著しくない。

波圧と波高との関係を静水面の高さについて調べると 図—7 のようになる。波圧はその最大値を  $w_0 H$  (ただ



図—7 静水面における波圧強度  $p_1/w_0 H$  の変化

し  $w_0$  は水の単位体積重量) で割って無次元化してある。図中の細い実線は先に発表した有限振幅重複波の理論値<sup>1)</sup>で、式 (1), (2) による波高の補正を行なってある。 $h/L_A=0.1$  の  $H/h$  の小さい部分で実験値が過大な値を示しているが、これは測定の絶対値が小さいための誤差と思われる、これを除くと重複波の範囲では理論値と実験値がほぼ一致している。波高がさらに大きくなって部分砕波から砕波の領域に入ると、 $p_1/w_0 H$  の値は一樣に減少を続ける。 $h/L_A=0.1$  の場合は  $H/h \approx 0.85$  で若干増大するけれども、その最大値でも  $p_1/w_0 H \approx 1.0$  であり、広井公式の  $1.5 w_0 H$  の値には到底およばない。

このように前面の波形が明らかに砕波の場合でも、波圧の値としては意外に小さい。また、重複波から部分砕波、砕波へと移る過程における波圧の変化は連続的に徐

徐に起こり、波圧の値を見て重複波か砕波かを判断することは困難である。

## (2) 波圧合力および平均波圧

次に波圧分布の積分によって波圧の合力を求めた結果を図-8に示す。この波圧合力は、図-5, 6のような波

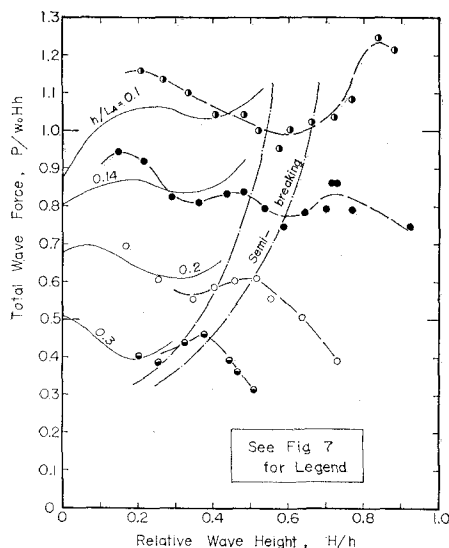


図-8 波圧合力の最大値  $P/w_0 H h$  の変化

圧の各ピークの積分ではなく、同時波圧の合力の最大値である。ただし、時刻を少しずつ変えて同時波圧の合力の変化を調べるのは大変なので、静水面の波圧が最大となる時刻について積分を行ない、これを波圧合力の最大値と見なした。この計算は測定記録の全波数について行ない、その結果を各波番号、造波板の各振幅ごとに平均した。図-8は造波板振幅ごとの平均値で、波圧合力を  $w_0 H h$  で割って無次元表示してある。個々の波の値は標準偏差値で 20% 以上ばらつくことがあり、特に部分砕波および砕波領域における変動が著しい。

図-8の結果は、図-7と同じように重複波領域ではほぼ理論値に一致し、部分砕波から砕波領域に移っても波圧合力には顕著な変化が見られない。図-7とやや異なるのは、 $H/h$  が增大しても  $P/w_0 H h$  があまり減少しないことである。これは波高の増大によって波圧の作用範囲が広がるための見掛け上の現象で、平均波圧強度としては  $H/h$  の増大につれて減少する。図-9は波圧の作用範囲を静水面上  $H$  の高さまでとして求めた平均波圧の変化であり、砕波領域の平均波圧としては  $h/L_A = 0.1$  で  $\bar{p}/w_0 H = 0.65$ 、 $h/L_A = 0.2$  で  $\bar{p}/w_0 H = 0.4$  程度である。

伊藤<sup>6)</sup> は不規則波による模型堤体の滑動限界に基づいて  $H/d \leq 1$  (ただし  $d$  は混成堤マウンド上の水深) に対して  $\bar{p} = 0.7 w_0 H$  の波圧式を提案し、これを用いて期待滑動量の計算を行なっている。このときの水深波長

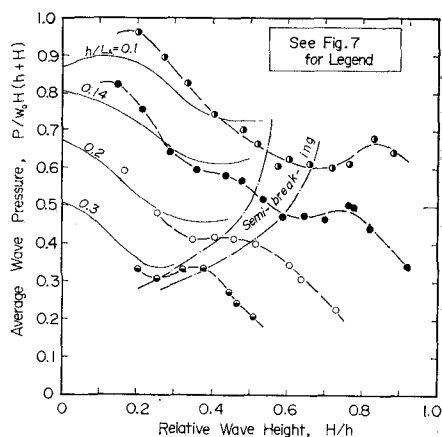


図-9 平均波圧強度  $P/w_0 H (h+H)$  の変化

比は  $h/L_A = 0.10$ ,  $d/L_A = 0.08$  であり、今回の実験による平均波圧とほぼ等しい。逆にいえば、 $h/L_A$  の大きい領域ではさらに低い値の平均波圧式が導かれるものと予想される。また、光易<sup>7)</sup> による全波力の測定結果では、海底勾配 1/50,  $H_0/L_0 = 0.032$  の波で  $P/w_0 H_b h = 0.9 \sim 1.8$ ,  $H_0/L_0 = 0.067$  の波で  $P/w_0 H_b h = 0.6 \sim 0.9$  である ( $H_0$  を  $H_b$  に換算)。このときの水深波長比は前者で  $h/L_A = 0.06 \sim 0.10$ , 後者で  $h/L_A = 0.09 \sim 0.15$  であるから、上記のデータは図-8の値にほぼ合致している。

光易の実験において強大な砕波圧が発生しているのは、 $h/L_A$  がさらに小さい領域あるいは海底勾配が急な場合に限られている。したがって、今回の実験のように海底勾配が 1/100 ときわめて緩やかで、しかも  $h/L_A$  が大きい場合には、強い砕波圧が測定されないのがむしろ当然であろう。

## 6. 越波による波圧の変化

壁体の天端高が 5 cm の場合の波圧分布の例を図-10に示す。越波のないときと比べると、波高の増大につれて越波のために波頂高が低下し、静水面付近の波圧が減少する。しかし、水底付近ではほとんど変化がなく、むしろ若干増加の傾向が見られる。永井ほか<sup>7), 8)</sup> は重複波

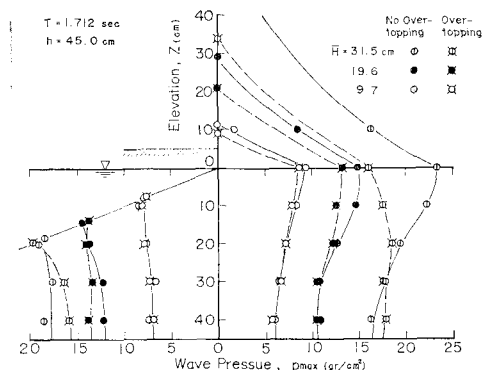


図-10 越波による波圧分布の変化 ( $T = 1.712$  sec)

領域では越波によって波圧強度が一様にわずかに減少することを示しているが、低基混成堤では直立部下部の波圧強度が増すとも述べている。

静水面および水底の最大波圧について越波の有無による波圧の変化を調べると、図-11, 12 のようになる。図

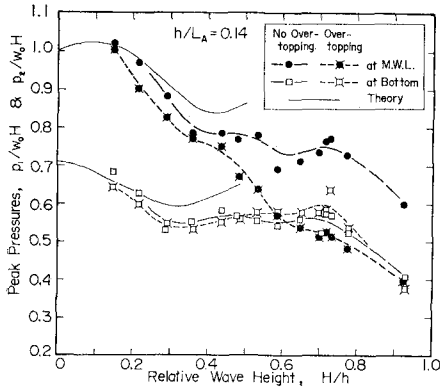


図-11 越波による静水面および水底波圧強度の変化 ( $T=1.302$  sec)

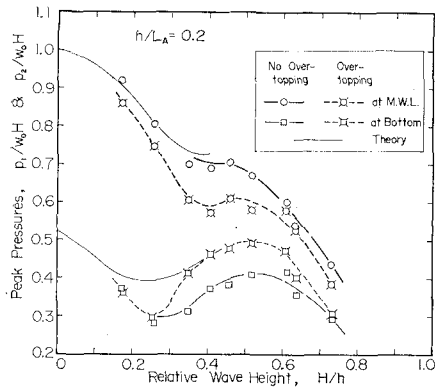


図-12 越波による静水面および水底波圧強度の変化 ( $T=1.712$  sec)

—11 は  $T=1.712$  sec の波で  $h/L_A=0.14$ 、図-12 は  $T=1.302$  sec の波で  $h/L_A=0.2$  である。 $h/L_A=0.14$  の場合、波高の増大に伴う静水面付近の波圧の相対的減少が著しいため、水底の波圧の方が大きくなっている。このようなときは、図-10 にも現われているように波圧分布の極大値が静水面よりもかなり下に現われる。 $h/L_A=0.2$  の場合は静水面の波圧の減少があまり著しくなく、一方、越波によって水底の波圧が増加する傾向が明らかに現われている。いずれにしても、越波が生ずると波圧の分布が一様化される傾向にある。また波圧の時間変化曲線の形も双峯型波形の最初のピークが高くなり、いわゆる砕波圧曲線の形を示す場合が多い。

次に同時波圧の合力の最大値を求め、平均波圧強度を計算した結果の一部を図-13 に示す。比較のために、越波のないときの平均波圧強度のデータ(図-9)も併示してあるが、波高の増大に伴って、天端高が低い方が若干大きな平均波圧強度を示す傾向が見られる。この一つ

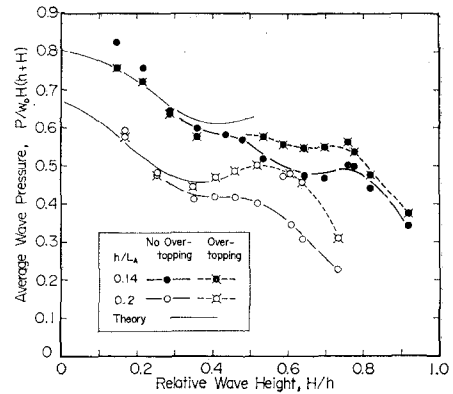


図-13 越波による平均波圧強度の変化

の理由は、越波しないときには水底から静水面上  $H$  の高さまで波圧が作用するものとして平均波圧強度を計算したためである。静水面から上の波圧はほぼ三角形の分布をするので、この部分を波圧の作用範囲に入れると平均値が低くなる。さらに、波高が大きい場合は水面が  $\eta=(0.6\sim 0.9)H$  程度上昇したときに波圧合力が最大となる。したがって、図-13 で越波時の平均波圧強度の方が大きいのはある程度見掛け上の現象である。しかしながら、少なくとも海底勾配が緩やかで比較的水深の大きな場所では、直立壁の天端高を下げても波圧強度は減少せず、平均波圧で見るとむしろ若干増加する傾向にさえあるといえよう。

## 7. む す び

この実験によって確認された事項は次のとおりである。

- (1) 重複波の波高は入射波高の 2 倍値よりも最大 20% 以上大きく、この波高増大率は第 3 次近似解による理論値よりも大きい。
- (2) 重複波の砕波限界は進行波の砕波限界の約 70% である。
- (3) 波圧の絶対値が最大となるのは、進行波の砕波限界よりも大きな入射波高の波が作用するときである。
- (4) 重複波から部分砕波、砕波に移行する際の波圧の変化は連続的であり、波圧の値から砕波か否かを判断することは困難である。
- (5) 海底勾配  $1/100$ 、水深波長比  $h/L_A \geq 0.1$  の条件では強大な砕波圧が発生せず、砕波による波圧を波の作用範囲について平均した値は、 $h/L_A=0.1$  で  $\bar{p} \approx 0.65 w_0 H$ 、 $h/L_A=0.2$  で  $\bar{p} \approx 0.4 w_0 H$  程度である。
- (6) 壁体の天端高が低くて越波が生ずる場合は、静水面付近の波圧が減少するけれども、水底付近の波圧はほとんど変わらず、逆にやや増加する傾向が見られる。
- (7) 波圧を全断面について平均した値は、越波が生ずる場合でも減少しない。

以上の実験結果は防波堤の設計波圧について幾つかの問題点を投げかける。たとえば、i) 水深の大きな箇所では設計波圧を小さくとれるのではないか、ii) 越波を防ぐため天端高を嵩上げしても堤体の補強は不要ではないか、iii) 混成堤のマウンドはできるだけ低くする方が波圧の面からは有利ではないか、などである。今後さらに検討を進めて行きたい。

なお本実験の実施にあたっては、港湾技術研究所水工部波浪研究室の笹田 正技官の協力を得たことを記し、謝意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 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9月，57 p.
- 2) Yamada, H. and T. Shiotani: On the highest water waves of permanent type, Bull. Disaster Prevention

Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 18, Pt. 2, No. 135, 1968, pp. 1~22.

- 3) 合田良実：碎波指標の整理について，土木学会論文報告集，第180号，1970年8月，pp. 39~49.
- 4) Mitsuyasu, H.: Experimental study of wave force against a wall, Rept. Transportation Tech. Res. Inst., No. 47, 1962, 39 p.
- 5) Goda, Y. and Y. Abe: Apparent coefficient of partial reflection of finite amplitude waves, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 7, No. 3, Sept. 1968, pp. 3~58.
- 6) 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄：防波堤の安定性に関する研究，港湾技術研究所報告第5巻14号，1966年9月，134 p.
- 7) 永井莊七郎・時川和夫・大坪崇彦：不規則な重複波の波圧，第13回海岸工学講演会講演集，1966年12月，pp. 102~105.
- 8) 永井莊七郎・大坪崇彦：低基混成堤に働く波圧，第15回海岸工学講演会講演集，1968年12月，pp. 109~114.