

# 潜堤の効果について

石原 藤次郎・榎 木 亨

## ON THE EFFECTS OF SUBMERGED BREAKWATERS ON WAVE ACTION

by Dr. Eng. Tojiro ISHIHARA and Toru SAWARAGI

### Synopsis

Recently a submerged breakwater has been considered to be suitable as an active protective construction for the maintenance of shorelines and sea dikes.

The effects of the submerged breakwater on wave action have been studied by many researchers who have worked on the damping effects on wave heights by submerged breakwaters being set on a horizontal sea bottom. However, the functions of submerged breakwaters set on an inclined beach including the surf zone have been scarcely studied.

In this paper, the authors have studied experimentally and theoretically on the effects of submerged breakwaters set in the surf zone, especially on the effects, by which the wave overtopping of sea dike is weakened, and the damping effects of wave heights by using the results from a model test of the beach from Suma to Shioya.

### 1. 緒 言

潜堤は静水面より低い天端をもつた離岸堤であつて、その機能の主なるものとして、海浜土砂の沖方向への流失防止と潜堤の背後領域における波高減殺とをあげることができる。この場合、波高減殺能力は静水面上に天端を出している海岸構造物、たとえば防波堤などに較べてきわめて低いが、堤体にうける波力が小さいため、その構造は比較的簡単であつて、工費を軽減することができる。こうした意味から、近年わが国においても潜堤は海岸線を維持し、さらにそれを前進せしめるという積極的な浸食防止対策として、また既設護岸の防護対策として、広く用いられるようになった。新潟海岸における潜堤は前者の代表的な一例であり、明石海岸で現在国鉄が施工している潜堤は後者の一例である。

この潜堤にともなう水理現象、とくに波高の減衰については、比較的古くから Jeffreys<sup>1)</sup>, Dean<sup>2)</sup>, John<sup>3)</sup> および J.W. Johnson-Fuchs<sup>4)</sup> などが解析的研究を行い、Beach Erosion Board<sup>5),6)</sup> や Morison<sup>7)</sup> などが実験的研究を行つている。わが国でも最近久宝や堀川・鮮<sup>8)</sup> などが実験を進め、波が潜堤を通過する場合の波高減衰や波の質量輸送にともなう水位上昇などの基礎的現象が逐次解明されてきている。しかしこれらの研究の多くは、水平勾配の海岸に潜堤を設置した場合の波高減衰効果に関するものであつて、傾斜海岸に潜堤を設置した場合、とくに砕波点およびその岸側に潜堤を設置した場合の効果については、十分な研究が行われていないようである。さきにも述べたように、潜堤の機能は主として海岸浸食の防止および海岸堤防の防護であるから、防波堤とは異なり、砕波点近傍あるいはその岸側に潜堤を設置することが少なくない。

そこで著者は、砕波現象をともなつた傾斜海岸に設置した潜堤の効果、とくに潜堤による護岸越し波の防止効果および波高減衰効果について、須磨—明石海岸を対象とした模型実験を行うとともに、砕波後も含めた波高減衰を理論的に解析し、実験結果に対する考察を進めることにした。

### 2. 潜堤による越し波防止効果

(1) 実験方法 実験には、京大防災研究所宇治川水理実験所の扇形水槽を用い、Fig. 1 に示すように

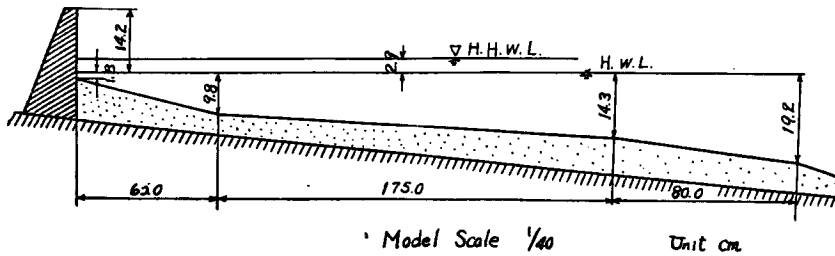


Fig. 1. Model Section of the Coast between Suma and Akashi.

須磨—明石の海岸を対象した模型海岸(縮尺1/40)に正面から波が来襲する場合を取り扱った。実験に用いた潮位は、ジェ

ーン台風時潮位および満潮位(HWL)の二つであり、波は沖波の波形勾配  $H_0/L_0$  が 0.0991 ~ 0.0218 の範囲についてそれぞれ8種類であつて、いずれの場合も潜堤の位置、高さ、天端幅および法面角度を変化させ、また潜堤の岸側部分に養浜した場合と、しない場合とにわけて、波のはね上り高さに及ぼす潜堤の効果を調べることにした。

(2) 波のはね上り高さと潜堤の位置および高さとの関係 実験結果のとりまとめにさきだつて、波のはね上り高さに影響する潜堤および波の諸量を、Fig. 2 に示すような記号であらわすことにする。すなわち、

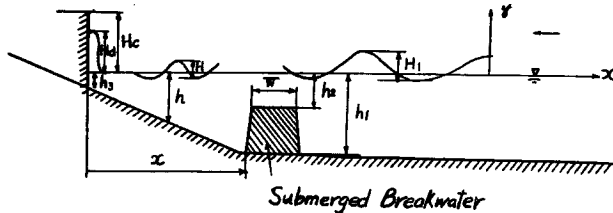


Fig. 2. Symbols and Dimensions used in Model Experiment.

$H_d$  は静水面からの波のはね上り高さ、 $H_c$  は静水面から護岸堤防天端までの高さ、 $h_1$  は潜堤前面の水深、 $h_2$  は静水面から潜堤天端までの水深、 $h_3$  は護岸堤防前面の水深、 $H_i$  および  $L_i$  はそれぞれ水深  $h_1$  における波高および波長、 $H_0$  および  $L_0$  はそれぞれ沖波の波高および波長、 $W$  は潜堤の天端幅、 $x$  は護岸堤防

から潜堤までの距離である。

波のはね上り高さに関する石原・岩垣・鈴木の研究<sup>9)</sup>によれば、護岸堤防の位置が砕波点の沖岸と岸側の二つの場合において考察せられ、前者では重複波理論、後者では Stoker の衝撃波理論<sup>10)</sup>によつて、波のはね上り高さが解析されることがわかつた。すなわち、波が砕ける前に堤防に当る場合には、そのはね上り高さは、反射率を 80 % と仮定して次式であらわされる。

$$\frac{H_d}{H_i} = 0.9 + \frac{0.81 \pi H_i}{L_i} \coth \frac{2\pi h_3}{L_i} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $H_i$  および  $L_i$  はそれぞれ水深  $h_3$  における入射波の波高および波長である。また、砕波後に堤防に当る場合は、Stoker の方法によつて、はね上り高さはつぎの関係から求められる。

$$\frac{H_d}{H_i} = f\left(\frac{h_3}{L_i}\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1) および (2) 式によると、波のはね上り高さ  $H_d$  は護岸堤防が砕波点の沖側および岸側のいずれにある場合でも、入射波の波高  $H_i$ 、波長  $L_i$  および堤防前面の水深  $h_3$  の関数としてあらわされている。この実験では、潜堤および養浜の有無によつて堤防前面における入射波の波高が変化するから、波の周期を沖と岸とで一定と仮定すると、つぎのような関数関係が考えられる。

$$H_i = f(H_0, L_0, h_1, h_2, h_3, W) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ところが  $H_i$  はまた  $H_0, L_0, h_1$  の関数であるから、これらの沖波諸量で  $H_i$  をあらわし、砕波後も  $L_i/L_0 = \tanh(2\pi h_3/L_i)$  なる関係が成立すると仮定すると、(1)、(2) および (3) の各式と Buckingham の  $\pi$

定理を用い、波のはね上り高さ  $H_d$  をつぎのようにあらわすことができる。

$$\frac{H_d}{H_0} = \phi\left(\frac{H_0}{L_0}, \frac{h_1}{L_0}, \frac{h_2}{h_1}, \frac{h_3}{L_0}, \frac{W}{L_0}\right) \dots\dots\dots (4)$$

なお、海岸勾配を  $i = \text{const.}$  とすると、

$$h_1 = h_3 + ix \dots\dots\dots (5)$$

であるから、(4) 式はつぎのように書きかえられる。

$$\frac{H_d}{H_0} = \phi'\left(\frac{H_0}{L_0}, \frac{h_2}{h_1}, \frac{h_3}{L_0}, \frac{x}{L_0}, \frac{W}{L_0}\right) \dots\dots\dots (6)$$

以下(6)式の無次元量を用い、満潮位およびジェーン台風時潮位(異常潮位)のそれぞれの場合について、 $H_0/L_0$  および  $h_3/L_0$  を一定として、潜堤の設置位置および高さの変化が波のはね上り高さに及ぼす影響を検討しよう。この場合、 $h_3$  を一定にすれば、それによつて  $L_0, H_0, H_c$  もまた一定となり、さらに波のはね上り高さに関する無次元量  $H_d/H_0$  も

$$H_d/H_0 = (H_d/H_c)(H_c/H_0) \dots\dots\dots (7)$$

なる関係によつて  $H_d/H_c$  におきかえることができる。こうした新表示法に従つて実験結果を処理して考察を進めるが、ここでは潜堤天端幅  $W=5\text{ cm}$  の場合だけを取り扱い、この天端幅が  $H_d$  に及ぼす影響については、後に改めて考察する。

Fig. 3 は上述の諸量を用い、ジェーン台風時潮位における波のはね上り高さや潜堤の高さおよび設置位置との関係を示したもので、縦、横軸にそれぞれ  $H_d/H_c$  および  $h_2/h_1$  をとり、護岸堤防から潜堤までの距離  $x$  をパラメーターとしている。なお、図には養浜の有無によつて測定記号を異にし、養浜の効果を明らかにしている。

Fig. 4 は  $H_d/H_c=1.0, 0.8, 0.5$  の三つの場合(ともに波のしぶきが護岸堤防を越えない)について、Fig. 3 の結果を用いて  $h_2/h_1$  と  $x$  との関係求めて図示したもので、 $H_0/L_0$  と  $T$  をそれぞれ一定とした実験ごとにとりまとめた。

Fig. 3 からわかるように、養浜していない場合には、 $H_0/L_0 \leq 0.0572$ ,  $h_3/L_0 \leq 0.0334$  なる波、すなわち穏かな波が入射してくると、潜堤を  $x=47\text{ cm}$  に設置した方が  $x=71\text{ cm}$  とした場合よりも波のはね上り高さ

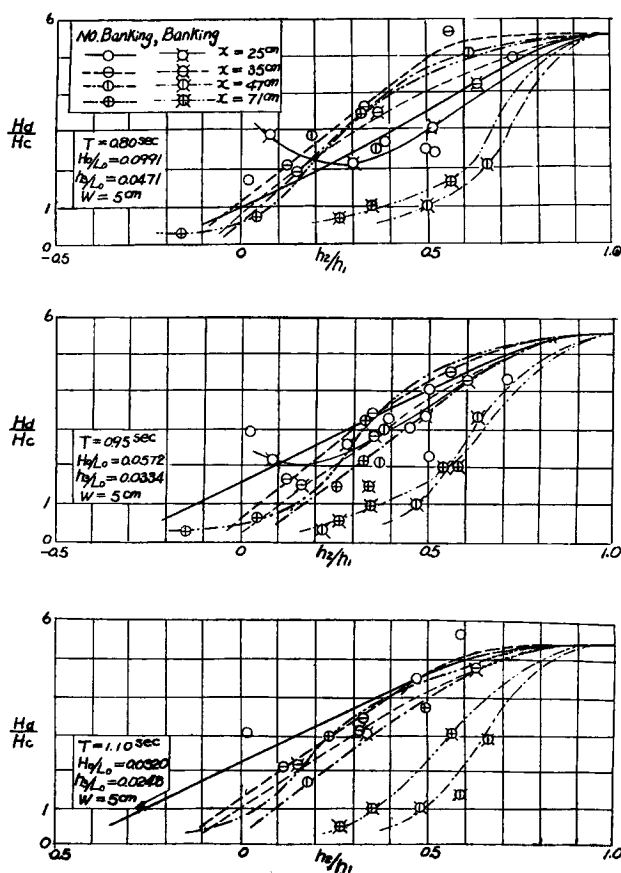


Fig. 3. Relationships of the Heights and Positions of Submerged Breakwater to the Overtopping Wave Heights in the Case of the Sea Level at Jean Typhoon.

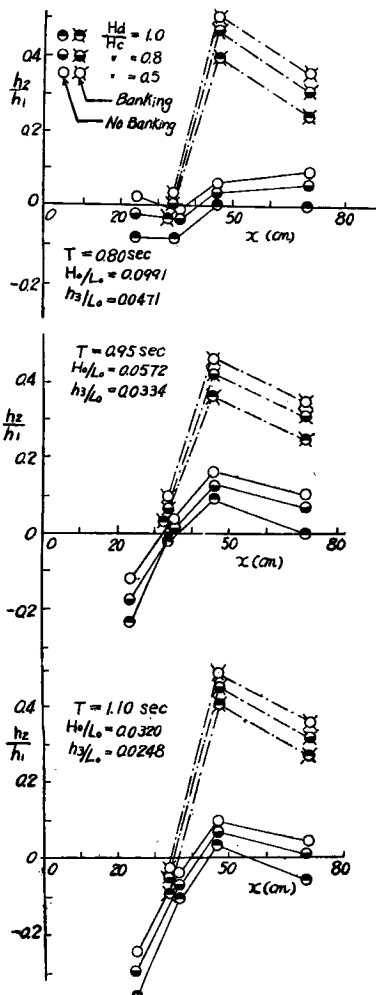


Fig. 4. Relationships of  $x$  to  $h_2/h_1$  for  $H_d/H_c=1.0, 0.8, 0.5$  in the Case of the Sea Level at Jean Typhoon.

になると、 $x=71$  cm と  $x=109$  cm とによつて  $h_2/h_1$  の値が大きく変化するが、波形勾配が約 0.040 以下になればなるほど、潜堤位置をそれぞれ上の両地点としたときの  $h_2/h_1$  の値に差異が少なくなる。これは波形勾配が大きいと、 $x=71$  cm で碎波点近傍となり、 $x=109$  cm の場合におけるような表面波の特性が失われて碎波の性質を帯びてくるため、潜堤による反射エネルギーが表面波の場合より大きいと解釈してよいであろう。

つぎに潜堤の位置  $x$  を一定とした場合には、養浜しなければ、Fig. 6 からわかるように、波形勾配が小さく周期の長い波ほど、 $h_2/h_1$  の値が小さくなつていく。これはさきにわれわれが行つた波のはねり高さの実験において<sup>9)</sup>、堤防前面の水深を一定とした場合、波形勾配の小さい波ほどはねり高さが大きくなつたという事実とよく一致している。

が減少している。その結果、Fig. 4 では  $x=47$  cm のところで、 $h_2/h_1$  が最大となつていく。このことは、 $H_0/L_0$  の比較的小さい波が入射してくると、 $x=47$  cm および 71 cm において  $h_1/L_0 > h_2/L_0 > h_3/L_0$  となつて、こうした場合同じ  $h_2/h_1$  の値に対する波高減衰率が  $h_1/L_0$  の小さいものほど大きくなるためと考えられる。この点については、微小振幅波理論を用いた Fuchs の理論<sup>4)</sup> による計算結果においても明らかである<sup>11)</sup>。なお、本実験の結果によると、 $H_0/L_0$  が大きい場合にはこうした結果がえられないが、これは  $x=71$  cm のところですでに碎波しているためであろう。

つぎに Fig. 4 からわかるように、波形勾配が小さく周期の長い波ほど、潜堤の設置位置が  $h_2/h_1$  の値に及ぼす影響が大きくなつていく。すなわち、波形勾配が大きい波では、潜堤の位置によつて  $h_2/h_1$  の値に大きい変化を与えないが、波形勾配が小さくなるにつれて、 $h_2/h_1$  の値は  $x$  の値によつて大きく変化する。このことは、波形勾配が大きい波では実験範囲内のどの潜堤位置でも潜堤のところすでに碎波しているのに対し、波形勾配が小さくなると、潜堤の位置によつてそれに表面波として入射する場合と碎波として入射する場合とがあり、入射波の性質が違ってくるためであろう。この場合、波形勾配が小さい波ほど、表面波として入射することが多く、碎波として入射する場合に較べて、一定の高さの潜堤によつて反射される伝達エネルギーが少なく、減高減衰の程度が減じてくるわけである。

Fig. 5 および Fig. 6 は満潮位の場合におけるもので、それぞれ Fig. 3 および Fig. 4 に対応するものである。Fig. 6 によると、養浜をしていない場合、どの波形勾配の波についても  $x$  の増加につれて  $h_2/h_1$  の値が減少している。すなわち、 $x$  が増加するにつれて、潜堤の高さを一定とした場合の波のはねり高さが増加することになる。このことは、 $x=59$  cm とすれば潜堤が碎波点より岸側にくることになり、 $x=71$  cm とすれば碎波点近傍またはその沖側にきて、入射波の運動機構が異なってくるためであろう。また沖波の波形勾配が 0.0474 以上に

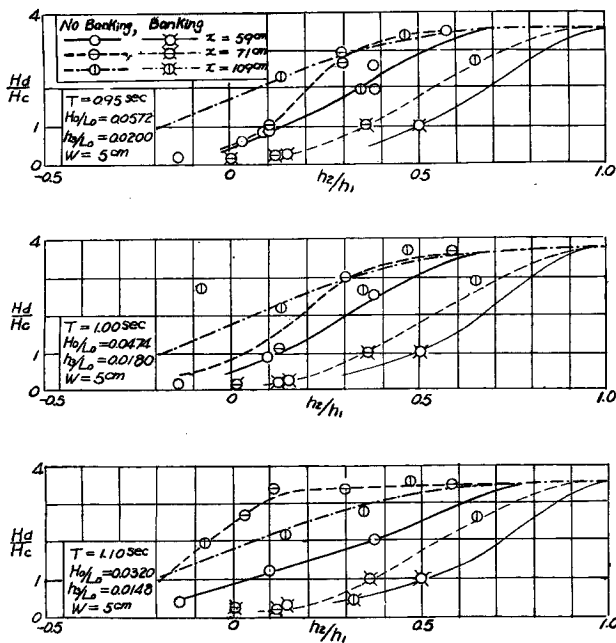


Fig. 5. Relationships of the Heights and Positions of Submerged Breakwater to Overtopping Wave Heights in the Case of High Water Level.

### (3) 潜堤背後の養浜が波のはねり高さに及ぼす影響

Fig. 4 および Fig. 6 からわかるように、波のはねり高さに及ぼす養浜の効果は、ジェーン台風時潮位および満潮位のいずれの場合においても、潜堤の位置によつて異なっている。こうした事実の原因は明らかでないが、養浜した場合としない場合とを比較すると、 $h_2/h_1$  と  $x$  との関係がほぼ同じ傾向を示すことから、前項で述べたと同様に、潜堤前面において入射波の性質が異なってくるからであろう。この場合、潜堤をあまり護岸堤防に近づけても、またあまり遠く離しても、ともに養浜の効果は十分でなく、ジェーン台風時潮位では  $x=47$  cm に潜堤を設置した場合に最も効果が大きく、これは養浜しない場合に波のはねり高さに対して最も効果のあつた潜堤位置と一致する。こうして養浜効果が十分発揮される場合、 $h_2/h_1$  の値が養浜のない場合の2～3倍になることは、Fig. 4 に見られるとおりである。

以上に述べた養浜の効果については、次章において波高減殺の立場から改めて考察するが、とくに明石一須磨海岸のように潮差の大きいところでは、Fig. 3 および Fig. 5 からわかるように、潜堤のみでは波高を減殺しはねり高さを軽減する効果が少なく、潜堤の建設費節約の上から、養浜は欠くべからざる工法といつてよいであろう。

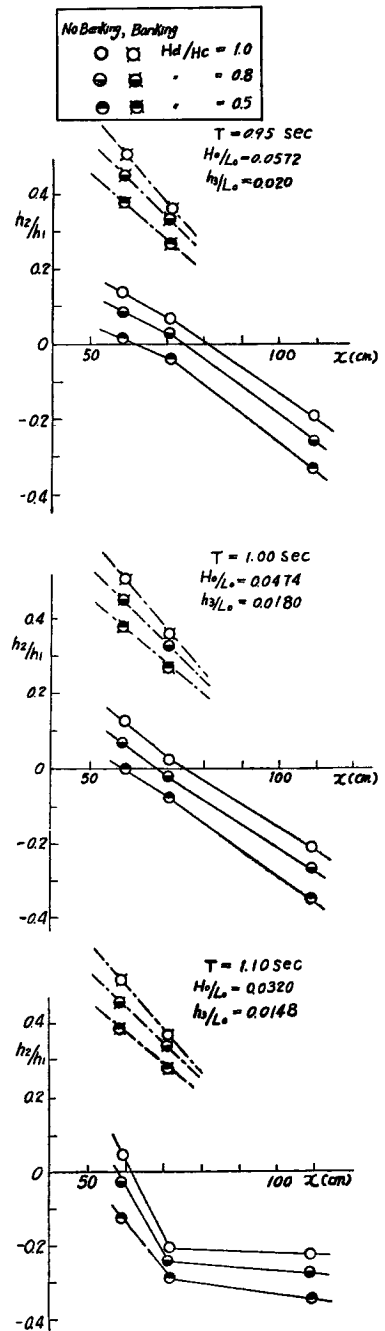


Fig. 6. Relationships of  $x$  to  $h_2/h_1$  for  $H_d/H_c=1.0, 0.8, 0.5$  in the Case of High Water Level.

(4) 潜堤天端幅が波のはね上り高さに及ぼす影響 いままでは潜堤天端幅を 5 cm とした場合であつたが、つぎに天端幅を変化した場合の関係を考察しよう。Fig. 7 は縦軸に  $H_d/H_c$ 、横軸に天端幅  $W$  と沖波の波長  $L_0$  との比をとつて、それぞれの実験条件における潜堤天端の効果を示したものであつて、 $h_2/h_1=0.257$ ,  $h_3=5.2$  cm (ジェーン台風時潮位),  $x=71$  cm,  $h_1=13.2$  cm としている。図からわかるように、この程度の日端幅の変化では、波のはね上り高さに対して大きい影響を与えないようである。もちろん、この天端幅が非常に大きいものとなつて、極端に言えば暗礁のような構造をとれば、養浜した場合と同じ効果をあげるであろう。

Johnson<sup>4)</sup> は実験の結果にもとづいて、 $W/L_1 < 0.12$  程度では波高減衰率に対する天端幅の効果は認められないが、 $W/L_1$  が 0.24 または 0.36 になると波高減衰

率が大きくなると述べている。しかしこの実験では、 $W/L_1$  の大きい場合は波形勾配の非常に大きい波を用い、 $W/L_1$  の小さい場合は波形勾配の小さい波を用い、こうした異なつた実験条件の下で得られた結果を比較して上の推論を行っているので、 $W/L_1$  が大きいほど波高減衰の効果が大きいという結論には疑問がある。われわれの実験による Fig. 7 においては、波形勾配が大きくなると  $H_d/H_c$  が減少しているから、上記の Johnson の実験結果は  $W/L_1$  の変化によるだけでなく、入射波の特性の影響も加わつているように思われる。

### 3. 潜堤による波高減衰効果

前章では波のはね上り高さが波高に左右され、その入射波高が潜堤の諸要素で変化することを明らかにした。このような潜堤による波高減衰効果を解明することは、潜堤工法を採用する場合にきわめて重要であるから、その理論的考察を行うとともに、実験結果と比較検討をしよう。

(1) 理論的考察 潜堤による波高減衰を数理的に取り扱つたものとしては、微小振幅波として解析した Johnson の研究がある<sup>4)</sup>。しかし、傾斜海浜でかつ砕波後も含めた場合の波高減衰については、ほとんど考察が行われていないといつてよい。したがつて、ここでは潜堤を傾斜海浜の砕波点の沖側または岸側においたそれぞれの場合について、微小振幅波として波高減衰現象をとりまとめて考察する。

砕波点近傍において運動量輸送の大きいことや波の変形状態を考慮し、またわれわれが波の流速分布を実

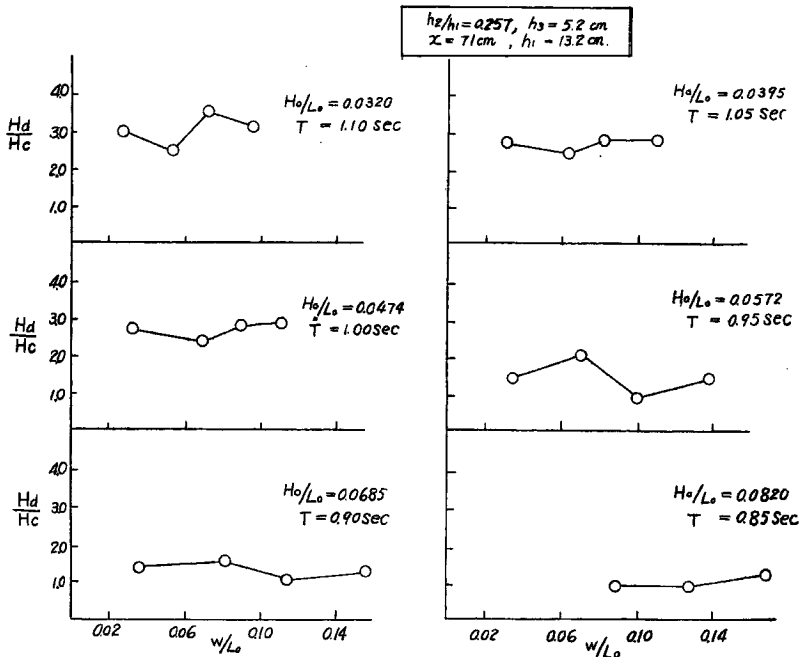


Fig. 7. Effects of the Top Width of Submerged Breakwater on the Overtopping Wave Height.

測した結果によると、潜堤前面に入射してくる波を衝撃波と仮定し、質量および運動量の保存則を用いて考察の方が妥当なように思われる。こうした立場から種々の考察を行い、すでに注目すべき成果がえられているが、これらは別にとりまとめて発表することとし、ここでは上述のように微小振幅波としての解析を進めよう。

潜堤前面に到達した入射波の海岸に向つて伝達されるエネルギーは、潜堤を越えてさらに前方へ輸送されるものと潜堤で反射されるものとに分けられる。微小振幅波理論によると、一波長当りの平均の波のエネルギーは、その波高の2乗に比例するから、上述の考え方によれば、潜堤背後の水深  $h$  における波高  $H$  と潜堤前面の波高  $H_1$  との比は、

$$(H/H_1)^2 = (H'/H_1)^2 (1 - \alpha) \dots\dots\dots (8)$$

となる。ここに、 $H'$  は潜堤のない場合の水深  $h$  における波高であり、 $\alpha$  は潜堤で反射される伝達エネルギーとその地点の入射波の全平均エネルギーとの比である。

波が潜堤を越える場合、傾斜海岸では  $h_b$  を砕波水深としてつぎの三つの場合が考えられる。

(a)  $h_1/L_0 > h_b/L_0 > h/L_0$ : この場合は潜堤背後のどの地点でも波が砕けないから、波を表面波と仮定して微小振幅波理論を用いると、 $-h_1$  から  $-h_2$  までの入射波の単位時間当りの伝達エネルギーは、一波長の平均をとり、 $h_1 - h_2 = h_2'$  とした場合、次式であらわされる。

$$\bar{E}_R = \frac{1}{16} \rho g H_1^2 C_1 \sinh 2kh_2' (1 + 2kh_2' / \sinh 2kh_2') / \sinh 2kh_1 \dots\dots\dots (9)$$

一方、水深  $h_1$  における入射波の単位時間当りの全平均伝達エネルギーは、(9)式にて  $h_2' = h_1$  とおき、

$$\bar{E}_i = \frac{1}{16} \rho g H_1^2 C_1 (1 + 2kh_1 / \sinh 2kh_1) \dots\dots\dots (10)$$

となる。ここに、 $C_1$  は水深に  $h_1$  における波速、 $k = 2\pi/L_1$  である。したがつて(9)式で与えられる  $\bar{E}_R$  が潜堤によつて反射されるものとすれば、(8)式における  $\alpha$  は次式のようになる。

$$\alpha = \frac{\bar{E}_R}{\bar{E}_i} = \frac{\sinh 2kh_2' (1 + 2kh_2' / \sinh 2kh_2')}{\sinh 2kh_1 (1 + 2kh_1 / \sinh 2kh_1)} \dots\dots\dots (11)$$

この場合、表面波の微小振幅波理論を用いると、単位時間に運ばれるエネルギーの全量が一定であるということから、 $H'/H_1$  は次式で与えられる。

$$\frac{H'}{H_1} = \left\{ \frac{C_1}{C} \frac{1 + (4\pi h_1/L_1) / \sinh(4\pi h_1/L_1)}{1 + (4\pi h/L) / \sinh(4\pi h/L)} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (12)$$

(11) および (12) 式を(8)式に代入すると、結局つぎの関係がえられる。

$$\left( \frac{H}{H_1} \right)^2 = \left\{ \frac{C_1}{C} \frac{1 + (4\pi h_1/L_1) / \sinh(4\pi h_1/L_1)}{1 + (4\pi h/L) / \sinh(4\pi h/L)} \right\} \left\{ 1 - \frac{\sinh 2kh_2' (1 + 2kh_2' / \sinh 2kh_2')}{\sinh 2kh_1 (1 + 2kh_1 / \sinh 2kh_1)} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

(b)  $h_1/L_0 > h_b/L_0 > h/L_0$ : 波が砕けてもその伝達エネルギーがやはり波高の二乗に比例すると仮定すれば(8)式が成立し、また水深  $h_1$  で波はやはり表面波として取り扱われるので、この場合の  $\alpha$  は(11)式と同じ式であらわされる。

つぎに  $H'/H$  の計算であるが、波は砕波水深  $h_b$  までは水深の減少につれて波高を増し、水深  $h_b$  に至つて砕波高  $H_b$  に達し、その後は水深減少とともに急激に波高を減少する。したがつてこの場合の  $H'$  を求めるには、入射波の波形勾配に応じた砕波高および砕波水深を、すでに実験的に解明され

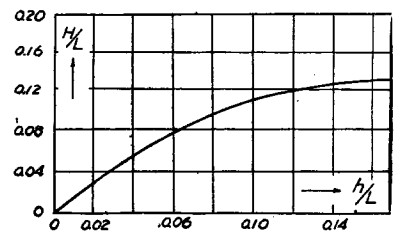


Fig. 8. Relationship of  $H/L$  to  $h/L$  after the Wave Breaking.

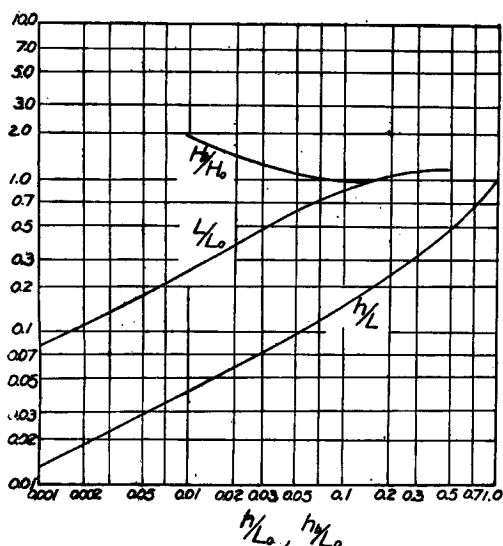


Fig. 9. Wave Height at the Breaking Point, and Change of Wave Length after the Breaking Point.

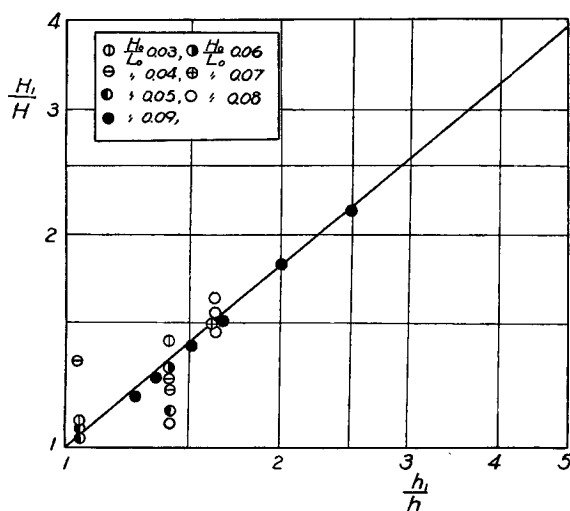


Fig. 10. Relationship of  $H_1/H$  to  $h_1/h$  after the Wave Breaking.

$$\left. \begin{aligned} h_1/h &= (h_1/L_0)/(h/L_0) \\ H_1/H &= \{(H_1/L_1)/(H/L)\} \{(L_1/L_0)/(L/L_0)\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

Fig. 10 には本実験の結果をあわせてプロットしてあるが、多少のばらつきがある程度では計算結果と一致する。したがって以下の解析では、砕波後の波高変化として (15) 式、すなわち Fig. 10 の関係を採用し、潜堤による波高減衰率を次式で求めることにした。

ている関係を用いて算定し、さらに水深変化にともなう砕波後の波高変化を知らねばならないが、後者については (c) において詳述する。

(c)  $h_b/L_0 > h_1/L_0 > h/L_0$ : この場合は砕波してから潜堤にぶつかるが、砕波の波形がよくわかっていないので、その伝達エネルギーを求めることがむずかしい。そこで砕波してからエネルギーの分布がかりに表面波の場合と同じであると仮定すると、波形はもちろん異なっているが、(11) 式の  $\alpha$  をそのまま用いることができよう。

つぎに砕波後の波高変化については、佐藤氏の浅水最大波高の理論<sup>12)</sup>がありまた石原・岩垣・鈴木三氏が実験的に求めた実験曲線<sup>2)</sup>がある。前者によると、砕波後の波が砕波条件でしばられた状態にあるものと考え、 $h/L$  と  $H/L$  との関係が Fig. 8 のように一義的に決定されている。われわれは Fig. 8 の関係と、Fig. 9 に示す

$$h/L = f_1(h/L_0), \quad L/L_0 = f_2(h/L_0) \quad (14)$$

なる関係とを用いて、

$$H'/H = F(h/h_1) \quad \dots\dots\dots (15)$$

の関係を求めた。すなわち、Fig. 8 によつて  $h_1/L_1$  および  $h/L$  のおのおのに対応する  $H_1/L_1$  および  $H/L$  が求められる。一方、Fig. 9 によつて  $h_1/L_1$ ,  $h/L$  に対応する  $h_1/L_0$ ,  $h/L_0$  および  $h_1/h$ ,  $h/L_0$  に対応する  $L_1/L_0$ ,  $L/L_0$  が求められる。したがって、 $h_1/h$  および  $H_1/H$  は上に求めた値から次式によつて容易に算定できるわけであつて、その結果は Fig. 10 のとおりである。

$$\left(\frac{H}{H_1}\right)^2 = \left\{ F\left(\frac{h}{h_1}\right) \right\}^2 \left\{ 1 - \frac{\sinh 2kh_2'(1+2kh_2'/\sinh 2kh_2')}{\sinh 2kh_1(1+2kh_1/\sinh 2kh_1)} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

## (2) 実験結果とその比較

(a) Fig. 11 は  $h_1/L_0 > h/L_0 > h_b/L_0$  の場合について、 $h/h_1$  を一定としたときの  $H/H_1$  と  $(h_1-h_2)/h_1$  および  $h_1/L_0$  との関係求めた実験結果と理論式 (13) による計算結果とを比較した一例である。

この図によると、波高減衰率に対する  $h_1/L_0$  の影響は、理論曲線ではあまり見られないが、実験結果では相当はつきりしており、 $(h_1-h_2)/h_1$  の値が小さいほど顕著である。このことは、前章で述べたように、波形勾配による波の特性の変化によるものであろう。すなわち、 $h_1/L_0$  の大きい波はこの実験では波形勾配  $H_0/L_0$  の大きい波であつて、砕波点付近でも表面波として取り扱つても、そのエネルギー分布には大きい間違いがない。それで  $h_1/L_0$  の大きい場合の実験結果は、表面波としての理論曲線とよく一致するが、 $h_1/L_0$  の小さい場合には砕波点付近になるとますます孤立波の特性を示すようになって、理論曲線とあわないようになる。こうした表面波と孤立波とにおけるエネルギーの鉛直分布の相違が、上述のような波高減衰率の相違を示すのであろう。

つぎに表面波として取り扱える波形勾配の大きい波であつて、波高減衰率が上の理論曲線と一致する範囲は、 $(h_1-h_2)/h_1$  の値が0.5~0.6より小さい場合であり、このことが実験結果よりよく認められる。これは微小振幅波として理論式を導き、かつ潜堤によつてその部分のエネルギーが完全に反射されたとする仮定に基づいているためと考えられる。すなわち、実際には潜堤の高さまでの伝達エネルギーの一部が潜堤を越えて岸側に伝達されるであろうが、その鉛直分布は底面近くなると急激に

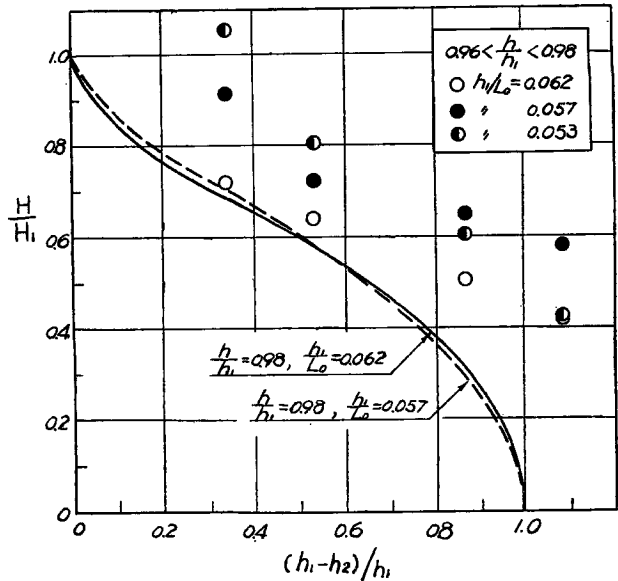


Fig. 11. Damping Ratio of Wave Height in the Case of  $h_1/L_0 > h/L_0 > h_b/L_0$ .

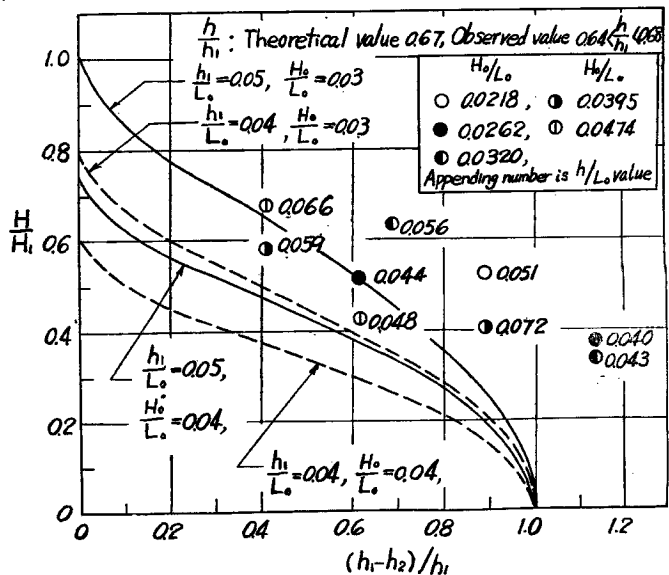


Fig. 12. Damping Ratio of the Wave Height in the Case of  $h_1/L_0 > h_b/L_0 > h/L_0$ .

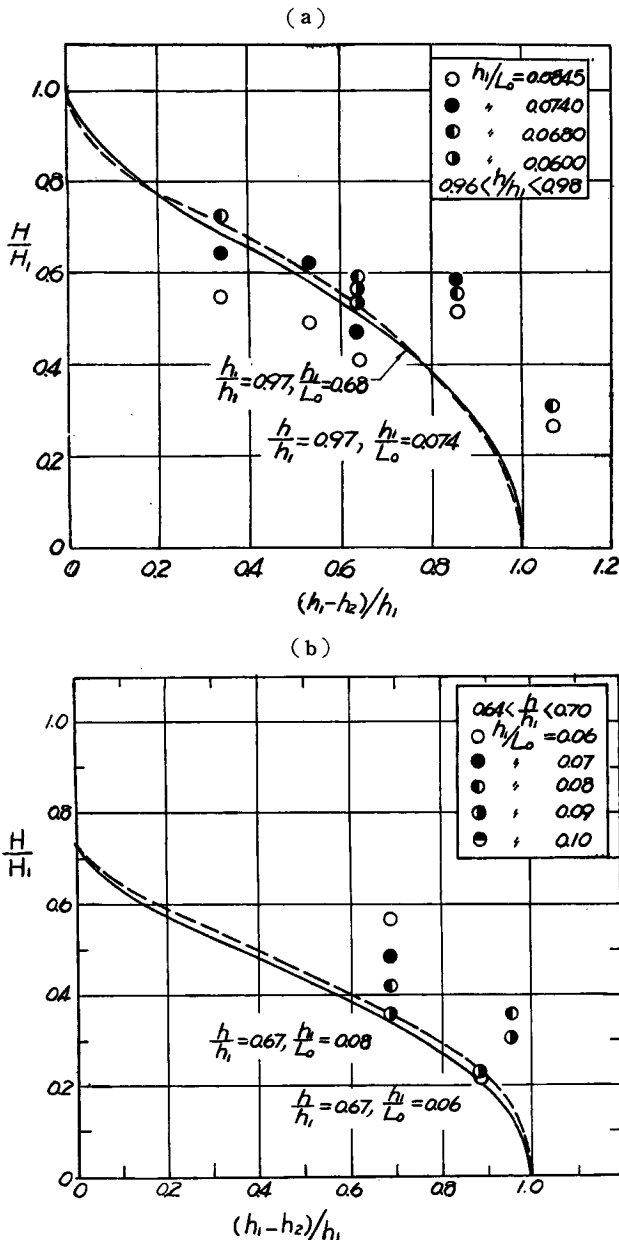
減するので、 $(h_1-h_2)/h_1$  が小さい場合は、その潜堤の高さ以下のエネルギーのうち岸側に伝達されるものは非常に少なく、理論と一致する度合が良好になる。ところが  $(h_1-h_2)/h_1$  の値が大きくなると、岸側に伝達される割合が全体のエネルギーに較べて大きくなり、理論曲線との一致度が悪くなるのであろう。

以上の実験結果から、波形勾配が大きく表面波の性質を示す波では、 $(h_1-h_2)/h_1=0.5$  のときに  $H/H_1=0.65$ 、 $(h_1-h_2)/h_1=1.0$  のときに  $H/H_1=0.45$  となることがわかる。波形勾配が小さく孤立波の性質を帯びるにつれて、この波高減衰率が悪くなり、表面波の場合に較べて1～2割低下するようになる。この結果は、

運輸技術研究所で行われた大型水槽の実験<sup>13)</sup>とよく一致している。

(b)  $h_1/L_0 > h_b/L_0 > h/L_0$  の場合は、前項で述べたように、潜堤のないときの砕波点が重要な要素となり。理論式の中に  $H_0/L_0$  の影響が含まれてくる。Fig. 12 はこの場合の理論式と実験結果の一例を示したものである。

この図によると、理論曲線においても  $h_1/L_0$  および  $H_0/L_0$  がともに波高減衰率に大きく影響している。すなわち、潜堤の高さ  $(h_1-h_2)/h_1$  が同じで入射波の波形勾配が等しい場合、 $h_1/L_0$  の値が小さいほどその波高減衰率が大きく、また同じ  $(h_1-h_2)/h_1$  で  $h_1/L_0$  の値を等しくする位置に潜堤をおくと、入射波の波形勾配が大きいほど波高減衰率を増している。これらの事実のうち前者の関係を、前節のジェーン台風時潮位の場合の関係を示す Fig. 3 において、潜堤を  $x=71$  cm に設置するよりも  $x=47$  cm に設置した方が波のはね上り高さが減少するという一つの理由を示すものと考えられる。すなわち、この場合は堤防前面の水深  $h_3$  を  $h$  と考えると、 $h_1/L_0 > h_b/L_0 > h/L_0$  の関係になるから、同じ波形勾配で周期を等しくする波に対しては、Fig. 12 によ



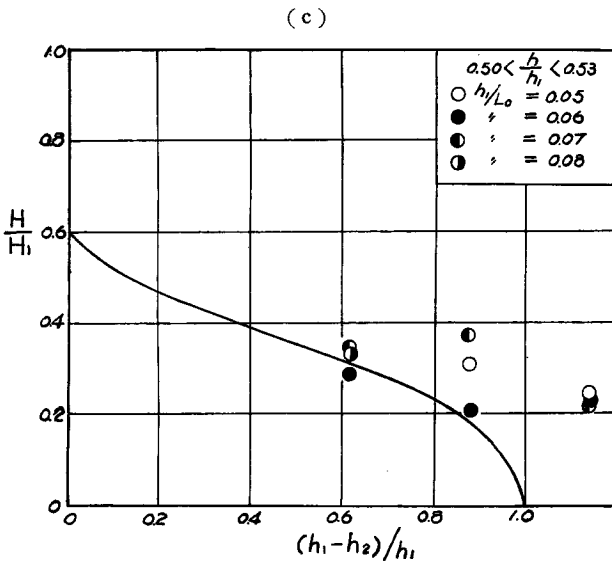


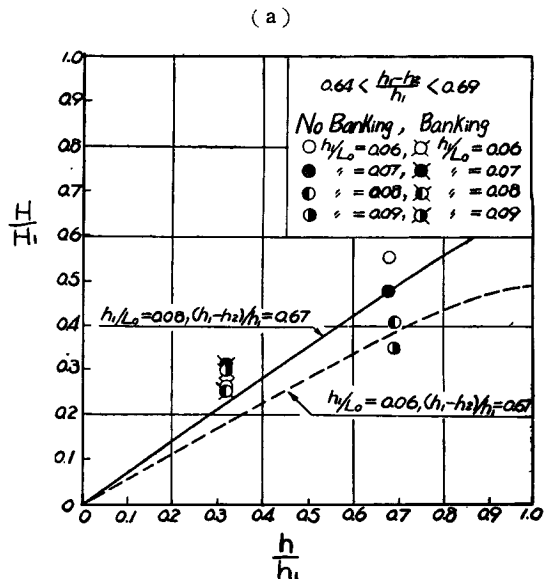
Fig. 13. Damping Ratio of the Wave Height in the Case of  $h_b/L_0 > h_1/L_0 > h/L_0$ .

Fig. 13 で理論曲線と実験結果とが一致すると思われる  $(h_1-h_2)/h_1$  の値の小さい範囲では、 $h_1/L_0$  の小さい波による実験結果が表面波として取り扱った理論曲線とよく一致し、 $h_1/L_0$  の大きい波によるものは理論曲線より小さい値を与えている。このことは、 $h_1/L_0$  の小さい波は波形勾配も小さく、潜堤が砕波点に近いために、砕波しても表面波の性質をまだ残しているが、 $h_1/L_0$  の大きい波は波形勾配も大きく、完全な砕波として入射してくる。そして砕波は表面波に較べて底部近くのエネルギー分布が大きいと推定されるから、同じ高さの潜堤によつても反射されるエネルギーは砕波の方が大きく、Fig. 13 のような結果になるのであろう。

(d) 以上は  $h/h_1$  の値が一定の場合についての考察であるが、傾斜海岸または本研究のように養浜して波高減殺をはかろうとする場合には、水深変化が波高減衰率に及ぼす影響を知る必要がある。Fig. 14 は  $(h_1-h_2)/h_1=0.67, 0.87$  の二つの場合について、水深変化と  $h_1/L_0$  とが波高減衰率に及ぼす影響を示したものである。とくに養浜する場合には、前述の(b)または(c)の場合となることは明らかであつて、Fig. 14 の理論曲線より(17)式から求めたものである。この図によると、 $h/h_1$  が波高減衰率に及ぼす効果は、いかなる波でも  $h/h_1$  の値が増すほど減少する。したがつて砕波後の波高減衰については、傾斜海岸では水深変化を大きくするのが

つて  $h_1$  の値が小さいとき、すなわち  $x=47\text{ cm}$  とした方が堤防にぶつかる波高が小さくなつて、波のはねり高さも低くあらわれるのであろう。

(c)  $h_b/L_0 > h_1/L_0 > h/L_0$  の場合には、波が砕波の状態で潜堤に入射してくることになり、(17)式の理論曲線と実験結果とを較べたのが Fig. 13 である。この図によると、(a)の場合と同様に理論曲線が実験結果と一致するのは  $(h_1-h_2)/h_1 < 0.6$  でのときである。これは(a)で述べたように、 $(h_1-h_2)/h_1 < 0.6$  では潜堤で反射される伝達エネルギーの全伝達エネルギーに対する割合が小さいからである。



最も効果的な工法と考えられ、このことから前節 Fig. 3, 4, 5, 6 で明らかにしたように、波のはねり高さ軽減に対する養浜の顕著な効果が諒解されよう。

#### 4. 結 語

本論文においては、潜堤が越し波防止および波高減衰に及ぼす効果について、実験および理論的な解明を行い、その力学的な意義をある程度明らかにすることができた。しかしながら潜堤による反射係数および水位上昇の影響や養浜した場合の砂の移動にともなう摩擦損失など、今後の研究にまっところが少なくない。なお、本研究の結果によつて、塩屋一須磨海岸における入射波の既往最大波高 2.82 m, 周期 6.5 sec を考慮し、この海岸の護岸堤防に対する波のはね上りを防ぐ潜堤の位置とその天端高などを決定したが、その詳細は別に報告書としてとりまとめられており<sup>11)</sup>、潜堤の効果を具体的にとりあげた一つの工法として注目されよう。

ここでは微小振幅波理論を用いて波高減衰の解析を行い、実験結果をある程度説明することができたが、さらに厳密には碎波点近傍の波を衝撃波として解析する方が望ましく、これらについて研究を進めていることは第3節で述べたとおりである。

最後にこの研究に対して終始協力していただいた足立助教授、岩佐助教授ならびに大学院学生の諸君に感謝する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) Jeffreys : Note on the offshore bar problems and reflection from a bar, Grt. Brit. Minis. Supply, Wave Report 3, 1944.
- 2) Dean : On the reflection of surface waves by a submerged plane barrier, Grt. Brit. Minis. Supply, Wave Report 8, 1945.
- 3) John : Waves in the presence of an inclined barrier, Comm. Appl. Math. Vol. 1, 1948.
- 4) J. W. Johnson, R. A. Fuchs and J. R. Morison : The damping action of submerged breakwater, Trans. A.G.U., 1951, pp. 704~708.
- 5) Beach Erosion Board : A model study of the effects of submerged breakwaters on wave action, Tech. Memo. 1, Chief of Engineers., U. S. War. Dept., 1940.
- 6) Beach Erosion Board : A method for determining depth over bottom discontinuities, Tech. Memo. 5, Chief of Engineers., U. S. War. Dept., 1944.
- 7) J. R. Morison : Model study of wave action on underwater barrier, Inst. Res. Univ. Calif., Berkeley, Report. H.E. 116-304, 1949.
- 8) 堀川清司, 鮮于澈 : 潜堤に関する実験的研究, 土木学会第12回年次学術講演会講演概要, 1957, pp.

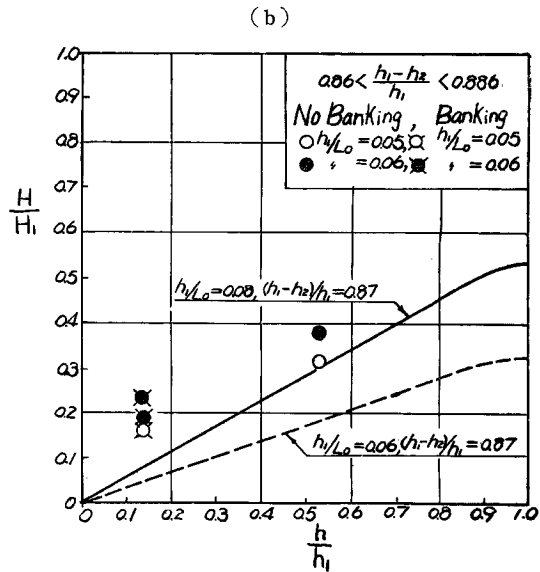


Fig. 14. Effect of the Change of Water Depth on the Damping Ratio of Wave Height.

251~252.

- 9) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 鈴木雄太: 海岸堤防の設計, 特にその有効高さについて, 土木学会海岸工学講演会講演集, 1955, pp. 57~70.
- 10) J. J. Stoker: The formation of breakers and bores, Comm. Appl. Math. Vol. 1, No. 1, 1948.
- 11) 石原藤次郎, 樫木 亨: 須磨~塩屋間塩害対策報告書, 1958.
- 12) 佐藤清一: 漂砂に関する研究(4), 浅水表面波について, 建設省土木研究所報告, 第82号の5, 1952, pp. 1~28.
- 13) 土木学会: 海岸保全施設設計便覧, 1957, pp. 204~205.