

越波による防波堤背後への波高伝達率

合 田 良 実*・竹 田 英 章*

1. 序 論

防波堤は、その名が示すとおり波を防いで港内を静穏にするために建設される。このためには、港口を波の主流方向からしゃへいするとともに、越波による港内への打ち込み波を防ぐことが必要である。しかし、防波堤の天端を高くすると、堤体に働く波力が増大するので堤幅を増さねばならず、建設費がかさむことになる。したがって、防波堤の計画および設計においては、防波堤の天端を高めることによって、背後への伝達波高をどの程度減少させられるかを知っておかなければならない。

こうした越波による防波堤背後への伝達波高については、Johnson その他¹⁾による実験データが発表されており、主としてこのデータにもとづいた設計図表が技術者に使われてきた²⁾。しかし、このデータは実験値の散らばりが大きく、また堤幅の影響なども十分調べられていない。その後、細井・富永³⁾、近藤・佐藤⁴⁾なども実験を行ない、とくに近藤、佐藤は波高伝達率の実験式を提唱しているが、実験条件が限られているので、十分に一般的であるとはいえない。

このような実験資料の不足を補い、越波による伝達波高の一般的特性を明らかにして、構造物設計のための資料を求めるため、われわれは昭和 36 年より一連の実験を行ってきた^{5), 6)}。この結果、直立堤および混成堤の波高伝達率について一応の成果を得たので、ここに取りまとめて発表する次第である。

2. 実験の施設および方法

実験は、2つの点で既往の実験と異なる方法を用いて行なった。第1は、平面水槽の中に設けた小水路を使用したこと、第2は、波の諸元とくに水深波長比を十分コントロールしながら実験を進めたことである。

実験施設は、図-1 のように幅 20 m、長さ 30 m の造波水槽に、幅 48 cm、長さ 16.5 m の小水路4本を設けたもので

ある。小水路の末端は、碎石とステンレス切削屑を組み合わせた消波構造であるが、水は水槽と自由に流通できる。この方式によれば、

(i) 模型構造物からの反射波は水槽内に広く分散されるので、顕著な再反射を起こさせないで実験を継続できる。

(ii) 水槽内の水域面積が広く、かつ小水路の両端が開放されているので、模型堤体の沖側と岸側の水位はいつも一定に保たれる。

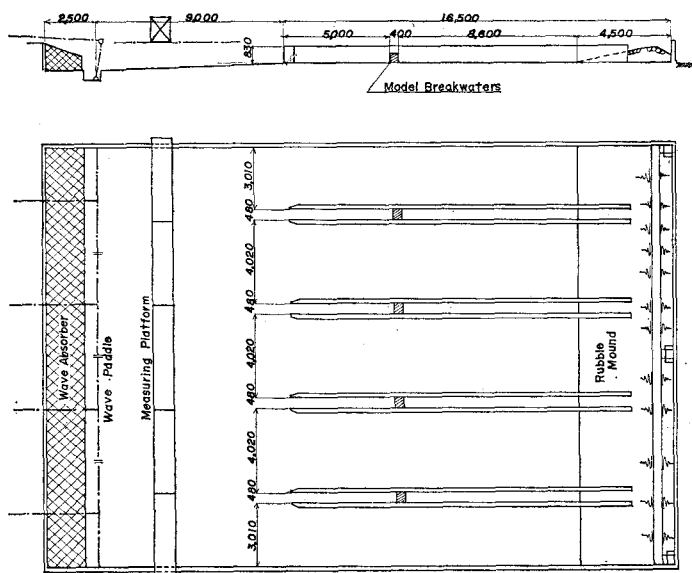
(iii) 小水路が4本あるので、同一の波に対して4種類の模型構造物を試験できる。

などの利点がある。ただし、第1の特徴は、図-1 の配置のままでは水槽側壁などからの反射があるために十分発揮できず、波の状況は小水路によって若干異なっていた。このため実験の後半では小水路を1本だけ使うことにし、水槽中央に幅 4 m、長さ 11 m の消波マウンドを設けて、反射波を吸収させることにした。

つぎに第2の水深波長比のコントロールとしては、 h/L がつぎの値になるように発生波の周期を調整しながら実験を行なった。

水深 $h=50$ cm, $h/L=0.14, 0.2, 0.3, 0.5$

図-1 実験施設の配置



$h=35\text{ cm}$, $h/L=0.07, 0.10, 0.14$

波高 H は、3~30 cm の範囲で、それぞれの水深波長比ごとに細かく変えて実験を行なった。

模型堤体は、小水路の先端から 5 m の位置にすえて、沖側では 1 波長以上、岸側では 2 波長以上の測定水域がとれるようにした。

波高の測定には、定速度 (2 m/min) で移動する台車に抵抗線式波高計を取り付けて、ペン書オシログラフ上に連続記録を画かせた。模型の前面では反射波によって部分重複波ができるので、腹と節の位置の波高の平均値を求めて入射波高とし、差の 1/2 をとって反射波高とした。越波によって生ずる伝達波の波高は、3.(4) のべる高調波成分波の存在などのために場所によってやや変動するので、模型背後から消波斜面までの区間の平均波高を用いた。

越波による伝達波高の問題では、現象に關係する諸量は、入射波高 H_I 、伝達波高 H_T 、水深 h 、入射波の波長 L 、堤体の水面上の天端高 R 、堤幅 B 、およびマウンド上の水深 d の 7 個である。これらの諸量は、皆長さの次元を持っているから、パイ定理によって伝達波高の問題は、7-1=6 個の無次元量間の関係として表示できる。そこで、われわれはつぎのような無次元変数を用いることにした。

$$K_T = \frac{H_T}{H_I} = \phi\left(\frac{R}{H}, \frac{B}{h}, \frac{d}{h}, \frac{h}{L}, \frac{H}{h}\right) \dots (1)$$

以下に示されるように、式 (1) は波高伝達率の最も実用的な表示法と考えられる。

3. 直立堤背面への波高伝達率

(1) 模型堤体

直立堤の模型は、松板で製作し、堤高 25~80 cm の 10 種類を用意した。堤幅は、實際構造物の設計例を参照してすべて $B=40\text{ cm}$ とした。

この模型のほかに、堤幅による波高伝達率の差を調べるため、厚さ 9 mm の鋼板で直立壁の模型を製作した。この模型はアンカー ボルトで水槽床面に固定し、その天端高は 2 枚の鋼板の締付け位置で調整できるようにした。

(2) 天端高パラメーターの選択

実験結果の整理における第 1 の問題は、天端高のパラメーターとして何をを用いるかである。Johnson たち¹⁾ は $(1+R/h)$ を用い、港湾工事設計要覧では R/H を用いている。この 2 つの表示法を、 $h/L=0.2$ の実験値についてくらべてみたのが 図-2, 3 である。図-2 の堤高 $(1+R/h)$ による表示法では、波高伝達率が波形勾配にも関係するように見える。それも、潜堤の状態では波形勾配の大きな波ほど波高伝達率が小さいが、天端が静水面よりも高いときはこの傾向が逆になって、波形勾配の

図-2 堤高による波高伝達率の表示

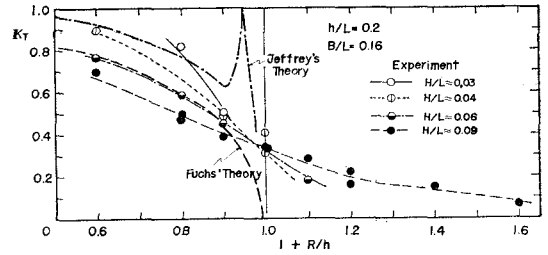
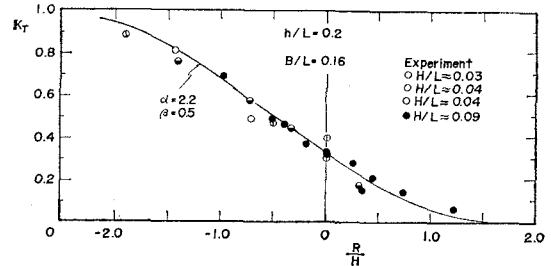


図-3 天端高による波高伝達率の表示



大きな波ほど波高伝達率が大きくなる。しかし、波高伝達率を天端高 R/H に対して表示した 図-3 では、こうした波形勾配の影響はほとんど見られず、実験値はすべてつぎの実験式のまわりに集まっている。

$$K_T = 0.5 \left[1 - \sin \frac{\pi}{2\alpha} \left(\frac{R}{H} + \beta \right) \right] \dots (2)$$

ただし、 $\alpha=2.2$, $\beta=0.5$

これは、天端高と波高との比 R/H が、越波による打ち込み再生波の現象を強く支配していることを意味している。

なお、図-2 には、文献 1) で紹介されている Fuchs と Jeffrey の計算式による値も示したが、実験値とはあまり良くあっていない。とくに、堤体の天端が静水面よりも上の場合の伝達波の現象は、計算式では説明できない。これは、計算式が微小振幅波の仮定にもとづく以上当然のことである。

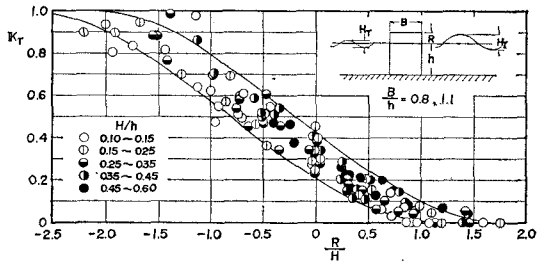
(3) 波の特性による波高伝達率の変化

図-3 は水深波長比が 0.2 の場合であったが、ほかの水深波長比についても同じような整理を行ない、式 (2) をあてはめてその係数を求めたところ、つぎのような結果が得られた。

$$\left. \begin{array}{lll} h/L=0.5 & \alpha=2.2 & \beta=0.7 \\ h/L=0.3 & \alpha=2.2 & \beta=0.5 \\ h/L=0.2 & \alpha=2.2 & \beta=0.5 \\ h/L=0.14 & \alpha=1.8 & \beta=0.4 \\ h/L=0.10 & \alpha=1.8 & \beta=0.5 \\ h/L=0.07 & \alpha=1.8 & \beta=0.3 \end{array} \right\} \dots (3)$$

これによると、 $h/L=0.2\sim0.5$ の深海波動的な波と、 $h/L=0.07\sim0.14$ の浅海波動的な波では、実験曲線の形がやや異なるのが認められる。この差は、潜堤の場合に浅海

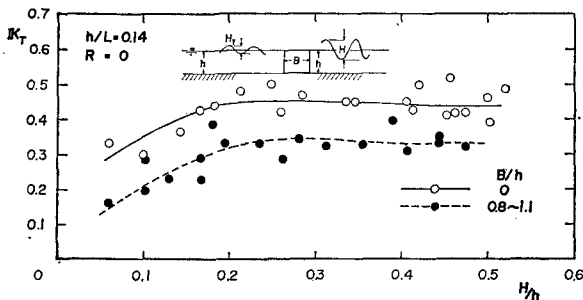
図-4 直立堤の波高伝達率



波のなみのほうが大きい波高伝達率を示す傾向として表われる。しかし、天端が静水面の上に出ている場合には、両者の差はほとんどなく、実用上は水深波長比の影響を無視することができる。そこで、堤幅 40 cm の直立堤の全実験結果を 1 枚の図にプロットしてみたのが、図-4 である。この全データに式 (2) をあてはめてみるとつぎのような係数が得られた。

$$\left. \begin{array}{l} \text{上限: } \alpha=2.0 \quad \beta=0.2 \\ \text{平均: } \alpha=2.0 \quad \beta=0.5 \\ \text{下限: } \alpha=2.0 \quad \beta=0.8 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

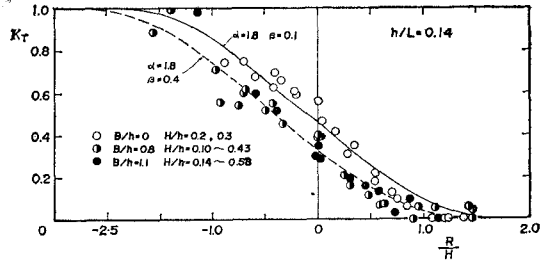
この 図-4 では、実験データを H/h の値によって分類して表示してある。データの散らばりが大きいこともあるが、 H/h の値による波高伝達率の差はあまり認められない。そこで、堤体の天端が静水面と等しい $R=0$ の場合について、波高水深比 H/h の影響を詳しく調べてみたのが、図-5 である。水深波長比は $h/L=0.14$ である。 H/h が 0.2 程度より小さい範囲では、波高伝達率の値が H/h の減少とともに小さくなって $H/h=0$ では $K_T=0$ に近づく傾向が認められる。しかし、 H/h が約 0.2 より大きい範囲では、波高伝達率はほぼ一定である。すなわち、波高が非常に小さくて微小振幅波の近似が十分成立する場合を除いては、 K_T と R/H の関係は H/h または H/L には影響されないといえる。

図-5 波高伝達率におよぼす H/h の影響

(4) 堤幅の影響

図-5 は、 H/h の影響ばかりでなく堤体の幅による波高伝達率の変化も示したもので、図の白丸は堤幅 0.9 cm ($B/h \approx 0$)、黒丸は堤幅 40 cm ($B/h=0.8 \sim 1.1$) のときのデータである。堤体の幅を増すことによって、波高伝達率は約 0.45 から約 0.33 へと明らかに減少している。

図-6 波高伝達率におよぼす堤幅の影響



この図は $R=0$ のケースであるが、これを種々の天端高について調べたのが 図-6 である。水深波長比は $h/L=0.14$ である。図-6 でも、 $B/h=0$ のデータのほうが明らかに大きな波高伝達率を示しており、式 (2) の実験式をあてはめると、 $\alpha=1.8$ 、 $\beta=0.1$ の係数が求められる。 $B/h=0.8 \sim 1.1$ の場合とくらべて、 β の値にして 0.3、 K_T の値にして約 0.1 の差がある。

こうした堤幅の影響は、現象的にはつぎのように説明される。堤幅が薄いときは、堤体を越えた波が分散せずに水塊のまま、堤内水域に一度に落下する。このため堤内水面には強い衝撃が働き、越波水塊のエネルギーは伝達波の再生に有効に働く。一方堤幅が広いときは、堤体に乗上げた水塊は、一種の流れとなって堤体の上面を走り、それから背面に落下する。このため水塊の落下時間が長引き、伝達波の再生に必要な水面衝撃が弱まる。また、落下の際の渦によるエネルギー損失も、堤幅が薄いときよりも大きい。このような結果、堤幅が広いときは伝達波高が小さくなるものと考えられる。

(5) 伝達波の波形と伝播速度

越波によって堤体背面へ伝達される波は、入射波が単に変形した波というよりも、越波水塊によって発生された新しい波であると見られる。したがって、伝達波の波形は入射波の波形と相似ではなく、一般に高調波成分が強まり、いちじるしい場合には、波が割れて多数の短かい波に変わることさえある。

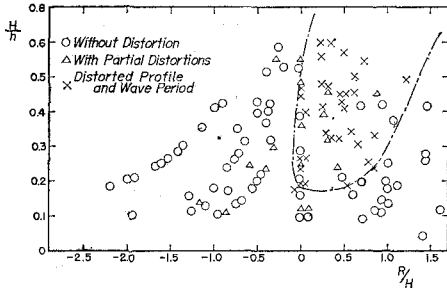
こうした伝達波の波形および周期性について概略の傾向をつかむため、直立堤 ($B=40$ cm) の実験記録を調べ、これを、

- (i) 波形はほぼきれいな形をなし、周期も入射波と同一のもの……○
- (ii) 波形にひずみが見られ、周期も部分的には乱れているもの……△
- (iii) 周期が入射波よりも明らかに短くなっているもの……×

に分類したところ 図-7 のようになった。伝達波の周期性が乱れるのは、入射波の諸元が図の破線領域内にある場合である。堤幅が薄いときは、こうした伝達波の周期性の乱れが比較的少ない。

越波によって生ずる伝達波は、またその波形が場所に

図-7 伝達波の波形の分類



よって異なる。図-8 はその一例で、厚さ 0.9 cm の直立壁前面、その後 1.5 m, 3.0 m, および 4.5 m の地点の同時水位記録とその調和解によって求めた各成分波の振幅を示している。実験条件は、 $h=50$ cm, $T=1.8$ sec, $L=3.57$ m, $H_I=14$ cm で、天端高は $R=-5$ cm の潜堤状態である。直立壁前面の水位波形が $t=0$ で急落しているのは、波の谷で岸側から沖側へ越流しているためと思われる。

図-8 伝達波の波形と各成分波の振幅

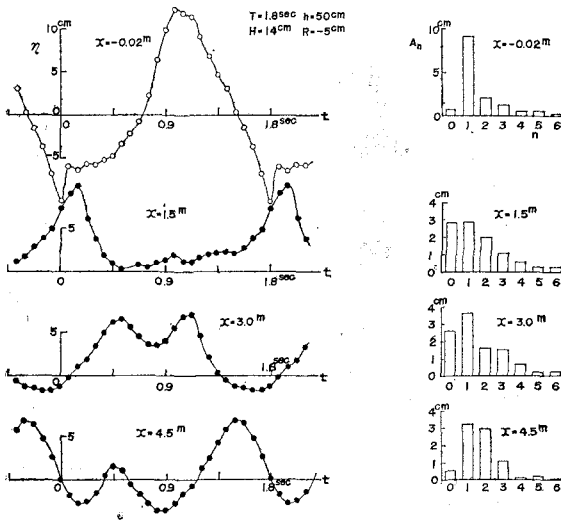


図-8 の同時水位記録を見ると、主峯が左から右へと移動しているのが認められる。この主峯の位置の時間差から主峯の伝播速度が求められるが、より正確には各成分波の位相差からそれぞれの伝播速度が算出できる。まず図-8 の水位時間曲線を調和解して、次式のように表わす。

$$\eta = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t - \varphi_n\right) \dots\dots\dots (5)$$

もし、式 (3) で表示した各成分波がそれぞれ独立な波であるとすれば、その波形の 1 点に着目してその移動を追えば、それぞれの伝播速度が得られる。たとえば、第 n 次高調波成分波が最高水位となる時刻は、

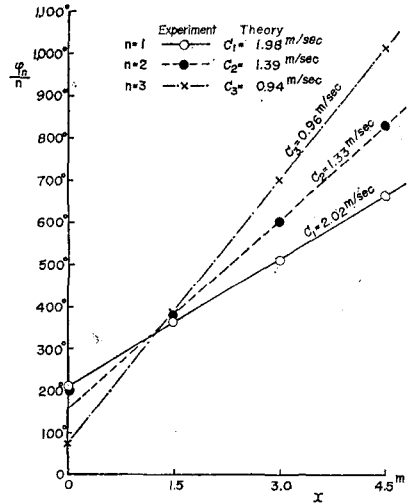
$$t_n = \frac{T}{2n\pi} (\varphi_n + 2r\pi), \quad r=0, 1, 2 \dots\dots\dots (6)$$

であるから、 $x=l_1$ と $x=l_2$ の 2 点で上記の最高水位時刻 t_{n1} , t_{n2} を求めれば、その波速が、

$$C_n = \frac{l_2 - l_1}{t_{n2} - t_{n1}} \dots\dots\dots (7)$$

で計算される。これを図-8 の例について図上で計算したのが図-9 である。この図は、 t_n の代わりに φ_n と l との関係を第 1~第 3 次成分波についてプロットしたものである。距離と位相差の関係はきれいな直線であり各成分波の波速が一定であることを示している。しかも位相差から求めた波速は、 $T_n=T/n$ の周期を持つ微小振幅波の波速と非常に良く一致している。

図-9 各成分波の伝播速度



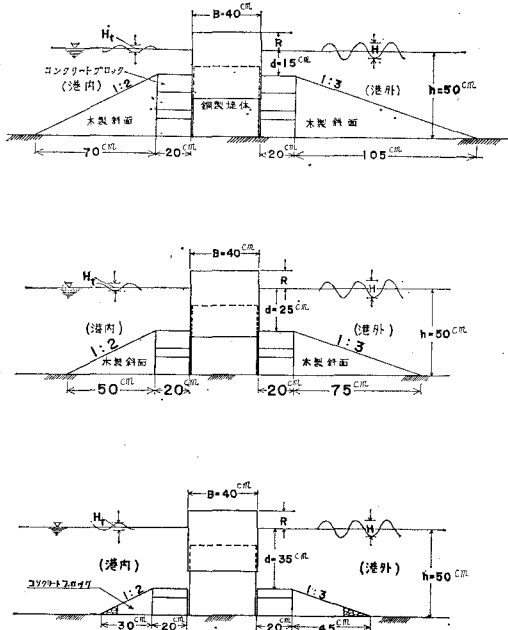
このことは、越波の打ち込みによって周期が T , $T/2$, $T/3$, $T/4$, ... の無数の波列が発生し、それぞれが独立な波列として進行していることを意味する。これは、造波水路における 2 次波峯の移動現象においても見られたところである⁷⁾。ただし、各波列が独立に進行するとはいっても、図-8 の各高調波成分の振幅を見ればわかるように、各成分波の振幅は場所によって変動している。これは測定時刻にたまたまそうになっていたというよりも、各成分波の波列が互いに干渉してエネルギーの交換を行ないながら進行していると見るべきであろう。

4. 混成堤背面への波高伝達率

(1) 模型堤体

混成堤の模型は、図-10 のような鋼製の二重箱構造で、ボルトの締付位置を変えて天端高を調節できる。堤幅は直立堤と同じく $B=40$ cm とし、マウンドの高さは実験水深 $h=50$ cm に対して、 $d=15, 25, 35$ cm の 3 とおとした。マウンドの天端幅は 20 cm である。このマウンドの模型は、表のり勾配 3 割、裏のり勾配 2 割とし、摩擦損失をできるだけ少なくするため木製斜面とした。また、図-10 でもわかるように直立部は水路の底まで下ろし、マウンド部分からの透過波がないようにし

図-10 混成堤模型



た。これは、この実験が基礎マウンドの有無による越波状況の差と、それによる波高伝達率の差を調べることを主目的としたため、マウンドを砕石で作って波の部分透過を許すと、透過エネルギーの相似性などの問題がからんで、実験結果の解釈があいまいになるからである。

実験条件としては、水深波長比を $h/L=0.14$ に固定し、波高と天端高をいろいろに変えて実験した。これは前項でのべたように、堤体背後への波高伝達率が波の諸元にあまり強く影響されないこと、および実際の防波堤の設計条件として $h/L=0.14$ 付近の値となることが多いことなどの理由による。

(2) 波高伝達率におよぼす基礎マウンドの影響

混成堤の実験は、まず堤体の天端が静水面と等しい場合に、波高伝達率と波高水深比との関係が、マウンドの高さによってどのように変わるかを調べた。図-11 はその結果で、マウンドが大きな $d/h=0.3$ の場合にはマウンドの影響が強く現われ、 $H/h \approx 0.35$ 、または $H/d \approx$

図-11 基礎マウンドの高さによる波高伝達率の変化

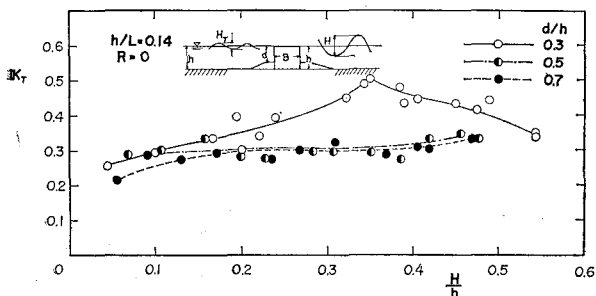
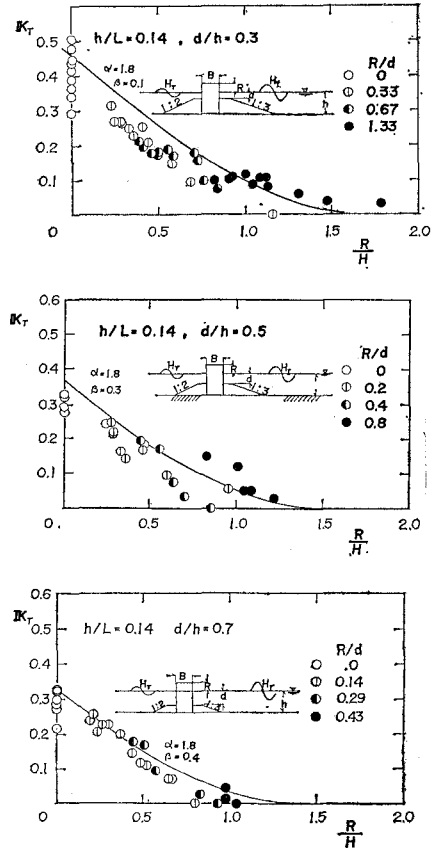


図-12 混成堤の波高伝達率



1.2 付近で最大の波高伝達率を示している。このときは、波は壁体の直前で砕波し、大きく跳ね上がって背面に落下するのが観察された。マウンドがそれほど大きくない $d/h=0.5$ と 0.7 の場合は、マウンドの影響はあまり認められず、図-5 の直立堤のケースと大差ない。これは、マウンド上の水深が深くなり、また実験に用いた波高に制限があって、マウンド上で砕波する状態について実験できなかったのが大きな原因と考えられる。またマウンドの天端幅を一定としたので、マウンドのり面の長さが短かったためかもしれない。

つぎに、混成堤直立部の高さを $5 \sim 20$ cm 上げたときの波高伝達率を調べた結果が図-12である。 $d/h=0.3$ のときは、図-11 と同じようにそれぞれの天端高について波高伝達率が最大となるような波高が存在する。また、波がマウンドに乗り上げる勢いがあるためか、 $R/H=1.5$ 以上でも伝達波の存在が認められる。これに対して、 d/h が $0.5, 0.7$ となると、基礎マウンドの影響が次第に弱くなる。結局、混成堤の場合には、波がマウンドに乗り上げてその上で砕波するかどうかによって、波高伝達率が左右されることになる。

(3) 混成堤の波高伝達率

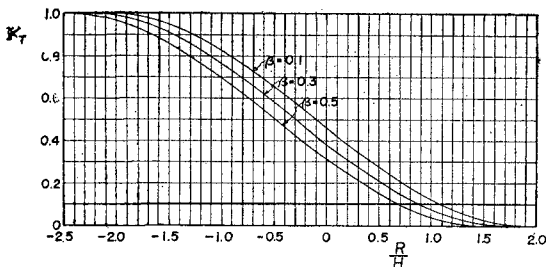
図—12 の各図に示した曲線は、実験 データ に式 (2) の実験式をあてはめたもので、係数 α , β の値はほぼつぎのようになる。

$$\left. \begin{array}{l} d/h=0.3 \quad \alpha=1.8 \quad \beta=0.1 \\ d/h=0.5 \quad \alpha=1.8 \quad \beta=0.3 \\ d/h=0.7 \quad \alpha=1.8 \quad \beta=0.4 \end{array} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

直立堤の場合には、式 (3) あるいは 図—5 に見るように、 $h/L=0.14$ に対しては $\alpha=1.8$, $\beta=0.4$ であるから $d/h=0.7$ の場合は直立堤と変わらないが、 $d/h=0.5$, 0.3 となると、波高伝達率が直立堤よりも大きいことになる。これがどのくらい大きくなるかは、マウンド上での波の変形の場合に関係することで、マウンドの長さや入射波長、マウンドの高さや入射波高などの関係に影響される。したがって、混成堤の諸元をすべて包括した設計図表または実験式を見出すことはかなりむずかしい。しかし、実用的には、式(3),(4),(8)の値を見くらべて、 $\alpha=2.0$, $\beta=0.5\sim 0.1$ (9)

として式 (2) で波高伝達率を算定することができよう。 β の値は、堤幅、マウンドの高さなどを考慮し、図—6、式 (8) などを参照して選定すれば良い。なお、図—13 は式 (9) の値を用いて、式 (2) で波高伝達率を計算した結果である。

図—13 波高伝達率算定図



5. 結 論

以上の実験によって明らかになったことを要約すると、つぎのようになる。

(1) 越波による防波堤背後への波高伝達率は、静水面上の天端高と入射波高との比 R/H によってほぼ一義的に定まり、波の諸元 h/L , H/h などにはあまり影響されない。

(2) 堤体の幅が広がると、波高伝達率は減少する。

(3) 混成堤の基礎マウンドが高くなると、波高伝達率は一般に増大する。

(4) 波高伝達率の概略値は、式 (2) と (9)、または 図—13 で推定することができる。

(5) 越波によって生ずる伝達波は、単一周期の波ではなくて、 T , $T/2$, $T/3$, $T/4$, ... の周期を持つ独立な波列が重ね合わされたものと見られる。

なお、ここに取り上げたのはすべて規則的な波についての実験結果であり、実際の海におけるような不規則波による越波については、まだ検討を行っていない。また、実験は一樣断面の水路内で二次元的に行なったのであるが、実際には波長の短い切れ波がいろいろな角度で防波堤にぶつかることが多く、三次元的な現象と見たほうが良い。さらに、捨石マウンドを透過して背後へ伝えられる波についても、未検討のままである。こうした問題点が残されていることを理解されたうえで、本実験の結果を実際の設計・計画に活用して頂ければ、誠に幸いである。

本実験の実施にあたっては、港湾技術研究所機材部菊谷徹技官、同水工部守屋義一技官の助力を得た。また実験の前半においては、元水工部・現北海道大学土岐祥介助教授の御協力を頂いた。上記の各位に厚く御礼申し上げます。次第であります。

参 考 文 献

- 1) Johnson, J.W., Fuchs, R.A. and Morison, J.R.: The Damping Action of Submerged Breakwater, Trans. A.G.U., Vol. 32, No. 5, p. 704-718, 1951.
- 2) 日本港湾協会: 港湾工事設計要覧, p. 120, 1959.
- 3) 細井正延・富永正昭: 離岸堤による波高減衰について, 第6回海岸工学講演会講演集, p. 121-123, 1959.
- 4) 近藤徹郎・佐藤 功: 防波堤天端高に関する研究, 北海道開発局土木試験所月報第 117 号, p. 1-15, 1963.
- 5) 合田良実・竹田英章・菊谷 徹: 防波堤の所要天端高に関する実験 (I) 一直立堤の越波による伝達波高, 第2回港湾技術研究所研究発表会講演概要, p. 1-7, 1964.
- 6) 合田良実・竹田英章・守屋義一: 防波堤の所要天端高に関する実験 (II) 一混成堤の越波による伝達波高, 第3回港湾技術研究所研究発表会講演概要, p. 63-66, 1965.
- 7) 合田良実: 造波水路内における二次波の移動現象について, 港湾技術水工部防波堤研究室資料 No. 8 (部内資料), pp. 22, 1961.