

防波堤天端高と越波に関する一研究

正員 北海道開発局土木試験所 近 藤 叔 郎

正員 同 佐 藤 功

1. 緒 言

港湾計画のなかで防波堤の計画は、外力としての波浪に對しその港の利用目的にかなう所要の静穏を確保するために効果的かつ経済的な配置と構造をもつことが要請される。このうち防波堤法線の配置は、港口からの侵入波とその回折波を支配するものであるから、自然条件に對して適正な配置を行なうことが必要である。

これには波浪に関する従来からの知識（たとえば波浪予報、屈折図、回折図など）が応用できるが、港内の任意の地点における波浪状況を予知するには、3次元の模型実験（平面遮へい実験）を行なうことが最良の手段と考えられる。

一方、防波堤を越波もしくは透過することによって港内に伝達する波は、防波堤構造に支配されるが、このうち透過波についてはそれ自体が港内波に占める割合は通常ごく小さいものとみられる。

防波堤の堤体構造の諸元のうちで天端高は、越波に対する防波機能に關して最も重要な要素である。

天端高はまた構造物に外力として伝く波力にも關連するものであるから、堤体の安定もしくは建設費用に關しても重要な因子であることは周知されている。

防波堤の計画設計の際、天端高の決定に当たり考慮すべき自然条件としては、潮位と波浪がある。そして対象とする波浪に對し（波高； H ），波そのものが越えないようにするには天端高を計画潮位上 $1.25H$ にとることが必要であるとされている¹⁾。しかるにこのような天端高をとる防波堤の堤体構造はかなり膨大なものになることから、越波に特に留意する必要にせまられる港内がせまく利用船舶が小型であるような小規模の港湾においてのみこの値に近い天

端高が採られているもので、たいていの防波堤は越波を許容する天端高をもつものである。

越波現象についての従来の研究は、海岸堤防などを対象として越波防止の立場から行なわれてきたものであり、越波防止の必要天端高、越波量、堤体形状などについてその成果をあげている。

しかし防波堤を対象として考えるならば、既述のように通常の場合はある程度の越波を認めざるを得ないし、また越波水量そのものよりもそれによって港内に発生する伝達波が問題となると考えられる。

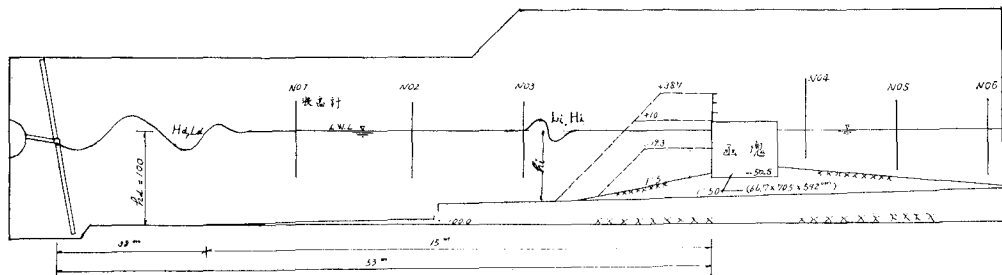
越波による港内への伝達波の問題は、現地観測ではこの現象のみを取出すことが不可能に近いことと、小規模の実験では現象の再現が困難であることなどから（2次元、3次元の場合とも）、港内波を扱う際には重要な問題であるにもかかわらず資料がほとんどないままにおかれている現状にある。そこで筆者らは、天端が水面上にある直立部をもつ防波堤を対象として、比較的大規模な2次元の実験を伴って越波現象とそれによる伝達波について考察を試みるものである。

そして天端高が伝達波に与える効果が知れるならば、それは、ともすれば経験的、画一的に計画されがちな防波堤天端高を合理的に計画するのに有用な資料となることが期待できる。

2. 実験方法

1) 実験水路

実験に使用した水路は長さ73m、幅および深さが1.8mの2次元コンクリート水槽で、別に幅0.8mの還流部を有し、観測部として長さ6m、高さ2.3mを片面強化ガラス



図—1 模型実験縦断面図

張にしてある。造波機は 35 HP の電動機によるベンジュラム型である。こが水路の一方端に勾配 1/50 の海浜地形 15 m を表面モルタル固定床で作製した。全体的な水路縦断面を図-1 に示す。

2) 堤体模型

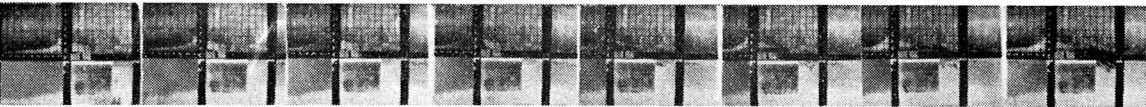
実験に供した防波堤断面の模型は、留萌港南防波堤の一部を縮尺 1/5 のコンクリートブロック (66.7×70.5×59.2 (cm), 空中重量 540 kg) で作製した。その構造は 図-1 に示すとおり、上記海浜地形上に 1/5 の前面勾配 1.4 m を小砂利で造成したマウンドの中央部に堤体模型を置き、その両脇には 54.5×70.5×59.2 (cm) の直方体ブロック 2 コを置いて直立堤とした。また胸壁に相当するものとして模型堤体上に 100×50 mm の溝型鋼を取付けるようにし、これを重ねて天端高の変位とした。なお付加的にテトラポット混成堤についても実験したが、これは現地使用の公称 25 t 型の 1/15 の模型として 7.2 kg のものを 図-1 の破線のように直立堤前面に積重ねたものにつき行なったものである。

3) 実験波

実験に用いた波は主に 10 種で範囲は下記に示すとおりである。記号は 図-1 による。(H₀, L₀ は深水波の値)

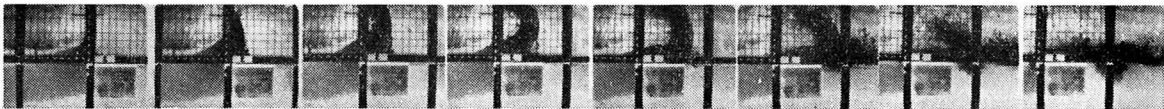
周 期; T	2.1~4.05 (sec)
水 深; h _d	90~105 (cm)

(1. a)



h_d; 90 cm, H₀; 33 cm, T; 2.6 sec, H/L; 0.047, h_c; 18.7 cm (1 コマ 0.1095 sec)

(1. b)



h_d; 90 cm, H₀; 44 cm, T; 2.95 sec, H/L; 0.055, h_c; 18.7 cm (1 コマ 0.1095 sec)

写真—1

体前面にて重複波となる場合で、入射波と反射波が重合して重複波をもたらしその一部が波の進行方向に押しやられ天端面に沿った流れとなって堤内側に落下する。(写真-1a)

ii) は堤体の近くで砕波する波についてみられるもので波が堤体に衝突する際には鉛直方向にかなり跳波して落下する。この際の落下点の位置は入射波の性質、天端高に関係があり、砕波の水平速度が大きく天端が低いときには堤体壁面よりかなり後方になるが、天端が高いときには鉛直方向への跳波高が大になるが落下位置は壁面に近くなる傾向がみられる。(写真-1b)

i) と ii) は、一般に入射波の砕波点の位置によって判別できると考えられるが、砕波点が堤体前面にあるときのみ ii)

水 深; h _i	70~85	"
波 高; H _d	23~51	(cm)
	H ₀	26~51 "
波形勾配; H _d /L _d	0.02~0.06	
	H ₀ /L ₀	0.012~0.044
相対水深; h _d /L _d	0.08~0.18	
	h/L ₀	0.035~0.153

4) 測定方法

波高の測定は抵抗線式波高計を使用し、沖波として堤体前面より 20 m の位置に 1 個を、入射波高を測定するため L/2, 3L/4 (2.5~8.5 m) に、さらに港内伝達波を観測するため、堤体前面より堤内側に 1 m 間隔の 3 点に波高計を設置し、各波高を 6 エレメントのペン書きオシログラフに自記させた。(図-1)

3. 越波の定性的性質

直立部をもつ防波堤を越える波については、入射波の性質によって二大別できることが知られているが、これは本実験でも確めることができた。(写真-1)

- i) 重複波型 (波状) 越波
- ii) 砕波型 (跳波状) 越波
- i) は堤体前面水深 (h) が波高 (H) の 2 倍以上あって堤

となるものではなく、砕波点が堤体より後にあるときでも (H/L) が大で波形が不安定である波であればかなりの跳波をもたらすことが実験結果から知れた。さらに現地では風の存在が跳波状越波をもたらすのに効果があることを見逃すことができない。

したがって純然たる重複波以外の砕波と重複波の中間的な波浪は一般に跳波状越波となると推定される。

4. 越波量

本研究においては既述のように越波量そのものを対象とせず、越波による波高伝達を主に扱うものだが、越波量が伝達波に密接な関連を持っていることからこのことについて

ては内外の研究成果を参照して考察する。

京都大学が行なった海岸堤防に関する研究²⁾によれば、鉛直壁における越波量(Q)は、無次元表示をすることによって下のよう3個の無次元数の関数となることが示されている。

$$\frac{2\pi Q}{H_0 L_0} = f\left(\frac{H_0}{L_0}, \frac{h}{L_0}, \frac{h_c}{H_0}\right)$$

ここに Q ; 1周期当たりの越波量(単位幅につき)

H_0 ; 深水波の波高, h ; 堤体の法先水深

L_0 ; " の波長, h_c ; 静水面上の天端高

ここで右辺の3コの無次元のパラメーターが Q に与える効果を京大と Beach Erosion Board³⁾(以下 B.E.B と略称)の実験から考察する。

i) H_0/L_0 ; 波高(H_0)が等しい場合, 周期(T)の大きいほどすなわち(H_0/L_0)の小さいほど Q が大になる。

このことは打上げ波高の場合と同様と傾向を示すものであり, 波のエネルギーの大きさから認められる。

ii) h/L_0 ; (h/L_0)のある値で Q が最大値をとる傾向がある。その位置は(H_0/L_0)によって異なるが砕波点よりもやや岸側にある。このことは対象となる波について, 越波量(Q)は, 重複波となる場合より砕波後のほうが大となることを示す。したがって防波堤のように堤体設置水深が比較的沖側にある場合には, 対象とする波浪の範囲を考慮したうえで, なるだけ砕波帯より沖側におくことが望まれるものである。

iii) h_c/H_0 ; (h_c/H_0)が大になるにつれ Q は減少するが, $Q=0$ とするのに要する天端高(h_c)は, (H_0/L_0)が小さいほど大になる傾向があるが $h_c/H_0=1.0\sim 3.0$ の範囲にあり, 一般に打上げ波高よりも大きい値となっている。

しかし, $h_c/H_0>1.0$ では Q はきわめて小さい値を示し, この領域での h_c の増加による Q の減少の割合は, $h_c/H_0<1.0$ に比し著しく小さくなっている。これは衝突波の容積は, 水面より H_0 以上では急激に小さくなっていることによるものと判断される。

以上, 3つのパラメーターの Q に対する作用を概括的に記した。このほかに堤体構造, 風の有無などの要素が考えられるが, ここでは直立堤につき無風状態を対象とする。上記のことから推察されるように越波量(Q)はかなり多くの諸要素の複雑な関数であることから, これを一般的な形に定式化することは理論的にも実験的にも困難視されている。そこで筆者らは, 通常の防波堤を対象として孤立波の容積の鉛直分布を基礎としてこれとB.E.Bの実験値とから近似的に越波量算定式を求めた。

孤立波の理論は, $0.04<(h/L_0)<0.10$ の範囲のいわゆる遷移状態の進行波の性質を説明するのに有効であることがこれまでの諸研究から知られている⁴⁾。そして一般の防波堤においては, その設置水深(h)と設計波に匹敵する波浪の

深水波長(L_0)とによる(h/L_0)の値は上記の範囲に含まれているものである。

孤立波の水面波形はBousinesqの式によると下のよう表わされる。

$$z = H \operatorname{sech}^2 \frac{x}{h} \sqrt{\frac{3H}{4h}} \quad (1)$$

ここで

x ; 原点を波の対称軸におき静水面にとった水平座標

z ; 原点を静水面にとり波の対称軸に沿う鉛直座標

H ; 波高 h ; 水深

この孤立波について 図-2 に示すようにある高さ(z_c)より上の水容積(V')を計算し, その結果を z_c で表現すると

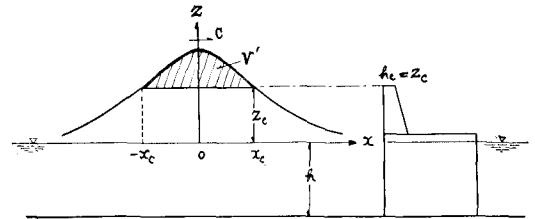


図-2 孤立波

$$\begin{aligned} V' &= \int_{-x_c}^{x_c} z \, dx - 2x_c z_c \\ &= \frac{4}{\sqrt{3}} H^{\frac{1}{2}} h^{\frac{3}{2}} \left\{ \left(1 - \frac{z_c}{H}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{z_c}{H} \operatorname{sech}^{-1} \left(\frac{z_c}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

孤立波の全容積(V_0)は上式で(h_c/H)=0とおいて得られ

$$V_0 = \frac{4}{\sqrt{3}} H^{\frac{1}{2}} h^{\frac{3}{2}} \quad (2')$$

これより V' と V_0 の比は

$$\frac{V'}{V_0} = \left(1 - \frac{z_c}{H}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{z_c}{H} \operatorname{sech}^{-1} \left(\frac{z_c}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2'')$$

すなわち孤立波の全容積 V_0 と z_c 以上の容積 V' との容積比(V'/V_0)は, 相対天端高(z_c/H)のみの関数として与えられる。ここで, 天端高(h_c)= z_c なる堤体を越える越波量(Q)は V' の一部と考える。この仮定は孤立波の水粒子の移動速度は水平方向への分速度が鉛直方向のそれに比しきわめて大きいことから可能と考える⁵⁾。

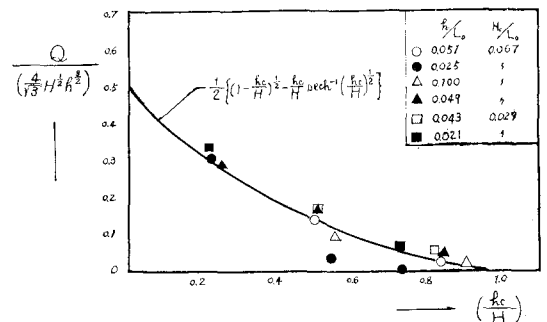


図-3 越波量と天端高

そうすれば、 Q を V_0 で除した (Q/V_0) なる無次元数は、(2)'式と同様に (h_c/H) のみの関数であらわされることが期待できる。図-3はB.E.Bの実験値から、孤立波の適用範囲である $0.02 < (h/L_0) < 0.1$ にある実験波について、 (Q/V_0) と (h_c/H) の関係を求めたものである。 (h_c/H) の小さい領域で Q を求めることはかなり困難であることから、B.E.Bの実験値もこの領域の値が少ないものであるが、この資料から Q は V' の約1/2となっていることが知れる。

この事実の正しい解析は、衝突波に関する今後の研究にまつものであるが、ここでは堤体による反射の影響が小さいとみなされる $0 \leq x \leq x_c$ の領域の V' の半容積が Q となるものと推定される。図-3の結果から $0.02 < h/L_0 \leq 0.1$ の浅海における直立堤の越波量算定式は近似的に次式で得られる。

$$Q = \frac{2}{\sqrt{3}} H^{\frac{1}{2}} h^{\frac{3}{2}} \left\{ \left(1 - \frac{h_c}{H} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{h_c}{H} \operatorname{sech}^{-1} \left(\frac{h_c}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (3)$$

ここで Q ; 1周期当たりの越波量 (単位幅につき)

h ; 堤体法先水深

H ; h における進行波の波高

h_c ; 静水面からの天端高

(3)式では $(h_c/H)=1$ で $Q=0$ となるが、実験値では既述のように、 $Q=0$ とする天端高は $(h_c/H)=1.0 \sim 3.0$ の範囲にある。しかし図-3からも知れるように $(h_c/H)=1.0$ における Q はきわめて小さいから、 $h_c/H \doteq 1.0$ においても(3)式は適用しようとする。

5. 伝達波

防波堤を越波した水量は堤内側の水面側に作用して波浪を発生させる。

この越波による伝達波は、静水面に物体を投下した場合から類推できるように一つの群波となる。

この群波は単独であるならば、その進行に伴い波高を減減してゆくから、越波量が小でかつ平面的、時間的に限られた場合にあらわれる伝達波は港内の静穏に支配的な要素とならないものと推察できる。

しかし、越波量が大き、防波堤の延長方向につきかなりの幅を持つ越波が入射波と同様に周期的にあらわれるときには、伝達波は振動波 (Oscillatory wave) としての性質をもつものと考えることができる。

写真-2は抵抗線型水位計によって、ペンオシログラフで自記した入射波と伝達波の水位一時間の記録 (図-1に示したNo. 3, No. 5の位置における) の一部である。

これによると入射波はきれいな波形を呈しているのに反し、伝達波のきわめて錯綜しており数多くの波によって合成された群波となっているが、これは落下水量が時間的、距離的にかなりの幅を持って水面に作用していることによると考えられる。

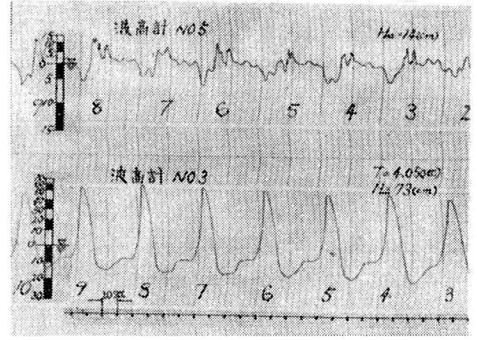


写真-2

しかしながらこの群波は入射波と等しい周期であらわれているから、これを個々の入射波に対応する伝達波として認めることができる。

本実験は図-1に示すような混成堤についてなされたものであるから伝達波は越波によるもののみでなくしてマウンド部分などからの透過波も含まれている。このため伝達波の波形が比較的安定したものになってあらわれていると考えられるが、越波の場合でもほぼ同様な波形となるものと推定される。

6. 波高伝達率 (実験)

上述したように伝達波は、個々の入射波に対応してあらわれるものであるから、入射波高 (H_i) と伝達波高 (H_t) との関連性を求めることが主要課題になる。

水中におかれた構造物を越えて波が伝達される問題は、港湾、海岸工学の分野においては潜堤の研究が古くからなされている。

しかし天端が静水面上にある場合についての研究はきわめて少なく、わずかにB.E.BとCalifornia大学の実験¹⁾が部分的にあるのみであるから、筆者らはこの場合についての実験を行ない波高伝達率を求めることとした。

4.でふれた越波量 (Q) に関する京大の研究成果と3)の考察から、波高伝達率 (H_t/H_i) は一般には下のような無次元数の関数となる。

$$\frac{H_t}{H_i} = f \left(\frac{h_c}{H_i}, \frac{h_i}{L_i}, \frac{H_i}{L_i}, \frac{h_i}{h_i} \right) \quad (4)$$

ここで H_i ; 入射波の波高, H_t ; 伝達波の波高

L_i ; " の波長, L_t ; " の波長

h_i ; 堤体前面水深, h_t ; 堤体背後の水深

h_c ; 静水面からの天端高

(H_t/H_i) ; 波高伝達率 (h_c/H_i) ; 相対天端高

(h_i/L_i) ; 入射波の相対水深 (h_t/h_i) ; 水深比

(H_i/L_i) ; 入射波の波形勾配

このうち (H_i/L_i) の効果については、B.E.B.などの実験によると潜堤の場合はこの値が小さいほど (H_t/H_i) を大に

するが、天端が水面上にあるときにはその傾向はあまり認められない。また (h_t/L_t) の効果については 4. における Q に関する考察から知れるように、砕波点に近い値のときに (H_t/H_t) を大にするものである。

したがって跳波状越波をもたらず、 (h_t/L_t) の限定された範囲の波については、 (h_t/h_t) が一定の場合は Q に関する (3) 式と同様に、波高伝達率 (H_t/H_t) は相対天端高 (h_c/H_t) のみの関数として得られると推定される。

図-1 の堤体について行なった実験結果を図-4 に示すが、これは (H_t/L_t) 、 (h_t/L_t) の異なる 2 種類の入射波について得たもので、縦軸に (H_t/H_t) を、横軸に (h_c/H_t) をとってあらわしてある。 H_t は堤体前面においた No. 2, No. 3 波高計で得た値から反射波の影響を除いて求め、また H_t は越波の落下点に近い No. 4, No. 5 波高計で得た値を用いたものである。波高計の設置位置は図-1 に記してある。

図-4 には B.E.B などの実験値¹⁾ をつけ加えてあるが、それらは主に潜堤部分における資料である。

図中の当実験値は、いずれも進行波としての砕波限界に近い値をもつ、跳波状越波をもたらず実験波によるものである。また当実験は図-1 から知れるように $h_t/h_t=1.0$ について行なった。

予期したように図-4 では、 (H_t/H_t) は (h_c/H_t) のみの関数として表わされることが知れる。ただし当実験は、図-2 に示したような混成堤であるから、図-4 の H_t は越波による伝達波のみならず、基礎マウンドの捨石部分を透過するエネルギーによる伝達波高も含まれている。このため、越波がほとんどない $(h_c/H_t) > 1.25$ の領域においても、 $(H_t/H_t) = 0.1$ 程度の伝達波高があらわれている。

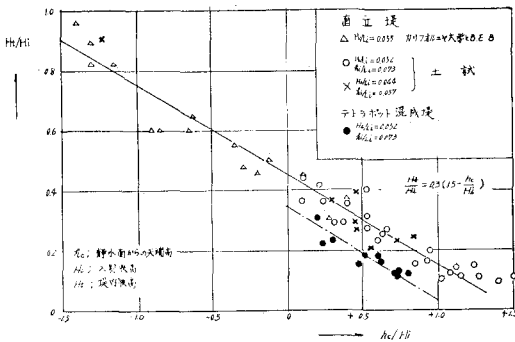


図-4 波高伝達率 (実験値)

(H_t/H_t) が一定であるこの範囲を除いて考えると、筆者らおよび B.E.B らの実験値から波高伝達率 (H_t/H_t) は相対天端高 (h_c/H_t) の関数として平均的に次式のようにあらわすことができる。

$$\frac{H_t}{H_t} = 0.3 \left(1.5 - \frac{h_c}{H_t} \right) \quad (5)$$

ただし、 $(h_c/H_t) \leq 1.25$

そしてこの (5) 式は h_c の (一) 領域すなわち潜堤の場合にも適用しうることが図-4 より知れる。

また付加的に行なった図-1 のテトラポット混成堤については同様に次式が得られた。

$$\frac{H_t}{H_t} = 0.3 \left(1.1 - \frac{h_c}{H_t} \right) \quad (5')$$

ただし、 $0 < h_c/H_t \leq 0.75$

(5), (5') 式はいずれも越波のみの伝達率ではなくして、透過波をも含めたものであるが、図-4 の結果から混成防波堤の場合はマウンドの捨石部分を透過する波のエネルギーもかなり大きいことが知れ、条件によってはこの透過波を無視できないものであると考えられる。

またこの実験結果から、衝突波頂高から求められた直立堤の越波限界 $(+1.25 H)$ はほぼ妥当であるが、 Q に関する 4. での考察結果から伝達波の発生を主に考える場合は、対象とする入射波の性質によっては上記の値よりもいくらか小さくしても良いと考えられる。

テトラポット混成堤のような消波構造をもつ場合には特に砕波については効果があるものであるが、 $(+0.75 H)$ 程度が越波限界となる。これは砕波の波高の静水面上の部分とはほぼ一致するもので、入射波のエネルギーが吸収され反射波の影響がごく小さいことを示すものである。

7. 波高伝達率 (孤立波による近似解)

主として越波による波高伝達率 (H_t/H_t) は、透過波をも含めて相対天端高 (h_c/H_t) のみの関数として (5) 式のようにあらわされることが実験により知れた。しかしこの式はごく平均的なものであって、入射波の性質その他の条件によって伝達率はかなり異なった値をとることは、B.E.B らの実験値¹⁾ においても示されている。

このことはまた、伝達波の問題の理論的な解を求めることの困難さを示唆しているものと思われる。

潜堤の波高伝達率の理論解は Fuchs⁴⁾ らが試みているがこれは微小振幅波につき入射波のエネルギー (E_i) と潜堤の反射エネルギー (E_r) との差 $(E_i - E_r)$ が伝達波のエネルギー (E_t) と等しいとして伝達率を求めたものである。しかるにこれはエネルギーの時間的平均について計算しているので比水深 $(d/h_t) = 1$ 、すなわち水面と天端が一致するときには波高伝達率 $(H_t/H_t) = 0$ となる不合理があり、この解は $d/h_t \leq 0.8$ の範囲でのみ適用され得るものである。実験結果では図-4 から知れるように、水面と天端が一致するとき、 $(h_c/H_t) = 0$ では、約 50% 程度の波高が伝達され、また入射波のエネルギーの 25% が伝達されていることが B.E.B の資料³⁾ から明らかにされている。

したがって天端が水面上にある場合の理論解は、上述の方法では求め得ず、厳密には越波した水量が堤内側に作用する力を知り、それによって発生する波浪を求めなくては

ならない。水面に外力が作用した際に起こる波に関しては、単純化された2, 3の場合についての理論解がある⁹⁾。しかし、越波により水面に作用する力は、時間的、距離的に複雑な分布をしているものであり、さらに越波の性質によってもかなり変化するものであるから、この方法によって伝達率を求めることは困難である。

そこで筆者らは4.における越波量(Q)に関する考察と同様に、入射波、伝達波とも孤立波とみなして越波のみによる波高伝達率を近似的に求めることとした。

入射波を孤立波とみなした場合の越波量(Q)は(3)式で与えられるが、この Q のもつエネルギーの一部が伝達波のエネルギーになる。このうち運動エネルギーは越波作用において失なわれると考えられるから、 Q のもつポテンシャルエネルギー($E_{p,q}$)のみが伝達するものである。この($E_{p,q}$)を入射波の容積のうちの Q となる部分すなわち V' の(うちの $0 \leq x \leq x_c$ 領域の)半容積につき求める。(図-2)

$$\begin{aligned} E_{p,q} &= \frac{w}{2} \int_0^{x_c} (z^2 - z_c^2) dx \\ &= \frac{wH^2}{2} \int_0^{x_c} \operatorname{sech}^4 \left(\frac{x}{h} \sqrt{\frac{3H}{4h}} \right) dx - \frac{w}{2} \int_0^{x_c} z_c^2 dx \\ &= \frac{1}{3^{\frac{3}{2}}} wH^{\frac{3}{2}} \cdot h^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{z_c}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \left(2 + \frac{z_c}{H} \right) \\ &\quad - \frac{wz_c^2}{2} \left(\frac{4h^3}{3H} \right)^{\frac{1}{2}} \operatorname{sech}^{-1} \left(\frac{z_c}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{3^{\frac{3}{2}}} wH^{\frac{3}{2}} \cdot h^{\frac{3}{2}} \left\{ \left(1 - \frac{z_c}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \left(2 + \frac{z_c}{H} \right) \right. \\ &\quad \left. - 3 \left(\frac{z_c}{H} \right)^2 \operatorname{sech}^{-1} \left(\frac{z_c}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

w ; 水の単位重量

孤立波の全エネルギー(E_0)は微小項を省略すると次式で得る。

$$E_0 = w \int_{-\infty}^{\infty} z^2 dx = \frac{8}{3^{\frac{3}{2}}} wH^{\frac{3}{2}} h^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

(6)式の $E_{p,q}$ が入射波によって伝達されるエネルギー(E_t)となるから、(6)式の右辺の諸数を入射波の表現にあらため、 $z_c = h_c$ とおくと

$$\begin{aligned} E_t' &= \frac{1}{3^{\frac{3}{2}}} wH_i^{\frac{3}{2}} \cdot h_i^{\frac{3}{2}} \left\{ \left(1 - \frac{h_c}{H_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left(2 + \frac{h_c}{H_i} \right) \right. \\ &\quad \left. - 3 \left(\frac{h_c}{H_i} \right)^2 \operatorname{sech}^{-1} \left(\frac{h_c}{H_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \end{aligned} \quad (6')$$

また伝達波の全エネルギー(E_t)は(7)式から、

$$E_t = \frac{8}{3^{\frac{3}{2}}} wH_t^{\frac{3}{2}} \cdot h_t^{\frac{3}{2}}$$

$E_t' = E_t$ であるから、これより(H_t/H_i)は次式で得る。

$$\begin{aligned} \frac{H_t}{H_i} &= \frac{1}{4} \left(\frac{h_t}{h_i} \right) \left\{ \left(1 - \frac{h_c}{H_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left(2 + \frac{h_c}{H_i} \right) \right. \\ &\quad \left. - 3 \left(\frac{h_c}{H_i} \right)^2 \operatorname{sech}^{-1} \left(\frac{h_c}{H_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{2}{3}} \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式は(H_t/H_i)が(h_t/h_i)と(h_c/H_i)の関数であることを

示しているが、(h_t/h_i)の効果については資料がないので検討できないが(H_t/H_i)に及ぼす影響が大きいことからして(h_t/h_i)のある範囲内のみでこの(8)式が適用しうるものと思われる。

図-5には(h_t/h_i)=1とした式の値を示したが、これを図-4の実験と比較すれば、実験値から透過波の影響を除くならばほぼこの(8)式の値に近似している。

(h_c/H_i)=1.0で(H_t/H_i)=0となるが、これは Q について4.節で記したように、ほぼ妥当な近似値である。

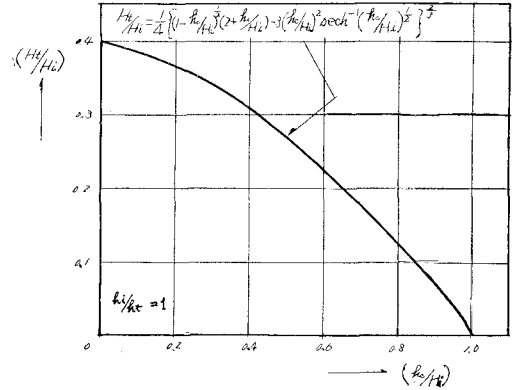


図-5 波高伝達率 (孤立波による)

8. 結 言

これまで防波堤天端高と越波との関連について、主として越波による伝達波を対象として考察してきた。

その結果として、天端高は越波量、波高伝達率と密接な関連を有するもので、これらは相対天端高(h_c/H_i)の関数として得られることが知れた。(3), (5), (8)式

1.において述べたように、越波の港内波に及ぼす影響については、これまでほとんど資料がないままにおかれていた。そのために、現地ではこれを過大視したり、また逆に過小視することになりがちである。

本研究はごく初歩的なものに過ぎず、今後の研究にまつところ大と考えるが、この方面の研究が現地における実測資料と相まって進展することを望むものである。

天端高はまた、既述のように波力と関連性を有するものであり、筆者らはこの問題についても当実験とともに波圧実験を行ない考察したが、ここでは紙数の関係で割愛した。これらの天端高に関する研究成果は、現地波浪観測資料を伴い、当実験のモデルとした留萌港南防波堤改良計画に適用されつつある。

本研究は当所港湾研究室が昭和36, 37年度に行なったものであり、本文をとりまとめる際に御指導を受けた宇田居室長、鴻上副室長に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本港湾協会編：港湾工事設計要覧 (1959 年版).
もしくは土木学会編：海岸保全施設設計便覧 (昭和 32 年版).
- 2) 石原・岩垣・三井：海岸堤防の越し波防止効果について
第 4 回海岸工学講演集 (1957)
- 3) Beach Erosion Board: Shore Protection Planning
and Design, Technical Report No. 4 (1961).
- 4) 石原藤次郎編：応用水理学中 II (昭和 33 年).
- 5) J. W. Daily・S. C. Stephan, Jr: 孤立波, 海岸工学 II
(土木学会海岸工学委員会訳, 昭和 30 年)
- 6) J. J. Stoker: Water Waves (1957).
- 7) 留蘭開発建設部：留蘭港南防波堤災害復旧工事について,
第 4 回港湾工事研究会報文集 (北海道開発局), 昭和 37 年.