

Water Curtain による波浪の減衰に関する実験的研究

——鉛直上向き噴流列の応用研究——

室 田 明*・村 岡 浩 爾**・中 山 茂 雄***

1. 概 説

流体防波堤、とくに気泡を低層部から噴出させた障壁によって消波効果を期待するという着想は、かなり以前から知られており、今世紀初めより Brasher¹⁾, Payne²⁾, Bogolepoff³⁾ などによって bubble breakwater として現地設置や室内実験が行なわれ、その可否について報告がなされてきた。その後、bubble breakwater による消波の主因が気泡の障壁そのものでなく、気泡上昇によって発生する連行流が水面に衝突したのち水平に流れる水平放散流にあることが判明し、このような観点から消波機構に関する理論的考察、詳細な模型実験、および大規模な現地実験の研究結果が相ついで発表された。すなわち、Unna⁴⁾ は水深方向に等分布する一様水平流による波の砕波機構を解析し、White⁵⁾ はこのような水平流によって消波効果の生ずることを実験的に確かめ実用化の可能性を示唆した。Carr⁶⁾ も実験によって消波効果を認めたが、長い波長の消波は気泡発生のための所要動力が大となり経済的に問題があるとした。Yi-Yuan⁷⁾ は水平流による深水波の破波現象が Unna および後述の Taylor の理論とよく一致することを基礎実験によって確かめた。栗原^{8), 9), 10)} は室内実験と大規模な現地実験によって、有効所要動力の算定に努め、実用化を推進するとともに、水平流による消波現象はその渦動粘性が主因であることを指摘した。Taylor¹¹⁾ は深水波について、任意の層の流速分布が一様分布および三角形分布をなす水平流による stopping action の理論を示し、Evans¹²⁾ は実験によって stopping velocity を求め、波高の大小による影響のあることを見出した。Bulson¹³⁾ は現地規模に匹敵する大水槽によって消波に要する空気量の算定に努めた。Wiegel¹⁴⁾ は風洞水槽による不規則波を対象として消波効果の特性を調べている。

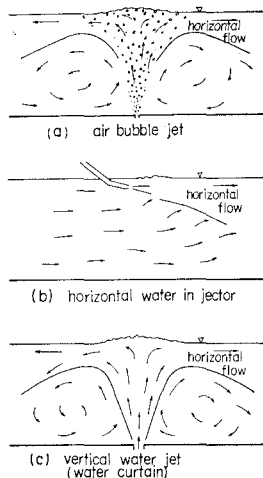
このように流体防波堤に関する研究は数多く行なわれてきており、それぞれの研究において対象にした侵入波特性に対する消波効果を確かめ、さらに実用化を推進するための所要動力の算定など、経済性の検討まで行なわれている。しかしながら、これらの研究に共通してい

ることは、限られた実験波の範囲内での可否議論がなされる難点があり、現実の波浪に应用する場合にどのような海況に対して有効であるか、あるいは不利であるかという一般的論議に結びつくような量的考察が行なわれていないことである。かといって、あらゆる状態を想定した詳細な実験をすることはかなり面倒なことである。なぜなら、流体防波堤の実現には、水平流特性および侵入波の波浪特性の2要因にもとづく制約があるのみならず、さらに施工、維持管理の経済性が検討されなければならないからである。

流体力学的な成果について前述した既往の研究をまとめれば、まず波浪特性に関しては、侵入波が深水波である場合が多く、shallowness の影響が明らかでないこと、侵入波の steepness との関連による総合的な判断が明白でないことである。もちろん最終的には、現地実験、あるいは少なくとも Wiegel の行なったような不規則波を対象とせねばならないのであるが、現段階ではやはり規則波によって shallowness および steepness の影響を明らかにすることが先決であろう。一方、水平流特性に関して述べる前に水平流を発生させる機構として実用的に可能なものに図-1 にあげた3つの方法が考えられよう。

従来の実験はすべて bubble jet および water injector によって行なわれている。これら3種の水平流発生方法による時、いずれの場合も水平流は放散流の形態をとり、水平・鉛直方向に複雑な流速分布をなすので、このことが消波機構の解析を困難にしている。すなわち、一様水平流による stopping action に関する Unna および Taylor の理論は、そのままこの場合に適用で

図-1 水平流発生方法



きないし、また栗原の渦動粘性にもとづく解析も水平流が放散型では現象の取扱いがかなり困難となる。

以上のような事情から、消波に寄与する水平流の特性

* 正会員 工博 大阪大学教授 土木工学科

** 正会員 工修 大阪大学講師 同

*** 正会員 工修 運輸省第四港湾建設局

を単純化された stopping velocity と結びつけて整理することは疑問であり、むしろ水平流特性を経ずに直接消波効率と水平流発生機構（たとえば、bubble jet によるならば、その供給空気量または所要動力）とを結びつけるほうがより实际的である。

筆者らは、このような流体防波堤にからむ力学的機構の複雑性に鑑み、もし消波の微視的な機構を当面問題にしないならば、消波の効果は水平流のある代表的な流速と侵入波特性との関係で把握できることに着目して、水平流の発生方法として 図-1 (c) の water jet を用いればすでに得られている筆者らの鉛直上向き噴流の実験成果^{15), 16)}によって流速分布の相似性を確認しているので、かなり一般的な形で water jet と消波効率とを直接結びつけることができると考えたのである。water jet が流体防波堤としてより経済的に適切であるかどうかという点に問題が残るが、これが bubble jet のように気液混相型でない点で力学的な取扱いが容易であることは幸いである。

2. Water Curtain の構造と水平流特性

実験水槽は全長 35 m、水槽幅を隔壁板で二分して約 40 cm の幅で実験を行なう。水槽のほぼ中央に manifold 噴流管を設置して water curtain を発生させ、流速測定は羽根径 1.5 cm のプロペラ式流速計を用いる。かぶりの水深は 20 cm、50 cm の 2 種類、すなわち h_s/d_o = 12.7, 31.8 とする。使用した噴出流量は単位長さ当りの平均流量 $q=0.244\sim0.032$ l/sec/cm の範囲である。噴流管を底面より上部に設置すれば、侵入波に対し潜堤としての消波作用が存在するおそれがあるが、侵入波が深水波である場合にはその影響はほとんどなく、浅水波の場合にはときによって若干影響されることが考えられる。しかし潜堤の消波効果を独立に求めることは実験遂行上かなり困難であるので、一応実験を通じてこれを考えないことにする。

Water curtain の発生装置として、筆者らは実用化を考慮して manifold 型の多孔噴流列を採用することにした。これによって生ずる流れの様相とその構造を図-2、図-3 に示す。図-2 に見られるように、水平流はある場所で流れの層が最も薄く、その水面付近で最大流速 U_{max} を生ずる。この様子は噴流の特性いかんにかかわらず同様である。たとえば、水平流の拡がりを調べるた

図-2 water curtain の流況図

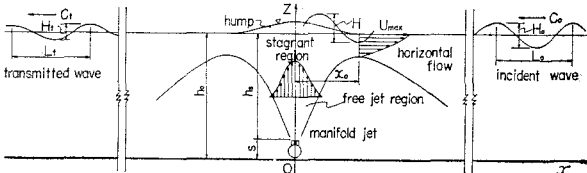


図-3 manifold 噴流管

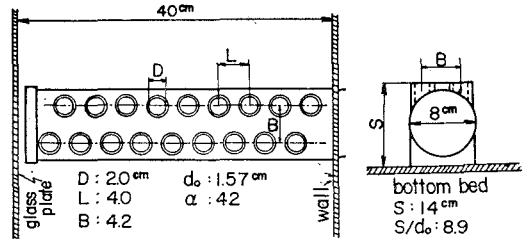
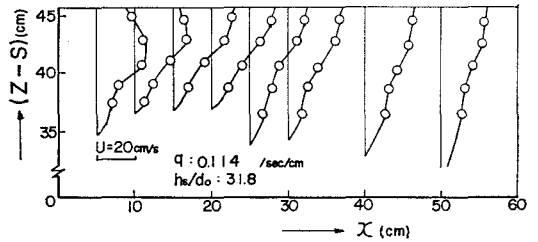


図-4 水平分散流の流速分布



めに水平方向に鉛直方向流速分布を測定した結果の一例が 図-4 であるが、これは噴流流量や水深を変えてもその一般的傾向は変わらない。また既往の実験によって、水平流発生方法が、air bubble jet であっても water injector であっても同様の分布形が得られている。これらのことから、水平流を代表するものとして U_{max} （これは stopping velocity と何ら関係はない）を考え、これと侵入波特性との関連によって消波効果を実験的に整理する。そのためにはまず、 U_{max} と噴流特性との関係を明らかにせねばならない。

すでに water curtain の鉛直方向流速（それに若干の水平流速）の分布に関して相似性の存在が多くの文献¹⁷⁾および筆者らによって確認されていることから、われわれは十分の信頼度をもって水平流と噴流特性との関係としてつぎの次元式を提案することができる。すなわち、

$$\frac{U_{max}}{\sqrt{gh_s}} = f\left\{\frac{h_s}{l}, \frac{M_0}{\rho gh_s^2}, (\text{manifold の幾何特性})\right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ ：水の密度、 g ：重力の加速度、 h_s ：かぶりの水深、 l ：噴流場における代表的な長さ、 M_0 ：manifold 噴流列の単位長さから出る噴出量の単位時間当り平均 momentum flux である。もし噴出孔が slit のように純二次元的であれば、 $l=d$ (d ：slit 幅)とすればよい。しかし manifold の場合は、図-3 のごとく個々の噴流孔の列を 2 列とし、各孔の配置を千鳥状とすれば、(孔径を D 、列方向の間隔を L 、2 列の間隔を B として) manifold の幾何特性は D, L, B の値によって表現される。manifold 噴流は巨視的には一つの二次元自由噴流であり、二次元的な取扱いが望まれるので、 D, L, B の代りにつぎの

manifold の場合は、図-3 のごとく個々の噴流孔の列を 2 列とし、各孔の配置を千鳥状とすれば、(孔径を D 、列方向の間隔を L 、2 列の間隔を B として) manifold の幾何特性は D, L, B の値によって表現される。manifold 噴流は巨視的には一つの二次元自由噴流であり、二次元的な取扱いが望まれるので、 D, L, B の代りにつぎの

ような量を考える。

$$d_0 = \frac{\pi D^2}{2L}, \quad \alpha = \frac{BL}{D^2} \quad \dots\dots(2)$$

d_0 は個々の噴出孔の総面積を噴流列全長で割った平均的な値で、換算 slit 幅と称する。また α は一つの噴出孔が平均的な面積に占める割合を示すもので、面積 factor と称し、この値が大きいと噴出孔の配置は粗で、小さいとき密である。図-3 の装置では、 $d_0 = 1.57 \text{ cm}$ 、 $\alpha = 4.2$ である。

さて、水平流と噴流特性との関係をきわめるには、種類の d_0 、 α の値に対して実験を行なうべきであるが、筆者らはこの種の実験は別に企画しているので、波浪減衰の実験に関する限り上記の1種類の manifold のみについて実験を行なう。このように d_0 、 α を固定すれば、式(1) はつぎのようになる。

$$\frac{U_{\max}}{\sqrt{gh_s}} = f\left(\frac{h_s}{d_0}, \frac{M_0}{\rho gh_s^2}\right) \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 $M_0 = \rho d_0 V_0^2$ 、 V_0 : 噴出流速

図-5 $U_{\max}$ の分布

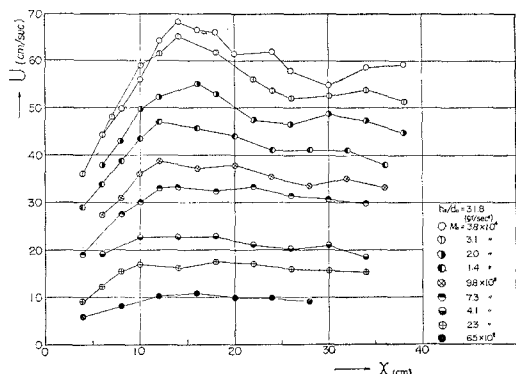
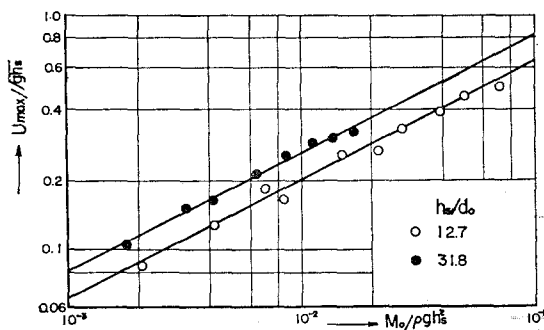


図-5 は M_0 の変化によって水面位置での水平流速の分布を調べたものである。この図より $U_{\max}$ が求められるが、 M_0 の大きな値に対しては $U_{\max}$ は明白であり、 M_0 の小さい場合には表面流速は x 方向に一樣で $U_{\max}$ は明確でない。図-6 は式(3) にしたがって $U_{\max}$ と噴流特性の関係を整理したもので、実験的に両者の関係

図-6 $U_{\max}$ と噴流特性との関係



が次のように明確に表わされる。すなわち、

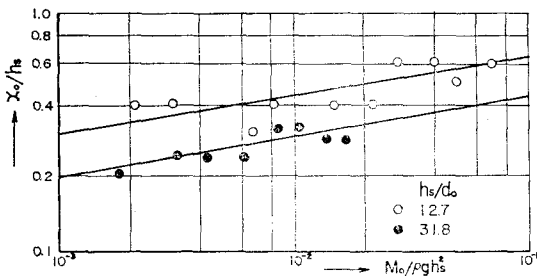
$$\left. \begin{aligned} h_s/d_0 = 12.7 \text{ の場合,} \\ U_{\max}/\sqrt{gh_s} = 2.0(M_0/\rho gh_s^2)^{1/2} \\ h_s/d_0 = 31.8 \text{ の場合,} \\ U_{\max}/\sqrt{gh_s} = 2.5(M_0/\rho gh_s^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4)$$

もし、 M_0 の代りに manifold 列の単位長さ当りの平均噴出流量 q によって整理すれば、式(4) は、

$$\left. \begin{aligned} h_s/d_0 = 12.7 \text{ の場合,} \\ U_{\max} = 0.358 q \text{ (cm-sec 単位)} \\ h_s/d_0 = 31.8 \text{ の場合,} \\ U_{\max} = 0.312 q \text{ (cm-sec 単位)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4.a)$$

式(4)、(4.a) より、 $U_{\max}$ は q に一次比例し、係数は h_s/d_0 の値に左右されること、すなわち manifold の設置水深とその幾何特性が決まれば両者の量的関係がわかることを意味する。図-7 は $U_{\max}$ の現われる位置 x_0 と噴流特性を調べたもので、資料に若干のばらつきがあるが、ほぼ $x_0/h_s \sim (M_0/\rho gh_s^2)^{1/6}$ の関係で表わされるようである。

図-7 $U_{\max}$ の位置と噴流特性との関係



以上のように水平流を代表する $U_{\max}$ は、比較的簡単に噴流特性と結びつけることができ、流体防波堤として manifold 噴流による water curtain を採用すれば、少なくとも流体力学的に消波効果と噴流特性を直接関連させるのにさほどの困難はないと考えられる。

3. Water Curtain による消波効果

(1) 実験方法と波浪特性

Water curtain によって発生した水平流の流量は、manifold 噴流管の沖側および岸側約 10 m 付近で回収し循環させる。水槽の一端に設けた plunger 型造波機によって起こされた波は、噴流管の沖側、岸側のおおの 2 m、4 m の地点に設置した波高計によって、発生させた波群の初めの数波を除き以後の連続した約 10 波を対象として、その平均の波高、周期、伝播速度などを記録する。消波実験に際しては、まず噴流のない状態で侵入波特性を調べ、ついで water curtain を発生させて消波効果、たとえば波高減衰、減衰率などを調べる。

侵入波特性はこの実験を通じて最も重要な要素であるから、使用した造波機の性能の限度で作動し、以下のような状態で実験を行なった。

shallowness : $h_0/L_0 = 0.09 \sim 0.78$

steepness : $H_0/L_0 = 0.01 \sim 0.07$

また、水平流の代表値 $U_{\max}$ は侵入波伝播速度 C_0 との比で規定し、一様水平対向流による波の停止限界 $C_0/U = 4.0$ を中心として、

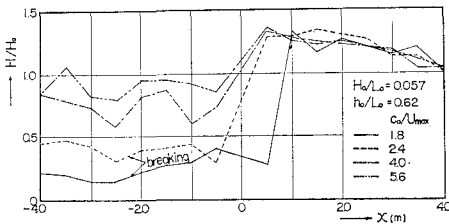
$$C_0/U_{\max} = 2.4, 3.2, 4.0, 4.8, 5.6$$

の5種類について実験を行なっている。

(2) 波高の変化と砕波

侵入波が water curtain の前後でどのように波高に変化するかを調べたのが図-8である。水深方向に等速な一様水平対向流においては、Yi-Yuan などにより、波高の変化は

図-8 波高の位置的变化

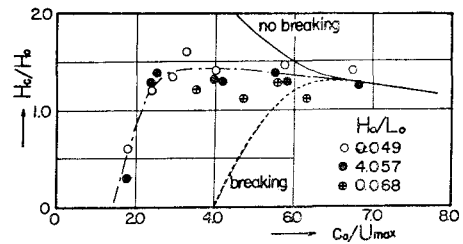


$$H/H_0 = \{2/(1+4U/C_0 + \sqrt{1+4U/C_0})\} \dots (5)$$

となり U/C_0 の増加にしたがって波高も増大する。water curtain によって生ずる水平流に関しては式 (5) とくらべるべくもないが、波高が対向流の増加とともに増大する傾向は同様で、水平流の大きさによってはほぼ $U_{\max}$ の生ずる位置で砕波が生じ、この場合には大きな波高減衰が期待される。しかし破波が起こらなくても波高が減衰する事実は、消波の機構を考えるうえに重要である。すなわち、破波が起こる直接の原因は明らかに水平流の stopping action であると考えねばならないが、その砕波の形態は波の波頂部分で崩れる部分砕波から完全砕波に近い砕波まで多くの段階があり、砕波が起これば侵入波のエネルギーが完全に消滅するというものではない。したがって砕波の原因が stopping action であっても、Taylor の理論による波動の完全消滅にもとづく stopping velocity のみで議論することは、放散型水平流である water curtain においてはおよそ妥当でないであろう。この事情は他の流体防波堤についても同様であると考えられる。

以上のことを別の観点で調べたのが図-9である。これは深水波について water curtain の位置での波高を H_c とし、これと水平流 $U_{\max}$ との関連で整理したものである。図中参考のために式 (5) で表わされる波高増大の理論曲線(実線)、および Yi-Yuan の実験曲線(破線)を示している。図中の筆者らの実験値に対し実験曲線(鎖線)を引くならば、water curtain の場合には砕波させるためには一様対向流の流れよりはかなり $U_{\max}$ を大きくしてやらねばならないことがわかる。別の実験によ

図-9 $C_0/U_{\max}$ と波高の関係(深水波)

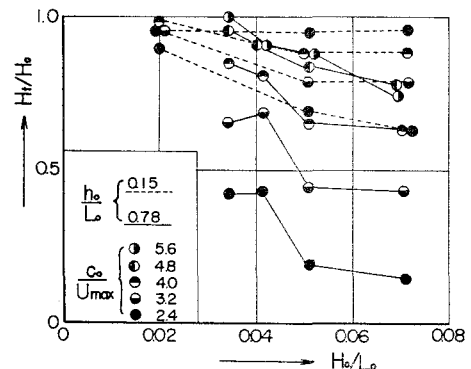


って砕波は波の steepness にも関係し、結論的には $U_{\max}$ が大きく、かつ steepness の大きいごく限られた場合のみ完全砕波が起こるといえる。そして本実験においては、大部分の侵入波は部分砕波が砕波することなく通過するが、それにもかかわらず場合によっては著しい波高減衰が観察されるのである。このことは消波現象の原因として対向流の stopping action のほかに、栗原の提案する渦動粘性の効果も考慮すべきであることを示唆していると思われる。実際に効果を量的に検討するのは困難であるが、この水平流の攪乱のほかに water curtain そのものによる波動の攪乱、および噴流の衝突によって水面に生ずる hump なども消波に若干影響をおよぼしているであろう。

(3) steepness の波高減衰におよぼす影響

侵入波の steepness が消波効果にどのように影響するかは、Evans によって量的な実験がなされている。しかし彼の場合は stopping action にしたがって完全な消波を意図しているため、steepness を変えることによってどの程度消波効率が変化するか判断しにくい欠点がある。筆者らは shallowness を一定値に固定し、steepness を変化させた実験により図-10を得た。これによって明らかに steepness の大きいほど消波効率のよいことがわかる。またこれには shallowness が関係し、shallowness が大きいほど、いいかえれば深水性の波ほどその影響は著しい。このことは、steepness が大きな波は一般に不安定であるから、部分砕波あるいは完全砕波に移行しやすいと考えられるからである。

図-10 steepness と波高減衰の関係

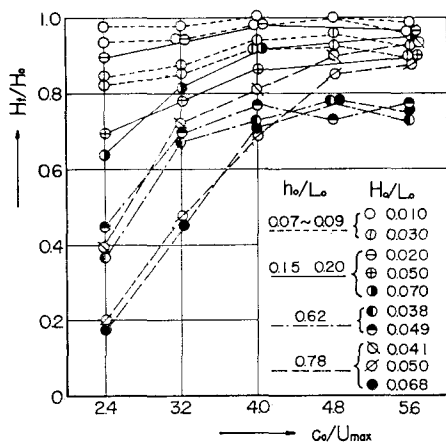


(4) shallowness の波高減衰におよぼす影響

従来の研究では限られた shallowness の範囲での実験が多く、stopping action の検証が主たる研究方向であったためほとんど深水波を対象としたものであった。事実、流体防波堤の設置位置の地理的条件と沖波特性から考えれば、深水波の消波が最も実際問題と結びつくものであるかも知れない。この場合には侵入波の特性はその波長のみによって決まり、波長が大きいとき stopping velocity も大きくなるという事実が理論的にまた実験的に明らかにされているにすぎなかった。しかしながら、流体防波堤の応用は必ずしも深水波に限らないから shallowness の影響も考える必要がある。

図-11 は shallowness をパラメーターとして U_{max} と波高減衰との関係を図示したものである。図から明らかなごとく、shallowness が大きいとき、すなわち深水性の波ほど波高減衰の効果が著しいことがわかる。このことに関する限り stopping action の理論が教えるところと全く傾向が一致する。また、同一 shallowness における steepness の影響が同図からうかがわれるが、これについては図-10 で説明したとおりである。

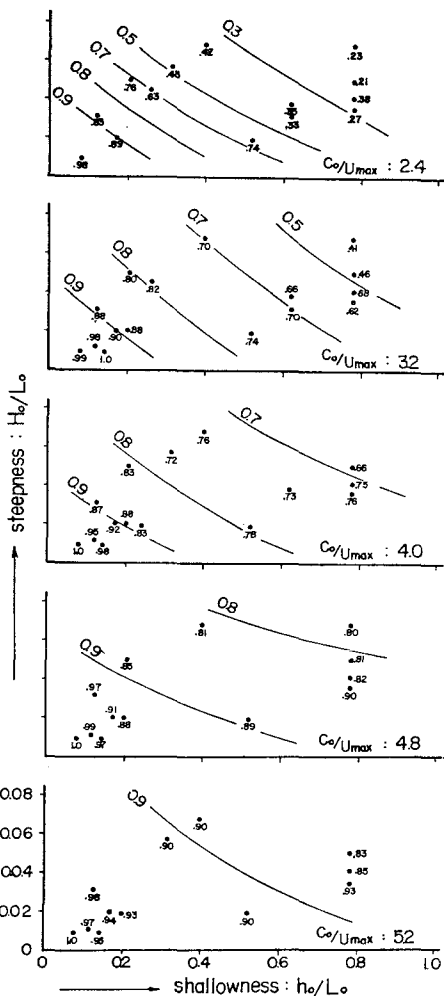
図-11 shallowness と波高減衰の関係



(5) 消波効果の量的推定

流体防波堤の消波効果は以上に述べたように種々の要素が関係する。筆者らはとくに侵入波特性に注目し、これを steepness, shallowness によって表現すると同時に水平流の代表的な表現として U_{max} を用いることにより、従来の研究の複雑な成果をもっと一般的に表示できることを予測した。すなわち、steepness, shallowness, および U_{max} の三者の関連のもとに波高の減衰率（または通過率 H_i/H_0 ）を量的に推定することが流体力学的な面での最終的な目標である。

このような観点から、同じ C_0/U_{max} の値ごとに、すべての実験資料を steepness と shallowness を座標軸にとって plot し、これより等 H_i/H_0 曲線を描いたのが図-12 である。この等 H_i/H_0 曲線は遺憾ながら

図-12 水平流特性、侵入波特性、および波高減衰の関係 (図中の値は H_i/H_0 を示す)

資料が不十分で確定的なものとはいえないが、こうした整理によって侵入波特性が消波におよぼす効果をきわめて明瞭に理解することができる。また従来の研究では完全砕波によって波浪の全面消滅を意図する扱いが多いのであるが、流体防波堤の柔な構造性格上、必ずしも完璧な消波をねらわず何割かの波高減衰を期待すれば十分な場合も当然考えられるであろう。このような場合には図-12 のごとき図表をいっそう整備することによって実用的な設計指針が得られるはずである。

4. Water Curtain の実用化に関する検討

以上の実験的成果をもとに実際の波浪に対しどの程度の波高減衰が期待でき、そのためにはどの程度の噴流規模が必要かを、例によって検討しよう。

(例) 三河湾北岸で観測された最大風波はほぼ以下のとおりである。

波高 $H_0=2.0$ m, 周期 $T=4.0$ sec, 水深 $h_0=10$ m.

これより

伝播速度 $C_0=6.16$ m/sec, 波長 $L_0=24.7$ m

steepness $H_0/L_0=0.081$, shallowness $h_0/L_0=0.405$

を得る。図-12 より, 水平流に関して $C_0/U_{\max}=2.4$ ($U_{\max}=2.57$ m/sec) を採用すれば, 波高の減衰率約 7 割, $C_0/U_{\max}=3.2$ ($U_{\max}=1.93$ m/sec) とすれば減衰率約 4 割弱が期待できる。前者の場合について噴流規模を算出しよう。それには筆者らの実験の $h_s/d_0=31.8$, 12.7 のいずれを適用させるかによって異なってくる。

a) $h_s/d_0=31.8$ の実験にしたがうとき

$$s/d_0=8.9, \therefore (h_s+s)/d_0=h_0/d_0=40.7$$

$h_0=10$ m であるからこれより,

$$d_0=0.25 \text{ m}, s=2.2 \text{ m}, h_s=7.8 \text{ m}$$

を得る。 $d_0=0.25$ m に対する manifold の幾何形状は, 実験模型と実物の縮尺化より簡単に以下のように求まる。

$$D=0.32 \text{ m}, L=0.64 \text{ m}, B=0.67 \text{ m}$$

また, $U_{\max}/\sqrt{gh_s}=0.306$ であるから, 図-6 より $M_0/\rho gh_s^2=0.014$ を得, これより manifold から噴出する出口流速 V_0 , および長さ 1 m 当りの噴出流量が以下のように与えられる。

$$V_0=5.86 \text{ m/sec}, q=1.5 \text{ m}^3/\text{sec/m}$$

b) $h_s/d_0=12.7$ の実験にしたがうとき,

同様の計算によって諸量は以下のごとくである。

$$d_0=0.46 \text{ m}, s=4.1 \text{ m}, h_s=5.9 \text{ m}$$

$$D=0.59 \text{ m}, L=1.18 \text{ m}, B=1.24 \text{ m}$$

$$V_0=4.7 \text{ m/sec}, q=2.2 \text{ m}^3/\text{sec/m}$$

以上の例からわかるように, 実際の波浪を対象とした消波はどのような場合も完璧な消波効果を上げることは不可能であるが, 侵入波特性によってはかなり波を鎮めることができる。また筆者らが用いた manifold 形状 (面積 factor : 4.2, 相対噴出孔高 $s/d_0=8.9$) を適用する場合には, 噴出孔位置を必ずしも浅い水深に設置することが有利であるとは限らない。

所要噴出流量を供給するための必要動力などの算定は実験で明確にすることは困難であり, 一方理論的に算出することも, 一般に manifold 噴流の流出抵抗が不明のため, 簡単にはできない。したがってこの方面の検討がなされれば water curtain による流体防波堤の経済性および維持管理といった面が明らかにされるであろう。

5. 結 論

流体防波堤として water curtain を採用した消波効果の実験から, つぎのように結論されるであろう。

1) 侵入波は対向水平流によって完全砕波するとき最も消波効果が大きい, 砕波しなくても波高は減衰す

る。このことは, 消波効果は stopping action によるのみならず, 水平流の渦動粘性による波高減衰も考えられることを示唆するものである。

2) 消波効率は侵入波特性によって著しく左右される。すなわち, 水平流特性が変わらないとき, steepness が大きいほど, また shallowness が大きい深水性の波ほど消波効果は著しい。

3) 侵入波特性が変わらないとき, 水平流, すなわち $C_0/U_{\max}$ の値が小さいほど消波効果が上がる。これら侵入波特性と水平流特性との関連による波高減衰の効果は, 図-12 によって量的に示すことができる。

4) water curtain の採用は, その経済性, 維持管理の面で未解決であるが, 噴流による流速分布の力学的相似性から, 比較的容易に噴流特性と水平流特性が結びつけられ, したがって消波効果に関し気液混相の air bubble jet よりもいっそう一般的な議論がなしうという利点がある。

参 考 文 献

- 1) P. Brasher : Comp. Air (Mag.) 26, 9921, 1921.
- 2) M.P. Payne : Admir. Exper. Wks, no. 17, 1925.
- 3) I.A. Bogolepoff : Bull. Perm. Int. Navig. Congr. No. 23, 1937.
- 4) P.J.H. Unna : Waves and tidal streams, Nature, Vol. 149, p. 219, 1942.
- 5) C.M. White : Admiralty Report, ATR/MISC, 1685, 1943.
- 6) J.H. Carr : Mobile breakwater studies, Calif. Inst. of Tech., Hydro. Lab., Rept., No. N-64. 2, p. 54, 1950.
- 7) Yi-Yuan Yu : Breaking of Waves by Opposing Current, Transaction of AGU, Vol. 33, No. 1, p. 39, 1952.
- 8) 栗原道徳 : 空気防波堤について, 第 1 回海岸工学講演会講演集, 1954.
- 9) 栗原道徳 : 空気防波堤について (II), 第 2 回海岸工学講演会講演集, 1955.
- 10) 栗原道徳 : 空気防波堤について (III), 第 3 回海岸工学講演会講演集, 1956.
- 11) G.I. Taylor : The action of a surface current used as a breakwater, Proc. Roy. Soc. A, 231, p. 446, 1955.
- 12) J.T. Evans : Pneumatic and similar breakwaters, Proc. Roy. Soc. A, 231, p. 457, 1955.
- 13) P.S. Bulson : Large Scale Bubble Breakwater Experiments, Dock and Harbour Auth., No. 516, p. 191, 1963.
- 14) J.A. Williams and R. L. Wiegel : Attenuation of Wind Waves by a Hydraulic Breakwater, Coastal Eng. Ch. 29, p. 500, 1963.
- 15) 室田 明・村岡浩爾・中山茂雄 : 鉛直上向き噴流に関する実験的研究, 第 11 回水理講演会講演集, 1967.
- 16) A. Murota and K. Muraoka : Turbulent Diffusion of the Vertically Upward Jet. Proc. of 12th Cong. of IAHR, Vol. 4, p. 60, 1967.
- 17) たとえば W. Tollmien : Berechnung der turbulenten Ausbreitungsvorgänge, ZAMM, Bd. 6, 1926.