

# Air Curtain での消波に関する基礎実験

川 端 猛\*

## The Experimental Study on the Breakwater by Air Curtain

by Takeshi Kawabata

This paper principally treats of the following contents on the breakwater by air curtain.

- (1) Decline about the height of wave.
- (2) Transmission of the wave energy.
- (3) Effects of the elements with air jet.
- (4) Property of the horizontal current.

### 1. 緒 言

Philip Brasher (米国)が1906年に海底のトンネル工事中に海底より漏洩している空気泡が水面の波を消波することに気付いて以来、この現象を消波機構として利用する試みが各国でなされ、又多くの研究者がこの消波作用の原因について、圧縮説、上昇水流説、水平流説、砕波説、粘性逸散説、反射説などをあげ理論的又は実験的研究を発表している。いろいろな過程を経て現在では消波の主因は気泡そのものではなく、気泡上昇に伴い水滴を連行し鉛直な連行流が水平流を生じさせて波の進行を阻止するものと考えられている。

この種のものを実際の構造物として利用する場合には、水中にパイプを布設しコンプレッサー等により空気を送り水中に気泡を発生させる透過性のものであるために、基礎の条件に左右されることなく施工が容易で工事費も割合に安く、工期も短かくてすむなどの利点があるが、今後の問題としては維持管理の面で悩むであろう。現段階では長期的連続的利用よりも短期的断続的利用の方が有利と思える。利用の過程においては軍事的な利用も考えられたが一般的に考えられる利用法は①海岸や湖での防波堤として②港やドックの入口に設置し浮遊物の進入防止③水産養殖などの囲い④河口での塩水の進入防止、などであろう。

ここでは基礎的知識を得るための方法として防波堤として利用する場合に、空気噴出の条件(空気噴出量、噴出管設置深さ、噴出幅、噴出孔径など)と波の要素(波高、波長、周期、波形勾配など)が消波作用にどのような影響を与えるかを実験的に調べようとするものである。

---

\* 理工学部土木工学科講師 水理学

## 2. 実験装置と実験方法

実験に使用した水路は長さ22m、幅0.8m、高さ1.0mの鋼製二次元造波水路で、一端にフラッター型造波機が、又両端には消波装置が設けられている。造波機の反対側水路端よりパイプを水路床に沿って水路のほぼ中央部まで導き、先端には空気噴出部を設けてある。噴出部は噴出管を適宜取り換えることができるようにしてある。噴出管の外径は3cmであり水路の外部に設置された10IPのコンプレッサーにより空気が送られる。圧送される空気量はパイプに直接取付けた直示フロー式流量計により測定される。波の測定には容量式波高計を用い、空気噴出部中央の前後対称に2m及び3mの地点に合計4本を設置した。波形は増幅器を通じてペン書き電磁オシログラフにより記録した。水平流速の測定にはプロペラ式流向流速計を使用した。(図-1)

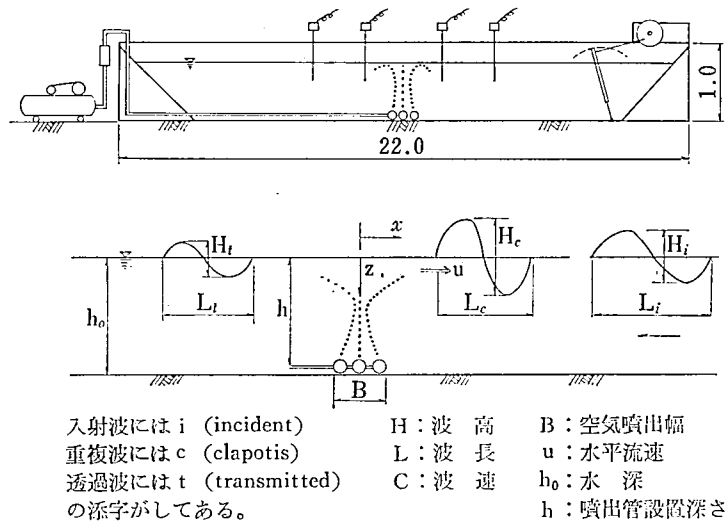


図-1 実験装置と記号

表-1 入射波の条件

波 の 要 素	範 囲
波 高 H	5~22 (cm)
周 期 T	0.95~1.75 (sec)
波 速 C	150~210 (cm/sec)
波 長 L	150~350 (cm)
波形勾配 H/L	0.01~0.10
比 水 深 h <sub>0</sub> /L	0.16~0.48

表-2 空気噴出条件

要 素	範 囲
噴出管設置深さ h	50, 60, 70 (cm)
噴出管本数	1, 2, 3 (本)
噴 出 幅 B	3, 26, 49 (cm)
噴 出 孔 径 φ	1, 2, 3, 4, 5 (mm)
空気噴出量 Q	0.1~1.0 (m <sup>3</sup> /min)

表-3 空気噴出管

噴 出 孔 径 φ (mm)	1	2	3	4	5
中 心 間 隔 (mm)	4.5	6.5	10	13	18
1 本当りの孔数	172	118	79	59	43
1 本当りの孔面積 (cm <sup>2</sup> )	1.35	3.70	5.59	7.41	8.44

(入射波の測定) 気泡を噴出させない状態で波を起こし図一1での堤外側に設置された2本の波高計により測定した。入射波の種類は波形勾配 ( $H_i/L_i = 0.01 \sim 0.10$ ) を基準にして、水深 ( $h_0 = 50, 60, 70\text{cm}$ ) 毎に10波ずつ合計30波の入射波を用いた。(表一1)

(重複波と透過波の測定) コンプレッサーを作動し気泡を噴出させた状態のところに、同時に上記の入射波を起こし堤外側に設置された波高計により重複波を、堤内側の波高計により透過波を測定した。空気噴出に関する条件は表一2及び表一3の通りである。

(水平流速の測定) 波を起こさない状態でコンプレッサーを作動し気泡を発生させて水平流を起こし、十分に流況が安定した後に流向流速計を  $x$  及び  $z$  方向に移動しつつ測定した。

### 3. 消波効果

防波堤による消波の效果を知るには例えば反射波の測定を行ない、そのエネルギーや波長、波高等を知り計算する方法もあるが透過波の測定は技術的にも経済的にも割合い案にできるので透過波と入射波を中心に、エネルギー伝達の状況、波高の変化等を調べる。又水平流が消波の主因と考えられるので、その性質も調べてみる。

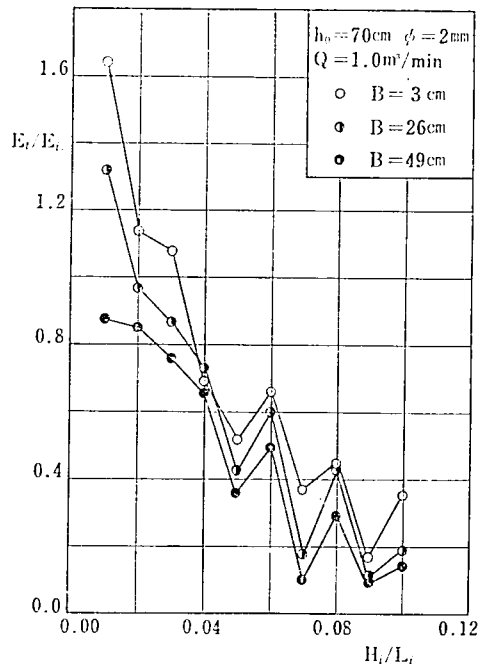
#### (1) エネルギーの伝達

一般に波のエネルギーは群速度で輸送されると考えられる。表面波の進行方向に垂直な任意の鉛直面の単位幅当りの単位時間に輸送される波のエネルギー ( $E$ ) は

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 U$$

であり群速度  $U$  は浅海波の場合には

$$U = n\omega$$



図一2 波動エネルギーの伝達

$$\text{ただし } n = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi h_0/L}{\sinh(4\pi h_0/L)} \right]$$

$$\omega = \frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h_0}{L}$$

入射波のエネルギーを  $E_i$

透過波のエネルギーを  $E_t$

としてその比  $E_t/E_i$  (エネルギー伝達率) は防波堤による消波効果を知る一つの要素と考えられるだろう。図-2は入射波の波形勾配 ( $H_i/L_i$ ) とエネルギー伝達率 ( $E_t/E_i$ ) の関係を示している。波形勾配の大きい波にはエネルギー伝達率が小さく、この種の防波堤が有効であることが推察できるだろう。波形勾配の大きい波は安定が悪く外力に対して変化しやすいためであろうか。図-2の中で波形勾配の小さい部分ではエネルギー伝達率が1.0を越える現象が見られる。この事は堤内側に向う水平流が透過波に影響してむしろ逆に波高を大きくしたのであろう。

## (2) 波高の減衰

防波堤により入射波高が透過後に減衰する様子を調べてみる。入射波高 ( $H_i$ ) と透過波高 ( $H_t$ ) との差 ( $H_i - H_t$ ) と入射波高 ( $H_i$ ) との比 ( $(H_i - H_t)/H_i$ ) を波高減衰率とするとその値が大きい程透過波高が小さいことを示している。図-3は波形勾配 ( $H_i/L_i$ ) と波高減衰率 ( $\frac{H_i - H_t}{H_i}$ ) の関係を示している。波形勾配の増加につれて波高減衰率も大きくなり(1)と同様に波形勾配の大きい波に消波効果のあることが推察できる。

波形勾配は波の形状を表わすが同じ値でも規模の大きい波も小さい波もある。そこで波の起きている地点での水深 ( $h_0$ ) と波長 ( $L_i$ ) との比 ( $h_0/L_i$ ) を考えてみよう。 $h_0/L_i$  (比

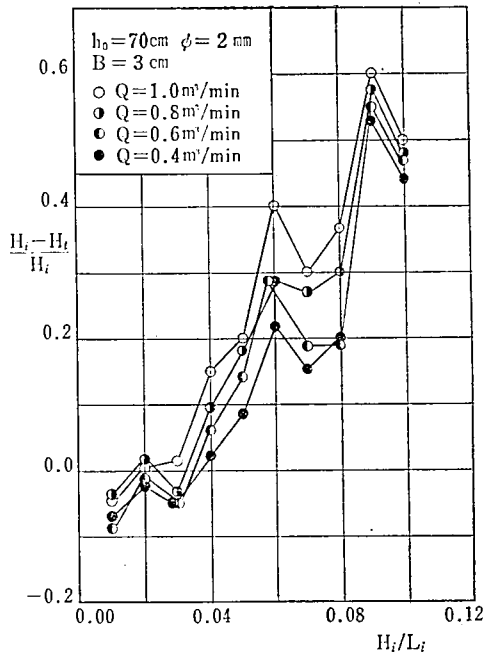


図-3 波高の減衰

水深)はその波が水深に対してどれ程の規模であるかを表わす指標であり、水深に対して大きな波長を持つ波の場合には  $h_0/L_i$  が小さく、その波がより浅水性の波であることを意味し反対の場合にはより深水性の波となる。図-4 は比水深と波高減衰率の関係を示している。比水深の範囲は  $h_0/L_i = 0.16 \sim 0.48$  とあまり広くはないが比水深の増加につれて波高減衰率も増加している。深水性の波に消波効果があると推察できる。

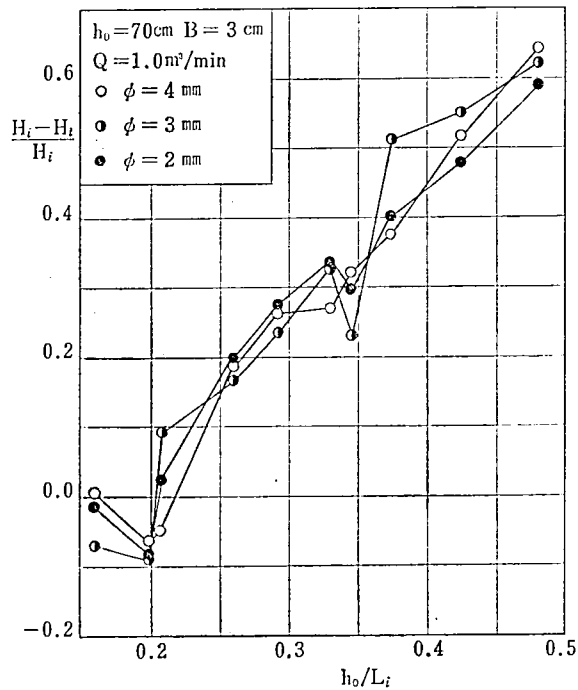


図-4 比水深の影響

### (3) 水平流の性質

Brasher の圧縮説や Laurie の上昇水流説に対して Taylor, Unna, White 等は消波の主因は気泡の障壁そのものでなく水平流が波の進行を阻止することを指摘している。又

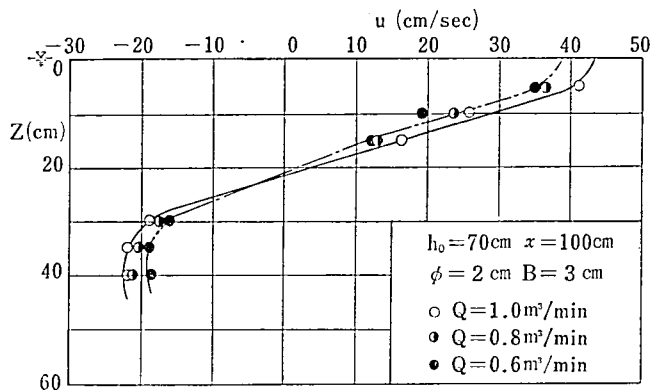
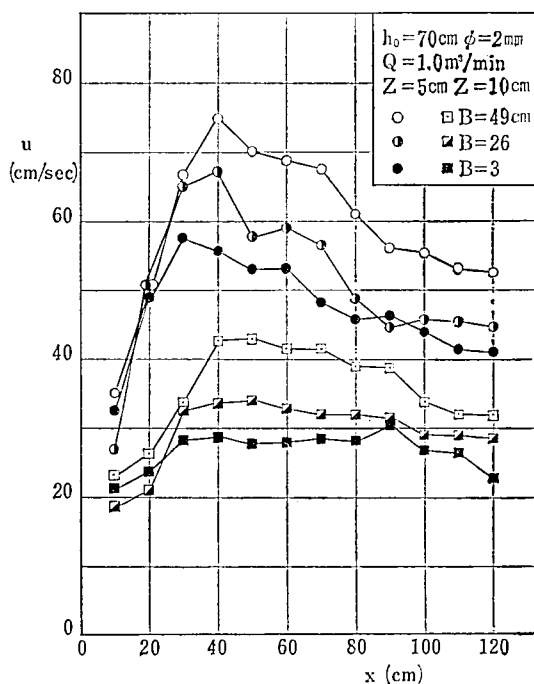


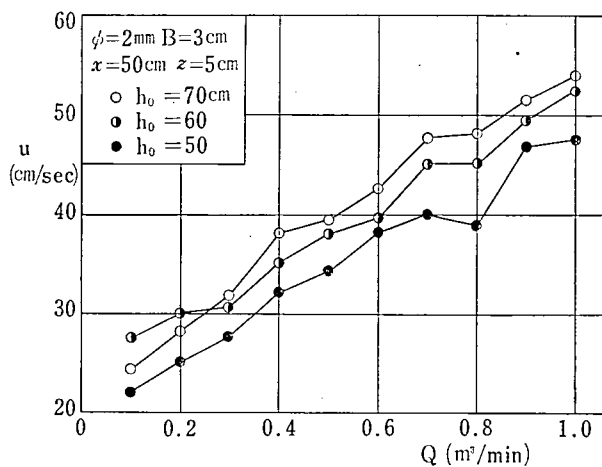
図-5 一地点での水平流速分布

Yi-Yuan は水平流が碎波現象を生じさせて消波されることを確かめている。栗原等は水平流に伴う渦動粘性が無視できないこと、さらには中村等のように水平流に伴う反射作用が無視できないことも指摘している。いずれにしても水平流が消波に重要な役割を果たすことは事実のようである。

図一5は一地点での水平流速分布を示している。最大流速の生ずるのは水面付近にあることがわかる。又堤外側に向う流れは噴出管設置深さ（この実験では水深に等しい）の $\frac{1}{2}$ 位しかなく、中間の遷移領域の下側には反対向きの流れが生じて対流を起こしている。



図一6 各地点での水平流速



図一7 空気噴出量と水平流速

図一6はx軸方向の水平流速(u)の分布を示している。空気噴出管に近い所では上昇流の成分が残っているために水平流速は割合に小さく、やや離れた地点で最大流速を生じている。この付近では上昇流の成分がなくなり完全に水平流になっていると思われる。進行して来た入射波が砕波するのもこの付近であるのが観測されている。図には示されていないが水平流速の成分はかなり遠くまで及んでいる。

図一7は空気噴出量(Q)と水平流速(U)との関係を示している。Taylor等の研究では $U \propto \sqrt[3]{Q}$ であるとしているが、この資料でも当てはまる。

#### (4) 空気噴出条件の影響

##### ① 空気噴出幅

図一2では空気噴出幅(B)別に波形勾配とエネルギー伝達率の関係を示しているが、噴出幅の大きい程エネルギー伝達率も小さく消波効果が大いと思える。波高減衰率についても同様の傾向を示す。又図一6でも噴出幅の大きい程水平流速も大きくなる傾向を示している。これらの事から推察すると噴出幅の大きいことは上昇気泡帯の厚みが増し、連行水量の増加、水平流速の増大となり効果が良くなると考えられる。別の見方をすれば、噴出管本数を増す(噴出幅が大きくなる)ことにより1本の場合に受ける影響を数回受けることになるとも云える。この実験では噴出幅と波の要素との関係が十分に検討されておらず今後に残された課題である。

##### ② 空気噴出孔径

当初、孔径の大小により、形成される気泡にも大小が生じて、表面積の差異により連行水量が異なると考えた。そこで図一4の如く、孔径別に効果を比較したのであるが孔径の大小の影響が効果にははっきりと現われない結果となった。気泡の発生する様子を観察すると気泡は孔径の大きさにあまり関係なく、その内部圧と水圧に適した大きさになって上昇するようである。又大きい気泡は上昇中に適度の大きさに分裂するものもある。

##### ③ 空気噴出量

図一3は空気噴出量別に波高減衰率を示す図である。多少のバラツキはあるが空気噴出量の多い程、波高減衰率は大きくなり消波に有利である。図一5、図一7の如くに、噴出量の増加が水平流速を大きくする傾向にある。噴出幅同様の過程で消波に有利になるのであろう。

##### ④ 噴出管設置深さ

この実験では水深と設置深さを同じにしてあるので図には水深のみを表示してある。図一7では設置深さ別に水平流速の大きさが読み取れる。深く設置される程水平流速が大きくなる傾向を示している。気泡の上昇時間が長くなり加速度が増し、連行力が増大するためであろうか。

## 4. 結 語

波の要素として波高、波長、周期、波速、さらに二次的な波形勾配、比水深など、噴出条件として空気噴出量、噴出管設置深さ、噴出孔径、噴出幅等の要素の消波効果への影響を調べた訳であるが以上の事を表示すると、

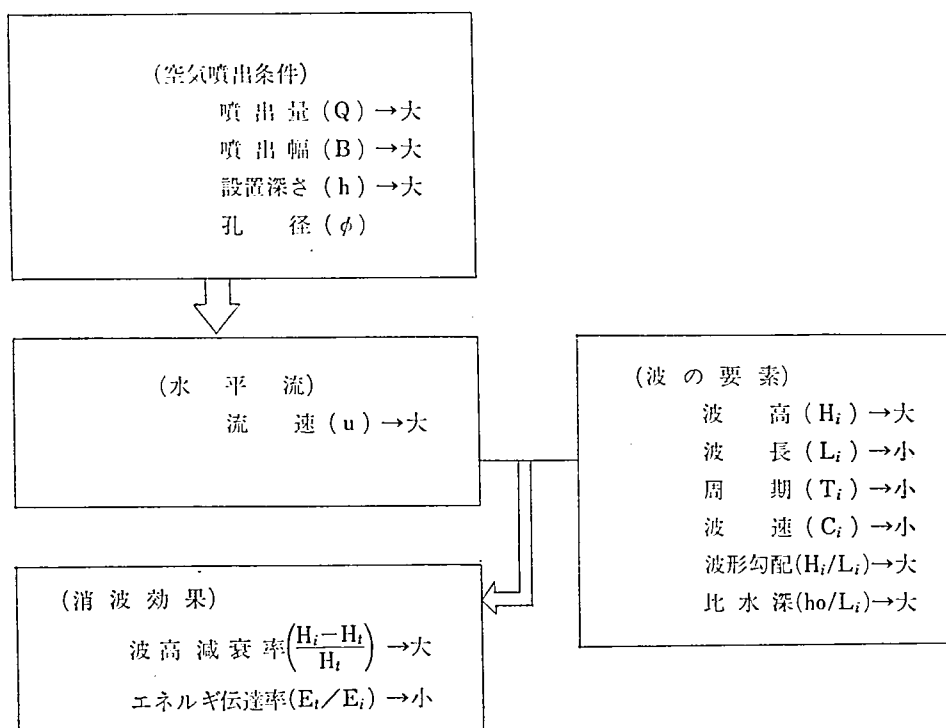


表-4

という結果を得た。

ここでは定性的な考察に重点を置いて定量的な考察は避けた。定量的な面については資料の精度を高めた上で別の機会に言及したいと思います。

末筆で失礼ですが、この実験研究に当り終始暖かいご指導を賜りました明星大学・加藤正晴教授に深く感謝の意を表します。又実験に参加した安田雅美、米沢信久、荒井賢一、簀野利之の諸君のご助力に敬意を表します。

#### 参考文献

- ・栗原道德：空気防波堤について（Ⅰ）第1回海岸工学講演会講演集
- ・栗原道德：空気防波堤について（Ⅱ）第2回海岸工学講演会講演集
- ・栗原道德：空気防波堤について（Ⅲ）第3回海岸工学講演会講演集
- ・室田 明他：Water Curtain による波浪の減衰に関する実験的研究  
第15回海岸工学講演会講演集
- ・中村 充：エアーカーテンによる上昇流の発生に関する研究  
第18回海岸工学講演会講演集
- ・中村 充・エアーカーテンによる消波機構について  
第19回海岸工学講演会講演集
- ・P. S. Bulson: The Theory and Design of Bubble Breakwaters.  
Coastal Engineering · chapter 64.
- ・J. T. Evans: Pneumatic and Similar Breakwaters.  
The Dock & Harbour Authority—December. 1955.
- ・P. S. Bulson: Currents Produced by an Air Curtain in Deep Water.  
The Dock & Harbour Authority. —May 1961.
- ・P. S. Bulson: Underwater Air Curtain Near a Vertical Wall.  
The Dock & Harbour Authority. —February 1965.
- ・James L. Green: Pneumatic Breakwaters to Protect Dredges. A. S. C. E.