

空 気 防 波 堤 に つ い て⁽¹⁾

九州大学教授 理学博士 栗 原 道 徳

空気防波堤は深海に面する港湾施設の保護あるいは簡易防波施設、または可動防波装置としてその利用面は甚だ広い。従つて空気防波堤がもし実際に有効な防波機構として役立つものならば、小規模の港湾施設の多いわが國にとつて重要な意義をもつものである。然るにいまだその消波の物理的機構も把握されるに至らず、従つて適切な設計を行ひ得ないばかりでなく、その実用化の可能性すら確かめられていない。応用力学研究所水文学研究委員会は昨年来この問題をとりあげ、その基礎的研究を行つてゐる。いまだ予備研究の域を脱しないが、得られた結果の概要を報告し、空気防波堤に興味をもつ研究者の参考に供しようとするものである。

1. 空気防波堤の歴史

海底から噴出する多量の気泡が波の勢力を消失せしめる作用は、半世紀の昔(1906)米人 Philip Brasher によつて発見された。彼はこの作用は気泡の圧縮性に基づく緩衝作用によるものと理解し、San Pedro 附近の El Segundo 港に設備して著しい成功を収めた。これに続いて多くの空気防波堤が設置された模様であるが、その大多数は失敗に終り、防波施設として確立されることなく無為の半世紀が過ぎ去つたのである。

1952年に至り、A. H. Laurie⁽²⁾ は成功を収めた Brasher の場合と不成功に終つたその他の数多くの場合とを比較検討して、空気防波堤の機構についての Brasher の理解が誤りであつたこと及びこれが成功するための条件を指摘し、多くの研究者の注意を喚起した。すなわち彼の説によれば、空気防波堤の機能は気泡の上昇に伴つて誘導される上昇水流が波動の周期運動を最も効果的に破壊せしめ得る場合に発揮されるものであり、そのためには充分な空気量を必要とするほかに、空気放出管は波動運動のほとんど伝えられないような 30 ft 以上の深さに設置されなければならない。

1953年、彼は Dover 港内のドックにおける彼の試みの成功を報じている⁽³⁾。他方同年ダンケルク港に関する模型実験は、空気防波堤の失敗を報じている。

空気防波堤の基礎的研究はごく少ないようで、各所で行われたであろう小規模の試みを除いて、われわれの知る範囲では I. A. Bogolepoff⁽⁴⁾ によつて報ぜら

れているソ連中央科学研究所におけるものを挙げ得るのみである。この研究は大型水槽で行われた大規模のものであり、夥しい資料を与えているが、著者自身も述べているように、これらを用いて空気防波堤の機構を探り、その性能を定量的に知することは困難である。このような点について見るとき、最近に実施されつつある Docks and Inland Waterways Laboratory⁽⁵⁾ の wave tank における研究は、その結果を期待される。つぎに、Bogolepoff 及び Laurie の論文に挙げられている事例の内、結果が多少とも積極的であつたものを挙げておく。

1. 米国, Atlantic City, Million Dollar 埠頭 (1908).

管長 1,000 m 空気消費量 1,428 m³/min.

結果：大うねりを減衰せしめた。

2. 米国, Maine 州, Crotch (Cross?) 島.

管長 100 m, 管径 100 mm, 孔口径 6 mm, 気孔 間隔 15 cm, 深度 14 m, 圧搾機 75 m³/min. のもの 2 基。

結果：飛沫が岸辺の樹頂を越えるような大寄せ波を15分間以内に減衰せしめた。

3. 米国, Massachusetts 州, Buzzard 湾 (汽船 Yankee 号救助に使用)。

管長 30 m, 管径 10 cm, 気孔口径 6 mm, 間隔 15 cm, 圧搾機 3 基, 性能不明。

結果：汽船を越えて逆捲きつつあつた波浪は、圧搾空気の作用によつて、低長なうねりと化した。

4. 米国, San Pedro, El Segundo 港 (1907)。

管長 320 ft, 管径 4 in., ノーズル直径 1/2 in., 間隔 6 in., 管の深度 30 ft, 圧搾機 2,000 ft³/min のもの 2 基, 空気使用量 1,500 ft³/min.

結果：12~15 ft の波を崩壊せしめた。

5. 英国, Dover 港, Train Ferry Dock (1952)。

ガスタービン圧搾機 500~1,800 ft³/min.

結果：ドック附近の不規則な波浪、うねりがよく消されている。

2. 消波作用と波長の関係

空気防波堤の気泡の圧縮性が波に及ぼす影響は、

Laurie の吟味によつても明らかに小さいから、こゝでは初めから無視する。またどのような方法によつて波を消すにしても、それが流体力学的なものである限り、浅海波より深海波の方が容易であるように思われるので、この報告ではすべて深海波について述べる。

空気防波堤の消波作用は、結局気泡の上昇によつて誘起される水流に基づくものと考えられる。そこで一般に何等かの方法によつて起された水流が、消波に役立つとする。簡単のために問題はすべて波の進行方向を含む鉛直面内の 2 次元的なものとして、水流の幾何学的性質は一つの標準長 l により表わされるものとする。然るとき消波のために要する波頂に沿う単位長さごとの動力 P は、波長 λ 、波高 h 、水流の標準長 l 、海水の密度 ρ 及び重力の加速度 g の函数である。従つて次元考察によつて、

$$P = \rho g^{3/2} \lambda^{5/2} f\left(\frac{h}{\lambda}, \frac{l}{\lambda}\right) \quad (2.1)$$

を得る。

例えば所要動力として、入つて来る波のエネルギーに対する出て行く波のエネルギーの比が一定の値をとる場合の動力を採用すれば、これは波高に著しく影響されるとは考えられない。従つて近似的に波高の影響を無視すれば、(2.1) 式は

$$P = C \rho g^{3/2} \lambda^{5/2} \quad (2.2)$$

となる。ここに C は l/λ の無次元函数である。

空気防波堤の場合には、気泡放出管の深度を H 、大気圧を水柱で測つて H_0 とすれば、同様に次式を得る：

$$l = H f(H/H_0) \quad (2.3)$$

(2.2)、(2.3) 式は空気防波堤の所要動力を推定するために重要な関係式である。(2.2) 式はもし室内実験を詳細に実施することができれば、確立することができる。そして装置を種々改良して C を最小にするような l/λ の値が決定されるはずである。

(2.2) 式がもっている一つの重要な意義は、消波機構、従つて空気防波堤の性能は波長に著しい関係があり、この関係を度外視して空気防波堤の研究を行うことは無意味であることを示す点にある。

3. 外国における実験的研究

才 1 節に挙げた実例では対象となつている波の波長についての記述がないので、これが重要な役割をもつ空気防波堤の研究及び設計に対して、これらは決定的な資料とはなり難いが、港湾の地形、構造その他の記述から、波長についての若干の知識でも得られるならば、実物大の実験資料として、現在の研究の段階では重要なものである。

才 1 節に述べたように、Laurie は空気防波堤の消

波機構を論ずるに際し、波動運動のほとんど行われなような深度 30 ft 以上に空気放出管を敷設すべきことを主張している。このことは成功している空気防波堤の対象となつていた波の波長が、あまり長いものではないことを意味している。

極めて不的確ではあるが、種々の記述からさきに掲げた実例 1, 2, 4 いずれの場合にもあまり長い波は対象となつていないと思われる。そこで博多湾内博多港外における風速 14 m/sec の際の平均波長 14.6 m と同程度のものを仮定してみる。

Dover 港の図を見れば明らかなように、Dock の前面における波は決して長波長のものではない。波長 10 m を推定しておけば安全である。

これらの推定波長に対して、それぞれの場合の空気消費量、圧縮に要する正味の馬力はつぎのごとくなる。

	1	2	4	5
空気消費量 l/sec.m	23.8	25	7.4	15.8
動力 kW/m	1.65	1.94	0.48	1.03
推定波長 m	15	15	15	10

(3.1)

外国でも空気防波堤の組織的な研究は、あまり行われていない。前述のように、ソ連水運中央科学研究所におけるもの、最近には Docks and Inland Waterways Research Laboratory におけるものが知られているだけである。

前者は深さ 3.5 m、幅 6.7 m、長さ 100 m の水槽で考えられる種々の parameters の値について 500 回以上の測定が行われている極めて大規模なものであるが、これらからは、あまり精度のよくない 1 組の資料

$$\left. \begin{aligned} Q &= 2.7 \text{ l/sec. m, } \lambda = 2.14 \text{ m} \\ \text{管の深さ} &= 2.4 \text{ m, } \therefore P = 0.065 \text{ kW/m} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

が得られるに過ぎない。

Docks and Inland Waterways Research Laboratory における研究は、同所の硝子張りの Wave tank にて行われつつあるものである。発表されている注目すべき結果は、bubbles の大きさがある程度以下に小さければ、その大きさは消波機能に関係しないと言うことと、消波状態を示している写真である。これより直ちに bubble jet の拡がりは、直線的であること及び水平流に伴う乱れは波の崩壊によつて著しく強められることが知られる。

4. 応用力学研究所における室内実験

1954 年 3 月、実験装置完成の直前水槽拡張工事のため当分研究を中止せざるを得なくなつたので、実験装置解体に際し急いで行つた予備実験の結果をこゝに報告する。

鉛直な両面に適当に細かい穴を開けられた四角な箱

をノズルとして用いた。鉛直2面の間隔は大型の場合に15 cm, 小型のものはその約半分程度であつた。大型ノズルは深さに較べて巾が広過ぎ、ために bubble jet は非常に不安定であり、従つてその能率は著しく悪かつた。

空気圧縮機は容量 10 l/sec の普通の往復機関を使用した。タンクの空気圧は分岐管を用いて調節し、空気消費量はオリフィスによつて測定した。波は造波板を用いて起した。

流量計とポンプ容量の許す範囲で使用空気量を数段に分け、各空気量について波長をできるだけ広範囲に変化せしめ、その際の bubble jet の前後における波高を測定した。以下簡単にその結果を挙げる。

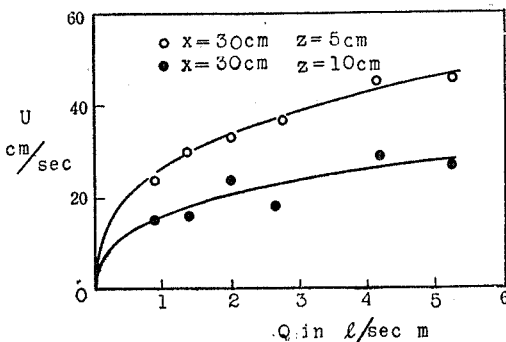
(1) 消波と波高の關係 代表的な波長として 129 cm の場合に、造波板の振巾を順次変化せしめて減衰率と波高の關係を検べたが、顕著な關係はなく、波高の高いほど若干減衰しやすい傾向を示していた。

(2) 流速と空気量の關係 ノズルの中心の深度は約 80 cm であつた。これより気泡が上昇する場合に、始めは第6節に述べられる理論に従つて上昇流を生ずるが、これは水表面附近にきて水平に向きを変え、水平噴流となる。これらの流れの模様は、空気量、流速に關係なく相似的であると考えられる。従つて水平流についても上昇流について同じ函数形の流速と空気量の關係が成立するはずである。

図一1 は bubble jet の中心から水平に 30 cm, 水面から 5 及び 10 cm の深さの点における流速と空気量の關係を示すものであり、これらの結果は

$$\text{流速} \propto (\text{空気量})^{1/3} \quad (4.1)$$

なる關係によつてよく表わされている(図中の実線)。



図一1 空気消費量と流速の關係

(3) 波長及び空気消費量の消波率に及ぼす影響 水平流、上昇流の不安定のために波の減衰率の測定が困難であつたばかりでなく、安定のときに較べて能率の著しく悪いことが觀察的に容易に認められた。

図一2 は比較的安定な小型ノズルの場合の測定の例を示している。

波高の減衰率が50%となるところを限界状態と定めて、測定資料を整理すると次のようになる：

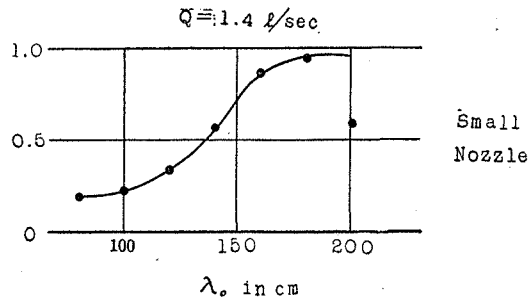
(i) 小型ノズル

Q l/sec. m	0.73	1.13	1.40	1.87
限界波長 cm	110	120	140	165
動力 kW/m	.0058	.009	.011	.015

(ii) 大型ノズル

Q l/sec. m	0.93	1.53	1.93	2.86	3.80	5.06
限界波長 cm	120	115	110	155	150	150
動力 kW/m	.0074	.0122	.0154	.0229	.0304	.0405

前に述べたように大型ノズルの場合には流れが不安定であり、ために小型ノズルの場合に較べて消波能力は劣つている。



図一2 消波特性曲線(実線)、波長と減衰率(波高比)の關係

以上求められた空気防波堤に必要な動力と波長の關係を図示すると 図一3 のようになる。室内実験の結果、特に大型ノズルに関するものは能率が悪く右方に寄つている。条件を種々変えることによつて、測定点を如何ほど左方に移動させることができるであろうか、その限度が問題なのである。

5. 流体力学的考察

空気防波堤の物理学的機構に関して Laurie の説明があるが、実際消波の模様を觀察してみると、波が消滅するような場合には、上昇流に続く水表面に沿う水平流の影響が著しく、波は上昇流の活潑な領域に入る前に次第に波長を短める。それと同時に波高は高くなるが、水平流の最も著しい部分に至つて急に消失してしまう。そこには上昇流は何等の役割をも持たないように觀察される。従つて以下水平流による波の減衰の模様を少しく考察してみる。

よく知られているように、静水で波長 λ の波は

$$c^2 = g/k, \quad k = 2\pi/\lambda \quad (5.1)$$

にて与えられる速度 c をもつて進行してゆく。また水が全体として U なる速度で水平に流れている場合に

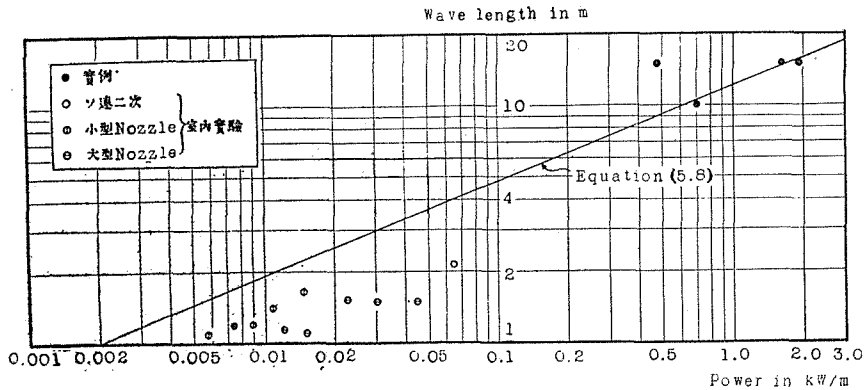


図-3 波長と消波所要動力

も、波はこの水に対して(5.1)式で与えられる c をもつて進行してゆく。すなわち $e^{i(\sigma t - kx)}$ なる型で波を表わせば、

$$(\sigma/k - U)^2 = g/k \quad (5.2)$$

によつて、われわれに対する進行速度 σ/k が与えられる。

さて、われわれの場合には、静水中を伝わってきた波が速度 U の流域にきて周期的な圧力変動を与え、これによつて波がこの流域に伝播して行くものと考えられる。従つて初めに与えられるものは波長ではなく、振動数または σ なのである。そして(5.2)式に従つて与えられた σ に対する k を求める問題になる。すなわち k に関する2次方程式 $U^2 k^2 - (2U\sigma + g)k + \sigma^2 = 0$ の根を求めることになる。 $U \rightarrow 0$ のさいに(5.1)式に帰着する根を採用すれば、

$$k = \frac{g + 2\sigma U - g\sqrt{1 + 4U\sigma/g}}{2U^2} \quad (5.3)$$

σ が与えられているものとして、静水の場合の量には“0”をつけて区別することにとすると、

$$\sigma^2 = k_0 g, \quad c_0^2 = g/k_0, \quad \sigma c_0 = g \quad (5.4)$$

流れの方向が波の進行方向と反対の場合だけが興味があるから、 n を正の数として、

$$c_0/U = -n \quad (4.5)$$

とおけば、(5.3)式はつぎのようになる。

$$\frac{k}{k_0} = \frac{n^2}{2} \left\{ 1 - \frac{2}{n} - \sqrt{1 - \frac{4}{n}} \right\} \quad (5.6)$$

この式から知られるように、 $n \leq 4$ の場合に k/k_0 は複素数となり、しかもその虚数部は負である。従つて波動項 $e^{i(\sigma t - kx)}$ には減衰要素が入る。すなわち流体が波に向つて、その進行速度の n 倍以上の流速をもつて流れるときには、波はこの水平流によつて崩壊される。その際の減衰係数は、

$$-k_i = \frac{n^2}{2} \sqrt{\frac{4}{n} - 1} \cdot k_0, \quad 4 \geq n > 2 \quad (5.7)$$

にて与えられる。従つて n が4より少しく小さくなると急激に増加し、丁度 $n=4$ が限界値であつて、これより少しでも小さくなると波は完全に崩壊し去つてしまうと考へて差支えない。

波数 k_r は、 n が無限大から減少して4になる間に、1より次第に増加して4になる。すなわち波長は次第に縮つて限界値 $\lambda_0/4$ となる。始めに述べたように、波が消失するような場合には先ず波長が著しく短縮されると言う事実は、この理論的結果に対応しているものであろう。

以上の結果は図-4に実線で示されている。

以上われわれは無限に深い海水が一様に U なる速度で流れている場合を考えたが、流れの層の厚みが $1/k_0$ に較べてあまり小さくならない限り、同様の結論が得られる。またさらに一般的な流速分布の場合も同様である。

空気防波堤の作用を持続させるためには、絶えず上

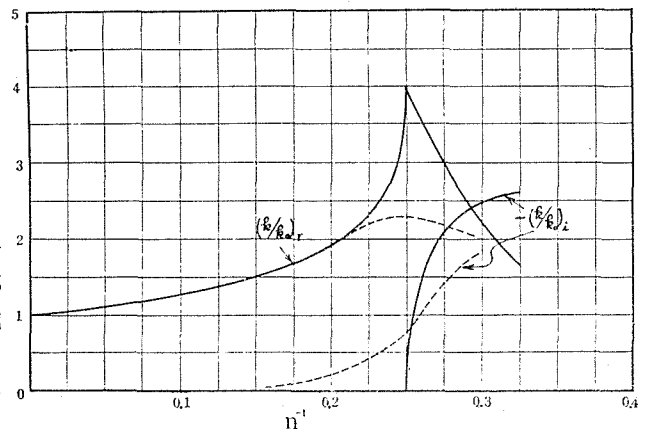


図-4 波数及び減衰係数と流速の関係

述の条件を満足するような水流を起さねばならない。従つて空気防波堤に必要な動力は、理論的に計算することができる。空気防波堤の単位の長さについての所要動力を P (kW/m) とし、流速が直線的に変化する場合につき、その最小値を求めるとつぎのようになる。

$$P_{min} = 0.002 \times \lambda^{2.5}, \quad \lambda \text{ in m.} \quad (5.8)$$

この式は (2.2) 式に対応するものである。実際の空気防波堤では bubble jet の 能率または水流の性能のために (5.8) 式にて与えられる動力以上のものを要するはずである。図-3 の実線は (5.8) 式を示してある。実測点はこの直線の右側に落ちるはずであり、そのずれの甚だしいものほど能率の悪いことを示している。

(5.8) 式または図-3 から知られるように、空気防波堤の対象となり得る波は、その波長のあまり長いものではない。例えば $\lambda = 30$ m とすると、 $P_{min} = 10$ kW/m となる。また性能は波長に著しく関係するから、これを施設する場合には、波の性質を予め充分に調べておく必要がある。

最後に、渦動粘性の影響を考慮に入れると、限界条件は鮮明さを失い、ある領域に拡げられる。計算される波数及び減衰係数と流速の関係は図-4 に点線をもつて示されている。また理論的に計算される消波特性曲線も実測されるもの (図-2) と同型のものとなる。

6. Bubble Jet.

空気防波堤のその名の来る所以である bubble jet の研究は重要であると同時に、困難な問題である。しかしながら上昇流の流速に較べて気泡群の水流に対する相対速度が無視される程度に気泡の大きさが小さければ、流体は気泡の密度に相当する浮力を受けて上昇し、そのために側面から吸い込みを行う一種の自由噴流となるので、比較的簡単になる。そして普通のようにして相似の仮定を採用すると、上昇流の速度はノーズルからの距離 x に関係なく一定であり、噴流の

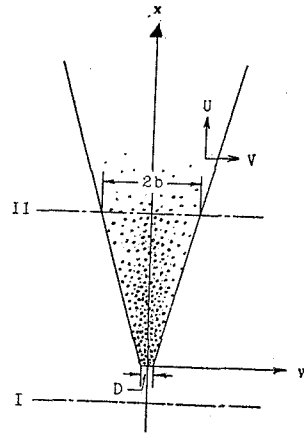


図-5 噴 流

巾は x とともに増加する、すなわち噴流は直線的に拡がっていくことが証明される。第2の結論は Docks and Inland Waterways Research Laboratory でとられた bubble jet の写真によつて確かめられる。また直接に次元解析からも知られるように、噴流の流速は空気噴出量の立方根に比例する、すなわち (4.1) 式の関係が証明される。

この研究に対しては文部省科学研究費が下附されていることを附記する。

文 献

- (1) 詳しくは、“空気防波堤の研究に就て”，九州大学応用力学研究所々報，第5号，昭.29.
- (2) A. H. Laurie; “Pneumatic Breakwaters”, Dock and Harbour Auth., May, 1952, pp. 11 ~13.
- (3) A. H. Laurie; “Pneumatic Breakwater at Dover”, ibid Dec. 1952, p. 249.
- (4) I. A. Bogolepoff (布施敬一郎訳); “圧搾空気防波堤”，技術。
- (5) “New Hydraulics Research Station,” Dock and Harbour Auth., Sep. 1953, pp. 152~154.