

空 気 防 波 堤 に つ い て (III)

端 島 に 於 ける 現 地 実 験¹⁾

九州大学教授 理学博士 栗 原 道 徳

1. 緒 言

日本に於ける空気防波堤の研究も、長崎県の依頼に依つて吾々がこれを取り上げ、最初の実験が試みられてから、既に3ケ年を経過している。最初の一年間は消波の物理機構を探るための予備実験、その結果に基づいて流体力学的な研究が行われた。その結果は空気防波堤は相当に有力であることを示唆していたので、実用化のためには是非経なければならない一つの段階、即ち現地実験を行い、それまでに得られた研究結果の妥当性を確かめ、或は如何に補正すべきかを探るばかりでなく、直接的にその性能を検べ、優劣を定めようという強い要望が湧いた、斯くて昭和30年冬冬季節風の期間に長崎港外伊王島に於て世界最初の科学的な現地実験が行われるに至つたのである。

第1次テストは許容空気量に依つて確実に、消波性能に関する資料を得ることに重点をおいて、安全のために対象波長を15 m程度におさえ、比較的穏かな海面として伊王島が選ばれた。

数次に亘るテストに依つてこの装置は略々計画通りの性能をもつことが知られた。従つて空気防波堤は実用化第一次試験に通過したのである。然るに基礎的測定の進められるに従つて、その好成绩にも拘らず、その消波機構に疑問を生じ、解釈を変更しなければならなくなつたのである。即ち、これまでは水平流による波の stopping action が主であつて、これに水平流に伴う渦動粘性が補助的に作用を及ぼすものと考えていたが、渦動粘性こそ消波の主要素であつて、水平流はその作用を増大ならしめているのである。更に、模型と実物の間の寸法効果を支配すると考えられる parameter ϵ^2 が発見されたのである。

第1次テストは成功裏に終つたが、初めての試みではあり、実験に種々不備な点や、多くの失敗があつて、充分な資料とは言ひ難く、然も実際に要求される防波対象の波に較べて取り扱つた波が小さ過ぎるため重ねて大規模な第2次のテストが要望される。

その後応用力学研究所実験水槽に於て詳細な研究が進められ、第1次テストにより得られた所論が確められ、遂に空気防波堤の設計に関する規準を定めることが出来た。斯くて長崎県庁の熱望に依つて、実用化のための大規模な最終的現地実験が企図されたのである。

空気防波堤が要望される様な荒海の代表的な現場として、長崎港外端島の西岸が選ばれた。高島礦業所端島礦より許容された空気量は毎分150立方メートルであつたので、総ての規模を第一次テストの場合の約2倍として、これまでの研究成果に基き改善された装置が設計され、昭和31年冬冬季節風シーズンを期してテストを行う様に準備が進められた。

擬て、諸外国(ポーランド、ドイツ、イギリス)に於ても近年空気防波堤の研究は盛んに行われ、30年に及んでその成果が順次発表されるに至つた。殊に英国に於ては、Geoffrey Taylor 卿は第2次大戦中ノルマンダーの上陸作用に関連して行つた理論研究を、Southall の水運研究所長 J. T. Evans は Taylor 卿の理論研究に対する実験的研究を Proceedings of The Royal Society の9月号に発表した。更に Evans は The Dock and Harbour Authority の12月号に於て、工学技術者のために彼の水槽実験に基いて、空気防波堤の性能を数量的に示した。これ等は今日までに発表されたものの中で最も權威あるものでもある。空気防波堤のために誠に残念なことではあるが、Evans は彼の論文の中で、空気防波堤の効用を全然否定はしていないが、示された数字は極めて悲観的なものである。

吾々があらゆる困難を排して、昭和31年2月24日第2次現地実験の予備テストを行い、新しく設計された装置が予期以上の優れた性能をもつことを発見し、実用化に就いての危惧が全く拭い去られた頃に、全く対蹠的な Evans の論文を入手したことは皮肉である。英国に於て空気防波堤が葬り去られようとしている時に、日本に於ては將に世に出んとしているのである。

結論のこの大きな相違は何に起因するものであろうか。今までの多くの実験的研究者が殆んど空気防波堤

1) この現地実験は長崎県土木部港湾課の依頼により行わたものである。海底部分は同課により、陸上部分の工事及び施設の維持は三菱高島礦業所により行われ、観測は九大が担当した。実験準備の他に礦業所により与えられた便宜、援助も亦少なしとしない。この研究の詳細は九大応用力学研究所々報告に発表されるであろう。

2) 空気防波堤について (2) 伊王島における現地実験、海岸工学研究論文集 p. 74, eq. (1)

の価値を否定していることも1つの原因かも知れないが、主として、渦動粘性の重要性の認識の程度に相違にあつたのではなからうか。

吾々は Taylor 卿の研究を昨年発表されるまでこれを知り得なかつたので、既に彼と全く同様の理論計算を行い、進んで消波に必要な最小動力の式、 $P=0.002\lambda^{2.5}$ を誘導したのである。更に、渦動粘性を考慮し、理論的に消波特性曲線²⁾を説明し、渦動粘性の無視し得ないことを指摘したのである。Evans も部分的な波の減衰は渦動粘性によるものと考えているが、特にその作用を検出するための工夫は試みていない。又 Taylor 卿はその効用に対して強く否定的である(私信による)。然るに第1次テストは予想外の重要性を示し、その結果に準拠して設計された第2次テストの装置は更に優秀な性能を示したのである。

この報告に於ては第2次テストの概要及び、未だ整理を終えていないが、その成果の概要を報告し、更に渦動粘性の役割に就き少し吟味し、最後に空気防波堤の設計に関する標準を考えてみたいと思う。

2. 端島に於ける現地実験の計量概要

第1次テストでは確実に消波が行われ、有効な資料が得られる様に、周期の短い波を対象とすることが現地を選ぶ第1条件であつた。第2次のテストでは最大の消波能率をみるのが目的であり、そのために多量の圧縮空気を利用し得て、実用上空気防波堤に対して要望される様な波を対象とし得る様に長崎港外の離島端島が選ばれたのである。

この島は W から NW にかけて五島列島に向い、その距離は約 70 km, NW より NNW の向は東支那海に開け、これより N にかけて対岸距離は急激に短くなる。従つて季節風の期間には絶えず劇しい波浪にさらされている。

実験のために三菱高島礦業所端島礦より供給される最大空気量は $150 \text{ m}^3/\text{min}$ であった。これは第1次テストの場合の5倍である。空気防波堤の能率は parameter ξ の函数であり、然も ξ の小さい方が望ましいので、最小限第1次テストと同じ能率を得る様に最大流量のときに ξ が同じ値をとる様に設計することにした。

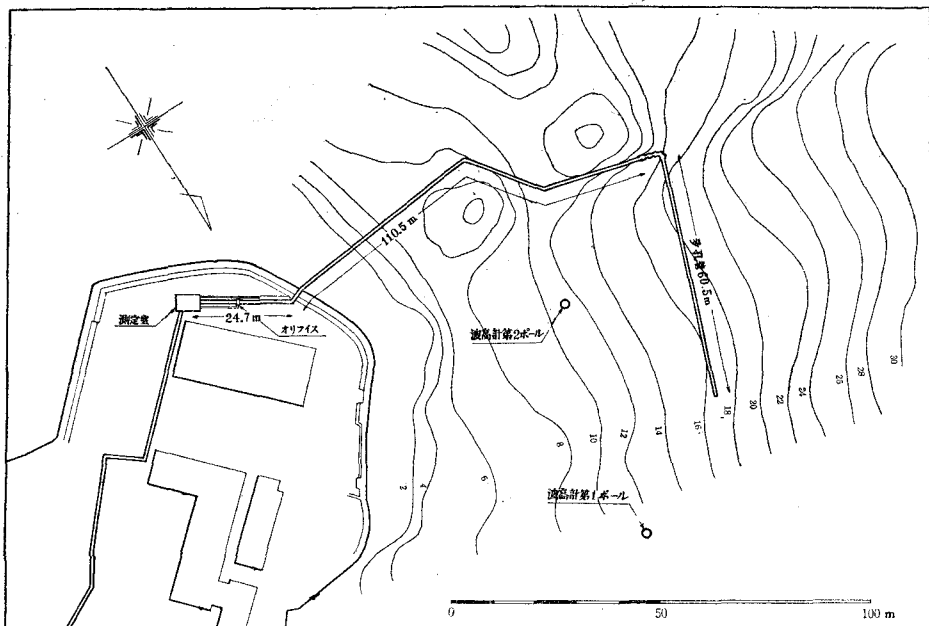
Q を単位長さ毎の空気放出量, H を多孔管の深さ, g を重力の加速度とすると

$$\xi = Q/g^{1/2}H^{3/2} \dots \dots \dots (2.1)$$

である。

多孔管を H に比例して長くするとすれば、 H は $5^{1/2.5}$ 倍になる。そこで総ての寸法を第1次テストの2倍に選ぶこととした。即ち深度は最低潮位面下16米、多孔管は $5.5 \times 11 = 60.5$ 米、消波対象波長は30米(4.37秒)と想定して総ての計画を樹てた。この波は略々 6~7 m/sec の風に対応している。

図一 端島に於ける空気防波堤



この計画には、先ずを小さくして使用した場合の能率の向上及び、後に述べる様に、第1次テストにより得られた縮流係数に関する知識を用いた適正な多孔管の設計による能率の向上、その他に規模を大きくした事に依つて起る未知の bubble jet の能率の向上が期待されている。

12月及び1月を実験期間として、最多風向 WNW に向け深度16米程度の海底に多孔管を据え付けることとした。岸壁からの距離は約100米である。

第1次テストの失敗に鑑みて、多孔管の後方におく減衰波用の他に、多孔管の側方に充分離して原波用の波高計を取り付け、原波と減衰波の同時記録を取ることが出来る様にした。

前回と同様に、空気防波堤の物理機構を探求するために、季節風の後に bubble jet による水平流の流速分布及び空気量と流速の関係を測定することとした。

3. 多孔管の設計等と実験実施の概要

多孔管の設計には先ず管の内外の圧力差を決めなければならない。これは圧縮機の馬力を減少させるためばかりでなく、放出気泡を細くするためにも出来るだけ小さくすることが望ましい。他方多孔管設置の際の水平誤差に較べては充分大きくなければならない。吾々はこの誤差を 50cm として、流量が最大量の $\frac{1}{2}$ (75m³/min) の場合にも、流出量が全管を通じて10%以外に於て一様である様にするため、その時 $\Delta p = 0.25 \text{ kg/cm}^2$ とした。従つて最大流量の場合に $\Delta p = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ である。

第1次テストにてもこれと同様な条件で設計されたが、縮流係数の適正值を知らなかつたために、実際には Δp は2気圧以上になつてた。これと反対に今回の消波実験では空気量は約 75 m³/min だつたので Δp は $\frac{1}{4}$ 気圧程度であつた。この事は前述の期待の様に bubble jet の能率を著しく増大させたものと考えられる。

1つの孔から空気が水中に放出されるとき縮流係数に就いては第1次テストの結果が唯一の参考資料である。圧力差 10 m (水柱) に対応してこれは0.4程度である。直径5吋の鉄管を使用するものとして、気孔の全面積を計算すると 1.64 cm²/m を得る。直径を 2 mm として、孔の数は 52.2/m となる。

多孔管の防蝕は接手共に純亜鉛鍍金を行う方法を用いた。

多孔管は深度 16 m 程度の海底にコンクリート台をおき、これに固定した。

波浪及び水平流に依つて波高計(フロード式)が傾斜することのない様に、又季節風の期間を通じて荒海に放置し得る様に特別の装置を工夫した。

種々の都合に依つて工事は遅れ、季節風の期間に入つて愈々困難を極めた。仮設置のまゝであつたが、季節風も未だ吹きすさんでいる2月24日に送気し試運転を行い得たことは誠に幸であつた。

当日は北西 6~7 m/sec の風、波高は余り高くないが、略々4秒程度の成分の単純な波であり、而も安定していたので、消波性能を観察するためには絶好な状態であつた。そして予想以上の性能をもつことが知られた。

装置は未だ仮設置のうちに荒天続き、故障続出、修理不能のまゝ季節風は終つて仕舞つた。その間に得られた消波記録は僅か2,3に過ぎないが、何れも空気防波堤の性能を知る上に信頼のおける資料である。

水平流の流速分布及び流量と流速の關係は送気管の故障をまつて七月に行つた。多孔管及び気孔には異状は認められなかつた。

4. 水平流の流速分布及び空気量と流速の關係

これ等の測定を短期間に完了せねばならなかつたので、僅かに一組の測定を行つたに過ぎなかつた。

図-2は鉛直方向の流速分布が多孔管から離れるとどんなに変化してゆくかを示している。図-3は一定の深さの点に於ける流速が距離と共にどう変わるかを示している。これ等を見ると判る様に距離と共に流速は減少するが、水平流の厚みは著しく増大してゆく。距離と共にその積が増大することは、渦動粘性の増大を意味する。これ等の傾向は第1次テスト及び水槽実験の場合と同様である。

図-4は多孔管からの距離が 12 m、深さ 50 cm の点に於ける流速と空気量の關係を示している。測定領域を通じて $U = 0.314 \sqrt{Q}$ (U : 流速 m/sec, Q : 空気量 l/sec m) が成立つている。この事は第1次テストと著しく相違している。先ず第1に同一空気量に対して流速は著しく大きい。第2には、測定領域に於て U の値は $0.39 \times 10^{-4} \sim 1.56 \times 10^{-4}$ にあつて、第1次テストの際の、法則 $U \propto \sqrt{Q}$ に対する限界値 1.8×10^{-4} よりも小さいにも拘らず、この法則が全域に亘つて成立していることである。これ等の事は今回の bubble jet の効率が第1次のものに較べて著しく優れていることを示すものである。

この性能の向上の原因として次の2つが考えられる。既に述べた様に、適正な縮流係数を用い、多孔管内外の圧力差を小さくすることに成功した。このために、観察に依つても認められる程に気泡の大きさは小さくなり、単独気泡の上昇限界速度が減少したため、エネルギーの損失が減少したことが先ず考えられる。第2には多孔管が深くなつたために、気孔から放出された直後の気泡のエネルギーは上層部に到達するまで無駄に消費されずに運ばれる割合が増加し、有効に水流のエネルギーに変えられることが考えられる。詳細は今後の研究に俟つて解決するべきである。

図-2 水平流の流速分布

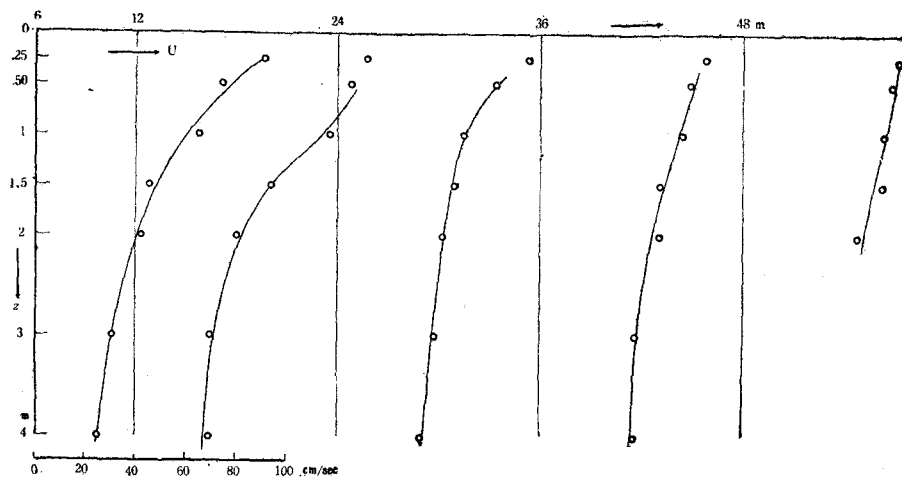


図-3 流速のX方向の変化

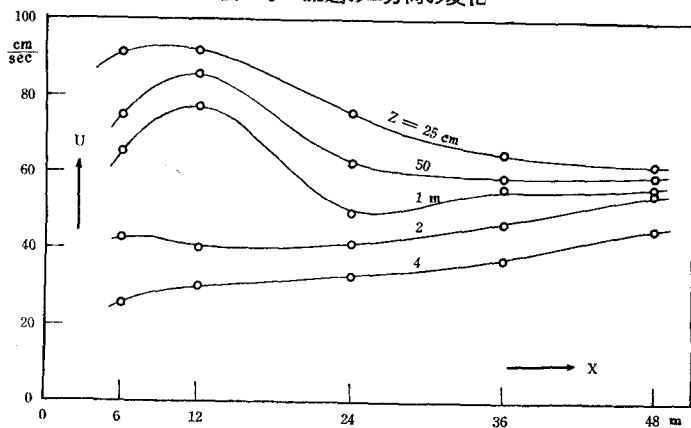
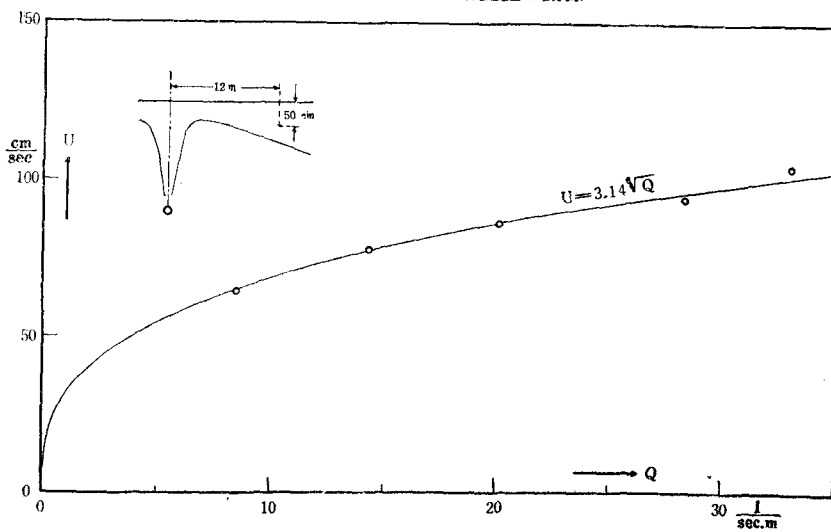
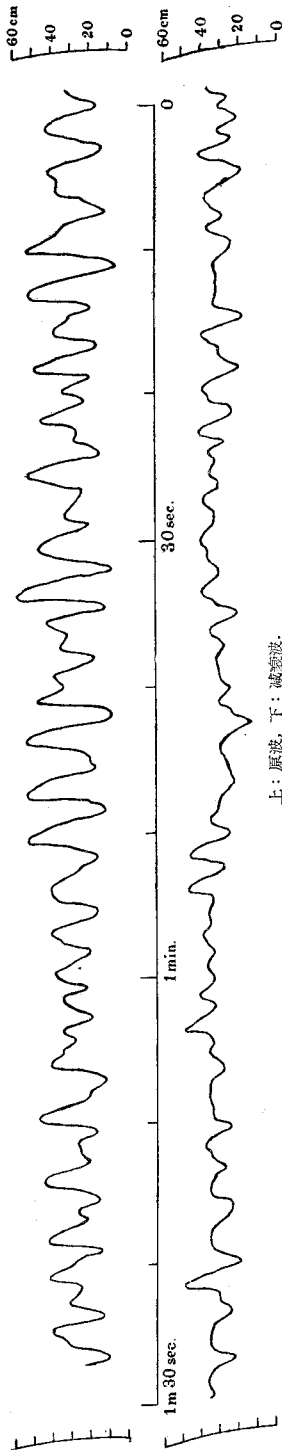


図-4 流速と空気消費量の関係



図一5 消波実験第2, 波型記録



5. 消波実験

前後を通じて9回行われたが、そのうち波型記録のとれたものは僅かに5回に過ぎない。その解析も未だ行われていないが、以下二つの例に就いて簡単に吟味してみる。

実験2. 風速 7 m/sec, 多孔管深度 16.78 m, 空気量 191 l/sec m, 工率 1.87 kw/m.

試運転当日の記録である。仮工事のため、未だ波高計は一つ多孔管後方 30 m 程のところに取り付けられただけであつた。従つて送気の前後に於ける原波の波型と消波の波型を比較することゝした。幸に風速、風向共に安定し、実験中波浪の変化は殆んど認められなかつた。波向は多孔管に斜め30°程傾いていたが、波浪の成分が単純であつたためか、消波状況もよく観察された。多孔管の両端に於ける回折波も余り認められず、たゞ傾角のひどかつた短周期の波が側方から消波領域に進入しているのが認められた。

肉眼観察によつても美事な消波状況を容易に認めることが出来たが、第5図に示された波型記録を一瞥すればこれを頷くことが出来る。原波側に於ては殆んどが 4.5 sec 以内であり、2.5~4.0 sec に主成分が含まれている。他方消波側に於ても略々同様であつて、殆んど一様に減衰されて仕舞つている。従つて吾々は少なくとも 4.0 sec (25m) の波までが殆んど消波されていると考えて差支えないであらう。

波長 25 m に対する理論工率は 6.25 kw/m である。(Evans の公式によれば 28 kw/m である)。多孔管の深度及び使用空気量から計算した所要工率は 1.87 kw/m であつて理論値の $\frac{1}{2}$ に過ぎない。

実験3c. 風速 8 m/sec, 多孔管深度 16.25 m, 空気量 17.46 l/sec m, 工率 1.68 kw/m.

北よりの強風で波は多孔管に対し著しく傾く。その成分中長周期のものは長い fetch に対応し、45°程度に傾き侵、短いものは一そう北よりの短い fetch に対応し、殆んど側面より侵入し、消波領域を著しく乱していた。そこで3秒以下の波は当然消波さるべきものとして、これを除外して one third highest waves を選んで平均波高、平均周期を求めると次の通りになる：

	平均波高 cm	平均周期 sec	
原 波	96.4	4.42	減 衰 率 = 0.69
減 衰 波	66.3	4.67	

減衰波の周期の大きいのは、長い波が余計に生き残つていることを意味する。然しながら、significant waves の大部分が 3~5sec の間に入つており略々一様に減衰されているから、この減衰率は大体 4.42 sec に対応していると見て差支えないであらう。これは 30.5 m の波長に対応する。Evans の論文の第4表を用いて減衰率50%に対する工率に換算すると、30.5 m の波に対する消波所要工率は $1.68 \times \frac{44}{26} = 2.84$ kw/m となる。これに対して理論工率は 10.3 kw/m である。この場合も前同様に、実際に要した馬力は理論馬力の僅かの分数 ($\frac{1}{3.6}$) に過ぎない。

6. 消波機構の概要

渦動粘性の作用を詳しく検べるに当つて、重複するが問題のために

消波機構の概要を先ず述べておく。

空気防波堤の消波の模様を観測するのに、活潑に上昇する気泡群とそれに伴う上昇水流及びこれが水表面に到達して生ずる水平流とが目立つ。気泡群の緩衝作用が余り役立たないことは直ぐ知られる。上昇流が活

1) Evans によれば Steepness 1/100 の場合に水平流の工率は $P = 0.00128 \times \lambda^{2.5}$ (P : kw/m, λ : m), 所要工率はこれの7倍である。故に $P = 28$ kw/m.

潑で、強い水平流を起している場合には、波は上昇流の領域に入る以前に水平流の作用を受けて、次第に波長は縮まり、波高は高くなつて、水平流の最も強い領域に於て崩壊して仕舞う。この事実から空気防波堤の作用は水平流の消波作用がその主要なものであつて、これに上昇流及び水平流に伴う乱流による渦動粘性が補助的に作用するものと考えてるのは一応もつともである。

若し波が水平流に依つて消されるものとすれば、次元的考察から、空気防波堤の単位長さ毎の所要動力 P と波長 λ との間に

$$P = \rho g^3/2 \lambda^{5/2} f\left(\frac{h}{\lambda}, \frac{l}{\lambda}\right) \dots\dots\dots (6.1)$$

が成立つことが知られる。茲に ρ は海水の密度、 g は重力の加速度であり、 h は波高、最後に l は水平流の幾何学的性質を代表する長さ（例えば、水平流の層の厚み）である。

所要動力として、入つて来る波の波高に対する出て行く波の波高の比が或る定つた値となる時の動力を採用するならば、これは初めの波高には余り影響されるとは考えられない。従つて (6.1) は

$$P = C \rho g^3/2 \lambda^{5/2} \dots\dots\dots (6.2)$$

若し水流の規模と波長とを比例する様にすると、 C はその水流に固有の無次元常数となる。

波が水平流に向つて進行して来るとき、若しも波のエネルギー伝播の速度が流速より遅いと、波は流れの中に進入することが出来ないで、エネルギーは一ヶ所に集まり、波高は高まり遂に崩壊して仕舞う。この様な見方に立つて、流速が表面で最大で深さと共に直線的に減少する様な層に就いて C を計算すると、理論的な最小動力として次式が得られる：

$$P_{\min} = 0.002 \times \lambda^{2.5} \dots\dots\dots (6.3)$$

茲に $P_{\min}$ は kw/m 、 λ は m にて表わされるものとする。

この式は空気防波堤に就いて、波長と消波所要動力の関係として水槽実験や実物に関して1つの基準を与えるものである。但しその際に bubble jet によるエネルギー損失は、渦動粘性のもつ消波作用に依つて補われ、(6.3) が妥当なものとされると考えている。

以上に於ては水平流の消波作用を考えたのであるが、空気防波堤の性質を詳細に検べるためには、先づ bubble jet の機能を考えねばならない。水深 H に置かれた多孔管から単位時間単位長さ毎に Q だけの空気が放出されて、代表速度が U である様な水平流を生じたとするならば、次元解析から次式を得る：

$$U = (gQ)^{1/3} \phi\left(\xi, \frac{H}{H_0}\right) \dots\dots\dots (6.4)$$

茲に H_0 は水柱で測つた大気圧を意味している。

Q が或程度以上に大きくて十分に気泡が含まれているときには、流体には気泡に作用する浮力が体積として作用していると考えられる。そして拡散の様子は相似的に行われていると考えられる。即ち ξ が或程度以上に大きいときには、 ϕ は ξ の値には無関係な或一定値 $\phi\left(\frac{H}{H_0}\right)$ となる：

$$U = \phi\left(\frac{H}{H_0}\right) (gQ)^{1/3} \dots\dots\dots (6.5)$$

この関係は水槽実験及び第2次現地実験に依つて確められている。又これ等の資料の比較からみて、 $\phi\left(\frac{H}{H_0}\right)$ は余り変化を示さぬ様に思われる。

扱て消波機構に立ち戻つて：i) 水平流が消波の主なる原因だとするならば、消波のためには水平流の流速 U と波の伝播速度 c の比は水平流の層の厚み H_1 と波長との比の或る函数として定められる。即ち $U/c = f_1\left(\frac{H_1}{\lambda}\right)$ 。この値は H_1/λ が少して大きくなると直ぐに一定値に収斂する。

(6.5) を用いて所要動力を計算すると：

$$\frac{P}{\rho g^3/2 \lambda^{5/2}} = \frac{H_1}{\lambda} f_1\left(\frac{H_1}{\lambda}\right) \Psi_1\left(\frac{H}{H_0}\right) \dots\dots\dots (6.6)$$

を得る。ここに ξ は充分大きいとして除外。(6.3) はこの式の特別の場合である。ii) 渦動粘性が消波の主なる原因だとするならば、極く短い波は除外して、波の減衰は $\frac{\nu t}{\lambda^2}$ (ν は渦動粘性係数、 t は作用時間) に依つて決められる。再び次元的考察に依つて消波の条件として $\frac{UH_1}{\lambda^2} \cdot \frac{H}{C} = \text{const.}$ を得る。(6.5) を用いて計算すると

$$\frac{P}{\rho g^3/2 \lambda^{5/2}} = \left(\frac{\lambda}{H}\right)^5 \Psi_2\left(\frac{H}{H_0}\right) \dots\dots\dots (6.7)$$

- 1) ϕ には更に気泡の容積を含む parameter が含まれる筈である。例えば w を単独気泡の上昇速度とすると、 w/U が含まれている。普通の場合にはその値の変域は小さいのでその影響は無視される。

を得る。 λ/H を一定にすると (6.6), (6.7) は何れも (6.2) に対応するものである。但し ξ は bubble jet の能率が著しく低下しない程度に大きいとしている。

ξ の定義 (2.1) を用いて (6.7) から λ/H を消去すると：

$$\frac{P}{\rho g^{3/2} \lambda^{5/2}} = \xi^{2/3} \Psi_3 \left(\frac{H}{H_0} \right) \dots\dots\dots (6.8)$$

を得る。

多孔管の深さと波長との比を適当に定めて、(6.6) 或は (6.7) の右辺の値を最小にするならば、最も能率のよい空気防波堤が得られる。式を見れば解る様に 2 つの場合に、 H/λ の右辺の値に及ぼす影響は著しく異なる。

空気防波堤を作用させる場合に 2 つの方法があるわけで、i) に従うならば H_1/λ はむしろ小さくしなければならぬが、ii) に拠るならば、bubble jet の能率を著しく低下させぬ範囲でもを小さく、従つて H/λ を大きくすることが望ましい。英国の研究者は前者を選び、吾々は後者を選んだのである。何れが有利であるかは実験結果によつて判断すべきであらう。

7. 渦動粘性の作用

こゝでは定量的に渦動粘性の影響を検べてみたいと思う。

渦動粘性が如何に重要な役割をもつかを知るためには、5 節に示した現地実験の結果を見るだけで充分である。即ち理論的に計算した所要動力は、bubble jet の能率を 100%、渦動粘性は全然作用していないとした場合に、水平流に依つて波の伝播を阻止するために必要な最小動力、即ち (6.3) に依つて計算したものである。他方 Evans の研究結果を利用して減衰率 50% に要する動力より完全阻止のための動力を推算すれば、25 m の波に対して吾々の現地実験は 6.45 kw/m を与える。これは上記の理論値 10.3 kw/m より小さい。従つて bubble jet の能率が余り大きいものでないことを考慮するならば、水平流の stopping action でなく、渦動粘性が決定的な役割をもつてあらうことが推定される。

実験水槽より伊王島へ、更に端島へと装置の規模を次第に大きく、parameter ξ を次第に小さくしてゆくに従つて能率の次第によくなつてゐる事は (6.8) に照らして、以上の所論を裏書きしているものであらう。

水平流の表面速度を U 、水平流の層の厚みを H_1 とすると混擾速度を αU 、混合距離を βH_1 とすると渦動粘性は $\nu = \alpha \beta U H_1$ であつて、 α, β は実験的に定められる。噴流の場合には $\alpha \beta = 0.016$ である。

今 U が stopping velocity になつてゐる様な波の波数を k_1 として¹⁾

$$a_1 = 4\alpha\beta k_1 H_1 \dots\dots\dots (7.1)$$

とおくと、 a_1 は (U, H_1) に依つて設計された空気防波堤に就いて粘性の作用を表わす parameter である。

波を $e^{i(kx - \sigma t)}$ の形で表わした場合に a_1 の貢献は k の虚数部 k_i に依つて示される (波高は $e^{-k_i x}$ に従つて減衰する)。

粘性が全く作用しないときには、進行速度が次第に減少して $4U$ になるまでは k_i は零であつて、こゝで急激に増大する。粘性が少しく作用すると図-6 に示されているように様子は急に変る。粘性が極く僅かで一般にはその影響が無視される様な場合でも、進行速度がこの限界値に近づくと、その効果は急激に増大する。種々の a_1 の値に対して行つた理論計算の結果は図-7 に示されている。

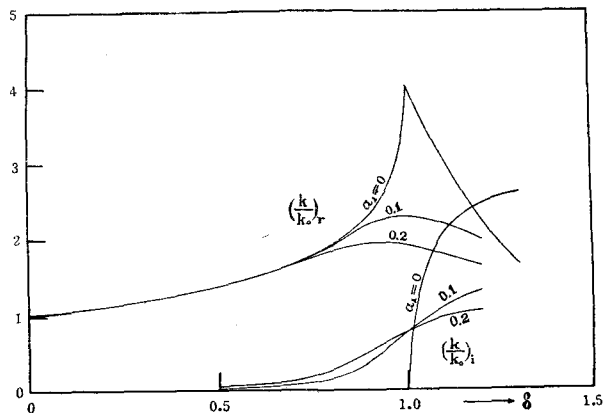
第 4 節に示した端島に於ける消波実験の結果が渦動粘性に依つてどの程度に説明されるかを、図-7 を用いて検べてみる。図-2 に示された流速分布は略々これ等の消波実験の際のものを表わしている。水平距離 $x=12$ m に於ける流速分布から $U=1.0$ m/sec, $H_1=7$ m と推定する¹⁾。有効水平距離の決定は頗る困難である。仮に表面速度が最高速度の 70% になる距離を選ぶと約 40 m である (図-3)。

1.0 m/sec を stopping velocity とする波の進行速度は 4 m/sec, $k_1=0.612$ /m. 従つて $a_1=0.274$.

図-6 波数及び減衰係数と流速の関係

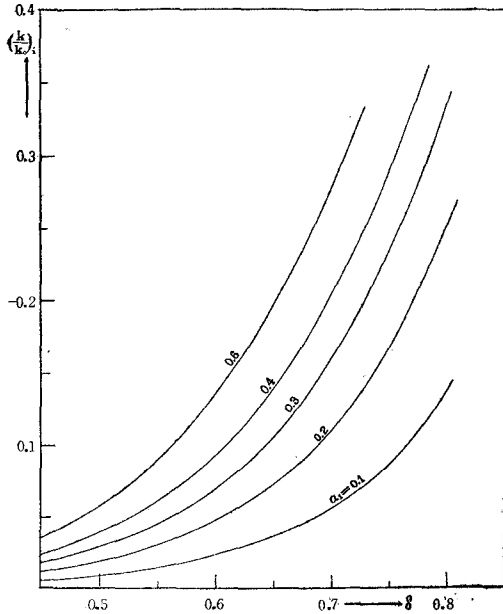
$\delta = 4H/C_D$, U : 流速, C : 位相速度

a_1 = 渦動粘性を表はすパラメーター



1) 一樣流の場合には $4U$ を進行速度にもつ様な波の波長を λ_1 とすれば $k_1=2\pi/\lambda_1$.

図-7 減衰係数と渦動粘性の関係



明しているものと言える。

最後にこの研究に対して惜しみなき援助と便宜を計らわれた三菱高島礦業所の各所員，特に前端島礦長岩間正男氏，現礦長今田義人氏其他工作課の方々に深く感謝の意を表するものである。

この研究に対して文部省科学試験研究費補助金及び朝日新聞科学奨励金が下附されている。

昭和31年8月。

実験第2. 波長 $\lambda_0=25$ m の波に就いて検べる。

従つて $k_0=0.251/\text{m}$, $\delta=\sqrt{\frac{0.251}{0.612}}=0.64$ 図-7 より

$k_i/k_0=0.089$, 従つて $k_i=0.0223$. これより波高の減衰率 $=e^{-0.0223 \times 40}=0.411$ を得る。

実験第3c. 波長 $\lambda_0=30$ m の波に就いて検べる。

前同様にして, $k_0=0.209$, $\delta=0.584$. 図-7 より $k_i/k_0=0.056$ 従つて $k_i=0.0117$. 減衰率 $=e^{-0.0117 \times 40}=0.634$ を得る。

これ等2つの計算結果は消波状態をよく説明しているものと言える。

上例と同一基準に従つて, 昨年の伊王島に於ける消波実験Dに就いて計算してみると次の如くなる:

$U=73\text{cm/sec}$, $k_1=1.14/\text{m}$, $H_1=3$ m, $a_1=0.22$. 消波対象波として14 mのものを考えると: $k_0=0.448$, $\delta=0.626$. 従つて図-7より $k_i/k_0=0.064$, $k_i=0.0386$. 有効水平距離は水平分布の測定点の散乱がひどいので推定に困難である。前同様最大流速の70%になるところを求めると約13 mである。従つて減衰率 $=e^{-0.0386 \times 13}=0.606$. 略々消波状況を説

1) 渦動粘性は UH_1 に比例し, これは徐々に増加してゆく。

2) 吾々は今まで表面附近の流速分布を曲線にしていたが, これはむしろ直線にした方が妥当と思われる。詳細な資料を得るまでは総て直線分布を仮定する。