

空 気 防 波 堤 に つ い て (II)

——伊王島における現地実験——

九州大学教授 理学博士 栗 原 道 徳

1. 緒 言

空気防波堤が実用に供されるためには実地試験,あるいはそれに相当する試みを行い,計画の当否が見定められなければならない。しかも空気防波堤は永い歴史をもちながら未だに確立されていないことから,その組織的な実地試験が望ましいのである。

われわれの空気防波堤に関する知識は,理論的考察および小型の模型について行われた実験的研究から得られたものであり,それらの結果がはたして実物大の空気防波堤についても成立つであろうか。具体的に言うならば: I) 多孔管の深さがいちじるしく違うため, a) 気体の圧縮性が現われる。また多量の空気を放出させるために気泡が大きくなることと, b) 海水中に含まれる気泡の割合がいちじるしく変ること等が, bubble jet の性能にいかんに影響するであろうか, また所要動力公式¹⁾にどう影響するであろうか。II) 波長がいちじるしく長くなること及び実際の波は実験室や単純な理論で考えているような正弦波のようなものでなく複雑である,このようなことが波長と所要動力の関係をいかん左右するであろうか。III) 消波機構の主因は水平流であろうか,あるいは渦動粘性であろうか。空気防波堤の性能から総合的にいうならば,多孔管の深度が深くなり,対象波長が大きくなつた場合に,波長に対する消波所要動力がどうなるかを知ること,すなわち(図—6 波長—所要動力図参照)において信頼のおけない外国の実例点の代りに波の性質も,十分考慮された組織的な信頼度の高い測定によるいくつかの点がぜひ欲しいのである。

さて実地試験に際しての第一の危惧は,実験室におけるように本当に波は消えるであろうか,すなわち II) の問題に関連して起る。今回の実地試験は本邦における空気防波堤実施の最初の試みであり,しかも消波機構および性能を組織的に探る意味において世界最初のものである。従つて現場において使用可能な空気量によつて安全に消波ができ,しかも所期の目的に沿つた測定が確実に行えることを第一条件として,比較的波長の短かい伊王島・鉄礦業所石炭積込の岸壁が選ばれた。

実際の空気防波堤について,その性能を検討することがこの実験の目的であるが,必然的に,水中へ空気が噴出する場合の流出係数,多孔管の腐食,多孔管設置等海中部分の施工等実局面の多くの問題が付随する。さらに実験室とはなはだしく異なつた状態にあるため,実験室では見出し得なかつた新しい事実の発見も期待される。

2. 伊王島と実験要素概要

伊王島は長崎市より西南 10 km 長崎港外にあつて,北西に位置する長さ 3.5 km,巾約 600 m の小島である。香焼島とともに長崎湾に続く入り海を形成している。その対岸距離は東に 2~3 km,北東に約 6 km,北から北西に開けて 10~20 km である。

冬期の季節風には,強風の際に東北より来る週期 3 秒程度の波,北西風による長週期の回折波が予期される。付近の海は深く,深度は岸壁に沿つてすでに 6~7 m で,少し離れるとたちどころに 10 m を越える。圧縮空気 30 m³/min まで使用の快諾を得た。従つてわれわれの目的にはふさわしい場所と言える。

実験の対象となる波の波長を 15 m (平均周期 3.1 秒) 以内と想定すると,多孔管の深度は 8 m 程度で十分である²⁾。上昇流および水平流が 2 次的に流れるためには,多孔管の長さはその深さおよび波長にくらべて十分長いことが必要である。他方単位長さの空気量を最小 1 m³/min 以下にすることは実験を無意味にする危険があるので,管長を波長の 2 倍すなわち 30 m と定めた。

気象統計に従つて冬期最も頻度の多い強風に対応する波に対して多孔管を設置した。送気管の途中には流量調節弁,圧力計,流量計が取り付けられる。

多孔管の前後に抵抗型波高計を設置し,これを陸上の自記電流計に連絡して,進入してくる原波と消波作用を受けて出てゆく減衰波の波型の同時記録をとることとした。空気防波堤の性能試験は,荒天に際し多孔管に波が都合

- 1) 応用力学研究所報第 5 号 (29 年 8 月), 式 (5.4), 第 9 図, 以下この論文を (I) と記号する。海岸工学研究発表会論文集 (土木学会関西支部) 昭和 29 年 11 月, 空気防波堤に就いて, 96 ページ, 以下この論文を (II) と記号する。
- 2) 現在多孔管深度は波長の $1/2 \sim 2/3$ と考えているがくわしいことは今後の研究にまつ。

よく向う場合に行われる。すなわち消費空気量を数段に変化させ、各空気量について多孔管前後の波型記録を取り、後日これらを調和解析し、得られるスペクトルを比較検討して空気防波堤の性能をしらべることにしたが、実際には波高計に故障を生じ多孔管の後方にある1本だけを使用することとなつた。従つて同時記録は得られず、空気を放出する前後における記録をもつて代用した。

3. 多孔管の設計及びその設置

空気防波堤の設計に際しては、まず消波対象の波に対する単位長さごとの空気量および多孔管の深度の決定について、多孔管の直径、気孔の直径および数の決定が重要なことである。

多孔管の腐食のことは期間が短かいので度外視し、3 in の鉄管を使用することとした。しかるときは流量 $30 \text{ m}^3/\text{min}$ の場合に、30 m 管内の最大の圧力差は 0.33 m (水柱) にすぎない。従つて気孔による圧力損失を 10 m とすれば、流出空気の配分は平等であるとみてさしつかえない。すなわち単位長さごとの気孔の数は一様にしてさしつかえない。

多孔管の深度が一様でない場合、すなわち水平に設置する際の誤差が大きいと空気の流出が不平等になる。もし最小の流量を最大のときの $1/2.5$ に仮定し、その際に 10% の流出量の不平等を許すならば、深度の誤差は 20 cm まで許すことができる。このような条件のもとに気孔数を計算すると、その直径を 1.5 mm として、1 m ごとに 357 個をうる。ただしその際に縮流係数は 0.60 と仮定してある。

過去 1 カ年間の気象記録より冬期の最多風向を北東と推定して多孔管を設置することとした。実際には北北西の強風多く、測定にふさわしい波浪はこの風による波が回折して北北東より来るものが多かつたので、後に多孔管の向を変更した。

岸壁よりの反射波を避けるためになるべく沖合に多孔管を敷設すべきであるが、海底が急に深くなるため、作業の困難を軽減するため 図-1 に示すように敷設したが大型船で反射波を防ぐ計画は実行されなかつた。そのため波型記録に反射波が入り、さらに予期しなかつた多孔管の両端からの回折波とともに、見かけ上空気防波堤の性能をいちじるしく低下させる結果を生じた。

多孔管を所定の位置に、所定の深さを保ち固定する最も簡単な方法として、まず多孔管をイカダに乗せて安定させ、これをブイおよびコンクリートブロックを用い海水中に宙吊りする方法を選んだ。

昭和 29 年 11 月より準備工事に着手し、1 月上旬より本格的工事なを開始した。

送気管の敷設、流量調節部、流量計の取り付けおよび測定装置の取り付け、整備が行われ、観測小屋も完備し、1 月中には地上部はほぼ完成した。その後は多孔管の海中設置に主力が注がれ、ついに 2 月 4 日午後海中部分と地上部分との連結を完了、本邦における最初の空気防波堤に空気は送り込まれた。

準備完了後は海面の波立つあらゆる機会に実験は行われ、いくつかの有効な資料が得られた。

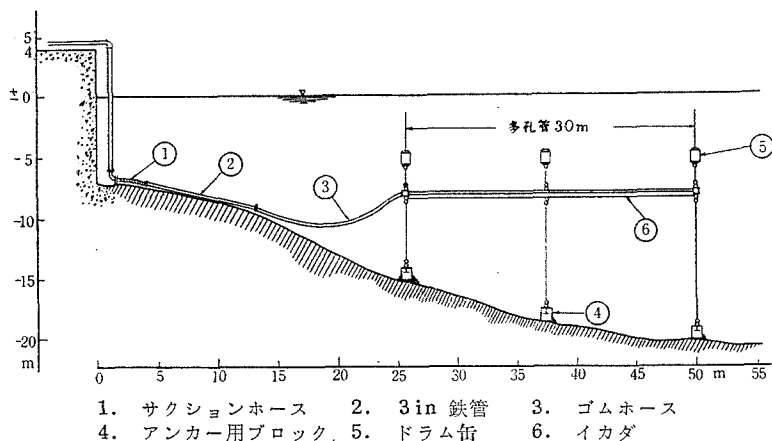
4. 測定および観察事項概要

i) 消波試験 空気防波堤を動作させぬ場合の波形を空気防波堤後方に設けられた波高計により記録し、同時に波面の方向、波の性質、岸壁における反射状態等を観察した。次に防波堤に空気を送り、空気量を適宜調節して、その場合の波形を記録に取り、同時に消波状況、空気防波堤の両端における波の回折状況および波高計に対する回折の状況、岸壁よりの反射波の状況、および波高計の状態を観察した。

波形記録の原理は、フルード型波高計のボールに電気抵抗線をボールに平行に 2 本張り、抵抗線の上端の端子間の電気抵抗の変化を記録電流計に記録させるものである。

ii) 水平流の測定 ナギの日の最満潮時または最干潮時を選び、空気防波堤により誘起される水平流の流速

図-1 海底配管図



を測定した。すなわち一定の空気量を多孔管に送り、多孔管中央より後方に張られた綱で小舟を固定し、これよりプライズ型流速計を吊して各点の流速を測定し、あるいは測定位置を固定して種々の空気量に対する流速を同要領で測り、流速分布および流速の空気量依存性を測定した。

5. 流速分布

流速の測定は前後7回にわたって行われた。同一空気量に際しての流速分布（深さ z 、多孔管よりの距離 x について）、多孔管より6mの距離における流速と空気消費量に関するもの、種々の空気量に対する同一 x における鉛直分布に関するものである。

鉛直方向の流速分布が距離 x とともにいかに変化するかを見るために、図-2にいくつかの例が図示されている。図を見てわかるように、上昇気泡にともなう上昇水流は表面に達して急に方向を変え、そこに狭隘部を形成して比較的薄い層の水平流となる。その後は、自由表面をもつた自由噴流として、次第に拡散し、層は厚くなり、流速は減少してゆく。その一般傾向は水槽実験におけるものと同じである。

ここに注意すべきことは水平流はかなりの遠方まで到達することである。実験Dでは多孔管より18m(多孔管深度の2-1/4倍)の点において最大流速の約2/3に減少するだけである。

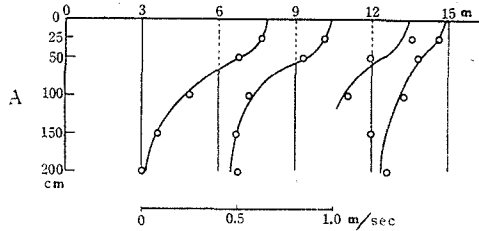
鉛直方向の流速分布を知るために、潮位および空気量のほぼ等しい実験A,B,Dのうち $x=3, 6$ mにおける資料を用い、表面流速を単位とつて z に対して流速を画くと図-3のごとくになる。散乱の少ないよい結果である。相似律が成立っていることを示すものであろう。

6. 空気消費量と流速の関係

実験F,Gおよびその他の実験結果より $x=6$ m, $z=25$ cmおよび $z=50$ cmの2点における流速を取り出し、多孔管の長さ1mごとの空気消費量 Q に対して図示すると図-4のごとくになる。

さて U と Q の関係をみるのに実験室で確かめられている関係 $U \propto Q^{1/3}$ とはいちじるしく異なる³⁾。そこで $U \propto Q^n$ を想定すると n が Q により変化する状態がよく見られる。すなわち Q が小さいときには n は大きく、 Q が増大するほど減少して次第

図-2 流速分布



実験 A, B, D において、横軸は多孔管からの距離 x を、縦軸は深さ z を表わす。

実験	潮位 (m)	空気量 (1/sec m)
A	0.3	13.0
B	0.4	11.7
D	0.3	12.0

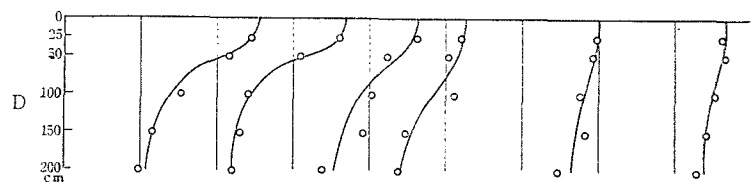
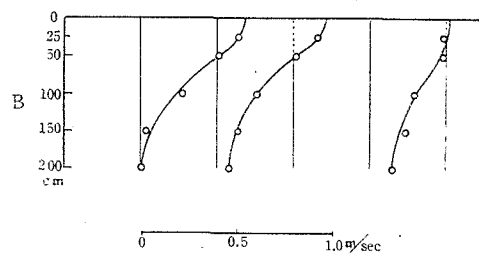
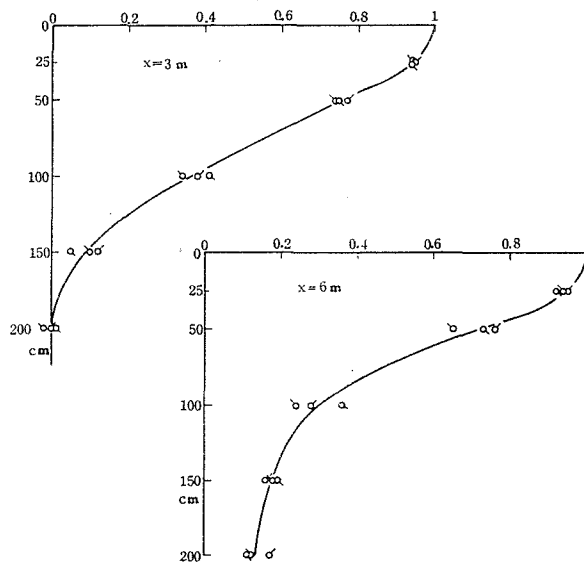


図-3 深さの方向の流速分布



に 1/3 に近づく。

実験室では見出すことのできなかつた bubble jet の、この性質は興味あるものであると同時に、重要な意味をもっている。気泡の上昇運動によつて誘起される水流の程度は、流体の単位体積中に含まれている気泡の容積の割合（気泡密度）によつていちじるしい影響を受けるはずである。そこで、 H を多孔管の深度、 g を重力の加速度とすると、気泡密度に対応する無次元量

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

を考えるならば、上記の結果はある程度以下になると重要な役割をもつてであろうことを示すものであろう。

実験室においては、その変域は $0.41 \times 10^{-3} \sim 2.04 \times 10^{-3}$ であつた。今回の現地実験では、 $0.5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$ であつて、その最大値も実験室における最小値の半分である、従つて Q の減少にともなう n の減少は、このパラメーター ξ の減少に起因するものであると考えられる。この理解の正しさは、今後の詳細な水槽実験によつて確かめられなければならない。

7. 消波実験

実験準備の完了した 2 月 14 日以降において、風強く、波浪はげしく、波面が適当であつたあらゆる機会に消波実験を行うように努力した。表-1 はその実験記録である。特に記述のないかぎり波型記録も同時にとられている。

8. 回折波について

空気防波堤の実験に際して予期していなかつた波の回折によつて、消波能率の判定に非常に苦しめられた。実験記録を見て最も顕著なことは、観察記述にあるように、消波が観察によつて確認されている場合でも波型記録にはあまりそれが現われていないことである。これは比較的細かい波が消えて表面が滑らかになるための錯覚もあるが、多孔管の端からの回折波および岸壁からの反射波に起因することも、記述に頻繁にそのことが書かれていることから見て承認しなければならない。

かくて実験室に戻り、水槽実験により回折の有無およびその模様を確かめた。波長、多孔管の長さおよび深度をすべて実地試験の場合と相似にした。実験に用いた多孔管の長さは 50 cm、深さは 15 cm であり、波の週期は 0.375 秒（波長 21.9 cm）であつた。Bubble jet 後方における波高は、使用した空気量に関係なく、消波領域にわたつて原波の約 1/2 であつた。すなわち回折現象のために、波高はせいぜい半分に減るだけであるということが出来る。この事実は実地消波実験の結果を理解する上に役に立つ。

9. 波型解析

今回の実験に際して最も遺憾なことは波高計の破損のために、原波と減衰波の同時記録の代りに、多孔管の後方において、送気の前後における波型記録の比較検討を行つたことである。従つて週期の短いスペクトルの部分が風力の変動にともなつて測定期間中に変動しやすく、実験の各段階の記録時間を永くすることできなかつた（3～5 分）。さらに波高計の不安定のために無効となつた部分もあつて統計資料として十分でなかつた。

波形の分析はすべて電気振動調和分析器を用いて、スペクトル分析による計画であつたが、その製作が間に合わなかつたので、代表的な記録を選んで野口式調和解析器によつてフーリエ級数の係数を求めるきわめて労多き方法に従つた。他方参考のために one third highest waves の方法によつて平均波高と週期の変化をしらべてみた。以下これらの一例を示す。実験 D：風向 NNE，風速 7.8 m/sec，波向 NNE，空気消費量 14 l/sec m，工率 1.01 kw/m，長い波長の部分を含まないで、大体週期が 2 sec から 3 sec の間の成分だけからなつてゐる。簡単のため途中の空気量の場合は省略して、空気量最大の D_1 と送気を中止した場合の D_2 を比較してみよう。

One third highest waves を選んで平均波高と平均週期を求めると次のごとくになる。

	平均波高	平均週期	波高比=0.47	}	(9)
原 波	28 cm	2.2 sec			
減衰波	13 cm	2.1 sec			

図-4 流速と空気消費量の関係

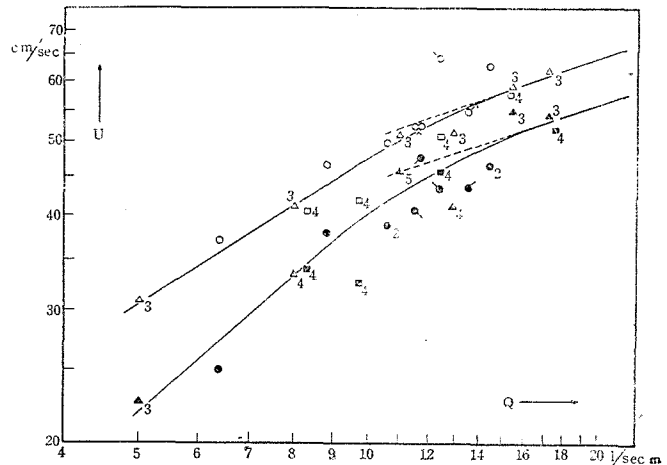


表-1 消 波 実 験 記 録

記号	日	時	分	天候	風向	風速 m/sec	波向	潮位 m	管内 気圧 kg/cm ²	水銀柱 cm	流量 l/sec	多孔管 水深 m	工率 kw/m	備	考
A ₁	2月	15	13	40	晴	NW	3.2	NNE	1.9	—	—	9.6	—	ボールは斜になる、うねりは通過。 うねりが抜け、そのときボール倒る。 記録の始めはまだよくきいていない。うねりもおおむね止る。	
A ₂									1.35	2.7	173	9.6	0.42		
A ₃									1.9	8.1	333	9.6	0.81		
A ₄									2.4	10.8	415	9.5	0.99		
A ₅									2.9	13.6	500	9.5	1.21		
A ₆	15	14	15					1.8	—	—	—	9.5	—		
B ₁	18	9	40	曇	NNE	7.4	NNE	1.4	1.3	2.9	178	9.1	0.42	うねり少々通過、ボールの所へは小波が逆方向に寄せ る。うねりはほとんど消える。	
B ₂	18	9	55						1.8	8.3	332	9.1	0.78		
B ₃	18	10	0						2.1	11.1	403	9.1	0.94		
B ₄	18	10	5					1.4	—	—	—	—	—		
B ₅									—	—	—	—	—		
C ₁	18	11	15		ENE	10.0	ENE	1.3	—	—	—	9.0	—	ボールの位置不適當で記録は不能、 相当消えているようである。	
C ₂									2.5	—	—	9.0	—		
C ₃									5.7	—	—	9.0	—		
D ₁	20	13	05		NNE	7.8	NNE	1.8	2.2	11.1	420	9.5	1.01	ボールが倒れる。よく消える。 うねりもかなり減少。 記録には回折波はいれる。 舟よりボールを引つばつて立てたがうまくゆかぬ。	
D ₂									1.6	5.8	266	9.5	0.64		
D ₃								1.7	1.6	5.8	266	9.4	0.63		
D ₄									—	—	—	—	—		
D ₅									—	—	—	—	—		
E ₁	20	9	25	雹	NW	6.8	N		—	—	—	—	—	水面滑らかになるのみ。 大うねり通過。 きわめて大きいうねりは通るが、ほかは消える。	
E ₂	20	9	30					1.8	1.3	1.9	144	9.5	0.35		
E ₃	20	9	40					1.7	2.4	11.0	420	9.4	1.01		
E ₄	20	9	45					1.6	2.8	13.7	496	9.3	1.18		
E ₅	20	9	55						—	—	—	—	—		
F ₁	20	13	45	雪	NNW	11.5	N		—	—	—	—	—	小さなうねりは周囲で曲りこむ。若干効くらしい。 大うねりは通るが小さいのは消える。 大うねりも若干きく模様。	
F ₂	20	13	55					0.9	1.3	3.2	186	8.6	0.42		
F ₃	20	14	10					1.0	1.8	7.8	292	8.7	0.66		
F ₄	20	14	15						—	—	—	—	—		
F ₅	20	14	20			10.0		1.0	3.2	12.8	500	8.7	1.13		
F ₆	20	14	30						—	—	—	—	—		
G ₁	21	10	50	吹雪	NNW	6.3	NNE	1.6	—	—	—	9.3	—	小波のみ消える。 小さなうねりも消える。 中くらいのうねりも減衰。 4秒程度のうねりのみ通過。	
G ₂	21	10	55						1.2	1.9	140	9.2	0.33		
G ₃	21	11	0						1.5	4.5	230	9.2	0.54		
G ₄	21	11	5						1.9	6.6	306	9.1	0.72		
G ₅	21	11	15						2.9	11.8	464	9.0	1.08		
G ₆	21	11	20					1.3	—	—	—	9.0	—		
H ₁	23	11	30	曇	NE	5.0	NNE		—	—	—	—	—	波長短かく波面汚く岸壁よりの反射が複雑である が、波面はおおむね多孔管に真正面から来ている。 小さな波がずつと沖で消えているのが見られた。	
H ₂	23	11	37					1.4	1.4	2.3	160	9.1	0.37		
H ₃	23	11	43					1.3	2.2	8.3	358	9.0	0.83		
I ₁	3月	5	9	45				1.4	—	—	—	—	—		
I ₂	5	9	50		NNE		NNE	1.4	1.3	2.6	168	9.1	0.39		
I ₃	5	9	54					1.4	2.0	6.1	292	9.1	0.63		
I ₄	5	9	59					1.3	—	—	—	—	—		
J ₁	9	13	35		N	6.0	NNE	0.3	—	—	—	—	—	小波が消える。大波は通過。 ボールの位置は良好。 うねりを除きよく消える。 ボールは引寄せられる。うねりは大きいのを除きお おむね止るらしい。	
J ₂	9	13	49					0.3	1.2	1.6	128	8.0	0.27		
J ₃	9	13	53					0.2	1.35	2.9	179	7.9	0.38		
J ₄	9	14	0					0.2	—	—	—	—	—		
J ₅	9	14	5					0.2	1.7	4.5	245	7.9	0.51		
J ₆	9	14	9					0.2	2.6	8.5	379	7.9	0.79		
J ₇	9	14	20					0.2	—	—	—	—	—		
K ₁	13	6	0	曇	WNW	6.0	N	1.1	—	—	—	—	—	低長なうねり。 記録状況良好、うねり通過。 うねりは波長が短くなるのみで消えない。 マノメーター配管に水がたまつたため K ₄ より水銀 柱の読みがやすい。	
K ₂	13	6	25					1.2	2.0	5.5	278	8.9	0.66		
K ₃	13	6	20					1.3	2.65	8.5	380	9.0	0.88		
K ₄	13	6	26					1.3	3.3	14.5	530	9.0	1.23		
K ₅	13	6	35					1.4	—	—	—	—	—		
L ₁	13	9	52		NNW		NNE		—	—	—	—	—	回路調子悪し。5~6秒ほどのうねりあり。波向は おおむね良好、大うねりは通り抜ける(最大流量で も)。 ボールは原因不明で沈む。岸よりの回折波があるが 消えてゆきボールにそれほど影響しない模様。	
L ₂	13	10	10					2.5	2.1	5.4	280	9.2	0.66		
L ₃	13	10	21					2.5	3.0	9.1	412	9.2	0.98		
L ₄	13	10	27					2.5	—	—	—	—	—		
L ₅	13	10	37					2.5	3.0	9.1	412	9.2	0.98		
L ₆	13	10	19					2.4	3.5	10.2	462	9.1	1.08		
M ₁	13	14	13						—	—	—	—	—	大きなうねりは通る。ボール頂上が冠水、記録が変 になる。	
M ₂	13	14	24					0.9	1.8	4.7	250	8.6	0.55		
M ₃	13	14	30					0.8	2.5	7.3	345	8.5	0.76		
M ₄	13	14	36					0.7	3.35	9.8	445	8.4	0.98		
M ₅	13	14	45						—	—	—	—	—		

前節に述べた回折波の影響を考慮するならば、波高比=0.47 は消波能率として優れたものといえる。

平均週期が短かく、これは波長 7.2 m に対応している。しかしながらこのことは、使用した空気量あるいは工率によつてはこのような波だけしか消波できなかつたという意味ではない。平均週期が消波によつて変化しないことからみて、次のように理解すべきである：波の成分が 2~3 秒程度にわたつていて、それらが一樣に消波作用を受けているのである。すなわち 3 秒程度の波まで消波することができることを意味しているのである。この

ことはスペクトル分析の結果をみれば明瞭である。

調和解析は1回50秒の記録について行い得たので、記録を3つに分け、各部分ごとにスペクトルを求め、最後にそれらの平均を求めた。図-5はその結果を示すもので、横軸は波の週期、縦軸は自乗平均から求めた平均波高である（ただし尺度は便宜的である）。

実線は原波で、点線は消波作用を受けた波である。2つのスペクトルを比較すれば、消波の様子がよく理解できる。週期の短いものはよく消え、長くなると消えにくくなり、ついには全く影響を受けなくなる。3.5秒程度で消波作用が始まり、3秒以下になると活潑になつてく

る。消波作用を受けた減衰波スペクトルに2.5秒付近でいちじるしい山のあるのは、波の回折を無視しては理解することは困難である。このようにして回折波を考慮し、スペクトルの比較から3秒までの波が消波されていると推定してさしつかえないであろう。

図-5 消波実験 D 消波スペクトル

(註：実線は原波、点線は消波作用を受けたもの、横軸は週期、縦軸は波高。)

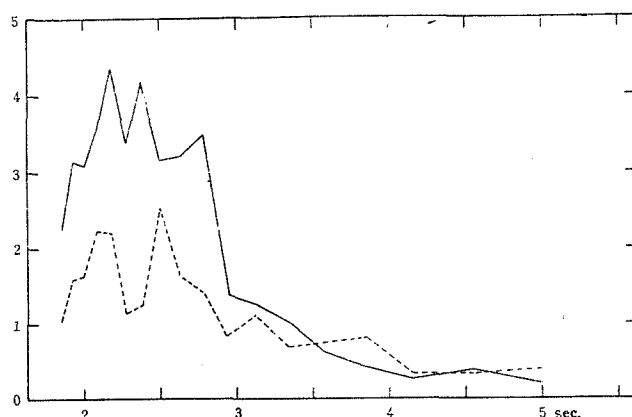
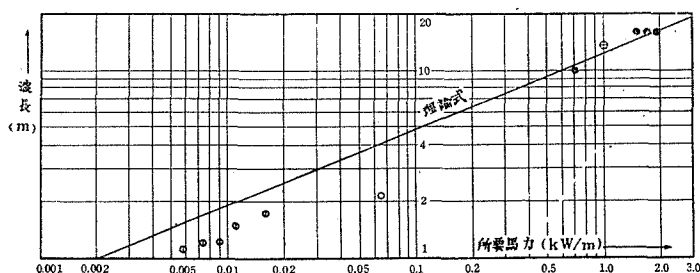


図-6 波長と消波所要動力

●外国の実例 ○応力研室内 ○ソ連室内 ⊕伊王島実験



週期3秒（波長14m）の波に対する消波所要動力として1.01kW/mを、波長と消波所要動力図（論文I、第9図；論文II、図-3）に記入すると、図-6のごとく、測定点は理論曲線の近くに落ちる。

10. 渦動粘性の作用について

われわれはいままで空気防波堤の消波機構は主として波に向う水平流の流動によるもので、これに

渦動粘性の作用が加わるものと考えていた。水槽実験の消波能率がきわめて悪いのは（図-6参照）、装置が小型であるのに気泡が大きく、bubble jetの能率が悪いためであると解釈してきた。すなわち水平流の流速が小さいため空気防波堤の機能が低下したものであると考えていた。大型の実地試験では装置全体の規模に対して気泡の大きさは小さくなり、水平流が速くなる。このためにbubble jetの能率、従つて空気防波堤の能率もよくなるので、図-6において外国の実例が理論曲線の近くにおちるものと想像されていた。しかるに実地試験においては水平流の流速と空気消費量の関係はQが適当に大きければ、実験室におけるものとほぼ同じであり、しかも図-6に見るように消波能率はいちじるしく向上されている。この事実はいく何を意味するであろうか。

いま前節に取り扱った実験Dの場合について考えてみよう。週期3秒、波長14m、空気消費量は約14l/sec mで工率は1.0Kw/mである。この空気量に対する最大流速は約60cm/sec、これは波の進行速度の12.6%に過ぎない。従つて水平流が波のエネルギー伝播を阻止するにはほど遠い。この流れは波長を19%縮め、波高を9%高める。従つて渦動粘性の効果を1.5倍高めるにすぎない。

60cm/secの流速を限界速度とするような波の進行速度は一樣流の場合に2.4m/secで、その波長は3.7mである。水平流の有効な長さとして15mを仮定するならば、このような場合に渦動粘性によつて週期3秒の波が1/2に減衰するためには、渦動粘性は自由噴流の場合にくらべて数倍大きくなければならない。これは一つには渦動粘性によつて崩壊した波のエネルギーが再び乱流のエネルギーとなり、渦動粘性を強めることに起因するであろう。二つには自由表面に接した噴流に際しては特に乱れは、はげしいのではないかと疑われる。最後に、上昇流は浮力を原動力としているので、自由噴流と対比させるべきではなく、むしろ物体の後流にくらべるべきであると

考えるならば、数倍の増加は容易に説明される。

渦動粘性がおもな要素ならば、混合距離、水平流の長さ、従つて多孔管の深度がいちじるしく消波に影響するはずである。他方多孔管の深度を増すならば、パラメーター ξ は減少し、bubble jet の能率は低下する。従つて空気防波堤の能率を極大にするような状態があるはずである。

今後においては、パラメーター ξ の役割を確かめ、能率最高の条件を実験室において十分吟味することが緊急のことであり、その後に続く、さらに大規模な実地実験が望ましい。

11. 今回の伊王島における試験は空気防波堤実用化の前提として、いままでに得られている理論的、実験的な知識、特に消波対象の波長と所要動力に関する関係式を実際の海の波について確かめ、空気防波堤設計の基礎となそうとするための試みである。そして経費、使用可能の空気量、実施の便等を考慮し、かつ確実に結果をうる条件のもとに伊王島が選ばれた。その際対象波の波長は約 15 m と限定された。

今回の実験から得られた結果を要約してみると、まず流速測定から：i) 空気量 Q と多孔管の深度 H に関する副変数 ξ (式 (5) 参照、海水中に含まれる気泡容積の割合に関する) があつて、これが重要な役割をもっている。そしてこれが、ある限度以上に大きくなると、ii) 流速分布には相似則が成立し、iii) 空気量 Q と流速 U との間には実験室にて求められた関係 $U \propto Q^{1/3}$ が成立つ。

次に消波実験について：i) 実地試験でたえず問題となつた bubble jet の両端からの回折波を水槽実験によつて確かめた。ii) 消波の様子は波形のスペクトルを比較することによつて明瞭に知ることができる。iii) 消波機能に対して渦動粘性は重要な役割をもっている。渦動粘性の大きさは普通の自由噴流の場合の 2~3 倍程度である。従つて iv) 波長—所要動力の関係は多孔管の深度、あるいは ξ によつていちじるしく左右されるものと思われる。