

空気防波堤の研究についてⅢ：端島に於ける現地実験

応用力学研究所水文学研究委員会

<https://doi.org/10.15017/4743359>

出版情報：応用力学研究所所報. 9, pp.25-33, 1956-12. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：

空気防波堤の研究に就いて III

端島に於ける現地実験¹⁾

応用力学研究所水文学研究委員会

概 要

昭和30～31年の冬期季節風の期間に長崎港外端島に於て第2次空気防波堤現地実験が行われた。これは昨年の伊王島に於ける第1次現地実験に較べて、総てが2倍の大きさのものであつた。即ち、多孔管の長さは60.5米、その深度は約16米、許容空気使用量 $150\text{ m}^3/\text{min}$ 、消波対象波長30米であつた。

荒天のため工事は困難を極め、2月24日仮工事のまま試運転が行われた。波浪は小さかつたが、成分は単純であつたため、その優れた性能をよく検べる事が出来た。

7月に至つて、水平流の流速分布及び流速と空気量の関係が測定された。

ここには単にこれ等の実験の内容及び測定の結果が報告されている。得られた結果の吟味や消波機構の流体水力学的説明は続く報告に発表される。

1. 緒言 長崎県土木部の依頼によつて昭和31年冬期季節風の期間に長崎港外端島(軍艦島と呼ばれている)に於いて、昨年行つた伊王島に於ける第1次空気防波堤現地実験に続く第2次の現地実験が行われた。第1次現地実験は、空気防波堤の研究のために有効な科学的資料を確実に求め、その実用化の第1歩を踏み出すことに主眼を置いて計画されたものである。従つて比較的对岸距離の短い伊王島日鉄礦業所岸壁を選び、許容空気量 $30\text{ m}^3/\text{min}$ に対して消波対象波長を15mとして、多孔管の長さ30mの比較的小型の装置に就いて実験が行われた。その結果は応用力学研究所々報等に発表されている。²⁾

この装置は略々所期の性能を有しており、空気防波堤の実用化を力強く示唆していたばかりでなく、吾々はこれに依つて、水槽実験では不可能であり、現地実験に依つて初めて見出すことの出来る、消波機構に関する2,3の重要な発見をなし得たのである。即ち渦動粘性の重要性、parameter ξ の役割及び空気防波堤の両端に於ける顕著な波の回折等である。

第1次テストは其の成功にも拘らず、その規模小さく、その結果を直ちに日本沿岸の波浪に応用するには不充分である。即ち実用化のためには、更に大規模な現地実験を行つて、第1次テスト及び其後に行われた水槽実験 或は理論研究により得られた空気防波堤の性能及び消波機構に関する知識を確め、進んで一層詳細に探り、所定の消波対象波に対する空気防

¹⁾ 実験, 測定は主として粟谷陽一, 富岡勝による。この稿の責任は栗原道徳にある。

²⁾ 九州大学応用力学研究所所報 第7号(昭和30年9月), 海岸工学研究発表会論文集(土木学会)昭和30年11月, “伊王島に於ける空気防波堤実地試験報告” 長崎県, 昭和30年8月。

波堤の設計基準を確立することは極めて望ましいことである。この様な意味に於て、昭和31年冬期季節風の期間に第2次現地実験が長崎港外端島に於て行われたのである。

端島は空気防波堤が要望されると思われる代表的な離島であつて、ここには三菱高島礦業所端島礦があり、これより実験時には圧搾空気分譲の受け得る。しかもその許容量は $150 \text{ m}^3/\text{min}$ に達するので、現地実験には相応しい現場である。

許容空気量からみて、総ての規模を第1次現地実験の場合の約2倍として装置が設計された。消波対象の波長を約30mとして、多孔管を深度16mの海底に敷設することとした。多孔管の長さは波長の倍として60.5mを採用した。当初には、異常荒天による装置の損傷を考慮して、多孔管及び通気管の海底設置等の準備工事は総て昭和30年11月中に完成し、季節風期間の初めの中に実験を完了する様に計画されたが、種々の都合に依り延引し、季節風期に入つて工事は困難を極め、ようやく2月24日に装置の仮設を終り、同日試運転を行うことが出来た。その後引続いて来襲した荒天のため仮設装置の故障続出し、修理不能のまま季節風期間を過ぎたが、その間に若干の有効な消波記録を採ることが出来た。然もこれ等の記録は、一瞥して新しい装置が予期以上の優れた性能をもつことを示すものであつたことは誠に幸いであつた。

装置の故障修理を待つて、7月に水平流の流速分布及び流速と使用空気量の関係を測定し、不充分ではあつたが一応実験は完了した。波浪のスペクトル解析は未だ終つていないので最終的な結論には到達していないが、得られた資料及びその簡単な整理の結果を茲に発表し、今後の空気防波堤の研究、或はその設計の参考資料に供さんとするものである。

2. 第2次現地実験の計画概要 端島はWからNWにかけて五島列島に向い、その距離は約70kmである。NWよりNNWの間は東支邦海にひらけ、これよりNにかけて対岸距離は急激に短くなる。従つてNW風の多い季節風の期間には絶えず劇しい波浪に曝されている。

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 $150 \text{ m}^3/\text{min}$ であつた。これは第1次現地実験の場合の5倍である。空気防波堤の能率はparameter $\xi^{1)}$ の函数であり、然も ξ の小さい方が望ましいのである。²⁾ 然しながらその詳細は未知なので、最小限度第1次テストと同じ能率を得る様に、最大空気量のときに ξ が第1次と同じ値をとる様に設計することとした。³⁾

1) 水文学研究委員会、九州大学応用力学研究所所報 第7号 (昭30.9), 式(3)。

2) 渦動粘性を有効に働かせるためには ξ を小さくすることが望ましいことは次元解析から容易に知れる。

3) 消波実験は最大空気量の約1/2で行われたので、 ξ は第1次テストの場合の約1/2であつた。実際能率は頗るよかつた。

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

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

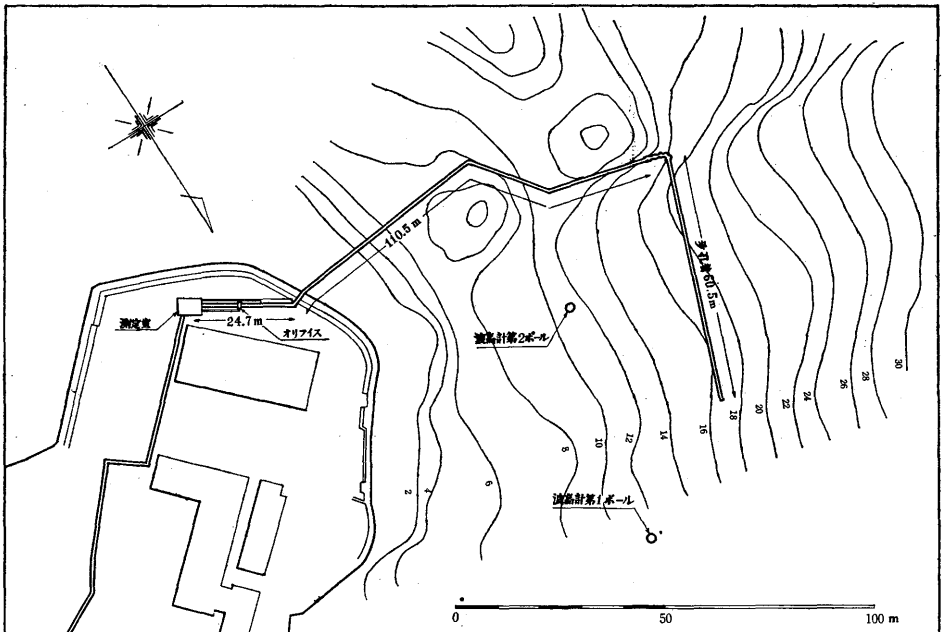
である。

第1次テストの場合と幾何学に相似にするならば, ξ も同じ値を与えるものとして, 多孔管の長さ L , 消波対象波長 λ は何れも深さ H に比例する。従つて H は第1次テストの場合の $5^{1/2.5}$ 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 16m, L は $5.5 \times 11 = 60.5$ m として, λ は 30 m (4.37 sec) を想定して総ての計画を樹てた。この波は略々 6~7m/sec の風に対応している。

以上の計画には, 先づ ξ を小さくして使用した場合 (空気量が少ない場合) の消波能率の向上, 及び次節に述べる様に, 第1次テストにより得られた縮流係数の適正值を用いて多孔管を設計したことによる bubble jet の能率の向上, 及び其他に規模を大きくした事に依つて起る未知の能率向上が期待されている。

12月, 1月を実験期間として, 最多風向 WNW に向け深度 16 m 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 m である。

第1次テストの失敗に鑑みて, 波高計は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れて原波用のものを取り付け, 波型は原波と減衰波とを同時記録することとした。



第1図 端島に於ける空気防波堤

減衰波用の波高計は多孔管の後方約 30 m に設置したが、実験中は水平流及び波浪に流されて平均的に約 40 m 後方にあつた。

前回と同様に、空気防波堤の物理機構を探求するために、季節風期の後に 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づ管の内外の圧力差を決めなければならない。これは空気圧縮機の馬力を減らすためばかりでなく、放出気泡を細くし bubble jet の能率を高めるためにも、出来るだけ小さくすることが望ましい。然しながら多孔管設置の際の水平誤差に較べては充分に大きくなければならない。今のこの誤差を 50 cm 以内に納め得るものとしよう。流量が最大流量の 1/2 (75 m³/min) までを使用範囲として、その際に空気の放出量が全管を通じて誤差 10% 以内にて一様であることを望むならば、その時の圧力差 Δp は 0.25 kg/cm² でなければならない。従つて最大流量のときに $\Delta p = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ である。

前回にもこれと同じ条件で設計されたが縮流係数の適正値を知らなかつたために、実際には Δp は 2 kg/cm² 以上になつていた。これに反して今回の消波実験では空気量は約 70 m³/min であつたので Δp は略々 0.25 kg/cm² であつた。前節に述べた今回の実験に対する期待の様に、この事は前回に較べて bubble jet の能率を著しく増大させたものと考えられる(次節参照)。

1つの孔から空気が水中に噴流する場合の縮流係数に関しては前回の測定結果が唯一の参考資料である。これ等を参考として、 $\Delta p = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ に対し縮流係数 = 0.44 と仮定した。これ等の条件から、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 1.49 cm²/m を得る。工作上の便宜から孔の直径を 2 mm として孔の数は 47.6/m となる。

多孔管の防蝕は接手と共に純亜鉛鍍金を行う方法を用いた。多孔管は昭和 30 年 11 月中旬に海底に敷設されたが翌年流速測定を行つた 7 月中旬には、空気の流動状態からみて極く僅かな異状が認められたに過ぎなかつた。

多孔管は深度約 16 m の海底にコンクリート台をおき、これに固定した。

波高計(フロード式)及び記録装置は原理的には前回のものと同じである。たゞ電気回路に若干の改良が加えられ、海中設置に工夫を凝らし、水流、波浪に依つても移動しないように、また長期間荒海に放置し得る様にした。しかしこれ等の装置の取付工事が遅れ遂に使用されなかつた。

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。仮設置のままではあつたが、季節風も未だ吹きすさんでいた 2 月 24 日に送氣し、試運転を行うことの出来たのは誠に幸であつた。

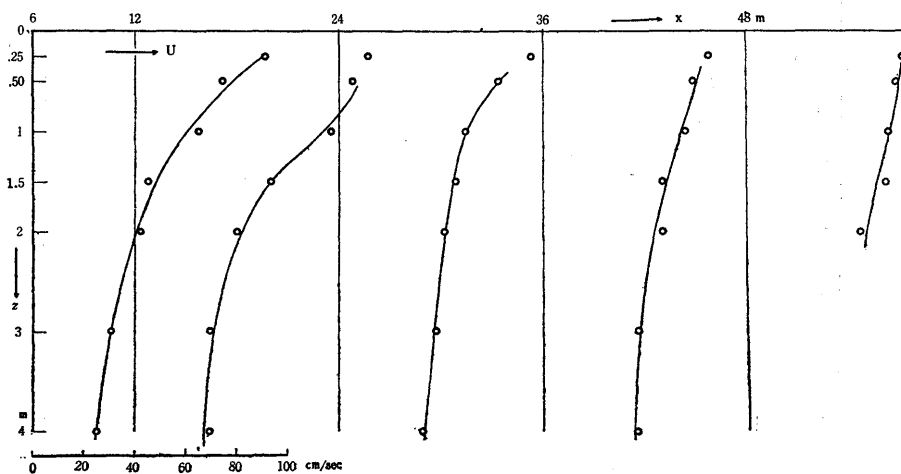
当日は北西 6~7 m/sec の風、波高は余り高くないが、略々 4 秒程度の成分の単純な波であり、而も状態が安定していたので消波性能を観察するためには絶好の状態であつた。この日の性能は予想以上のものであり、特に空気防波堤の両端よりの回折波が少なく、その後方広汎な領域に亘つて波は静かであつた。

装置は未だ仮設置のうちに荒天が続き、故障は続出して修理不能のまゝに季節風の期間は終つて仕舞つた。その間に得られた消波記録は僅か 2, 3 に過ぎないが、何れも信頼のおける資料であつた事は誠に喜ばしいことである。

4. 水平流の流速分布及び空気消費量と流速の関係 これ等の測定は送気管の故障修理をまつて 7 月 4 日に行はれた。測定時間が限られていたので、前回の様に異つた条件に応じた数多くの測定を行ふことが出来なかつた。¹⁾

第 2 図は鉛直方向の流速分布及びそれが多孔管から離れてゆくやうに何う変化するかを示している。測定中の多孔管の平均深度は 16.0 m であつた。第 3 図は一定の深さの点に於ける流速が距離と共に何う変るかを示している。これ等を見ると判る様に、距離が増大するに従つて流速は減少するが、水平流の厚みは著しく増大してゆく。この傾向は第 1 次テスト及び水槽実験の場合と同様である。この測定に際して $Q=19.7 \text{ l/secm}$ であつた。

第 4 図は多孔管からの水平距離が 12 m、海面からの深さが 50 cm の点に於ける流速と空気消費量の関係を示している。測定中の多孔管の平均深度は 17.3 m であつた。図中の 1 点は 3~5 回の測定値の平均を示している。測定領域を通じて $U=0.314 \sqrt[3]{Q}$ (U : 流

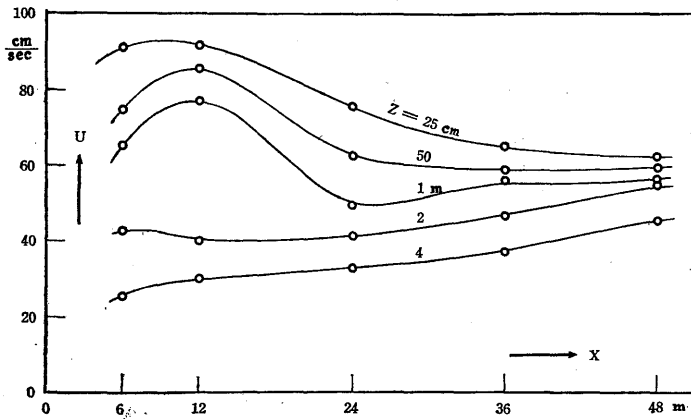


第 2 図 水平流の流速分布 $Q=19.7 \text{ l/secm}$.

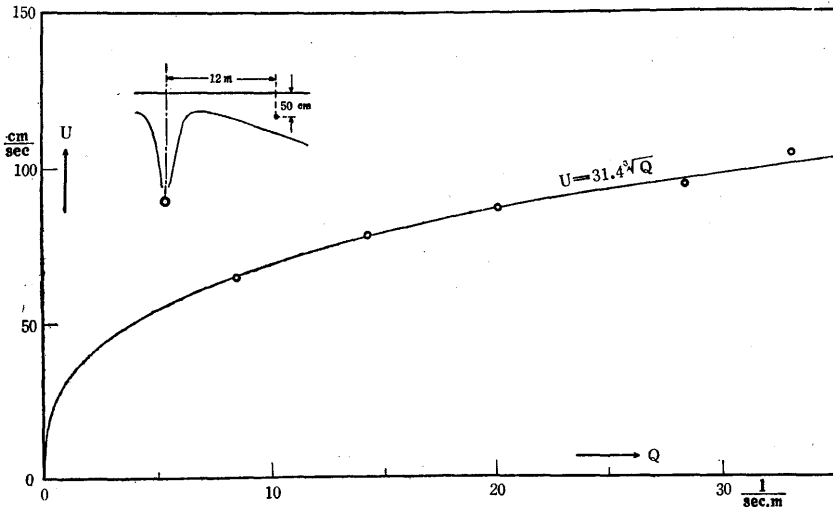
¹⁾ 幸に小潮であつたため潮位の変化も少なく、他方伊王島の場合に較べて潮流も極く少なく、これ等を見ても差支えなかつた。

速 m/sec , Q : 空気量 $l/sec\ m$) が成立っている。空気消費量と流速の関係は前回のものと著しく相違している。先づ第1に、同一空気消費量に対して流速は著しく大きい。前回の距離 $6\ m$, 深さ $25\ cm$ の場合の関係と比較するならば、¹⁾ $Q = 15\ l/sec\ m$ に対して、今回は $U = 77\ cm/sec$, 前回は $U = 59\ cm/sec$ である。第2には、測定領域に於て ξ の値は $0.39 \times 10^{-4} \sim 1.56 \times 10^{-4}$ であつて、前回は於ける法則 $U \propto \sqrt[3]{Q}$ の成立する限界値 1.8×10^{-4} よりも小さいにもかかわらず、この法則が全域に亘つて成立していることである。これ等のことは今回の bubble jet の能率が前回のものに較べて著しく優れていることを意味している。²⁾

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



第3図 流速の x 方向の変化



第4図 流速と空気消費量の関係

1) 九大応研所報第7号, 第11, 12図“流速と空気消費量の関係”を参照。

2) 水槽実験に於ける流速と空気量の関係が今回のもの $U = 0.314 \sqrt[3]{Q}$ に依つて略々表われること及び圧縮空気の馬力と水平流の馬力との比、即ち bubble jet の efficiency が両者とも似た値をもつことは注目すべきことである。

孔管内外の圧力差を小さくすることが出来た。このために、観察に依つても認められた程に気泡は小さくなり、単独気泡の上昇限界速度が減少したためエネルギー損失の減少が先づ考えられる。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たねばならぬ。

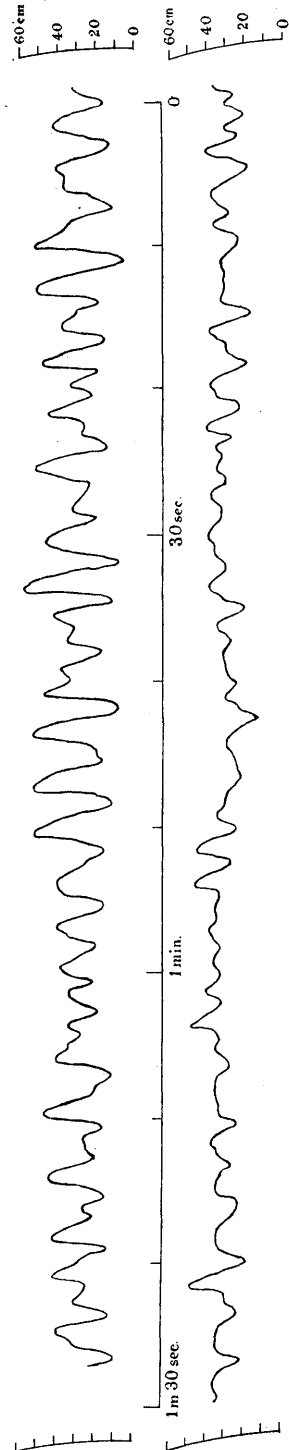
5. 消波実験 前後を通じて9回行はれたが、そのうち波型記録のとれたものは僅かに5回に過ぎない。そのスペクトル解析は未だ行はれていないが、以下2つの代表的な場合に就いて消波実験の結果を簡単に紹介する。¹⁾

実験2. 風速 7 m/sec, 多孔管深度 16.1 m, 空気消費量 19.0 l/sec m, 工率 1.85 KW/m.

試運転当日の記録である。仮工事のため、未だ波高計は多孔管の後方約 30 m (実験中は水平流と波浪に流されて 40 m 程になつていた) のところに只1本取り付けられたただけであつた。従つて送気の前後に於ける原波と減衰波の波型を比較することとした。幸に、風速、風向共に安定して居り、実験中波浪の変化は殆んど認められなかつた。(実験の初めと、終りの原波の波型に比較した)。

波向は多孔管に斜め 30° 程に傾いていたが、波浪の成分が比較的単純であつたため消波状況がよく観察された。多孔管の両端に於ける回折波は、伊王島に於ける現地実験の場合に較べては殆んど認められない。たゞ傾角の著し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るだけで、多

¹⁾ 茲には概略を紹介するものであつて、引用される数字は今後の詳細な整理の結果若干訂正されるやも知れない。



第5図 消波実験第2、波型記録
上：原波，下：減衰波

孔管の後方広い領域に互つて海面は静かであり、肉眼観察によつても美事な消波状況が容易に認められた。これは又第5図に示された原波と減衰波の波型記録を一瞥すれば容易に頷くことが出来る。

原波の波型を見るのに、成分は殆んどが周期 4.5 sec 以内であり、2.5 ~ 4.0 sec の範囲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、各成分が一様に減衰されて仕舞つている。然も消波側には多少であつても回折波¹⁾が進入していることを思えば、水平流のために波高の減少²⁾されることを考慮しても、尙お少なくとも周期 4.0 sec (波長 25 m) の波までが、実用的には消波されていると考えて差支えないであろう。

多孔管の深度及び空気消費量から計算した所要馬力は 1.85 kw/m である。他方栗原³⁾による理論工率は波長 25 m に対して 6.25 kw/m であり、Evans⁴⁾の公式によれば 25 kw/m である。こた等の数字を比較して今回設計された空気防波堤は素晴らしい性能をもつていていることがわかる。

実験 3c. 風速 8 m/sec, 多孔管深度 15.6 m, 空気消費量 17.5 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、多孔管に 45° 程度傾く。短い周期のものは更に北よりの短い fetch に対応して、殆んど側面より消波領域に進入しこれを乱していた。空気防波堤の性能を知る上から見れば、この様な短い周期、例へば 3 秒以下のものは当然消波さるべきものでもあり、又余り意味がないので、これ等を除外して 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である：

	平均波高	平均周期	
原 波	96.4 cm	4.42 sec	減衰率 = 0.69
減 衰 波	66 3	4.67	

減衰波の周期が原波より大きいのは、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 ~ 5 sec の間に入つて居り、略々一様に減衰されているから、減衰率 0.69 は原波の平均周期 4.42 sec に対応していると見ても過大には見積つていないであろう。これは 30.5 m の波長に対応している。Eevans の論文(前出)の第 4 表を用いて減衰率 50% に対する工率を求めると、波長 30.5 m に対する消波所要工率は $1.68 \times 44/26 = 2.84$ kw/m となる。これに対して理論工率は 10.3 kw/m である。この場合も前と略々同程度によい能率を示している。

1), 2) 回折波及び following current の場合の波高の減少に就いては次の報告に於て詳しく吟味される。

3) 九大. 応力研. 所報 第5号 (昭 29. 8) 式 (5.4). $P = 0.002 \lambda^{2.5}$ (P : KW/m, λ : m)

4) J. T. Evans, The Dock and Harbour Auth. Dec. 1955. 彼に依れば Steepness 3/100, 減衰率 50% のときの水平流の工率は $P = 0.00115 \lambda^{2.5}$ であり, bubble jet の efficiency は 15 per cent であるから, 所要の工率はこれを 7 倍しなければならない。

6. 結 語 水平流の流速分布及び流速と空気消費量の測定は空気防波堤の性能を解析する上に極めて重要である。充分回数を行つて種々の条件のもとに測定することは出来なかつたが、得られた結果に於て、測定点の散乱が比較的僅かであつたことは幸いであつた。これ等の結果から bubble jet の性能は次の 2 つの点に於て第 1 次現地実験のものより優れていることが知られた。i) 測定領域に於て ξ の値は第 1 次のものより小さいにも拘らず $U=C\sqrt{Q}$ が成立つている。ii) 全領域に於て、同一の Q に対する U の値は第 1 次のものより大である。この高性能は多孔管の設計に際して、第 1 次現地実験の結果から求められた適正な縮流係数を用いたため、管内外の圧力差を減じ、気泡を細くなし得たことに起因するものと思われる。

第 1 次現地実験では空気防波堤の消波性能を知る上に、その両端からの回折波が著しく、性能の判定に甚しく困難を感じた。今回のテスト、特に消波実験 2 に於ては肉眼観察に依つては著しい回折波は認められず、多孔管の後方広い領域に亘つて波は静かであつた。これは前回に較べて、波長に対する多孔管の長さの割合が大きかつた事によるものではなからうか。

消波実験も波型記録のとれたものは僅小であつたが、波が比較的単純な成分からなり、然も波長が適当であつて消波性能を知る上に好都合のものであつた。最大空気量の際の記録に欠けている。その約 1/2 の空気量の場合に長さ 25 m ~ 30 m の波までを実用的に殆んど消波している。消波実験の結果はスペクトル解析を行い、更に消波領域に於ける水平流及び回折波の影響を考慮して詳細に論ぜらるべきであるが、波型記録の簡単な解析の結果は今回設計された空気防波堤の優れた性能を充分に示している。

最後に、この研究に対して惜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および朝日新聞科学奨励金が下附されている。

(昭和 31 年 11 月)

(昭和 31 年 12 月 12 日 受理)