

## 感潮河川流場における空気防波堤の現地実験

## FIELD TEST OF A PNEUMATIC BREAKWATER IN A TIDAL RIVER

岩垣雄一\*・浅野敏之\*\*・近藤浩右\*\*\*・山田耕一\*\*\*\*

By Yuichi IWAGAKI, Toshiyuki ASANO, Kousuke KONDO and Koichi YAMADA

At the Edogawa moterboat racing stadium located at a tidal river channel in Tokyo, moterboat races have sometimes become difficult to open by wind waves during spring gales. A pneumatic breakwater has been planned to be adopted to protect the racing field from the wind waves because it has an advantage of no interruption of common boat navigations through the river channel. However, the breakwater performance of wave damping in the water field where the tidal current exists in addition to the river current is not clear yet.

The present study shows the results of the field test and discusses the applicability of the pneumatic breakwater to tidal rivers. It is found from the data analysis that the pneumatic breakwater in the field with the tidal current maintains almost same performance of wave damping as that without the current.

*Keywords: pneumatic breakwater, field test, applicability, wave damping performance*

## 1. 緒 言

空気防波堤の研究の歴史は比較的早く、1906年アメリカ人 Phillip Brasher が、海底トンネル掘削現場から漏れてくる気泡が水面に噴出するところで、波浪が明らかに低減していることに気づき、翌年空気防波堤の特許をとったのが最初である<sup>1)</sup>。彼は何度か現地への適用を試み、その中には成功例もあったが、失敗例も数多くあったようである。その後、しばらく空気防波堤は用いられなかったが、1952年には Dover 港の鉄道フェリー用ドックの外ゲートの修理期間中に、内ゲートを波浪から保護するため空気防波堤が設計施工され、成功をおさめた<sup>2)</sup>。わが国では栗原が1954年長崎県伊王島<sup>3)</sup>、1956年長崎県端島<sup>4)</sup>で相次いで現地実験を行い、現地スケールでは水平流の消波作用以外に渦動粘性の効果が重要となることを提唱した<sup>5)</sup>。さらに栗原は日本鋼管鶴見造船所の岸壁において、艤装中の船体の保護を目的とした空気防波

堤の現地実験を行った<sup>6)</sup>。また最近では運輸省第三港湾建設局が岩垣らの指導の下に大阪南港で現地実験を行っている<sup>7),8)</sup>。

こうした過去の現地実験例を総合して検討してみると、その成否の鍵は船舶の航行や港内作業の支障とならず、しかも施設が可動であるといった空気防波堤の長所が発揮できるか否か、さらに現地の波が空気防波堤の消波可能な範囲の周期のものであるかどうか、にかかっていると考えられる。また、実施にあたっての維持・管理の方法、経費、必要とする空気容量のコンプレッサーが使用できるかどうか等も重要な要素であることはいうまでもない。

ここで報告する空気防波堤の現地実験は、調査を含めて昭和54年12月から昭和59年5月にかけて東京都江戸川区にある江戸川競艇場において実施されたものである。現地は東京湾に河口をもつ中川放水路内にあり、ここでの風波の消波については、流れを妨げないこと、また船舶の航行を阻害しないという付帯条件があり、これには空気防波堤の適用が最も適当であると考えられた。また消波の対象となる波は、モーターボート競走を行うにあたって最も危険と考えられる艇長と同程度の波長をもつ波形勾配の大きい波であり、これは空気防波堤による消波が十分可能な短い周期の波であった。さらに消波

\* 正会員 工博 名城大学教授 理工学部土木工学科  
(〒468 名古屋市天白区塩釜口1-501)

\*\* 正会員 工博 京都大学助手 工学部土木工学科  
(〒606 京都市左京区吉田本町)

\*\*\* 正会員 工修 五洋建設本社土木設計部  
(〒112 文京区後楽2-2-8)

\*\*\*\* 正会員 五洋建設本社土木設計部 (同上)

が必要となるのは、レース開催時に特定の方向の強風が吹くときに限られるので、その使用頻度は非常に少なく、空気防波堤の経済性がより有効に発揮されるであろうと考えられた。以上のように当地への適用は空気防波堤の有用性を発揮する絶好の機会と考えられたので、著者らは従来空気防波堤の研究を行ってきた経験を生かして、この実用化研究に着手した次第である。

現地には東京湾の潮位変動と上流からの河川流出とによる流れが存在するので、特に流れによる空気防波堤の消波性能の変化について、定量的に調べることが必要である。このような感潮河川域へ空気防波堤を適用した例は、著者らの知る限り全くない。本研究は、流れがある場で形成される空気防波堤の表面水平流の流況観測と、流れの上に発生する風波に対する消波実験を通じて、こうした場への空気防波堤の適用可能性について明らかにするものである。

空気防波堤を現地で使用するにあたっては、設計・施工等の実際面での検討課題が多数あること、また現地では消波の対象となる波高の大きな風波は、一年を通じてほぼ春先に限られることから、観測の機会が非常に少なく、したがって実験は長期にわたったが、ようやくその結果をまとめることができたのでここに報告する。

## 2. 現地実験の概要

### (1) 江戸川競艇場の概要

江戸川競艇場は荒川の支流である中川放水路の河口導流堤先端から3.8 km 上流にその水域を有している。同地点の川幅は約140 m、水深は両岸で2~3 m、中央部6~7 mである。水域内の流況は東京湾の潮位変動と上流からの河川流出によって支配され、下げ潮時には下流側へ最大で約1.2 m/s、上げ潮時には上流側へ最大約1.1 m/sの流速が記録されている。風向がS~SSWおよびN~NNEのときには放水路の方向と一致し、風の方向が流れの方向と逆向きで、その風速が大きいときに高い風波が発生する。すなわち、下げ潮時に強いS~SSWの風が吹く場合、あるいは上げ潮時に強いN~NNEの風が吹く場合がそれである。S~SSWの南風は春季に多く、これが下げ潮時と重なれば、高波のためにレースを中止せざるを得ないことがある。この対策として、レース開催中には、長さ20 m、幅約3.3 m、高さ70 cmのプレート式浮防波堤を競艇場の上下流側にそれぞれ2基と3基設置するようにしている。しかし、この浮防波堤は放水路の幅の1/2にも満たない長さなので、開口部からの波の侵入、回折により、十分な水面の静穏度を確保することができない状態である。これは放水路内を上下する船舶の航行のために片側を開けておく必要があるという絶対的な制約によるものであり、航行を阻害しない

という利点をもつ空気防波堤の設置が検討されるに至った大きな理由の1つである。

### (2) 消波対象波の設定

現地の風波の観測は昭和54年12月から翌年5月にかけて実施した。計測には16 mm 撮影機を用い、水域中に固定された25 mm 間隔のスケールを標識として水面の変動を撮影した。フィルムモーションアナライザーを用いてこの水位変動を読み取り、得られた記録から波別解析法およびスペクトル解析法によって、現地の風波の特性を解析した。ゼロアップクロス法によって求めた現地風波の波高および周期の結果については文献9)の表-1にすでに示したとおりである。それによれば現地の周期は最大でも2.3 s程度であり、またスペクトル解析の結果からも、ピーク周波数が0.4 Hz~0.5 Hzの範囲にはいることがわかっている。

一方、モーターボート競争を行うにあたって最も危険な波は、艇長(約3 m)と同程度かそれより若干長い波長をもつ波であり、0.6~0.8 m/sの逆流がある場合には、周波数0.4~0.5 Hzの波がこれに相当する。

以上より、消波対象波は下げ潮時に現われるピーク周波数0.4~0.5 Hzの風波と決定した。

### (3) 必要空気量と圧縮機容量

岩垣・浅野は既往の室内実験および現地実験の結果を整理解析し、空気防波堤の相似則を明らかにすることによって、流れがない場合に与えられた周期の波を消波するのに必要な空気量を算出する方法をすでに確立している<sup>10)</sup>。一方、流れがある場での空気防波堤の消波実験は、岩垣・浅野<sup>9)</sup>が行った水深45 cmの水槽実験があるのみであり、現地で流れがあるときの必要空気量の算定法は明らかでない。この室内実験では、波の進行方向と逆方向の流れがある場合には、流れによって気泡噴流が消波に直接有効な入射波と逆方向に流されるため、空気防波堤の消波性能が向上するという結果を得たので、この性質を考慮に入れて圧縮機の容量をひとまず算出することにした。この算定値は前述したように必ずしも正確な根拠があるわけではないが、現地の水深を4 mと設定した場合に、0.05 m<sup>3</sup>/s・mという値が圧縮機的设计吐出容量として算出された。

### (4) 気泡管の製作および送気設備の設計

前項で得られた設計空気吐出量に基づいて、気泡管ならびに送気設備の設計を行った。気泡管長は空気防波堤設置予定地点の川幅が約115 mであること、浮防波堤を併設すること、左岸側にコンプレッサー用台船および観測用台船を設置することを勘案して全長36.4 mとした。この気泡管は一様な気泡の噴出を得るために6 m単位の分割構造とした。気泡管径、オリフィス孔径、孔数の設計にあたっては十分な検討を行った結果、これら

の値としてそれぞれ 89 mm, 4 mm, 18 個/m が得られた。

気泡管の支持方法については、河床に杭を打設することが河川管理上許可されないため、沈設管に気泡管を取り付け、河床に沈める方法を採用した。現地の底質がヘドロ状態であり、通常の沈設管では著しい沈下が予想されるため、図-1 に示すように 2 本のフロート用鋼管と 1 本の沈設用鋼管から構成される接地圧の少ない沈設管を考案した。この装置は通常は水面上に浮かんでいるが、実験時には沈設用鋼管に水を送り込んで河床に沈ませ、実験が終了するとこれに送気することにより、管内水を排除して水面上に浮上させるものである。この方法によれば短時間に装置の設置や撤去が可能であって、空気防波堤の可動性という長所をさらに増大させたことになる。

図-2、図-3 は実験時における気泡管、浮防波堤、コンプレッサー用台船の配置平面図、配置断面図を示したものである。図-3 からわかるように、河川横断方向の河床形状が起伏を有するために、気泡管は 3 分割され、それぞれがゴムジョイントで連結された構造となっている。

送気装置として最大圧力  $7 \text{ kg/cm}^2$ 、最大吐出量  $17 \text{ m}^3/\text{min}$  の能力をもつエンジン・コンプレッサーを採用した。送気管に取り付けられたピトー管と圧力計から空気流量を測定した結果、このコンプレッサーを 6 台稼働すれば約  $0.045 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$  の空気吐出量となり、当初見積った計画空気吐出量がほぼ得られることがわかった。また 4 台および 3 台稼働したときの空気吐出量はそれぞれ  $0.027 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 、 $0.021 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$  であった。以後の流況および波浪観測においては、コンプレッサーを 6 台、4 台、3 台稼働させた実験を行うものとし、それぞれのケースを  $Q_{\text{max}}$ 、 $Q_{2/3 \text{ max}}$ 、 $Q_{1/2 \text{ max}}$  とよぶことにする。

### 3. 流況観測

#### (1) 観測方法

空気防波堤の気泡噴流が形成する水平流は消波と密接な関係をもつが、この流れは気泡管からの距離と水面からの深さによって流速が変化する。したがって、流況観測は水平方向および鉛直方向に多数の測点をとる必要があるが、現地には潮汐による流れが存在するので流向・流速は時々刻々変化する。そのため、できるだけ速やかに流速測定を終えねばならない。本観測では観測用台船にパワーリーチを据え付け、電磁流速計をそれに吊り下げた。流速測点間の移動はパワーリーチのアームとワイヤーの操作により、迅速に行った。

流速の測定は、空気防波堤のほぼ中央を通る河川縦断方向の測線上で行った。水平方向の流速分布測定は、水

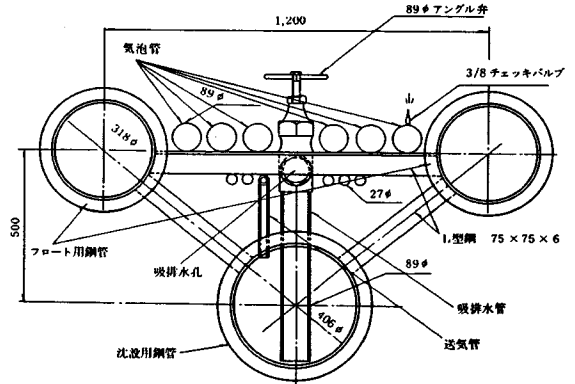


図-1 浮沈式空気防波堤の概略構造 (単位: mm)

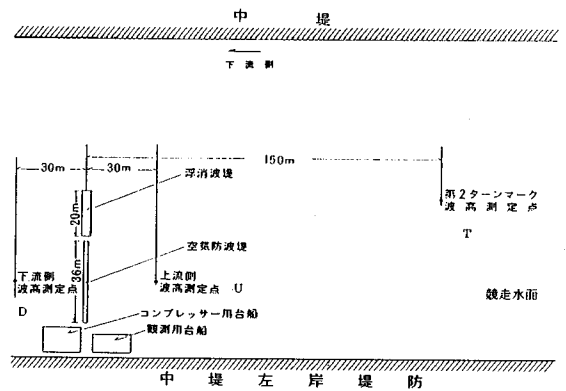


図-2 実験設備の配置平面図

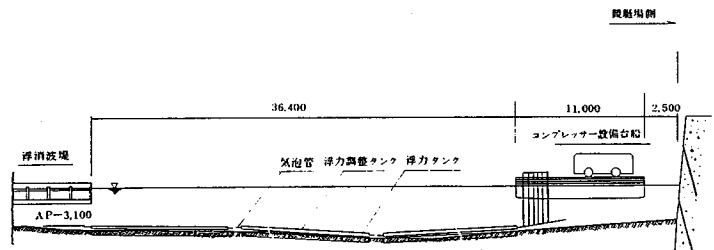


図-3 実験設備の配置断面図 (単位: mm)

面下 40 cm の深さで行い、水面に現われた気泡群の中心を起点として 8 m までは 1 m ごとに、それからは 2 m ごとに測点をとった。鉛直方向の流速分布測定は、水平方向の流速測定を行った後、最大流速が得られた位置で行い、水深 1 m までは 20 cm おきに、それ以深では 50 cm おきに測点をとった。1 ケースの測定の前後には、河川流の流速分布を測定した。

この流速測定のための目的は、気泡噴流によって形成される水平流が、水域内の流れによってどのように変化するかを調べることにある。したがって、観測は潮差の比較的大きい日に行った。観測は下げ潮時に潮流流速が最大と

なるとき、下げ潮時に潮流流速が最強時の約半分となるとき、潮止り時および上げ潮時に潮流流速が最大となるとき、の4回について実施し、それぞれの潮流状態に対して空気量を3通りに変化させた。

(2) 観測結果

図-4は水平流の観測結果の一例で、河川流のみと空気防波堤を作動した場合の河川流も含めた水平流の鉛直分布を示したものである。次に河川流速を差し引くことにより空気防波堤の正味の流速値を求め、それをプロットしたものが図-5である。以下の図においては、河川流速を  $U$  とし、空気防波堤による水平流の流速を  $u$  とする。また、上流側は上流に向かう流速を正、下流側は下流に向かう流速を正とする。CASE-1~3の下流側の結果には、典型的な空気防波堤の水平流速分布である表面水平流と下層における戻り流れがみられるが、これが明らかでないケースもいくつかあった。

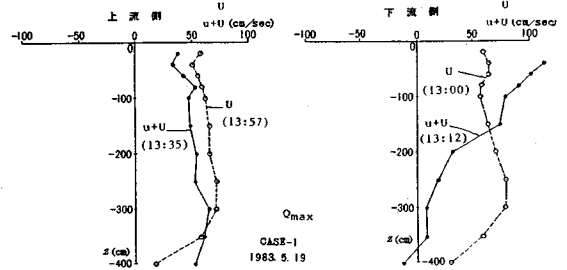
図-6は表面水平流（ここでは、水面下40cmにおける測定値）の水平方向流速分布を示したものである。図-6(a)は空気量最大  $Q_{max}$  の場合であるが、CASE-4の潮止り時に、最も大きな水平流速が得られることがわかる。他の3ケースはいずれも下げ潮時のもので、その値に大きな差異はみられない。図-6(b)は空気量  $Q_{2/3 max}$  の結果を示したものであるが、やはり潮止り時の水平流速が最も大きな値となっている。CASE-6とCASE-8は流向は異なるが流速はほぼ同じ場合であり、CASE-6の下流側とCASE-8の上流側はともに気泡流が河川流に流される側に相当し、流速値が他方に比べて大きくなること、また水平距離による変化特性がよく似ていることがわかる。

(3) 室内実験結果との比較

ここでは流れによる表面水平流の変化を定量的に明らかにするために、観測結果を整理するとともに、室内実験水槽で同様な実験を行い、両者の結果を比較することによってこの課題を検討した。

実験は京都大学工学部土木工学教室にある長さ27m、幅50cm、高さ70cmの循環流発生装置の付いた造波水槽を用いて行った。水深は60cmで一定である。気泡管は水槽の全幅にわたって設置されている。水平流の測定は25mm径のプロペラ流速計を用い、水面下5cmの流速を水平方向に10cmピッチで測定し、流速が最大となる位置で鉛直方向に流速を、水面下20cmまでは2.5cmおきに、それ以深は5cmおきに測定を行った。

図-7は空気防波堤によって形成された正味の水平流の鉛直分布を示したものである。図より上流側では、流れの流速の増加とともに、表面水平流および下部の戻り流れの流速が急激に減少することがわかる。一方、下流側では流れの流速の増加とともに、表面水平流の流厚(流



(( ))は測定開始時間を示す)

図-4 水平流の鉛直分布

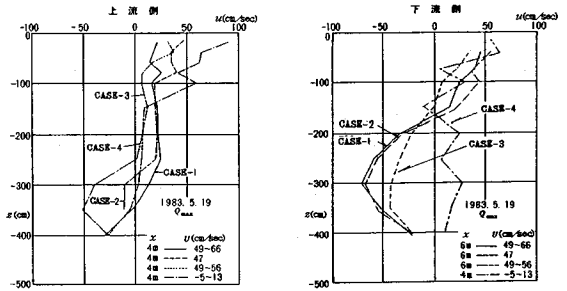
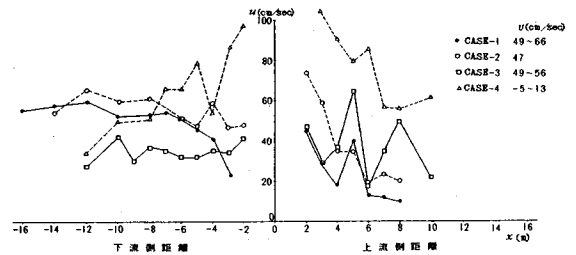
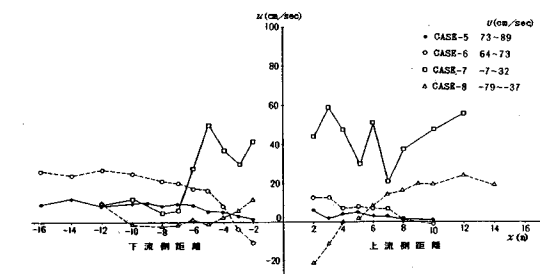


図-5 空気防波堤によって形成された水平流の流速分布 (空気量:  $Q_{max}$ )



(a)  $Q_{max}$



(b)  $Q_{2/3 max}$

図-6 表面水平流の水平方向分布

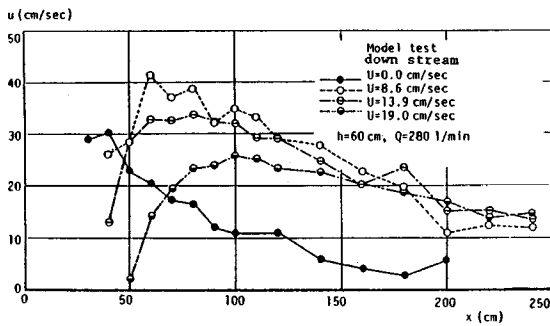
れの方が変わるまでの深さ)が増加し流量は大きくなるが、水平流の最大流速は必ずしも増加しない。現地観測の結果でもこの表面水平流の流量の増加はみられないで、むしろ河川流の増加とともに下流側においても減少するようである。

図-8は表面水平流速の水平方向分布を示したものである。横軸の  $x$  は気泡管設置位置からの水平距離である。気泡噴流が流れによって流されることより、水平流速が0となる中心点が流れの流速とともに移動する。図から、上流側では流れの流速が増加するにつれて、大きな水平流速の得られる範囲が狭くなるのに対し、逆に下流側では流れがある場合には、ない場合より広い範囲で大きな水平流速が得られることがわかる。

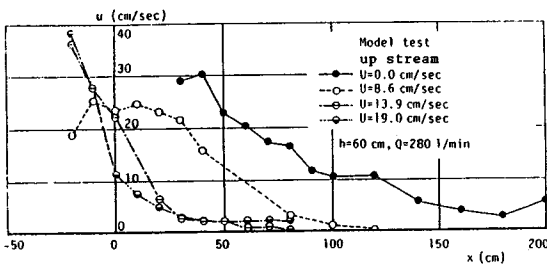
次に現地における観測結果と上述の室内実験の結果を整理し、流れによる表面水平流の性質の変化について比較検討を行った。上昇する気泡噴流が横からの流れにより湾曲する程度は、横からの流れの流速  $U$  と気泡噴流の上昇速度  $w$  によって表わされるであろう。後者の流速の代表値として、流れがない場合に空気量  $Q_0$  を供給した場合の水面での上昇流速  $w_0$  を採用することにする。この  $Q_0$  と  $w_0$  の関係については Bulson<sup>11)</sup> や Kobus<sup>12)</sup> の式があるが、既往の室内実験・現地実験の結果を最もよく説明するものとして、岩垣・浅野<sup>10)</sup> が提案した次式に基づいて、 $w_0$  を算出することにした。

$$w_0 = 1.22 \left( 1 - \frac{0.075}{h'} \right) \sqrt[3]{gQ_0}$$

ここに、 $g$  は重力加速度、 $h'$  は気泡管の設置水深である。図-9、図-10はそれぞれ室内実験と現地実験における表面水平流の水平方向最大流速  $u_{max}$  と流れがないときのその値 ( $u_{max}^0$ ) との比を縦軸にとり、横からの流れ



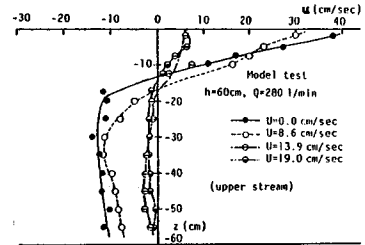
(a) 上流側



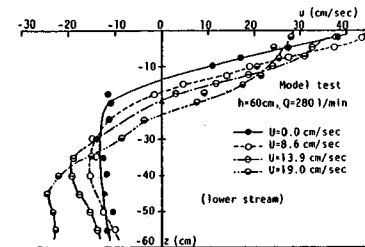
(b) 下流側

図-8 表面水平流の水平方向分布 (室内実験)

の流速を  $w_0$  で無次元化した  $U/w_0$  を横軸にとって示したものである。水槽実験の結果では、 $U/w_0$  が約0.3より小さい場合には、下流側では流れがない場合より大きな水平流速が得られるが、 $U/w_0$  が0.3より大きくなると、下流側においても流れがない場合の水平流速を下回



(a) 上流側



(b) 下流側

図-7 水平流の鉛直分布 (室内実験)

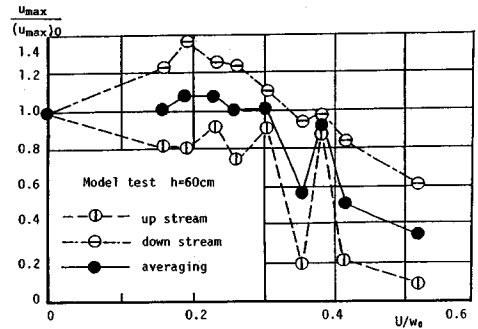


図-9 水平流の表面流速と河川流速の関係 (室内実験)

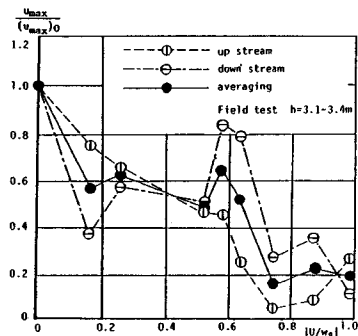


図-10 水平流の表面流速と河川流速の関係 (現地実験)

る値となることわかる。一方、現地実験結果では、上流側・下流側とも、河川流の流速の増加とともに空気防波堤の水平流速が急速に減少することが読み取れる。

以上の結果から、室内実験においては、河川流による空気防波堤の水平流の流速の減少は、河川流の流速がある程度大きくなると現われるが、現地実験ではわずかな河川流速によっても流速の減少が著しいことがわかる。この両者の相違は、現地実験では室内実験と違って空気防波堤を放水路の全幅にわたって施設しなかったことに起因すると考えられる。すなわち、河川内の流れが空気防波堤の上昇気泡流にさえぎられて、気泡流のない横方向へそれて流れてしまい、空気防波堤を作用して得られる水平流と、水路内の流れの和が、空気防波堤を作用しないももとの流れの流速とそれほど変わらなくなったためと考えられる。

4. 波浪観測

(1) 観測方法

観測設備の配置および波浪観測点の位置はすでに図一2で示したとおりである。波浪観測点は気泡管をはさんで放水路の上下流方向に30m離れた2点で入射波と透過波を測定し、さらに江戸川競艇場の競走水面内に入射する波を代表するものとして、気泡管から放水路上流に150m離れた第2ターンマーク地点を加え、計3点とした。観測は下げ潮最強時、下げ潮半強時、潮止り時の3通りの潮の状態に対して実施し、それぞれの場合に3通りの空気量を放出して、そのときの水位変動を容量式波高計によって測定した。またその前後には空気を出さない場合の測定を行った。

波浪観測は昭和59年5月に実施した。波浪観測時には電磁流速計を観測用台船から水面下40cmの深さに吊り下げて河川流速を同時測定するとともに、自記風向・風速計により観測時の風の記録を取めて、波浪観測記録との対応がとれるようにした。

(2) 観測結果

観測された水位記録を波別解析法とスペクトル法の2方法で解析し、有義波高の比から求めた透過率とスペクトル密度から求めた透過率曲線とによって、空気防波堤の消波効果を評価する。

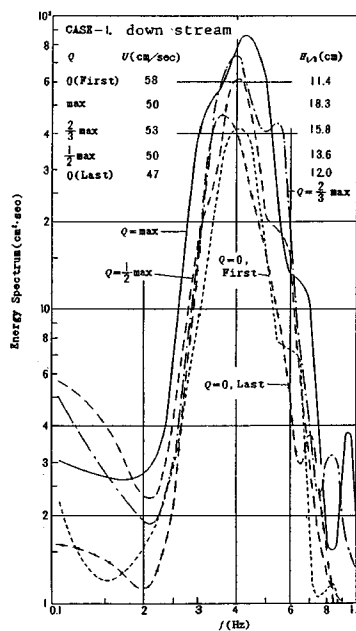
ここで透過率を算定するにあたって問題となるのは、入射波および透

過波としてどの地点の水位変動記録を用いるかであるが、これには次の2通りが考えられる。

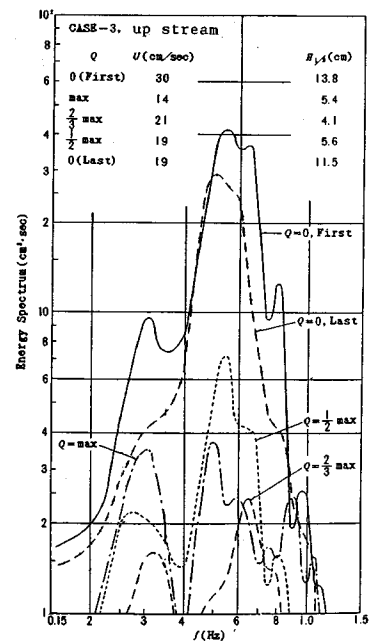
(I) 上流側の空気量0のときの水位変動を入射波とし、空気を放出したときの同じ上流側の水位記録を透過波とする方法。

(II) 空気を放出した場合の下流側の水位記録を入射波とし、同時刻における上流側のそれを透過波とする方法。

以下ではこれら2つの透過率評価法の優劣について検討を行う。図一11(a)は下流側において測定された波のスペクトルの一例を示したもので、図中(First),(Last)とあるのは、それぞれ空気を放出する一連の実験の最初と最後に観測した空気量0の場合の結果である。図からわかることは、空気量0の場合より、空気を放出したときのスペクトル密度が増加していることである。このことは基準となるべき入射波が空気防波堤の影響を受けて変化することを意味している。このような結果が生じた原因は、下流側の測定点が空気防波堤と接近しすぎたために、空気防波堤による水平流の影響を受けて波高が大きく測定されたためと思われる。波と流れの共存場では、波高は流れの流速の大小によって変化するが、その波高変化は順流より逆流の時に著しい。波の周期Tを2.0s、河川流速Uを50cm/sの一樣流として、試算したところ、空気防波堤の水平流のために河川流が10cm/s増加したとすれば、波高が1.2倍にも大きくなる。したがって、(II)の方法ではこの程度の誤差が含ま



図一11(a) 下流側の波のスペクトルの例



図一11(b) 上流側の波のスペクトルの例

まれてしまうことになる。図—11 (b) は上流側で得られたスペクトルを示したものであるが、ここでは上述の問題は生じていない。しかし空気防波堤の消波が期待できないような周波数  $f=0.2\text{ Hz}\sim 0.4\text{ Hz}$  までの領域においても、空気を放出したときのスペクトル密度が減少するという別の問題が生じている。現地で観測される波は、通常の外海に面した海岸でみられる波浪より、周期・波高ともかなり小さい風波であって、現地の風や河川流速に伴い波高は時々刻々変化する。(I)の方法によれば、こうした波浪の時間変動性による誤差を含むことになる。

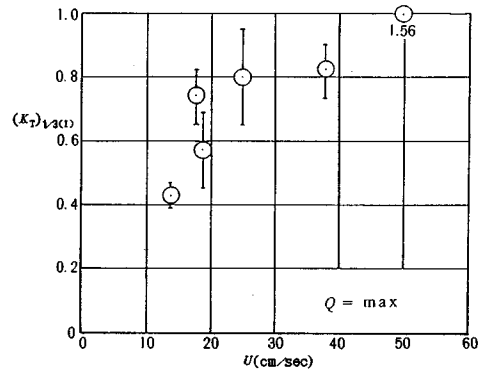
両者を検討した結果、(II)の方法は空気防波堤と接近しすぎたために、入射波に採用する波がその影響を強く受けて、誤差がより大きいことがわかった。以下では(I)の方法により得られた結果について示すことにする。

図—12は有義波高の比から算定した透過率と河川流速の関係を示したものである。図から河川流速が小さい場合には透過率は0.4~0.6程度の値をとるが、河川流速が大きくなると透過率が1を越える場合があることがわかる。すなわち消波効果が全くなくなるということになる。

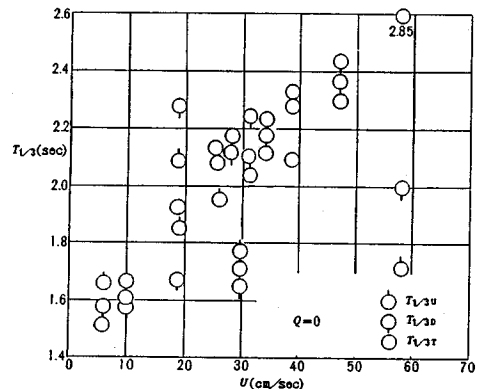
図—13は3つの波浪測定点(添字U, D, Tはそれぞれ上流側地点, 下流側地点, 第2ターンマーク地点を示す)で測定された有義波周期と河川流速との関係を示したものである。図から河川流速が大きくなると、観測期間中の風速5~8 m/sの逆方向の風によって発生する有義波周期は大きくなるのがわかるが、これは加藤・鶴谷<sup>(4)</sup>が示したように、逆流によって風波のエネルギー輸送速度が減少し、同一の吹送距離では風から波へエネルギーを輸送する時間が長くなるためと考えられる。また、図—14は下流側で測定された有義波周期と透過率の関係を示したもので、図—13と図—14より河川流速が大きくなると入射波の周期が大きくなり、そのために波が消えにくくなるという説明が可能である。

次にパワースペクトルの比の平方根から、各周波数ごとの透過率を計算した結果について考察する。透過率  $K_T$  は透過波と入射波のスペクトル  $S_T$  と  $S_I$  から、 $K_T = \sqrt{S_T/S_I}$  で計算される。図—15はその結果の一例を示したものである。ここでは  $K_T$  が1.2以上の結果はすべて  $K_T=1.2$  として図中に点描した。また、図中の矢印は、 $Q=0$ のときのスペクトルのピークを中心として、そのスペクトル密度の値の1/10がはいる範囲を示したもので、測定精度のうえから信頼できると思われる範囲である。この周波数領域における透過率の値から、従来の室内実験における透過率曲線の結果を参考にして、右下りの曲線を図中に描いた。

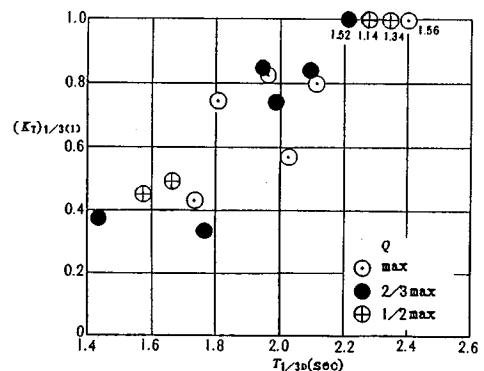
次に透過率曲線から、透過率が0.5および0.3に対応する周波数を読み取って、それぞれ  $f_{0.5}$  および  $f_{0.3}$  と名付け、消波限界周波数に対応する指標とした。図—16は  $f_{0.5}$  および  $f_{0.3}$  と河川流速との関係を示したものである。いくつかのケースでは透過率曲線を一部および全部にわたって明確に決定できない場合があり、その推定値は図中の点を( )でくくって示した。図—12に示した有義波高比から求めた透過率からは、河川流速が大き



図—12 有義波高から求めた透過率  $(K_T)_{1/3}$  と河川流速  $U$  の関係



図—13 有義波周期  $T_{1/3}$  と河川流速  $U$  の関係 ( $Q=0$ )



図—14 有義波高の透過率  $(K_T)_{1/3}$  と有義波周期  $T_{1/3}$  の関係

くると消波効果が減少するという結果を得たが、この場合には河川流速が大きくなっても、消波限界周波数を示す指標はほとんど変化しないことがわかる。

(3) 透過率の補正と空気防波堤の消波効果の評価

さて、図-15では典型的な透過率曲線が得られ、空気供給量の増加とともにこの曲線が左に移動することなど、これまでの知見とほぼ一致する結果となったが、一連の実験の最初 (First) と最後 (Last) で観測した空気量 0 の水位変動を入射波とした 2 つの結果の間にかんりのばらつきがみられ、また一部の結果には明確な透過率曲線が見出せないことや、空気防波堤の消波効果が期待できないような低周波側で透過率が 1 に等しくならないなど、特異な結果が少なくないことがわかった。すべての観測データを詳細に比較検討したところ、これらのデータには前述したように風や河川流速が時々刻々変化することによる波浪の時間変動性によって、かなりの誤差が含まれることが判明した。したがって、空気防波堤の消波特性についてのこれまでの知見をもとにデータを再検討し、誤差を含まない結果を抽出しようと考えた。

図-15 に例を示したように、スペクトル密度の比から求めた透過率曲線には、透過率が 1 を越える結果が多数得られているが、これは何らかの要因によるものとしか考えられない。また他方では、空気防波堤の消波効果が本来ないはずの低周波数の領域においても、透過率が 1 より小さくなる場合があり、これも発生する風波の時間変動性によるものと考えられる。そこで空気防波堤によって本来消波されない低周波数の領域では透過率は 1 となるはずであると考え、全周波数領域にわたって、

スペクトル密度に一定の比を乗じるという補正を行った。ここで空気防波堤の消波効果がなくなる限界の周波数、すなわち、前述の透過率が 1 となるべき周波数の選定は、透過率曲線のデータから逆 S 字となる空気防波堤の透過率曲線の特性を考慮し、かつスペクトル密度がピーク値の 1/10 以上であるような信頼できるピーク周波数

付近の周波数領域の中から見出すことにした。

このような簡単な補正により、すべての実験ケースに

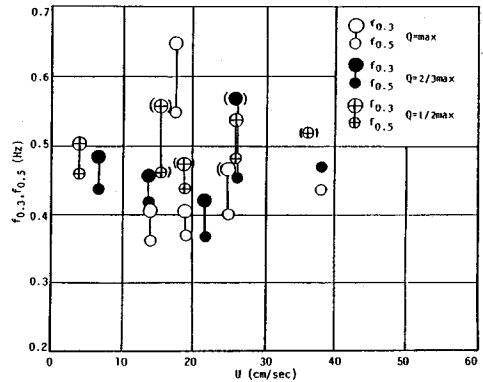


図-16 透過率曲線から求めた限界周波数と河川流速の関係

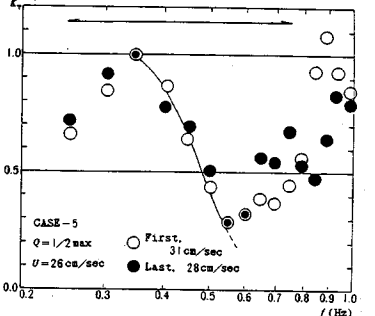
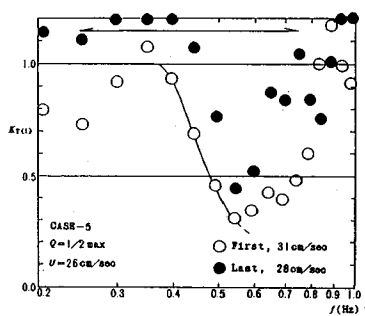
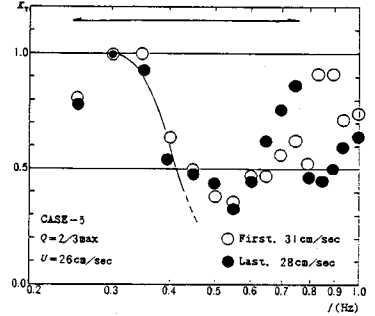
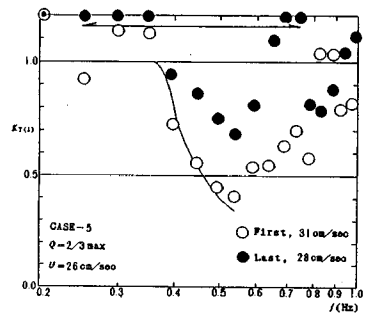
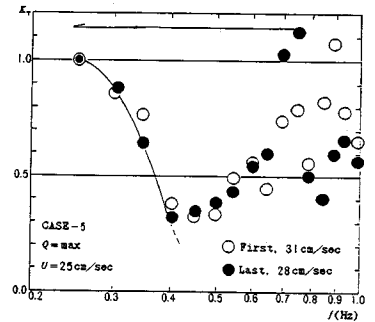
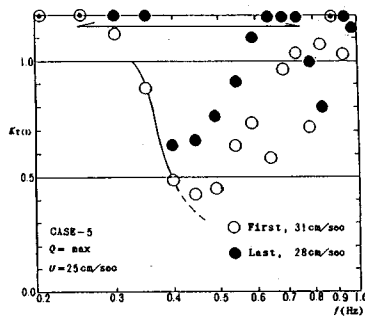


図-15 透過率曲線 (補正しない場合)

図-17 補正後の透過率曲線



対して典型的な空気防波堤の透過率曲線を得ることができた。補正を行った後の透過率曲線の一例を図-17に示す。この実験ケースは図-15に対応するものであるが、入射波として実験開始前あるいは終了後に測定した水位変動のいずれを用いても、ほぼ一致した透過率曲線が得られることがわかる。なお、図-17においてもわかるように周波数がある値より大きくなると、いったん減少した  $K_T$  の値が増大し始めるが、これは空気防波堤

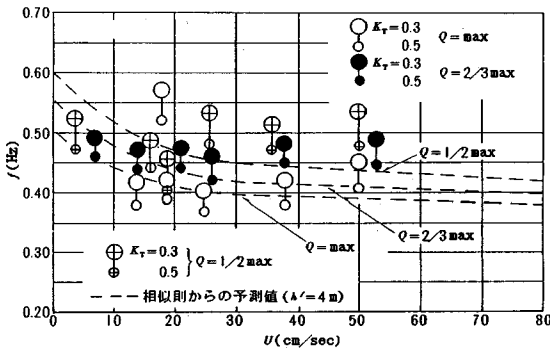


図-18 透過率曲線から求めた限界周波数と河川流速の関係 (補正した場合)

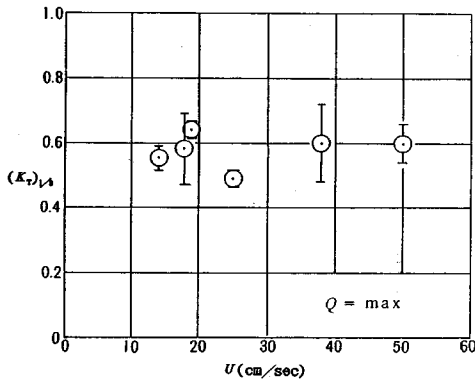


図-19 有義波高の透過率と河川流速の関係 (補正した場合)

自身が発生する攪乱波によるもので、室内実験においても現われる現象である。

次に、得られた透過率曲線から図-16と同様に、透過率  $K_T$  が 0.3 および 0.5 に対応する周波数  $f_{0.3}$ 、 $f_{0.5}$  を算出し、河川流速との関係を調べたものが図-18である。図中には流れがある場における水槽実験の結果から、相似則に基づいて予測した値を破線で示した。これらの図から河川流速が 20~30 cm/s 以下の比較的小さい場合には、観測結果は予測値とよく合っているが、流速が増大すると予測値のように減少しないで、かえって若干増加することがわかる。この理由は、3. で明らかにしたように、現地では河川幅全体にわたって空気防波堤を設置しなかったために、室内実験より表面水平流の流速性能が低下したことによると考えられる。

一方、有義波高の比から求めた透過率についても、上述の補正比を乗じて補正を行うと、図-12に示した結果は図-19となる。この場合には河川流速が増大しても消波効果がなくなることはなく、 $Q_{max}$  の場合には 0.6 前後の透過率が保証されることがわかる。これは、逆流の河川流速があると波が消えやすいという効果と、逆流上では発生する入射波の周期が長くなり、また空気防波堤の長さが限られていたために消波効果が減少するという効果が相殺したものと考えられる。

なお、写真-1は消波実験中の入射波と透過波を示したもので、空気防波堤の消波効果がよくわかる。

### 5. 結 論

本研究は江戸川競艇場における現地実験結果に基づいて、空気防波堤の感潮河川域への適用可能性について検討したもので、得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 沈設用鋼管とフロート用鋼管から構成される浮沈式の気泡管を考案した。この方式によれば、装置の沈設・浮上を短時間に行うことができ、空気防波堤の可動性という長所をさらに増大させたことになる。また、地

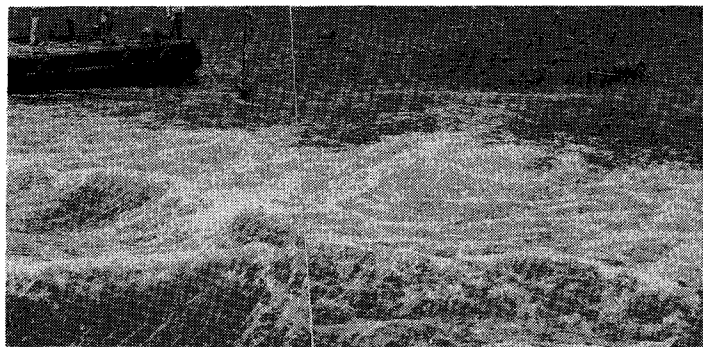


写真-1 空気防波堤の消波状況 (下流側から空気防波堤の上流側を望む)

盤支持力の小さい水底上にも設置することができるため、気泡管の水底設置法としてすぐれた方法といえる。コンプレッサー等の送気設備を小型化し、可動性のあるものにするのが今後の課題と考えられる。

(2) 流れによる空気防波堤の表面水平流の変化について考察したところ、室内実験では流れの流速がある程度以上にならないと水平流の流速性能の低下が現われないが、現地実験では、わずかな流れによっても流速性能の低下が著しいことがわかった。この相違は現地実験では室内実験と違って、空気防波堤を放水路の全幅にわたって設置しなかったため、河川流が気泡流のない横方向にそれてしまうためであることがわかった。

(3) 観測された生のデータを用いて有義波高の比から透過率を求めると、河川流速の増大とともに空気防波堤の消波性能が低下するという結果が得られた。一方、透過率曲線から求めた消波限界周波数によれば、流れによっては消波性能は変化しない結果となった。現地ではさまざまな誤差要因が存在し、またここで消波対象とする波が、有義波高で10~30 cm程度の小さい波で、しかも時間的変動の著しい風波であったために、生データのままでは明確な消波特性を見出すことは困難であった。そこで空気防波堤によっては消波され得ない低周波数の部分の透過率は1.0となるはずである、という前提で簡単な補正を行ったところ、観測結果はよく整理されることが明らかになった。その結果、有義波周期が2.4 s以下であれば、空気量が最大のときには河川流速に関係なく、0.5~0.6の透過率が確保できることがわかった。また、河川流の流速が増加すると消波限界周波数は若干減少するが、20~30 cm/sより大きくなると、室内実験による予測値のように減少しないことが見出された。このことは、流況観測の結果から明らかにされたように、現地では河川幅全体に空気防波堤を設置しなかったため、河川横断方向に流れが迂回し、流れによる消波性能の増大効果が現われなかったためと考えられる。

この観測調査を実施するにあたり、江戸川競艇場の関係者各位、特に関東興業株式会社専務取締役 織田清孝氏および取締役管理部長 熊野 彊氏にはいろいろと便宜をはかって頂き、多大のご配慮を賜わった。ここに深く謝意を表する次第である。

なお、この研究において、空気防波堤の設計・製作ならびに現地観測と一部の資料解析を近藤と山田が担当したことを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) Laurie, A.H. : Pneumatic breakwater, Dock and Harbour Authority, pp.11~13, May, 1952.
- 2) Laurie, A.H. : Pneumatic breakwater at Dover, Protection for Train Ferry Dock, Dock and Harbour Authority, pp.249, Dec., 1952.
- 3) 栗原道徳：空気防波堤について(Ⅱ)、一伊王島における現地実験一、第2回海岸工学講演会講演集, pp.71~77, 1955.
- 4) 栗原道徳：空気防波堤の研究に就いて、Ⅲ、端島における現地実験、九州大学応用力学研究所報, 第9号, pp.25~33, 1956.
- 5) Kurihara, M. : Pneumatic breakwater experiments in Japan, Summary of conclusions from further full scale test, Dock and Harbour Authority, Aug., pp.137~140, 1957.
- 6) 栗原道徳：空気防波堤の研究に就いてⅣ、日本鋼管鶴見造船所における現地実験2、九州大学応用力学研究所報, 第15号, pp.23~38, 1960.
- 7) 松本輝寿・會我部隆久・奥村研一・木村慎一郎：空気防波堤の現地実験について、第25回海岸工学講演会論文集, pp.407~411, 1980.
- 8) 岩垣雄一・酒井哲郎・辻 義則：現地実験による空気防波堤の透過率の周波数特性、第27回海岸工学講演会論文集, pp.397~400, 1980.
- 9) 岩垣雄一・浅野敏之：流れが空気防波堤の消波性能に及ぼす影響、一空気防波堤に関する研究(第6報)一、第29回海岸工学講演会論文集, pp.413~417, 1982.
- 10) 岩垣雄一・浅野敏之：空気防波堤の相似則と必要空気流量、土木学会論文報告集, 第337号, pp.101~110, 1983.
- 11) Bulson, P.S. : Current produced by an air curtain in deep water, Dock and Harbour Authority, pp.15~21, May, 1961.
- 12) Kobus, H.E. : Analysis of the flow induced by air-bubble systems, Proc. 11 th Conf. on Coastal Engg., pp.1016~1031, 1968.
- 13) 岩垣雄一：波とその変形, 水工水理学, 丸善, pp.467~515, 1972.
- 14) 加藤 始・鶴谷広一：流れの中の風波に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.270, pp.73~83, 1978.

(1986. 8. 30・受付)