

流れが空気防波堤の消波効果に及ぼす影響

——空気防波堤に関する研究（第6報）——

岩 垣 雄 一*・浅 野 敏 之**

1. 緒 言

空気防波堤は、周期の長い波に対して消波性能に限界があるところから、通常の防波堤の代用として何時でも使用できるものではないが、特殊な条件下では非常に効果を発揮する場合が考えられる。その一例として、河口感潮部に発生する風波の消波を挙げることができる。この場合には流れを妨げず、また船舶航行の障害とならないことが要求されるために、そこでの消波が可能であれば空気防波堤の効用が最も有効に発揮されるところであるといえる。

しかしながら、空気防波堤の消波機構から考えて、現地の流れ（潮流）により消波性能が大きく変化することが十分予想される。これについては著者らが規則波を用いて実験を行った結果¹⁾、逆流が存在すると空気防波堤の表面水平流に流れが加わって、消波効果が増大するのに対し、順流の場合には消波性能が著しく低下することがわかった。

著者らの一連の研究は、空気防波堤の消波機構の解明や消波性能の向上とともに、その実用化に向かって現在も継続中であるが、たまたま東京都の江戸川競艇場の関係者から、競走水面に発生する風波の消波に空気防波堤を適用することの可能性について問い合わせがあった。流れの上に流れと逆方向の風が吹くと高波が発生することはよく知られているが²⁾、この競艇場では河口の放水路を利用しているために、下げ潮時に強い南風が吹くと波高数 10 cm の風波が発生し、危険のため競走を中止せざるを得ないことが少なくなかった。その対策として空気防波堤の設置が最適であろうとの結論が得られたが、その実用化にあたっては、なおいくつかの解決すべき問題が残されていた。その 1 つが流れによる消波性能の変化を定量的に調べることであった。

そこで本研究では、空気防波堤の消波性能に及ぼす流れの効果を明らかにするため、まず実験水槽内に流れを起し、その中で不規則波を用いて消波実験を行う。そして具体的に競艇場への適用を考えて、流れがある場合

とない場合について、空気防波堤の設計に必要な代表透過率曲線を定め、消波限界周波数を定義して、空気流量と流れの流速および消波限界周波数の 3 者の関係を明らかにする。

2. 江戸川競艇場における風波特性

水槽実験における波高・周期・流れの流速等の実験条件は、現地の江戸川競艇場における諸量から、フルードの相似則により換算したものをを用いる。フルードの相似則の適用性については別の機会に発表する予定である。したがって、まず最初に現地の風波を観測し、その特性を明らかにする必要がある。

江戸川競艇場は荒川の支流である中川放水路の河口から 3.6 km 上流地点にその水域を有している。そこでの流況は東京湾の潮汐と上流からの河川流出に支配され、平常時には下げ潮時に最大で約 1.2 m/sec、上げ潮時に最大約 1.1 m/sec の流速が記録されている。風向が S~SSW および N~NNE の時には放水路の方向と一致し、かつ風向が流れの方向と逆向きの際に大きな風波が発生する。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が、特に前者の方が高波の発生が著しい。

江戸川競艇場水域に発生する風波については、16 mm 撮影機を用いて現地観測が行われ、その記録を用いた解析から表-1 に示す結果を得た。表中には有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ をはじめとする波の諸量の他に、それぞれの観測時間に対応した平均流速、流向、平均風速、風向を合わせて示した。

3. 消 波 実 験

(1) 実験条件の選定

上述した現地での波浪および流れの観測結果をもとに、実験室での波浪および流れの諸量を次のように決定した。現地水深を 6 m とし、実験室での水深を 45 cm とすると長さの縮尺は 13.3 : 1 となる。これをもとにフルード則を適用する。

現地の流れは表-1 からわかるように、最大流速が 0.9 m/sec 程度で、実験室に換算すると 24.7 cm/sec とな

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科

表-1 江戸川競艇場水域における風波の波高・周期、流速・流向および風速・風向の観測結果

Case 番号	観測日	観測開始時刻	H_{max} (cm)	$\bar{H}$ (cm)	$\sqrt{\bar{H}^2}$ (cm)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (sec)	流速・流向 (m/sec)	風速・風向 (m/sec)
Case 1	S54.12.25	13:15	13.67	5.82	3.01	9.15	0.82	0.8 下	8~12 S
Case 2	S55. 1. 5	15:50	36.73	12.47	8.73	22.81	2.24	0.2 下	8~12 NW
Case 3	S55. 4.20	11:30	48.32	16.83	11.15	29.75	2.34	0.9 下	10~12 SW
Case 4	S55. 4.20	12:00	46.89	18.53	10.96	30.85	2.17	0.9 下	10~12 SW
Case 5	S55. 5. 3	13:05	42.21	10.17	6.65	17.78	1.67	0.5 下	6~10 S
Case 6	S55. 5.15	10:40	20.87	8.05	4.89	13.58	2.08	0.6 下	6~ 8 S
Case 7	S55. 5.23	14:15	33.07	12.07	7.81	21.46	1.80	0.3 下	8~12 S

り、これは本研究で用いた循環流発生装置で発生可能な流速である。またこの装置は、順流および逆流の2つの流向を発生させることができる。本実験では流れは24 cm/sec程度と、その半分の12 cm/sec程度の流速を持つものを選定し、それぞれ順流と逆流に流向を変えたとともに、流れなしの場合を加えて全5ケースとした。

一方、現地で観測された風波のスペクトルのピーク周期 T_p は最大で2.56 secで、これを実験室に換算すると0.7 sec ($f_p \approx 1.4$ Hz) となる。このような高周波数の波を安定して造波させることは多少困難であり、また入力信号と造波板の応答特性や、流れによっても変化する造波特性のために、必ずしも設定したとおりの成分を持つ不規則波は発生しない。そこで実験波として厳密に相似則を満足させることはしないで、ピーク周波数 $f_p = 1.3$ Hzの比較的高周波数成分の卓越するCASE-Iの波と、 $f_p = 0.9$ Hzの低周波数成分の卓越するCASE-IIの波の2つを採用することにした。

波高については、相似則をそのまま適用すると実験水槽内で発生させる波高がきわめて小さくなり、精度の上から消波特性を調べるのが困難となる。また、空気防波堤の消波機構は水平流によるエネルギー伝播の阻止作用が主要なものであることを考えると、波の消波には周期の効果が大きく波高はそれほど関係しないことになる。したがって波高については相似則を無視し、実験の容易なある程度大きい波高を用いることにする。

空気供給量については、水槽実験においてある空気流量を与えた時の消波効果から逆算して、現地での値を求めるべきものである。この空気流量の相似則は、発生する表面水平流を相似にすることを意味し、上昇流と潮流とを相似にすることによって、同時に潮流により上昇水流が傾く効果をも相似にする必要がある。実験水槽内における空気供給量 Q として、80, 130, 180, 230, 330 l/minの5ケースを採用した。

(2) 実験装置および実験方法

実験は長さ27 m、幅50 cmの不規則波造波水槽を用いて行い、水深は45 cmで一定である。気泡発生筒は造波機から9.5 mの地点に設置し、水位変動は容量式波高

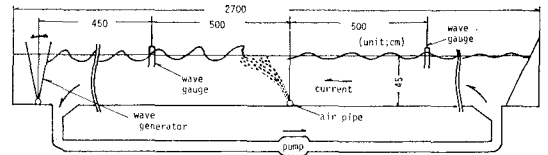


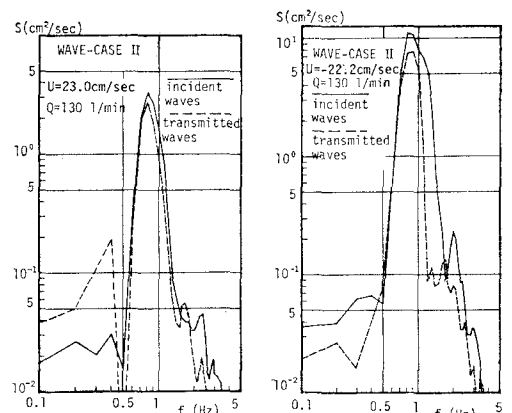
図-1 実験水槽

計により造波機から4.5 mと14.5 m離れた気泡発生筒を挟む位置で測定した。これをデータレコーダーに収録し、サンプリング周波数100 Hzでデジタル化を行った。1分間のデータをBlackman-Tukey法およびF.F.T.法でスペクトル解析した。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、次のように各周波数のエネルギー密度の平方根の比として算出した。

$$K_T = \sqrt{S_T/S_I} \dots\dots\dots (1)$$

(3) 実験結果

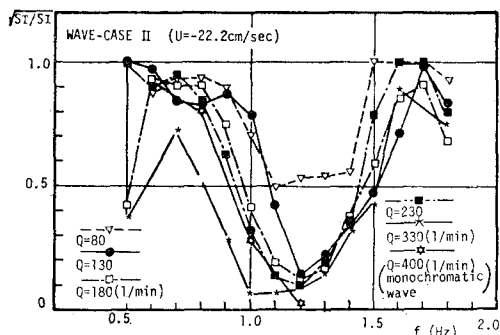
図-2 は (a) 順流および (b) 逆流の場合について、入射波と透過波のスペクトルの変化を示したものである。このように逆流においてはかなりの消波効果が見られるが、順流ではほとんど認められない。これを定量的に評価するために、3.(2)で示した方法で得られた透過率の結果を示す。図-3 は逆流の場合に、空気供給量 Q をパラメーターとして透過率変化を調べたもので、 Q が



(a) 順流の場合

(b) 逆流の場合

図-2 入射波と透過波のスペクトル

図-3 空気供給量 Q をパラメーターとした時の透過率特性

大きくなるにつれて、また周波数 f が高くなるにつれて透過率は減少する。 f が 1.2 Hz 付近より大きくなると逆に透過率が增大しているのは、気泡の上昇流そのものによる二次波の発生や、 S_T , S_I がともに小さくなって誤差が入るためであって、この部分は後の図-8以降では省略して示してある。次に図-4は流れの流速 U をパラメーターとして透過率変化を調べたもので、逆流の場合には透過率が全体的に小さくなり消波性能が良くなるのに対し、順流の場合には1に近く、ほとんど消波効果がないことがわかる。図-4の結果での1つの問題点は、逆流で流速が大きくなっても透過率は必ずしも小さくなっていないことである。これをさ

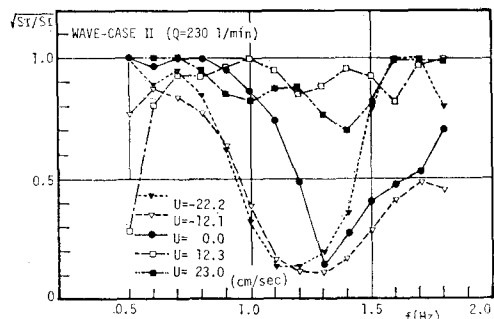
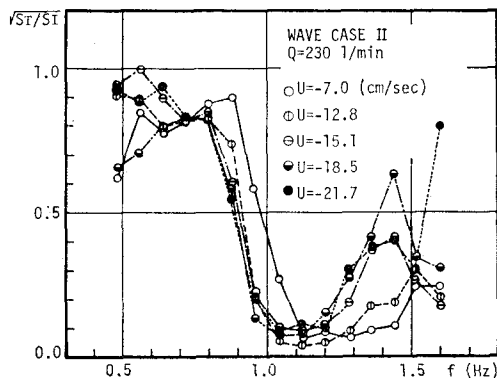
図-4 流れの流速 U をパラメーターとした時の透過率特性

図-5 逆流の流速が変化した時の透過率特性

らに検討するため、CASE-IIの波に対して逆流の流速を5通りに変えて、透過率曲線の変化を調べたものが図-5である。この図からも逆流の流速が増加しても透過率はそれほど減少しないことがわかる。この理由として、逆流の流速が大きくなると、気泡噴流の中心軸は入射波の方向と逆方向により大きく傾くが、消波に有効な表面水平流の流速やその厚さは、必ずしも大きくならないことも考えられ、今後の検討課題といえる。

次に入射波と透過波の有義波高の比から透過率を算出した結果を図-6に示す。空気供給量が增大するほど、また流れが順流から流れなしを経て逆流となるほど透過

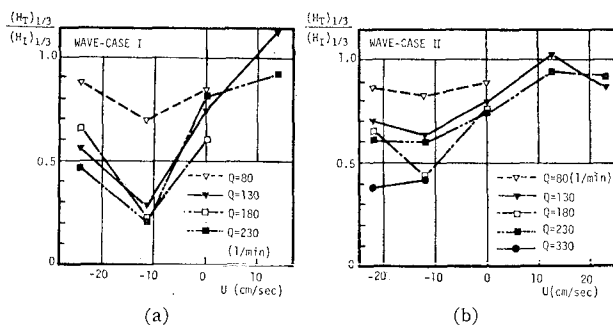


図-6 有義波から算出した透過率

率が減少するという図-3、図-4で示した結果が、図-6からも同様に読み取れる。図-7は逆流の流速による透過率の変化をさらに細く調べたもので、図-5と同様に流速の増加による透過率の低下は明確には見られないことがわかる。

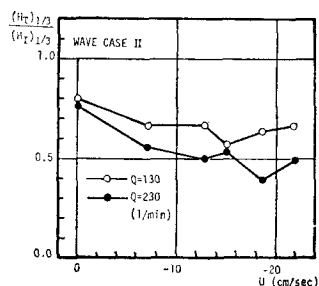


図-7 逆流の流速と透過率の関係

4. 代表透過率曲線の決定

規則波に対する場合と不規則波の場合とで、空気防波堤の消波性能は同じであるかどうか、また不規則波でスペクトル形状が異なる場合にはどうなるかを調べるため、これまでの規則波および不規則波を用いたすべての実験ケースの透過率曲線の結果を整理した。その結果が図-8～図-10で、図-8は流れのない場合、図-9は逆流の流速が 11.4～12.8 cm/sec の場合、図-10は逆流の流速が 21.7～24.3 cm/sec の場合である。図-8から不規則波に対する透過率曲線は、そのスペクトル形状を問わず規則波に対する透過率曲線とかなり良く一致することがわかる。この事実は不規則波であっても、各周波数に対応する成分波が、規則波と同じ透過率曲線にしたがっ

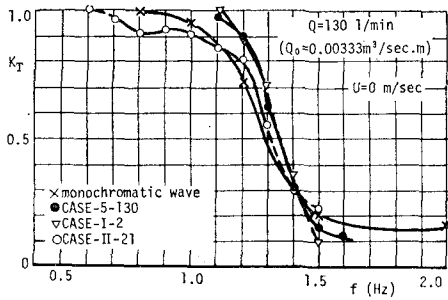
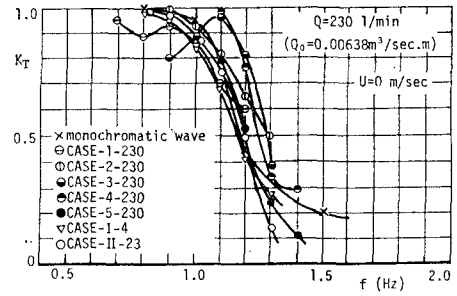
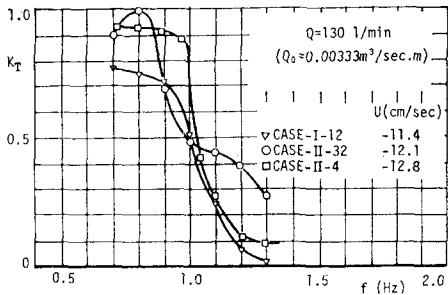
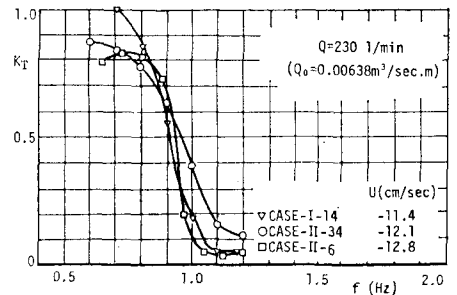
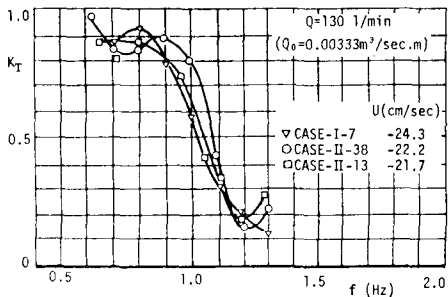
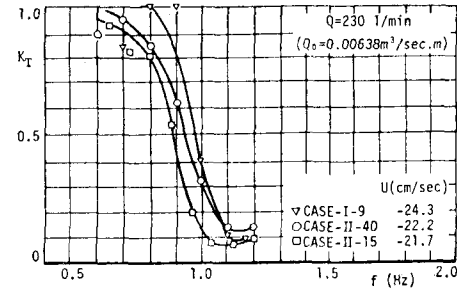
(a) $Q=130$ l/min(b) $Q=230$ l/min

図-8 流れがない場合の透過率曲線

(a) $Q=130$ l/min(b) $Q=230$ l/min図-9 $U=-11.4 \sim -12.8$ cm/sec の場合の透過率曲線(a) $Q=130$ l/min(b) $Q=230$ l/min図-10 $U=-21.7 \sim -24.3$ cm/sec の場合の透過率曲線

て波高減衰することを示すもので、線形的な性質を持っていることを意味する。また、図-9、図-10 から流れ(逆流)がある場合でも、流れがない場合と同様、不規則波のスペクトル形に関係なく、空気流量と流速が同じで

あれば、ほぼ同じ透過率曲線が得られることがわかる。

こうした事実にもとづき、実験値の平均的傾向を基礎として、同一空気流量、同一流速に対して代表する一本の透過率曲線を決定した。図-11はこのようにして求め

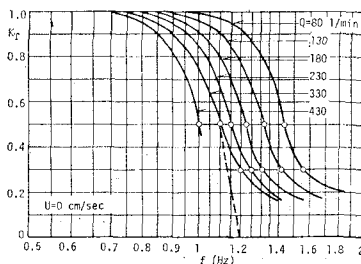
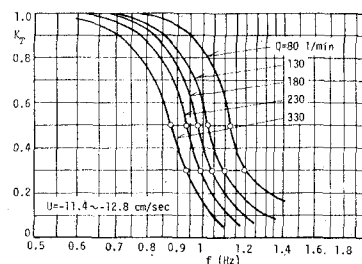
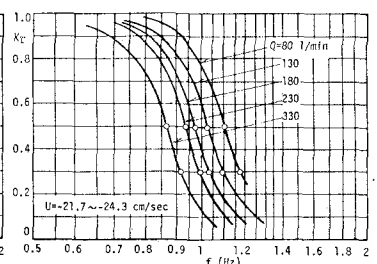
(a) $U=0$ cm/sec(b) $U=-11.4 \sim -12.8$ cm/sec(c) $U=-21.7 \sim -24.3$ cm/sec

図-11 代表透過率曲線

たもので、横軸の波の周波数 f は対数目盛で表示されている。図から各曲線は同じ形状となり、横軸をスライドさせることによって、すべての曲線が 1 本の曲線で表わされることがわかる。

いま、これらの代表透過率曲線から、消波限界を示すと考えられる波の周波数 f_0 を次のように定義することにする。図—8～図—10 に見られるように波の周波数 f が大きくなっても透過率 K_T は 0 にならないで、一定の値を保つ場合によっては増大する傾向を示す。ある限界の周波数より大きい周波数をもつ波は空気防波堤により消波されて存在しないはずであるにもかかわらず、 K_T が 0 にならない理由は、前述したように空気防波堤自身によって発生する二次波が伝播するためである。したがって K_T がある小さな値であっても、入射波は実質的には完全消波されていると考えることができる。透過率 K_T が 0.3 および 0.5 というのは、エネルギー的にはそれぞれ透過波が入射波の 9% および 25% になることを意味しているが、いま 図—11 に示すように消波限界周波数 f_0 として、 $K_T=0.3$ あるいは 0.5 に対応する周波数を採用することにする。図—11 (a) の破線に示されるように、透過率曲線の傾向をそのまま $K_T=0$ まで延長すると、そのときの周波数は $K_T=0.3$ に相当する周波数であることがわかる。

なお、 $U=0$ の場合には第 1 報³⁾ に示したように、Kobus や Bulson らの空気供給量 Q を与えて表面水平流の最大流速 $u_{\max}$ を求める実験式と、 $u_{\max}$ から消波限界周波数 f_0 を求める Taylor⁴⁾ の理論を用いると、 Q と f_0 の関係が求められ、ここで定義した $K_T=0.3$ あるいは $K_T=0.5$ に対応する周波数を f_0 と考えてよいかどうかを検討できるが、これについては別の機会にその結果を明らかにしたい。

また次の段階は、現地スケールでの供給空気量と消波限界周波数との関係を求めることであるが、これは空気泡によるエアバブルカーテン流の形成と、形成されたエアバブルカーテン流による消波作用の両者に、流れを考慮して相似則を検討する必要がある。これについても別の機会に発表したい。

5. 結 言

(1) 空気防波堤の消波性能に及ぼす流れの効果を明らかにするため水槽実験を行った。その結果、流れの効果は予想以上に大きく、順流の場合には消波性能が著しく低下するが、逆流の場合には気泡噴流が消波に有効な方向に傾くので、消波性能が顕著に向上することがわかった。

(2) 砕波直前の波形勾配の大きい風波が発生するのは、逆流上を風が吹く場合であるので、上記の性質は河口の感潮域での風波を対象として空気防波堤を適用する上に有利なものと考えられる。

(3) スペクトル形状の異なる不規則波および規則波の透過率曲線を整理したところ、空気流量と流れの流速が同一であれば、透過率曲線は同じと見なしてよく、横軸を対数で表わせば、それらの曲線はほぼ同じ形状となることがわかった。

(4) これを利用して流れの流速ごとに空気流量をパラメーターとして代表透過率曲線を決定することができた。そしてこの曲線から $K_T=0.3$ あるいは 0.5 に対応する周波数を消波限界周波数と定義した。

最後に本研究を実施するにあたり、いろいろと便宜をはかって頂いた江戸川競艇場の関係者各位に厚く感謝の意を表する。さらに本研究の遂行にあたり、御助言を頂き、また実験解析を手伝って頂いた京都大学工学部酒井哲郎助教授、名古屋工業大学工学部喜岡渉助手および京都大学工学部土木工学教室海岸工学研究室の学生諸君に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 浅野敏之・岩垣雄一・原 克彦：流れによる空気防波堤の消波性能の変化について，第 34 回年次講演会概要集，pp. 627～628，1979.
- 2) 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.
- 3) 岩垣雄一・安井誠人：空気防波堤に関する研究（第 1 報）——空気防波堤の基本的性質——，第 22 回海岸工学講演会論文集，pp. 563～569，1975.
- 4) Taylor, S. G.: The action of a surface current used as a breakwater, Proc. Roy. Soc., A231, pp. 466～478, 1955.