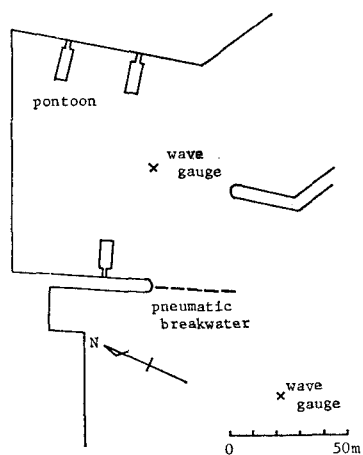


現地実験による空気防波堤の透過率の周波数特性

岩 垣 雄 一*・酒 井 哲 郎**・辻 義 則***

1. ま え が き

すでに報告されているように¹⁾、最近、大阪港中央突堤基部南海岸通船溜り(図—1)において、空気防波堤の



図—1 大阪港中央突堤基部南海岸通船溜り

現地実験が行われた。この船溜りは、大阪港の大開門に対してはほぼ WSW 方向に開いている。空気防波堤は、このことを考慮して WSW 方向に直交するように設置された。したがって、図—1 に示すように、船溜りの開口部は空気防波堤によって完全に塞がれるのではなく、開口部が、存在することになる。

実験は昭和 53 年 1 月 20, 21, 28 日および 2 月 1 日の 4 日間行われた。4 日とも空気防波堤の長さを 25 m, 30 m および 35 m の 3 種類に変え、また、空気の送風パルプを全開および半開として空気量を変えた。波高は図—1 の船溜り内外の 2 点で超音波式波高計を用いて測定されている。

すでに述べたように、開口部の全体にわたっては空気防波堤が設置されていないため、入射波の一部は直接船溜り内に進入する。したがって、空気防波堤の透過率を算定するには、この波の存在を考慮する必要がある。す

で、有義波としての扱いでは、開口部の一部から直接進入する波の存在を考慮して、空気防波堤の透過率が検討されている²⁾。しかしながら、空気防波堤の消波効果が高周波数の波に顕著な周波数特性を有していることを考えると、波の各周波数成分ごとに、直接進入波の存在を考慮して、より詳細な検討がなされるべきであると考えられる。

2. 計算方法とその検討

港内の波高分布を求める方法としては、現在いくつかの方法があるが、不規則波の場合に簡単に計算できるのは、折り返し回折図法³⁾である。樫木・広畑⁴⁾は、実際の港内での実測の波高分布(岸壁沿い)について、折り返し回折図法によるものを、境界値問題として解く SOGREAH の方法⁵⁾で計算された結果と比較し、岸壁沿いでは、入射波と反射波の位相間にかんがりの相関があるため、各成分波の位相関係がランダムであるという仮定に基づく折り返し回折図法ではあまりよい結果を与えないと述べているが、ここでは図—1 からわかるように港内の中心部の波高を対象とするので、有義波に関する検討⁶⁾の場合と同様、折り返し回折図法を用いることにする。

その基本的な考え方は、つぎの通りである。すなわち、開口部の空気防波堤が設置されていない部分から進入する波のみによる港内波高計位置での回折係数 K_{a1} と、空気防波堤設置部分から、空気防波堤が存在しないとして進入する波による回折係数 K_{a2} とが、空気防波堤の透過率を K_t として、実測の港内外の波高計位置での波高比 K_a との間に、

$$K_a^2 = K_{a1}^2 + (K_t \cdot K_{a2})^2 \dots\dots\dots (1)$$

の関係を有するものとする。しかも、この関係はスペクトルを構成する各周波数成分ごとに成立するものとする。ここで、 K_{a1} , K_{a2} は各周波数ごとに、折り返し回折図法によって求める。 K_a は、2 台の波高計で得られた各位置での波のパワースペクトル密度のその周波数における比の平方根とする。

折り返し回折図法を用いるに際しては、まず入射波の方向スペクトルを与える必要がある。(この場合、各周波数ごとに解析を行うので、周波数スペクトルを与える

* 正 会 員 工 博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 正 会 員 工 博 京都大学助教授 工学部土木工学科

*** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科

必要はない). ここでは有義波に関する解析を行なった文献²⁾と同様, 光易型方向スペクトルを用いる⁶⁾. 必要なパラメータの有義波周期 $T_{1/8}$ は実測値を用い, 方向集中度パラメータは $S_{\max}=10$ とした. 光易型分布では, 波向 θ の範囲が $-\pi \leq \theta \leq \pi$ であるが, ここでは $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ と仮定し, この間を5等分して, 各周波数ごとに, 各波向の重みの値を, その合計が1.0となるように求めた.

主波向は実測されていないので, ここでは2種類の方法で決定した. 1つの方法は, 実測されている風向きに一致させる方法である. しかしながら, 図-1で示される実験場所は, 船溜りの外の北側岸壁がさらにWSW方向に続いており, 地形的に風向きにかかわらず主波向がWSWである可能性が大きいので, 第2の方法としては, 風向きにかかわらずすべてWSWとした. 船溜り内の反射率については, 0.7と0.9の2種類の値を採用した. 反射回数については, 1回から3回までを採用して比較した. 水深は平均水深として7mとした. 開口防波堤の回折図としては, 森平・奥山⁷⁾のものをを用いた. この回折図を用いるためには, 現実の防波堤形式を仮想的な開口防波堤に変える必要がある. 図-2はそれを示したもので, (1)は K_{d1} に対するもの, (2)は K_{d2} に対するものである. ここでは同時に有効開口幅 B' も決定される. 開口防波堤の回折図を用いる際に必要となる波長 L

は, 各成分波の周波数 f を用いて, 微小振幅波の関係から求めた. なお, 式(1)で $K_d < K_{d1}^2$ の場合はすべて $K_t=0$ とし, $K_t > 1.0$ の場合はすべて1.0とした.

1月28日は, 風向きが船溜りへの進入方向と逆となるので解析の対象から除外し, 残り3日間の3種類の防波堤長について, パルプ全開の場合のみ解析した(合計9ケース).

図-3は, 1月21日の防波堤長30mの場合について, 反射率と反射回数の影響を検討したものである. ただし風向きはWSWであり, 主波向もWSWとした. 図からわかるように反射率が0.7の場合, 反射回数が2回と3回では計算される K_t の値にほとんど相違がなく, 反射回数は3回でよいと考えられるので, 以後は3回とした. 一方, 反射率は, 同じ反射回数3回でも0.7と0.9でかなりの相違があるが, 図-1に示すように浮き桟橋もあるような岸壁なので, 0.7の方が適当と考え, 以後は0.7とした.

図-4は, 空気防波堤を用いない場合についても, 港内外のパワースペクトルが求められているので, 船溜りの既設防波堤の開口部全体を仮想開口部とし, それに対して折り返し回折図法を用いて求められた港内の波高計位置における回折係数 K_d と, 実測のパワースペクトル密度の比の平方根 $\sqrt{S_1/S_0}$ を比較したものである. (S_1 : 港内でのパワースペクトル密度, S_0 : 港外でのパワース

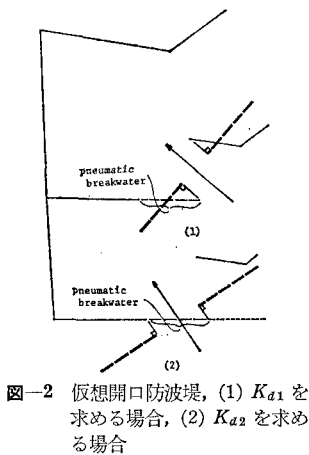


図-2 仮想開口防波堤, (1) K_{d1} を求める場合, (2) K_{d2} を求める場合

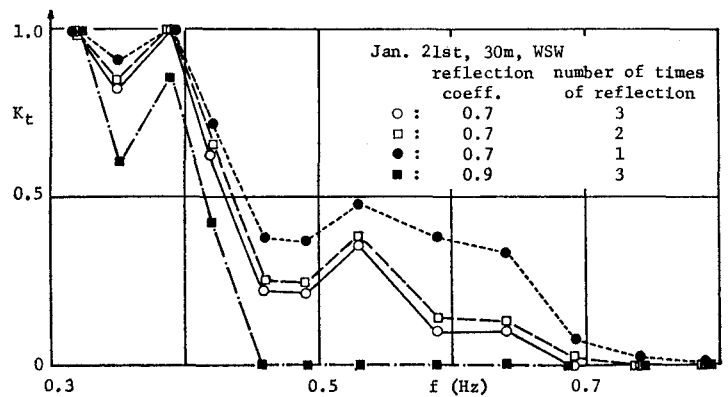


図-3 折り返し回折図法における反射率と反射回数の影響

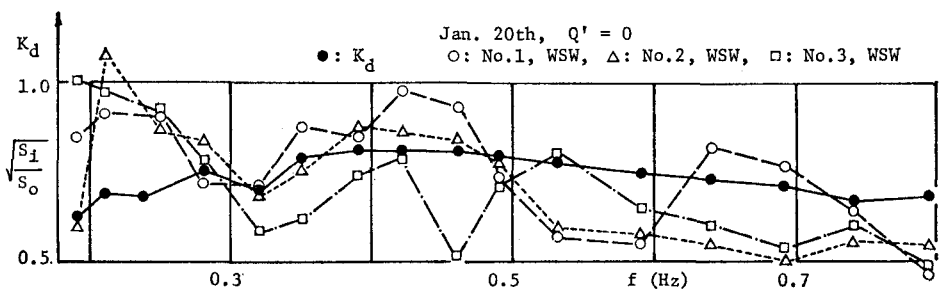


図-4 折り返し回折図法の精度 (空気量=0)

ペクトル密度). 比較した実測値は, 1月20日の空気防波堤の空気量 $Q=0$ の3ケースである. また, 風向きはすべて WSW であったので, 主波向も WSW とした. 図から明らかなように, 折り返し回折図法で計算された回折係数の値には, 少なくとも 20% 程度の誤差が含まれるものと考えなければならない.

3. 結 果

図-5 は, 主波向をすべて WSW とした場合の計算結果である. 防波堤長 35 m で風向きが WNW の場合に

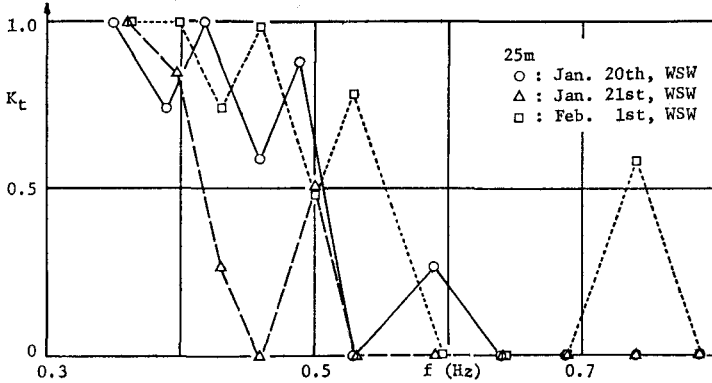
は, 計算したすべての周波数帯にわたって $K_t \approx 1.0$ で, 消波効果が全くない. また 30 m の WNW の2ケース (1月21日と2月1日) は, 他のケースに比べて全体にやや K_t の値が大きい. 以上の点を除けば, 他のケースは, 2. で述べた計算誤差を考えると, ほぼ同一の傾向を示している.

一方, 主波向を風向きに一致させた計算結果では (ここには示していない), 風向きが WNW の3ケース (30 m の1月21日と2月1日, 35 m の2月1日) のいずれも全周波数帯にわたって $K_t \approx 1.0$ となる. これら3ケースの実測のパワースペクトル密度を検討したところ, 2月1日の35 m の場合のみ, 他と異なって, 全周波数帯にわたって港内のパワースペクトル密度が港外のそれより大きくなっており, 実測値そのものに問題がある. このことと, 2月1日の35 m のケースを除いて, 残りの1月21日と2月1日の30 m の場合, 他のケースよりもやや K_t が大きいものの, 消波効果がそれほど悪くないことを考え, 以後は第2の方法 (主波向をすべて WSW とした) による計算結果 (図-5 に示したもの) について検討することにする.

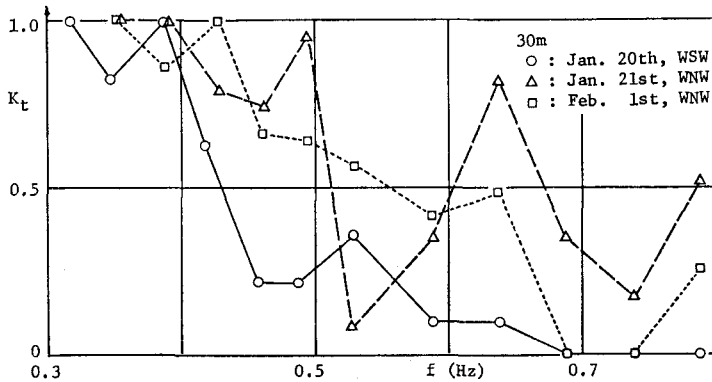
4. 考 察

図-5 において, 防波堤長 35 m の2月1日のケースを除くと, 他の8ケースは, 30 m で風向きが WNW の2ケースがやや K_t が大きいものの, $K_t \sim f$ 関係はほぼ同一, すなわち, 0.35 Hz 付近から K_t は減少しはじめ, 約 0.7 Hz 以上では 0 となる. その形状は従来の実験結果の逆 S 字型と類似している.

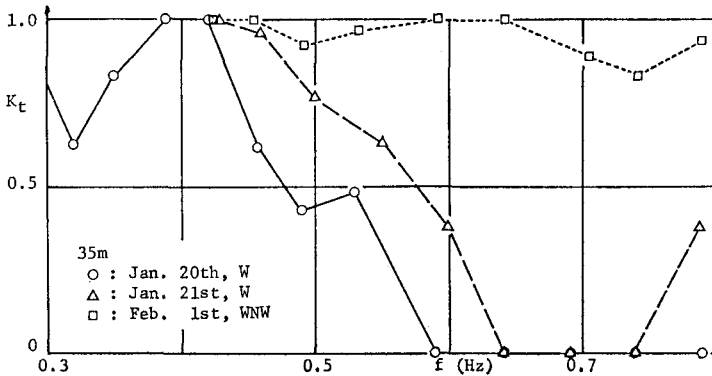
以上の現地実験結果を, これまでの実験水槽での結果と比較することにする. スケールの異なる実験結果を比較する場合, 共通のパラメータとして無次元量を採用する必要がある. 水深 h と重力加速度 g を導入すると, 図-5 の横軸の f を無次元量 $f/\sqrt{g/h}$ に変換できる. 一方, 空気防波堤の単位長さ当りの空気量 Q' は, 無次元量 $Q'/\sqrt{gh^3}$ に変換できる. しかしながら, 空気防波堤の消波機構を考え, 空気防波堤によって生じる水平流を遡上する



(1) 防波堤長 25 m



(2) 防波堤長 30 m



(3) 防波堤長 35 m

図-5 空気防波堤の透過率 (主波向 WSW)

波の碎波がその主要な要因と考えると、上述の2つの無次元量 $f/\sqrt{g/h}$ と $Q'/\sqrt{gh^3}$ は、むしろ一つに統一されるべきである。すなわち、一樣な流れを遡上する波の変形の理論⁸⁾では、波速と流速の比が主要なパラメータである。波速は f と h に関係し、一方、水平流速は Q' と h に関係している。

微小振幅波の波速 c は、 f と h を用いて次式で与えられる。

$$c = \frac{g}{2\pi f} \tanh \frac{2\pi f \cdot h}{c} \quad \dots\dots(2)$$

一方、空気防波堤の水平流速は、いくつかの関係が提案されているが、最も実験および現地観測結果をよく説明するものとして、Kobus⁹⁾ は次式を与えている。

$$\frac{U_{\max}}{\sqrt[3]{gQ'}} = 1.75 \left\{ \frac{h_0}{(h+z_0)} \ln \left(1 + \frac{h}{h_0} \right) \right\}^{1/2} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 $U_{\max}$: 水平流の最大流速、 h_0 : 大気圧に相当する水柱の高さ(=10.1 m)、 $z_0=0.8$ m である。式(2)と(3)から、 $c/U_{\max}$ を g , h , f , Q' の単純な組み合わせで表現することは困難である。そこでここでは、両式を用いて、 c と $U_{\max}$ (以後は U とする) を計算し、その比を求めて横軸にとり、 $K_t \sim c/U$ の関係を調べることにした。

比較の対象とした実験結果は、岩垣・安井¹⁰⁾の $h=45$ cm の空気量 $Q=80$ l/min ($Q'=1.71$ l/s·m) と 330 l/min (10.9 l/s·m) の結果(文献(10)の図-10)である。一方、現地実験のケースとして、1月20日の3つの防波堤長(風向きは25 m と 30 m のケースが WSW, 35 m のケースが W である)のケースを用いた。図-6 はその結果である。

図からわかるように、3つの現地実験結果は、 $Q=80$ l/min の水槽実験結果の曲線付近から、 $Q=330$ l/min の曲線の間にわたって分布しており、その意味では、現地

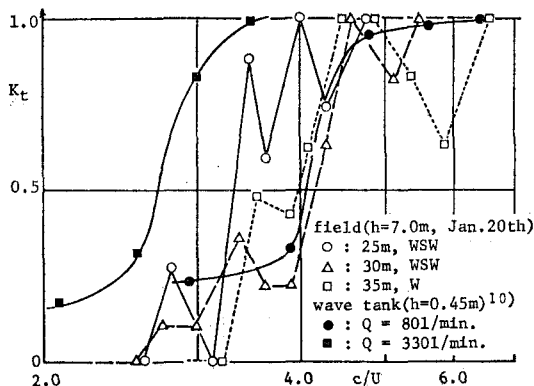


図-6 水槽実験結果(岩垣・安井¹⁰⁾)との比較

実験結果は水槽実験結果とともに、 c/U という単一のパラメータによって支配されており、縮尺効果は顕著ではないといえる(現地実験の計算誤差を考慮して)。ただし、水槽実験結果相互の相似性に問題がある。水槽実験における測定誤差は、現地実験の解析に用いた折り返し回折図法の計算誤差よりはかなり小さいと考えられるにもかかわらず、 $Q=80$ l/min と $Q=330$ l/min の両曲線の差異は、3つの現地実験結果の間の相違よりかなり大きい。

このことは、空気防波堤の消波機構が、水深の小さい実験水槽の場合には、単に c/U のみによって支配されるのではなく、他の要素が存在する可能性を示している。現地実験の場合、種々のコントロールできない条件があって、それと相殺されて c/U 以外の要素の効果が顕著でないのに対して、水槽実験ではその効果が顕著に出ているのかもしれない。例えば、Kobus の空気量と最大水平流速の関係自体が、せいぜい実験や実測結果の平均的傾向を説明しうる程度で、測定結果は大きくばらついており¹⁰⁾、このことも一つの理由と考えられる。

この問題に関しては、改めて基礎的研究を行って検討する必要がある。それはまた、現地実験結果のより詳細な解釈、および縮尺効果の検討の必須条件でもある。

最後にこの研究は、文部省科学研究費(試験(1))による研究の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 松本輝寿・曾我部隆久・奥村研一・木村慎太郎・岩崎 宏: 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, 1978.
- 2) 運輸省第三港湾建設局: 空気防波堤調査報告書, 1978.
- 3) 佐藤昭二・合田良実: 海岸・港湾, わかりやすい土木講座 17, 彰国社, p. 73, 1971.
- 4) 榎木 亨・広畑彰一: 港内波高の数値シミュレーション手法の検証について、第26回海岸工学講演会論文集, pp. 109~113, 1979.
- 5) Barailler, L. and P. Gaillard: New developments in mathematical models of sea waves; Calculation of wave diffraction over an uneven bottom, Translation No. 69-3, Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, 1969.
- 6) 合田良実・鈴木康正・高山知司: 不規則波に対する防波堤の回折図について、第23回海岸工学講演会論文集, pp. 401~405, 1976.
- 7) 森平倫正・奥山育英: 海の波の回折計算法と回折図, 港研資料 No. 21, 1965.
- 8) Taylor, G. I.: The action of a surface current used as a breakwater, Proc. Roy. Soc. London, Vol. 321, pp. 466~478, 1955.
- 9) Kobus, H. E.: Analysis of the flow induced by an air-bubble system, Proc. 11th Conf. Coastal Eng., pp. 1016~1031, 1968.
- 10) 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.