

港湾技術資料

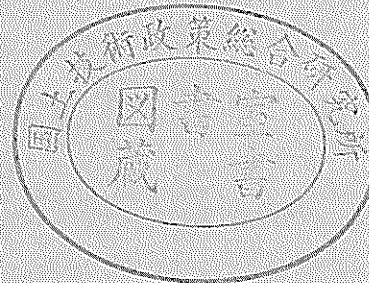
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 394 Sept. 1981

立体骨組構造防波堤の透過率の推定について

谷 本 勝 利
吉 本 靖 俊
和 泉 田 芳 和

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 抗力仕事によるエネルギー消費に基づいた透過率の推定式	4
2.1 基底的考え方と対象とする構造の条件	4
2.2 理論式の展開	6
3. 実験の方法	9
3.1 実験水路	9
3.2 模型の構造	9
3.3 水理条件	12
3.4 反射率および透過率の測定	13
4. 実験結果	14
4.1 波高分布	14
4.2 反射率	16
4.3 透過率	19
5. 見掛け抗力係数の決定と実験値との比較	20
5.1 見掛け抗力係数の決定	20
5.2 実験値との比較	23
5.3 既往実験結果との比較	25
6. 現地透過率の計算例	25
6.1 透過率の推定式と計算条件	25
6.2 透過率の計算結果	26
7. むすび	30
参考文献	30
記号一覧表	32

**Study on the Wave Transmission through Permeable Breakwaters
Composed of Vertical and Horizontal Structural Members**

Katsutoshi TANIMOTO*
Yasutoshi YOSHIMOTO**
Yoshikazu IZUMIDA***

Synopsis

The estimation method of wave transmission through permeable breakwaters composed of vertical and horizontal structural members has been investigated on the basis of two-dimensional experiments with regular waves. The following structures are tested:

- 1) vertical pile structure composed of circular cylinders arranged with the equi-distance for the both of longitudinal and transverse directions,
- 2) three dimensional lattice structure composed of vertical and horizontal circular cylinders having the equi-spacing for the longitudinal, transverse, and vertical directions,
- 3) three-dimensional lattice structure with discs at all midpoints of members between the joints of vertical and horizontal circular cylinders,
- 4) vertical pile structure with a horizontal plate under the still water surface.

Wave reflection from these structures is generally small, and the experimental formula for three structures excluding the vertical pile structure with a horizontal plate is obtained as a function of the ratio of projecting area of structural members formed the first unit row to the whole vertical area parallel to the incident wave crest. The reflection coefficient is about 0.24, even if this ratio is 0.5.

The fundamental relation for the transmission coefficient is derived by the consideration of the energy dissipation equivalent to the work done by the drag forces on the structural members. The coefficient contained in the relation is evaluated on the basis of experimental results of wave reflection and transmission. Finally, the transmission coefficient is expressed as a function of wave steepness, relative water depth, ratios of projecting area of structural members of the unit row to the vertical and the horizontal areas, and number of rows in the direction of wave propagation. The present experimental values of transmission coefficient fall within the range of ± 20 percents of the estimated values by the proposed method.

Example of calculation for the prototype conditions of water depth of 50 meters, incident waves of 6.93 meters in the height and 13 seconds in the period demonstrates that the transmission coefficient of three-dimensional lattice structure with discs, which has the length of 65 meters in the direction of wave propagation, is about 0.40, while those of the vertical pile structure and the three dimensional lattice structure which have the length of 300 meters are 0.65 and 0.43, respectively. In these examples, all the nominal diameter of circular cylinder is 1.1 meters, the center to center distance of vertical and horizontal cylinders is 5 meters, and the diameter of disc is 4 meters.

The transmission coefficient of vertical pile structure with a horizontal plate is almost equal to that of the three-dimensional lattice structure with discs, if the length of structure is the same, although the general estimation method of transmission coefficient is not established for the vertical pile structure with a horizontal plate.

* Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division.

** Member of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division.

*** Member of Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division.

(Ex-member of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division.)

立体骨組構造防波堤の透過率の推定について

谷本 勝利*
吉本 靖俊**
和泉田芳和***

要 旨

本研究は、非重力式透過性防波堤の一型式として、多数の鉛直および水平部材から成る立体骨組構造防波堤をとりあげ、その透過率の推定法を規則波による実験結果に基づいて検討したものである。対象とした構造は多列円柱構造、立体格子構造、円盤付立体格子構造であり、そのほか参考として水平板付多列円柱構造についても実験を行った。主要な内容は以下のとおりである。

1) 立体骨組構造の反射率は、波の進行方向にある程度の列数があるとき、波の進行方向の直角面上での単位列部材の投影面積が占める比率、すなわち締め切り率によって決まり、これに対する実験式を求めた。この締め切り率が0.5程度であっても、反射率は0.24程度であり、立体骨組構造の反射率は一般に小さい。

2) 抗力仕事によるエネルギー消費の考え方にに基づき基本式を導びき、その中に含まれる係数を実験により評価して、立体骨組構造の透過率の推定式を求めた。本実験による透過率は推定式による計算値のほぼ±20%の範囲に入っている。

3) 水深35mおよび50mの条件について、本研究で得た推定式を適用して、透過率の計算例を示した。その結果、たとえば水深50mで、周期13s、波高6.93mの波に対して、直径1.1mの円柱を5m間隔で並べた多列円柱構造では波の進行方向の長さが300mでも透過率は0.65、これに深さ方向にも5m間隔で水平円筒部材を加えた立体格子構造とすると幅300mで透過率は0.43であるのに対し、立体格子構造の各部材の中央に半径2mの薄円盤を取り付けた円盤付立体格子構造では幅65mで透過率が0.4となる。

4) 多列円柱構造の水面下に1枚の水平板を取り付けた水平板付多列円柱構造の実験結果によると、透過率は円盤付立体格子構造とほぼ同程度である。ただし、本構造に関する透過率の実験式は定めていない。

1. まえがき

近年、沖合海域に人工島を建設して、産業基地や流通基地、あるいは水産基地、レジャー基地として利用する等の調査研究が行われるようになってきた。このような構想における防波堤構造として、従来の重力式防波堤をそのまま適用すると、水深が大きくなるにつれて大断面となり工費が著しく増大する。そこで、非重力式透過防波堤を含めた各種の構造についてその可能性を検討し、

経済性を追求していくことが重要となる。

しかしながら、一般に非重力式透過防波堤は外海の比較的長周期の波を防ぐには不向きと考えられ、防波効果を期待するためには相当の規模を要することが推測される。したがって、これの外海大水深域への適用を検討するにあたっては、できるだけ効率的に波の浸入を防ぐ構造を探求するとともに、まずどの程度の規模が必要となるかを定量的に把握するための透過率の推定法を明らかにすることが第一である。

そのため、本研究は透過性防波堤の一型式として多数

* 水工部 防波堤研究室長

** 水工部 防波堤研究室

*** 海洋水理部 海水汚染研究室（元水工部 防波堤研究室）

の鉛直および水平部材等によって構成される構造をとりあげ、これを立体骨組構造防波堤と称して、その透過率の推定法を検討したものである。これに類する構造の透過率については、既に多列円柱構造に対する Costello¹⁾の実験、立体格子構造に対する近藤・藤間²⁾の実験等がある。本研究においては、そのほか抵抗を増大させるために立体格子の水平・鉛直部材に円盤を取り付けた構造等を対象とし、合田・Ippen³⁾がワイヤーメッシュのフィルターの透過率を求める際に用いた抗力仕事によるエネルギー消費の考え方に基づいた基本式を導き、その中に含まれる係数を実験により定式化する方法をとった。以下はその基本式の誘導および実験による検討結果、さらに現地諸元に対する計算例を述べたものである。

2. 抗力仕事によるエネルギー消費に基づいた透過率の推定式

2.1 基本的考え方と対象とする構造の条件

(1) 基本的考え方

一般に、透過性防波堤に波が作用したとき、入射波のエネルギーの一部は反射波となって前面に部分重複波を形成し、一部は透過して背後には透過波が生じる。このとき、入射波、反射波、透過波の波高を H_i , H_R , H_T とし、反射率 K_R を H_R/H_i 、透過率 K_T を H_T/H_i で定義すると、エネルギー保存の関係から次の式が成り立つ。

$$K_R^2 + K_T^2 + K_{Loss}^2 = 1 \quad (1)$$

ここに、 K_{Loss} は入射波のエネルギーに対する透過構造物によって消費されるエネルギーの比の平方根で、これをエネルギー逸散率と呼ぶ。このエネルギー消費は透過式防波堤を構成する部材の形状抵抗によるのが主で、背後に渦が形成され、その渦が粘性抵抗によってやがて消滅してしまうことによると考えられる。したがって、エネルギー消費は水粒子運動速度の自乗で表わされる非線型な現象である。

このように、透過性防波堤においては非線型抵抗を考慮する必要がある、これを厳密に取り扱うことは困難である。そのため、近似的取り扱いが行われるのが普通であり、井島・江口・小林⁴⁾はこれを線型抵抗のかたちで扱って、速度ポテンシャルの解を求め、透過構造物の解析を行っている。また、近藤ほか^{5)~8)}は長波近似による取り扱いで一連の研究を行っているが、抵抗の項は一周期にわたる仕事等しくなるように線型化している。

本研究においては、こうした研究とは異なり、後述の実験結果の定式化を計るうえでの基本式を得ることを目

的として、かなり大胆な仮定を設けて理論式を展開する。その扱いは基本は立体骨組構造の透過波を小さくする主たるメカニズムを構造物内におけるエネルギー消費であると考え、このエネルギー消費が部材に働く抗力が仕事をなすことによって生じるとすることである。この方法はまえがきでも触れたように合田・Ippen⁹⁾がワイヤーメッシュのフィルターの透過率を求めるのに用いたものである。フィルターの場合、反射波が非常に小さく無視できるため、入射波のエネルギーが、抗力仕事によるエネルギー損失分と伝達波のエネルギーの和に等しいとおいている。

これに対し、高山・菊地・西田¹⁰⁾は多数の円筒浮体で支持された大型浮遊構造物に対する波の透過率の検討において、波の反射によるエネルギー分を考慮するため次式による仮想の入射波高 H'_i を導入した。

$$H'_i = \sqrt{1 - K_R^2} H_i \quad (2)$$

すなわち、反射波のエネルギー分を予め差し引いたエネルギーを有する仮想の波(波高 H'_i)が入射するものとし、これが反射を生じることなく抗力仕事によってエネルギーを失いながら透過するとした取り扱いである。本研究においてもこれと同様に扱う。

仮想入射波高に対する透過率を仮想透過率と呼び K'_T で表わすと、これと透過率 K_T との間には次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} K'_T &= \frac{H_T}{H'_i} \\ &= \frac{K_T}{\sqrt{1 - K_R^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 抗力によるエネルギー損失の基本式

海中に固定された部材に働く波力は Morison 公式で表わされ、水粒子運動速度の自乗に比例する抗力 F_D と加速度に比例する F_T の和であることは周知のとおりである。この力による単位時間あたりの平均仕事率 \bar{W} は次式で与えられる。

$$\bar{W} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (F_D + F_T) U dt \quad (4)$$

ここに、 t は時間、 T は波の周期、 U は水粒子の速度である。このうち慣性力の項は1周期にわたり積分すると消え、抗力 F_D による仕事のみが残る。この平均仕事率が平均波エネルギー損失 \bar{E}_{Loss} に等しいと考えることができるから、 \bar{E}_{Loss} は次のように表わされる。

$$\bar{E}_{Loss} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} F_D U dt$$

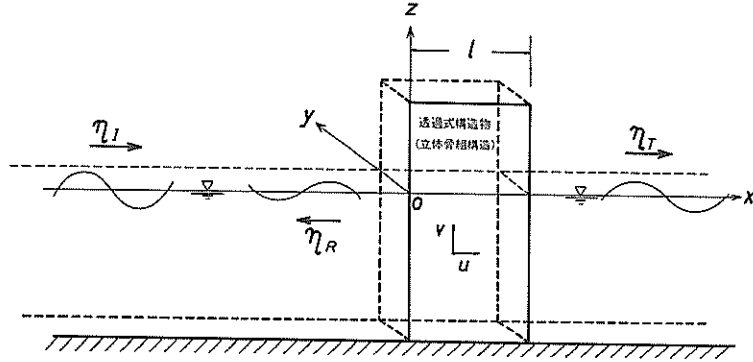


図-1 座標系

$$= \frac{1}{T} \int_0^{T+T} \frac{w_0}{2g} C_D |UW|^2 A dt \quad (5)$$

ここに、 w_0 は水の単位体積重量、 g は重力の加速度、 C_D は抗力係数、 A は流れの方向直角面への部材の投影面積である。

(3) 適用する波動理論

図-1に座標系を示す。座標軸の原点を静水面と透過式構造物の前面との交点にとり、波の進行方向を x 軸、鉛直上向き方向を z 軸、波の進行方向と直交する方向を y 軸とする。なお、 y 軸方向、すなわち透過式構造物の長さ方向には一様な構造が無限に続くものとして、その方向へは単位幅で考え、 x 軸方向および z 軸方向の二次元問題として取り扱う。

このように座標を決めた場において、本研究では微小振幅波理論を適用して透過式構造物の透過率を検討する。したがって、入射波の波形 η_I 、反射波の波形 η_R 、および伝達波の波形 η_T は次式で与える。

$$\eta_I = a_I \cos(kx - \sigma t); x \leq 0 \quad (6)$$

$$\eta_R = a_R \cos(kx + \sigma t + \theta_R); x \leq 0 \quad (7)$$

$$\eta_T = a_T \cos(kx - \sigma t + \theta_T); x \geq l \quad (8)$$

ここに、

a_I : 入射波振幅 (= $H_I/2$)

a_R : 反射波振幅 (= $H_R/2$)

θ_R : 反射波位相

a_T : 伝達波振幅 (= $H_T/2$)

θ_T : 伝達波位相

σ : 角周波数 ($2\pi/T$)

k : 波数 ($2\pi/L$)

L : 波の波長

l : 透過式構造物幅

また透過式構造物内の流速分布は、構造物内の部材からの反射がないと仮定したこと、および構造物の近接効果はないと仮定することにより、微小振幅進行波の流速分布で与える。すなわち、水粒子水平速度成分 u および鉛直速度成分 v は次式で表わされる。

$$u = a\sigma \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(\sigma t + \theta_x) \quad (9)$$

$$v = -a\sigma \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(\sigma t + \theta_x) \quad (10)$$

ここに、

a : 透過式構造物内の振幅

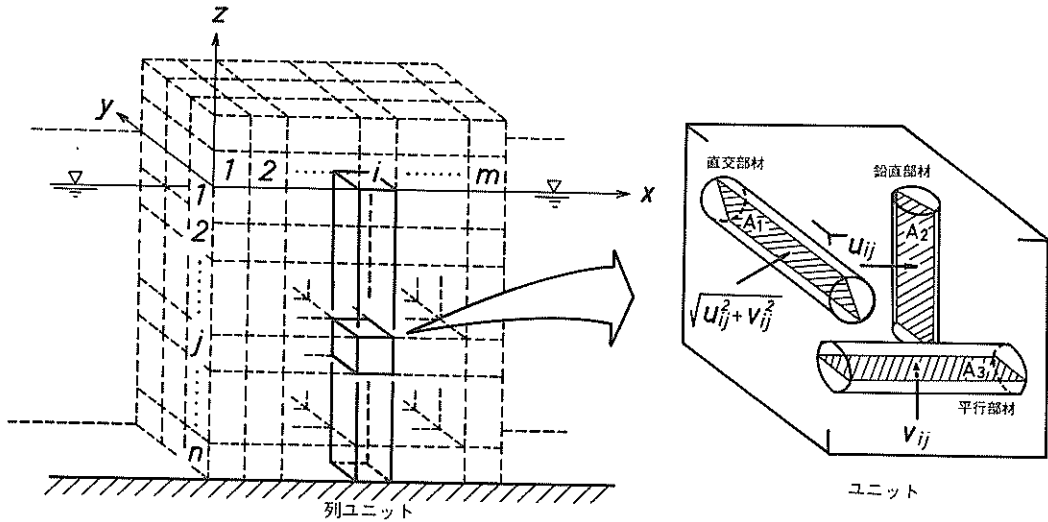
h : 水深

θ_x : x による位相角

ただし、 a は構造物内を波が進行するにしたがい、抗力仕事によるエネルギー損失のため、 $x=0$ で $a=a_I$ から $x=l$ での $a=a_T$ まで減少する。

(4) 対象とする構造

本研究で対象とする立体骨組構造防波堤は、円柱状部材および薄平板状部材が三次元的に規則正しく配列された構造から成る透過式構造物である。以下に進める解析を簡便化させるため、構造物前面と後面は鉛直とする。また、すべての部材軸は x 、 y 、 z のいずれかに平行とし、斜材を含まないものとする。これらのうち、水平速度成分 u のみが作用する部材を鉛直部材といい、鉛直速度成分 v が作用する部材を水平部材という。さらに、水平部材のうち鉛直速度成分のみが作用する部材を平行部材(波の進行方向に平行である部材)と呼び、鉛直および水平速度成分が同時に作用する部材を直交部材(波の進行方向に直角である部材)と呼ぶ。ただし、直交部材は合成速度 $\sqrt{u^2+v^2}$ がどの方向から作用しても同じ投影面



図一2 立体骨組構造のモデル

積を持つものとする。斜材を含む場合には、その斜材に平行な座標軸を設け、その斜材のみのエネルギー損失を別に求めることにより解析可能である。

一般に、以上のような条件を持つ立体骨組構造は、鉛直方向すなわち z 軸方向に形状が連続でない。そのため解析上は、図一2に示すように同一の形を持つ小さなユニット（具体的には後出の図一7、図一9）に分割して、個々のユニット毎の抗力仕事によるエネルギー損失を求める。その際、各ユニット内における水粒子水平速度成分 u 、鉛直速度成分 v は一様と仮定し、そのユニットの中心座標の値を用いる。最終的にはそれらを鉛直方向 (z 軸方向) に総和をとることにより、 i 列目の n 個のユニットの抗力仕事によるエネルギー損失が求まる。この静水面下にある n 個のユニットの集合を列ユニットと称する。図一2の右側の図は、ユニット中の鉛直部材 (投影面積 A_2)、平行部材 (投影面積 A_3)、および直交部材 (合成速度方向への投影面積 A_1) を模式的に示したものである。

2.2 理論式の展開

(1) 列ユニットによるエネルギー損失

x 軸方向に m 列、 z 軸方向に n 個のユニットから成る立体骨組構造を考える。ユニットの寸法は x 軸方向を r 、 z 軸方向を q 、 y 軸方向を s とする。まず、立体骨組構造前面より i 列目、静水面より j 個目のユニットを考える。このユニット内の水粒子水平速度成分を u_{ij} 、鉛直速度成分を v_{ij} 、としてユニット内の各部材によるエネルギー損失量を求め、さらにそれらを鉛直方向について総和をとることにより、 i 列目の列ユニットによるエネルギー損失量を求める。

① 直交部材
水平速度成分 u_{ij} と鉛直速度成分 v_{ij} の合成速度 $\sqrt{u_{ij}^2 + v_{ij}^2}$ が作用する投影面積を A_1 とする。この部材の抗力仕事による単位時間あたりのエネルギー損失量 \bar{W}_{mij} は式 (5) より単位幅あたり次のように求まる。

$$\begin{aligned} \bar{W}_{mij} &= \frac{1}{Ts} \int_t^{t+\tau} F_{mij} \sqrt{u_{ij}^2 + v_{ij}^2} dt \\ &= \frac{w_0 C_D A_1}{2gTs} \int_t^{t+\tau} (u_{ij}^2 + v_{ij}^2)^{\frac{3}{2}} dt \quad (11) \end{aligned}$$

F_{mij} : ユニット内の水平部材に働く抗力

したがって、 i 列目の列ユニット全体の直交部材による単位時間あたりのエネルギー損失量 \bar{W}_m は式 (12) のようになる。

$$\begin{aligned} \bar{W}_m &= \sum_{j=1}^n \frac{w_0 C_D A_1}{2gTs} \int_t^{t+\tau} (u_{ij}^2 + v_{ij}^2)^{\frac{3}{2}} dt \\ &= \frac{w_0 C_D A_1}{2gTs q} \int_{-h}^0 \int_t^{t+\tau} (u_{ij}^2 + v_{ij}^2)^{\frac{3}{2}} dt dz \\ &= \frac{w_0 C_D a_1^3 \sigma^3}{2g \pi k} \frac{A_1}{sq} f_1(kh) \quad (12) \end{aligned}$$

ここに、

$$f_1(kh) = \int_0^{kh} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{(\cosh^2 \zeta \cos^2 \theta + \sinh^2 \zeta \sin^2 \theta)^{\frac{3}{2}}}{\sinh^3 kh} d\theta d\zeta \quad (13)$$

u_i, v_i は i 列目における水平および鉛直速度成分で、 a_i はそこでの振幅である。なお、 $f_1(kh)$ は数値積分によって求める必要があるが、 kh が次のような範囲の場合には式 (14) のように近似できる。

$$\begin{aligned} f_1(kh) &\approx \frac{\pi}{3} && ; kh > \pi \\ &\approx \frac{4}{3(kh)^2} && ; kh < \frac{\pi}{10} \end{aligned} \quad (14)$$

② 鉛直部材

鉛直部材の x 軸方向への投影面積を A_2 とする。この部材の抗力仕事による単位時間あたりのエネルギー損失量 $\overline{W}_{v,i}$ は式 (5) より単位幅あたり次のように求まる。

$$\begin{aligned} \overline{W}_{v,i} &= \frac{1}{T_s} \int_t^{t+\tau} F_{v,i} u_{i,j} dt \\ &= \frac{w_0 C_D A_2}{2gT_s q} \int_t^{t+\tau} |u_{i,j}| u_{i,j}^2 dt \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、

$F_{v,i}$: ユニットの鉛直部材に働く抗力

したがって、 i 列目の列ユニット全体の鉛直部材による単位時間あたりのエネルギー損失量 \overline{W}_v は式 (16) のようになる。

$$\begin{aligned} \overline{W}_v &= \sum_{j=1}^n \frac{w_0 C_D A_2}{2gT_s} \int_t^{t+\tau} |u_{i,j}| u_{i,j}^2 dt \\ &= \frac{w_0 C_D A_2}{2gT_s q} \int_{-h}^0 \int_t^{t+\tau} |u_{i,j}| u_{i,j}^2 dt dz \\ &= \frac{w_0 C_D a_i^3 \sigma^3}{2g\pi k} \frac{A_2}{sq} f_2(kh) \end{aligned} \quad (16)$$

ここに、

$$\begin{aligned} f_2(kh) &= \int_0^{kh} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cosh^3 \zeta |\cos \theta|^3}{\sinh^3 kh} d\theta d\zeta \\ &= \frac{4}{9} \left(1 + \frac{3}{\sinh^2 kh} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

③ 平行部材

平行部材の z 軸方向への投影面積を A_3 とする。この部材の抗力仕事による単位時間あたりのエネルギー損失量 $\overline{W}_{p,i}$ は式 (5) より単位幅あたり次のように求まる。

$$\begin{aligned} \overline{W}_{p,i} &= \frac{1}{T_s} \int_t^{t+\tau} F_{p,i} v_{i,j} dt \\ &= \frac{w_0 C_D A_3}{2gT_s} \int_t^{t+\tau} |v_{i,j}| v_{i,j}^2 dt \end{aligned} \quad (18)$$

ここに、

$F_{p,i}$: ユニットの平行部材に働く抗力

したがって、 i 列目の列ユニット全体の平行部材による単位時間あたりのエネルギー損失量 $\overline{W}_{p,i}$ は式 (19) のようになる。

$$\begin{aligned} \overline{W}_{p,i} &= \sum_{j=1}^n \frac{w_0 C_D A_3}{2gT_s} \int_t^{t+\tau} |v_{i,j}| v_{i,j}^2 dt \\ &= \frac{w_0 C_D A_3}{2gT_s q} \int_{-h}^0 \int_t^{t+\tau} |v_{i,j}| v_{i,j}^2 dt \\ &= \frac{w_0 C_D a_i^3 \sigma^3}{2g\pi k} \frac{A_3}{sq} f_3(kh) \end{aligned} \quad (19)$$

ここに、

$$\begin{aligned} f_3(kh) &= \int_0^{kh} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sinh^3 \zeta |\sin \theta|^3}{\sinh^3 kh} d\theta d\zeta \\ &= \frac{4}{9} \frac{\cosh^3 kh - 3 \cosh kh + 2}{\sinh^3 kh} \end{aligned} \quad (20)$$

(2) 仮想透過率

i 列目の列ユニット (n 個のユニットの集合) について、直交部材、鉛直部材、および平行部材の全部材による単位時間あたりのエネルギー損失量 \overline{W}_i は、式 (12)、式 (16)、式 (19) の和をとって次式で与えられる。

$$\overline{W}_i = \overline{W}_{H_i} + \overline{W}_{v,i} + \overline{W}_{p,i} \quad (21)$$

この列ユニットに入射する波の振幅は a_i であり、この列ユニットを透過した波の振幅は、 $(i+1)$ 列目の列ユニットに入射する波の振幅でもあるので、 a_{i+1} である。また、群速度を c_g とすると、これらの間には次の関係が成り立つ。

$$\frac{1}{2} w_0 a_i^2 c_g - \frac{1}{2} w_0 a_{i+1}^2 c_g = \overline{W}_i \quad (22)$$

ここで、 w_0 は水の単位体積重量であり、群速度 c_g は次式で与えられる。

$$c_g = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (23)$$

したがって、式 (22) に式 (21) を代入することにより、 i 列目の列ユニットの仮想透過率 $K'_{T,i}$ は次式で表わせる。

$$K'_{T,i} = \frac{a_{i+1}}{a_i} = \left(1 - \frac{\overline{W}_i}{\frac{1}{2} w_0 a_i c_g} \right)^{1/2}$$

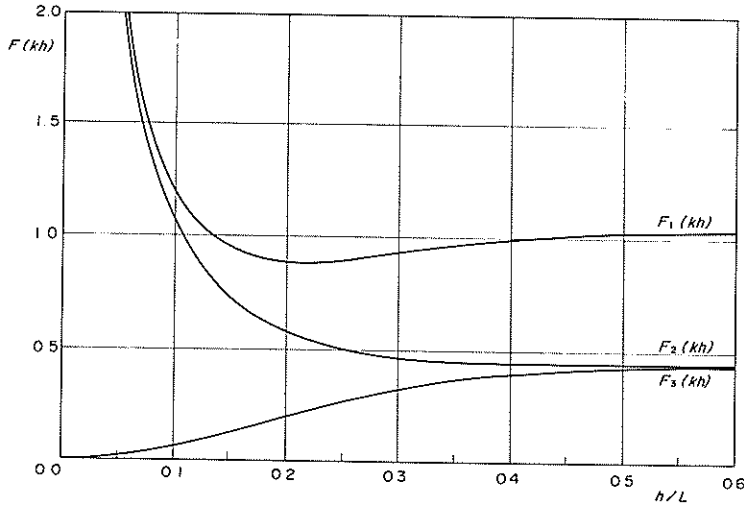


図-3 $F(kh)$ の算定図

$$= \left\{ 1 - \frac{4C_D a_i}{L} F(kh) \right\}^{1/2} \quad (24)$$

ここに,

$$F(kh) = \frac{2 \sinh^2 kh}{\sinh 2kh + 2kh} \left\{ \frac{A_1}{sq} f_1(kh) + \frac{A_2}{sq} f_2(kh) + \frac{A_3}{sq} f_3(kh) \right\} \quad (25)$$

今、 x 方向への列ユニット数を変数 M とする。式 (24) より i 列目の列ユニットを波が透過することによる、すなわち $\Delta M = 1$ に対する振幅の変化量 da_i は次式で表わせる。

$$\frac{da_i}{\Delta M} = a_{i+1} - a_i = -a_i (1 - \sqrt{1 - \beta a_i}) \quad (26)$$

ここに,

$$\beta = \frac{4C_D}{L} F(kh) \quad (27)$$

ここで、式 (26) の離散的表現による振幅変化率を連続的表現の微分方程式にすると、

$$\frac{da}{dM} = -a(1 - \sqrt{1 - \beta a}) \quad (28)$$

となる。 $\beta a \ll 1$ であるので上式を、 $M = 0$ で $a = a_i$ 、 $M = m$ で $a = a_r$ の境界条件のもとで近似的に解くと、仮想透過率 K'_r として次式が得られる。

$$K'_r = \frac{a_r}{a_i} = \frac{1}{1 + m C_D \frac{H'_i}{L} F(kh)} = \frac{1}{1 + C_D \alpha'} \quad (29)$$

ここに,

$$\alpha' = m \frac{H'_i}{L} F(kh) \quad (30)$$

ここであらたに、

$$F_1(kh) = \frac{2 \sinh^2 kh}{\sinh 2kh + 2kh} f_1(kh) \quad (31)$$

$$F_2(kh) = \frac{2 \sinh^2 kh}{\sinh 2kh + 2kh} f_2(kh) \quad (32)$$

$$F_3(kh) = \frac{2 \sinh^2 kh}{\sinh 2kh + 2kh} f_3(kh) \quad (33)$$

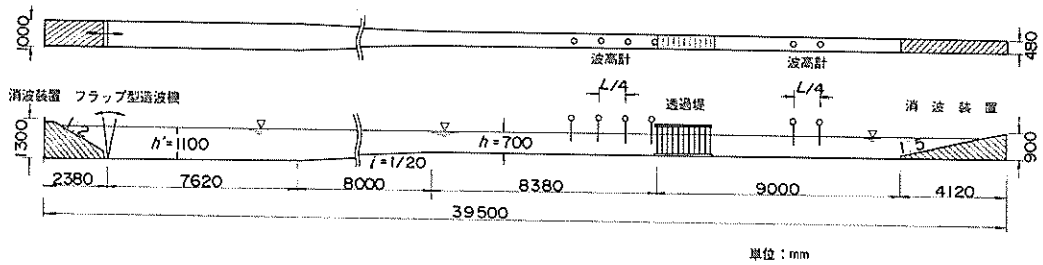
とし、 $q = h/n$ を用いて

$$\begin{aligned} S &= sh \\ S_1 &= nA_1 \\ S_2 &= nA_2 \\ S_3 &= nA_3 \end{aligned} \quad (34)$$

とすると、 α' は次のように表わすことができる。

$$\alpha' = m \frac{H'_i}{L} \left\{ \frac{S_1}{S} F_1(kh) + \frac{S_2}{S} F_2(kh) + \frac{S_3}{S} F_3(kh) \right\} \quad (35)$$

式 (34) から明らかのように、 S は静水面以下の立体



図一四 実験水路

骨組構造前面面積であり、 S_1 、 S_2 、 S_3 は、それぞれ列ユニットにおける直交部材、鉛直部材、および平行部材の全投影面積である。なお、以上の誘導は基本的には合田・Ippenによる鉛直・直交部材の解析に水平部材の項を追加したものである。

(3) 透過率推定式

仮想透過率 K_T' と実際の透過率 K_T との間には式 (3) の関係があるので、 K_T は実際の入射波高 H_i と反射率 K_R を用いて式 (36) のように与えられる。

$$K_T = \frac{\sqrt{1-K_R^2}}{1+C_D\alpha'} \quad (36)$$

ここに、

$$\alpha' = \alpha\sqrt{1-K_R^2} \quad (37)$$

$$\alpha = m \frac{H_i}{L} \left\{ \frac{S_1}{S} F_1(kh) + \frac{S_2}{S} F_2(kh) + \frac{S_3}{S} F_3(kh) \right\} \quad (38)$$

図一三は式 (38) 中の $F_1(kh)$ 、 $F_2(kh)$ 、 $F_3(kh)$ の値を h/L に対して示したものである。

式 (36)、式 (38) を見て明らかなように、立体骨組構造の透過率は反射率以外に、入射波の波形勾配、波の進行方向への列ユニット数、相対水深、および静水面以下の立体骨組構造前面面積に対する鉛直部材、平行部材、および直交部材の投影面積比で決まることがわかる。

3. 実験の方法

3.1 実験水路

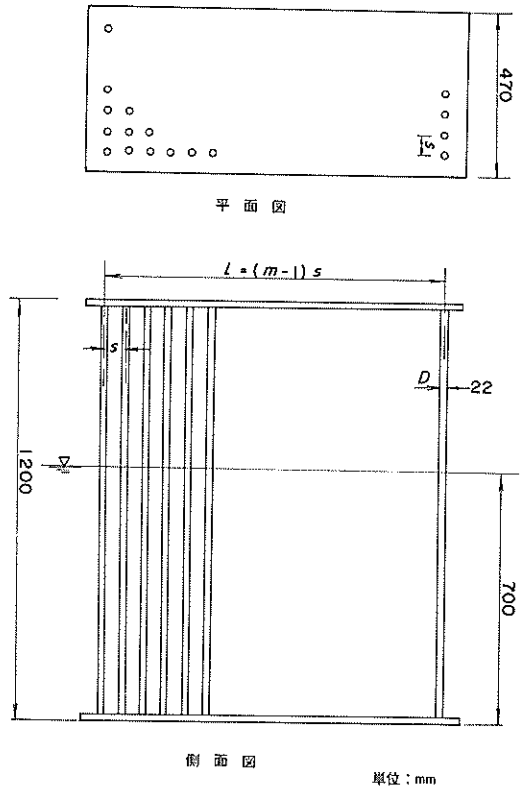
本実験には当研究所の中型造波水路（通称パイロットチャンネル）を使用した。この造波水路は図一四に示しているように、造波機側は深さ 130 cm、幅 100 cm、模型を設置する側は深さ 90 cm、幅 48 cm である。全長は 39.50 m で、そのうち模型を設置する側の一様水路部の長さは 17.38 m である。造波機設置地点より波の進行方向側へ 7.62 m の地点から 15.62 m 地点の 8 m の間で

深さ、幅をすりつけている。水路の両端には消波装置を設けており、両端壁からの反射波は小さい。

造波機は 1.5 kW の出力を有する電動機駆動のフラップ型造波機である。偏心量は 0 cm から 1 cm 間隔に最大 28 cm まで変化させることができ、周期が 0.8 s から 4.0 s の規則波を発生することができる。

3.2 模型の構造

今回の実験で対象とした立体骨組構造は次の 3 種であ

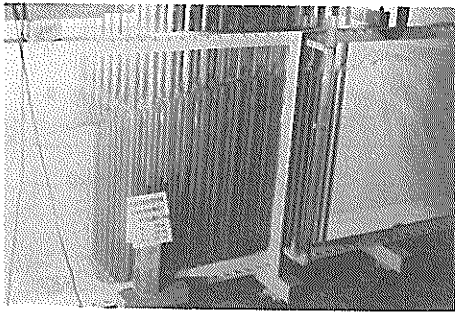


図一五 多列円柱構造

表—1 多列円柱構造の構造条件

$D = 2.2 \text{ cm}$

$s \text{ (cm)}$	D/s	m	$l \text{ (cm)}$
10	0.220	5	40
		10	90
		15	140
7	0.314	7	42
		14	91
		21	140
5	0.440	9	40.5
		20	95.5
		29	140.5
3.5	0.629	14	45.5
		28	94.5
		42	143.5
3	0.733	16	45
		33	96
		49	144



写真—1 多列円柱構造 ($D/s = 0.314$, $l = 100 \text{ cm}$)

る。

- ① 多列円柱構造
- ② 立体格子構造
- ③ 円盤付立体格子構造

このほか、多列円柱構造に水平板を取りつけた水平板付多列円柱構造についても実験を行った。以下、各構造の諸元について述べる。

① 多列円柱構造 (図—5, 写真—1 参照)

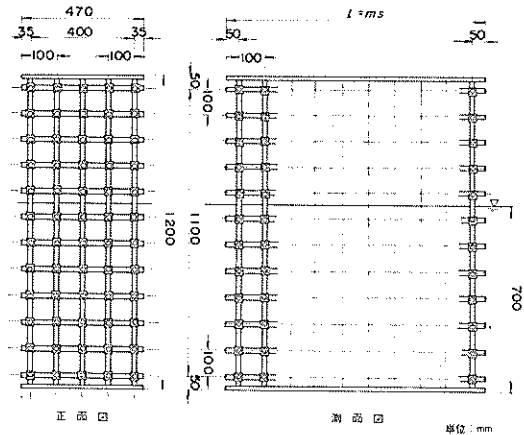
この構造は図—5に示しているように、多数の鉛直円柱を波の進行方向、およびそれと直交方向に等間隔で配列した鉛直部材のみから成る構造である。円柱材としては剛性を確保するために中に丸鋼を詰めた外径 D が 2.2 cm の塩化ビニルパイプを用いた。構造条件は表—1に示してあるように、円柱間隔(心間距離) s を 3.0 cm ~ 10.0 cm の範囲で5種類に変化させた。これによって D/s は 0.220 ~ 0.733 の範囲となる。また、波の進行方向への円柱数 m は、最小で5列、最大で49列に変化させている。表中 l は多列円柱構造の有効幅であり、この場合次式で定義している。

$$l = (m - 1)s \quad (39)$$

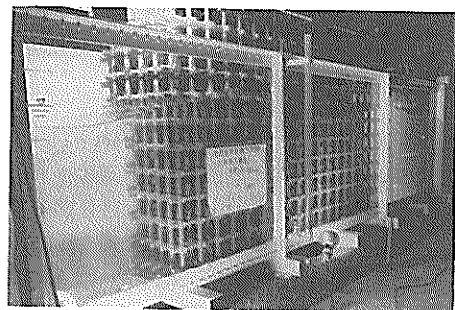
この構造の場合は鉛直方向に形状が同一であり、2で述べたユニットに分割して考える必要はない。

② 立体格子構造 (図—6, 写真—2 参照)

この構造は鉛直部材のみからなる多列円柱構造に、さらに水平部材を波の進行方向、およびそれと直交方向に加えた構造である。用いた部材は多列円柱構造と同じく外径 D が 2.2 cm の塩化ビニルパイプである。表—2に示してあるように円柱間隔 s は三方向とも同一間隔の 10 cm とし、 $D/s = 0.220$ の1種類である。また、波の進行方向への鉛直円柱数、すなわち列ユニット数 m は5



図—6 立体格子構造

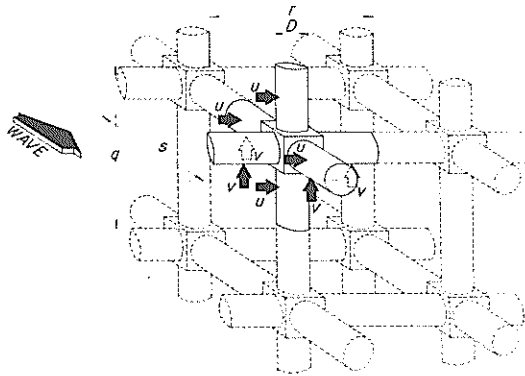


写真—2 立体格子構造 ($D/s = 0.220$, $l = 100 \text{ cm}$)

表一 2 立体格子構造の構造条件

$D = 2.2 \text{ cm}$

$s \text{ (cm)}$	D/s	m	$l \text{ (cm)}$
10	0.220	5	50
		10	100
		15	150
		20	200



図一 7 立体格子構造のユニット

～20の4種類とした。なお、この構造の有効幅 l は多列円柱構造の場合と異なり、次式で定義している。

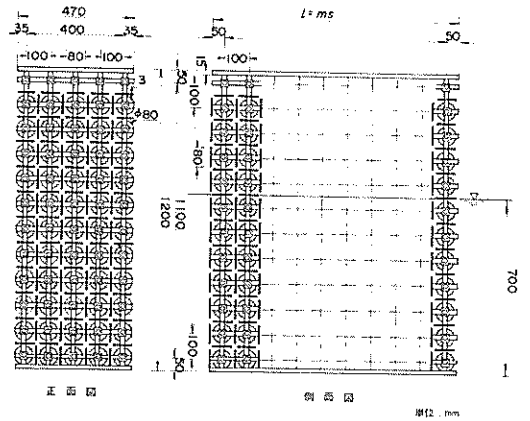
$$l = ms \quad (40)$$

図一7は本構造のユニットの拡大図を示したものである。ユニット中心に円柱材の交点を固定する一辺3cmの立方体を設けているが、これによる影響は小さいとして考慮しない。

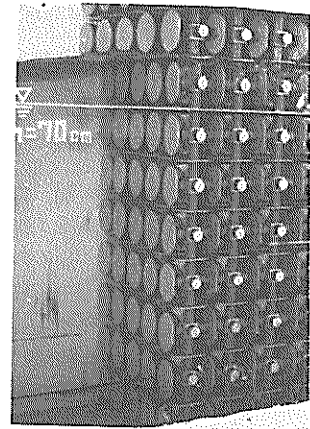
③ 円盤付立体格子構造 (図一8, 写真一3参照)

この構造は立体格子構造の各格子間中央に抵抗を増大させるため円盤を取り付けた構造である。この円盤は塩化ビニールで製作したもので、半径 R は4cm、盤厚は3mmとした。表一3に示しているように円柱間隔 s は三方向とも同一間隔の10.0cmの1種類であり、波の進行方向への列ユニット数 m を5列と10列の2種類に変化させた。本構造の有効幅 l は立体格子構造の場合と同様に定義している。

図一9に本構造のユニットの拡大図を示している。各ユニットに所属する3枚の円盤のうち、波の進行方向に平行な鉛直円盤には形状抵抗が働かず、表面抵抗のみが作用する。しかし、その大きさは他の2枚の円盤に働く波力に比べ微小なので、本研究においてはこれらの効果を無視した。



図一 8 円盤付立体格子構造



写真一 3 円盤付立体格子構造 ($D/s = 0.220$, $R = 4.0 \text{ cm}$)

表一 3 円盤付立体格子構造の構造条件

$D = 2.2 \text{ cm}$, $R = 4.0 \text{ cm}$

$s \text{ (cm)}$	D/s	m	$l \text{ (cm)}$
10	0.220	5	50
		10	100

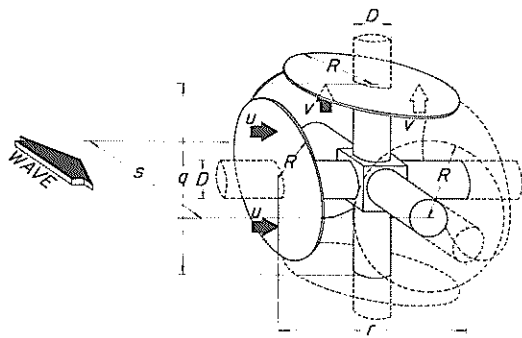


図-9 円盤付立体格子構造のユニット

表-4 水平板付多列円柱構造の構造条件

$D = 2.2 \text{ cm}, h = 70.0 \text{ cm}$

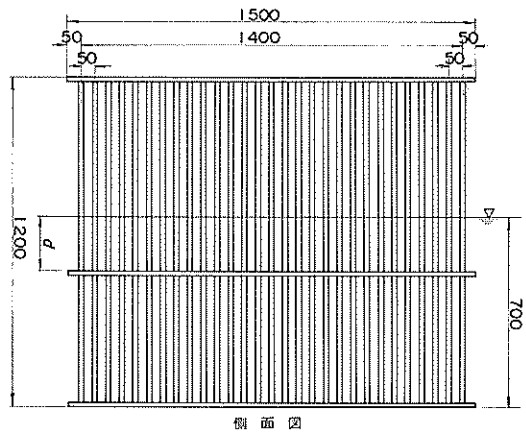
$s \text{ (cm)}$	D/s	m	$l \text{ (cm)}$	$d \text{ (cm)}$	d/h
5	0.440	29	140	0	0.000
				10	0.143
				20	0.286

④ 水平板付多列円柱構造 (図-10, 写真-4 参照)
この構造は多列円柱構造に水平板を1枚加えた構造である。これについては表-4に示してあるように、鉛直円柱間隔 s と波の進行方向への鉛直円柱数 m をそれぞれ 5 cm, 29 本と一定として、水平板上面の静水面下の深さ d を 0 cm, 5 cm, 10 cm の 3 種類に変化させた。本構造の有効幅 l は多列円柱構造の場合と同様に定義した。

3.3 水理条件

模型設置位置での実験水深 h は 70 cm の 1 種とした。表-5 および表-6 は実験波の条件をまとめて示したものである。周期 T は多列円柱構造, 立体格子構造, 水平板付多列円柱構造の場合 1.00 ~ 3.00 s の範囲, 円盤付立体格子構造の場合 1.15 ~ 3.00 s の範囲のそれぞれ 5 種類である。また, 入射波高 H は前者の場合周期によって 7.4 cm ~ 24.4 cm の範囲, 後者の場合 4.1 cm ~ 24.4 cm の範囲である。

この波高は模型を設置する以前の状態で, 模型前面の設置予定地点より造波機側に 50 cm 間隔で測定した 4 点での波高の平均値であり, これを通過波高と呼ぶ。用いた波高計は約 40 cm まで測定可能な容量式波高計であり, 模型を設置した本実験において造波機からの再反射が含



側面図

単位: mm

図-10 水平板付多列円柱構造



写真-4 水平板付多列円柱構造 ($D/s = 0.440$, $d/h = 0.143$)

表-5 水理条件 (円盤付立体格子構造以外の構造)

$T \text{ (s)}$	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
$L \text{ (cm)}$	155	312	462	605	745
$H_i \text{ (cm)}$	16.6	12.9 16.1	9.9 15.9 23.8	7.4 10.4 17.2 24.4	13.1 22.6
H_i/L	0.1070	0.0413 0.0516	0.0214 0.0344 0.0515	0.0122 0.0172 0.0284 0.0403	0.0176 0.0303
h/L	0.452	0.224	0.152	0.116	0.094
$h \text{ (cm)}$	70.0				

表一六 水理条件（円盤付立体格子構造）

T (s)	1.15	1.50	2.00	2.50	3.00
L (cm)	201	312	462	605	745
H_I (cm)	4.1	9.7	9.9	7.4	13.1
	8.2	12.9	11.9	10.4	22.6
	12.3	16.1	15.9	15.5	
	16.4	19.1	19.8	17.2	
			23.8	24.4	
H_I/L	0.0204	0.0311	0.0214	0.0122	0.0176
	0.0408	0.0413	0.0258	0.0172	0.0303
	0.0612	0.0516	0.0344	0.0256	
	0.0816	0.0609	0.0429	0.0284	
		0.0515	0.0403		
h/L	0.348	0.224	0.152	0.116	0.094
h (cm)	70.0				

まれない範囲での連続した10波を整理の対象とした。

図一11, 12は造波機の偏心量 e と通過波高 H の関係を周期条件ごとに示したものである。

3.4 反射率および透過率の測定

(1) 反射率の測定

反射率 K_R はHealyの方法により式(41)～(43)を用いて求める。

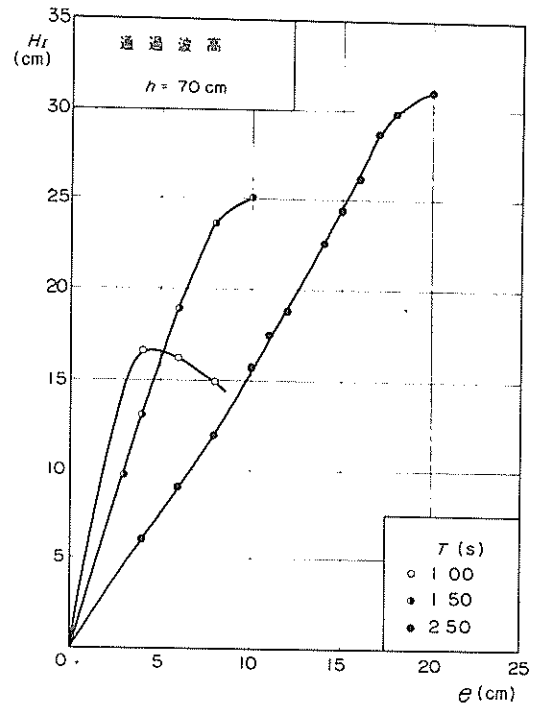
$$H_{I\text{Healy}} = \frac{H_{\max} + H_{\min}}{2} \quad (41)$$

$$H_R = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{2} \quad (42)$$

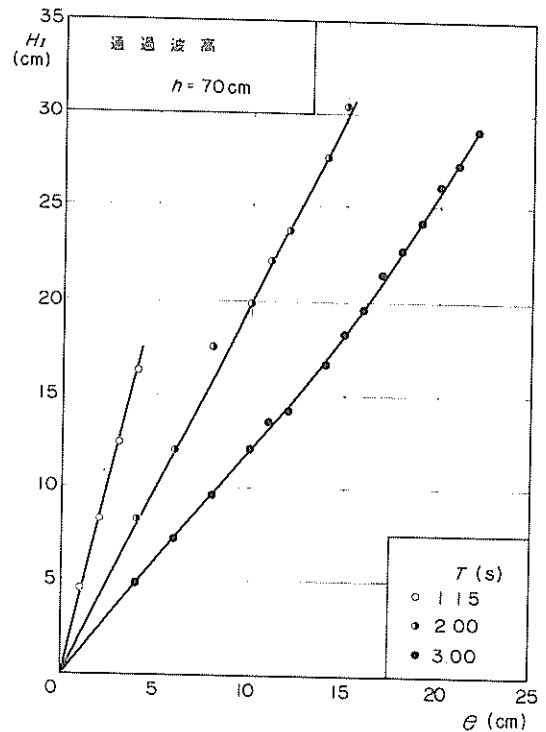
$$K_R = \frac{H_R}{H_{I\text{Healy}}} \quad (43)$$

ここに、 $H_{I\text{Healy}}$ 、 H_R は分離された入射波高、反射波高であり、 H_{\max} 、 H_{\min} はそれぞれ構造物前面域における波高分布の最大値、最小値である。ただし、本実験においては比較的周期が長く、波高が大きい条件を含んでいる。そのため、有限振幅性の影響に対し、Healyの方法により求めた入射波高と反射率を合田・阿部¹¹⁾が示した方法によって補正しこれを最終的に $H_{I\text{Healy}}$ 、 K_R とした。

前面域の波高は4本の波高計を使用し、模型直前より $L/16$ 間隔で約1波長にわたって繰り返し測定した。この個々の位置での波高は造波板からの再反射を含まない有効波内での5～10波の平均値である。最大波高、お



図一11 偏心量と発生波高の関係（その1）



図一12 偏心量と発生波高の関係（その2）

よび最小波高はこれらをプロットして波高分布の曲線を目視で描き、この波高分布曲線の極大および極小値の約1波長間におけるそれぞれ平均値として求めた。ただし、模型に最も近く生じる波高分布の極大値は、いわゆる減衰定常波¹²⁾の影響を受けていると考えられるので除いた。

(2) 透過率の測定法

透過波高 H_T は、模型後面と水路端にある消波装置の法先との中間点で、 $L/4$ の間隔で設置した2本の波高計による測定値の平均値とした。透過率 K_T は H_{Healy} でなく通過入射波高 H_I を用いて次式より求める。

$$K_T = \frac{H_T}{H_I} \quad (44)$$

4. 実験結果

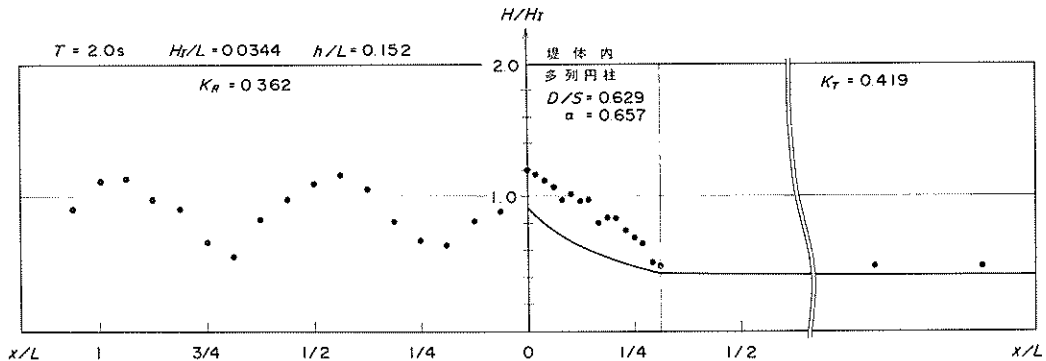
4.1 波高分布

図一13~17は反射波領域、立体骨組構造内、および伝達波領域での波高分布の例を通過入射波高 H で割っ

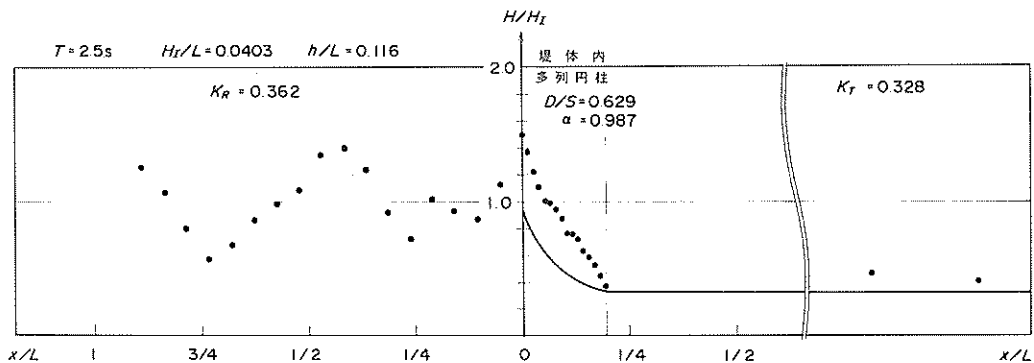
て無次元化して示したものである。図一13, 14は多列円柱構造 ($D/s = 0.629$, $m = 42$) の $T = 2.0$ s, 2.5 s の、図一15~17は立体格子構造 ($D/s = 0.220$, $m = 20$) の $T = 1.5$ s, 2.0 s, 2.5 s の例であり、入射波の波形勾配 H_I/L は 0.034 ~ 0.041 の範囲の結果である。以下、各領域ごとの波高分布について述べる。

① 反射波領域

この領域の波高分布には、ほぼ $L/2$ 間隔で山、または谷が生じているが、高次波の影響によって必ずしもきれいな分布を示さない場合もある。反射率 K_R は前述したように、これから高次振動を無視して滑らかな曲線を描き求めた。なお、波高 H を通過入射波高 H_I で割って示しているが、図一13, 15の例ではこの値が全体に1より小さい方にずれている傾向にある。これは反射波があるときに進行波のエネルギーが若干失われて波高がやや減じられることによるのかもしれないが、原因は明らかでない。



図一13 波高分布 (多列円柱構造 $T = 2.0$ s, $H_I/L = 0.0344$)



図一14 波高分布 (多列円柱構造 $T = 2.5$ s, $H_I/L = 0.0403$)

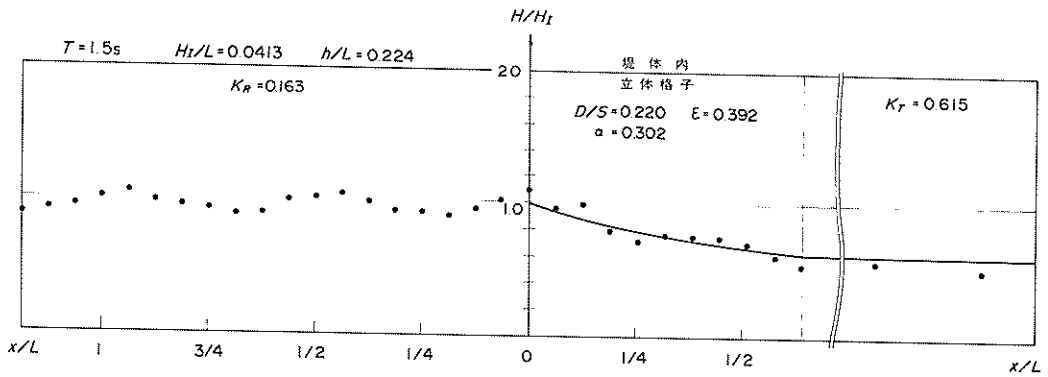


図-15 波高分布 (立体格子構造 $T = 1.5s$, $H_1/L = 0.0413$)

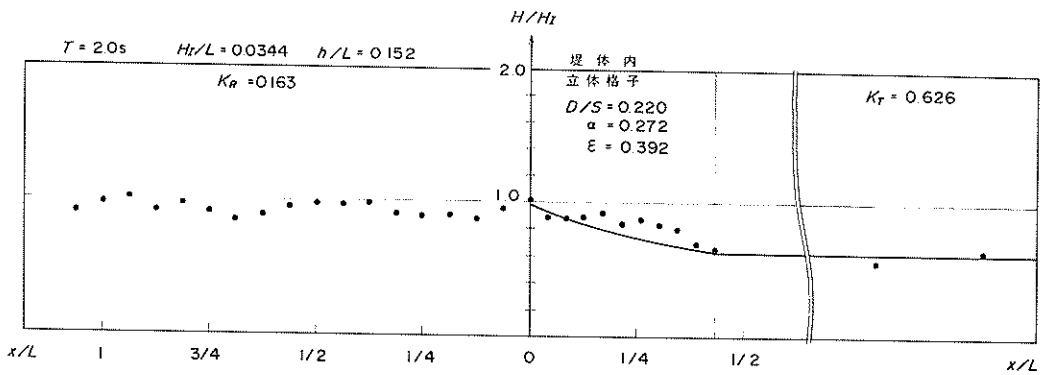


図-16 波高分布 (立体格子構造 $T = 2.0s$, $H_1/L = 0.0344$)

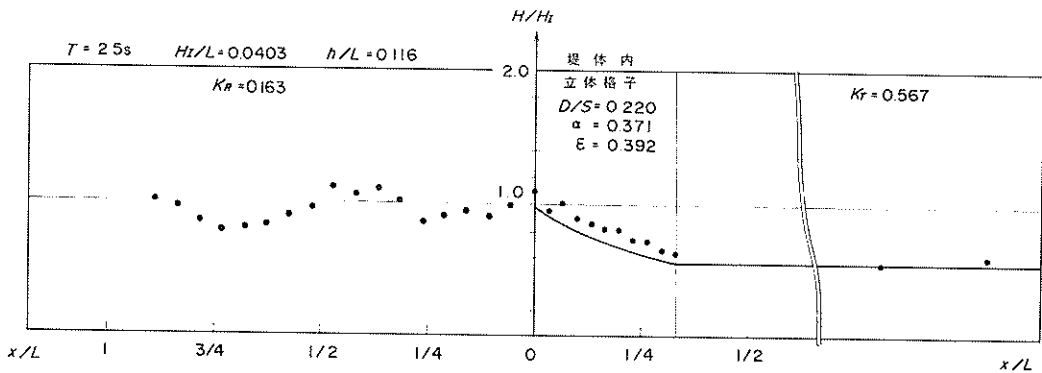
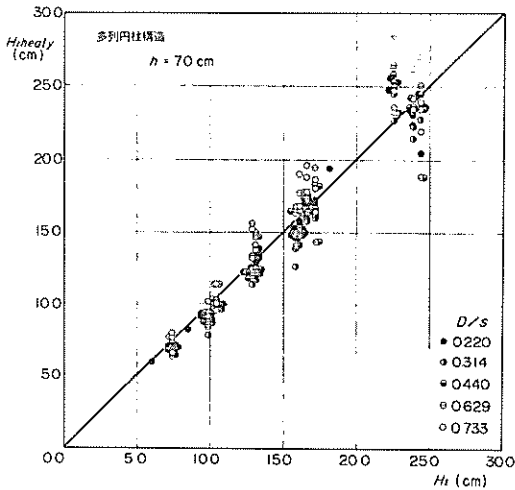


図-17 波高分布 (立体格子構造 $T = 2.5s$, $H_1/L = 0.0403$)

ここで、Healy の方法により得られた入射波高 H_{1Healy} と通過波高より求めた通過入射波高との関係をもておく。

図-18は多列円柱構造、図-19は立体格子構造、円盤

付立体格子構造、水平板付多列円柱構造の場合の相関図である。いずれの構造においても、入射波高 H_1 が 20 cm 以下の小さい場合には Healy の方法で求めた入射波高



図一18 H_i と $H_{i,theory}$ の相関 (多列円柱構造)

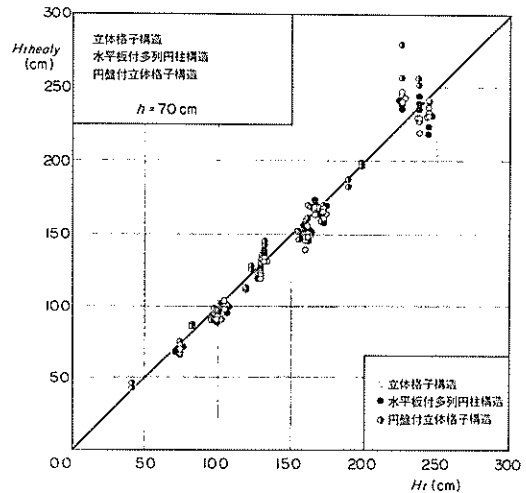
$H_{i,theory}$ と良い一致を示している。しかし、波高が大きい場合には、 $H_{i,theory}$ に対して有限振幅性に対する補正を施しているにもかかわらず、両者の一致度は多少悪くなっているのが認められる。

② 立体骨組構造内

前出の図一13～17には、実験で得られた立体骨組構造内の波高分布のほか、後出の6.1の(1)で述べる立体骨組構造の透過率を与える式より、列ユニット数 m を変数として求めた各列ユニット透過後の推定波高比を実線で示している。

図一13, 14, 17にみられるように相対堤体幅 l/L が $1/4 \sim 3/8$ より小さいとき、立体骨組構造内の波高比は直線的に減少する。また、その値は実線で示した推定波高比より大きな値を示している。逆に、相対堤体幅が $1/4 \sim 3/8$ より大きくなると、図一15, 16にみられるように波高比分布は波動性を帯びてきて、しかもその値は推定波高比より小さくなる所が現われてくる。この波動性を帯びた波高比分布は、立体骨組構造後面に近づくにしたがい、実線で示した推定波高比分布曲線に漸近し、その振幅も減少している。

こうした波動性について Costello¹³⁾ は、円筒杭が格子状に鉛直に配列された透過性構造物内 ($D/s = 0.375$) の場合、その前面より $x/L \leq 0.16$ の範囲では、波高が比較的急激に減少し全エネルギー損失量の40～80%がここで生じ、波形勾配が小さい場合には $x/L = 2/3$ 近傍で、また波形勾配が普通の値の場合には $x/L = 1/3$ 近傍で波高が再び上昇する傾向にあることを述べている。また、近藤・藤間¹⁴⁾ は透過性防波構造物内の波高分布に



図一19 H_i と $H_{i,theory}$ の相関 (多列円柱構造以外の構造)

おいて、構造物前面で腹、後面で節となるような一種の定常波型の波高分布を形成すると報告している。

③ 伝達波領域

伝達波領域では3.4の(2)で述べたように2測点で伝達波高の測定を行った。水路端には消波装置が設置されているため伝達波に対する反射の影響は少ないが、2測点での伝達波高の値には若干の差が見られる。図中の実線は6.1の(1)で述べる立体骨組構造の透過率を与える式より求めた推定透過率である。

4.2 反射率

(1) 構造別の反射率

図一20は同一の円柱間隔 ($D/s = 0.22$) を持つ各種立体骨組構造についての反射率 K_R を、横軸に相対堤体幅 l/L をとって示した図である。波浪条件は多列円柱構造、立体格子構造、水平板付多列円柱構造 ($d/h = 0.286$) の場合は前出の表一5に示している全ての波浪条件を、円盤付立体格子構造の場合は表一6に示している全ての条件を含んでいる。

この図から、相対水深、波形勾配の影響は不明ではあるが、多列円柱構造、立体格子構造、円盤付立体格子構造の場合、相対堤体幅 l/L が0.2近傍で最大の反射率となり、0.4近傍で最小の反射率となることがわかる。近藤・藤間¹⁵⁾ はこのような変化を、構造物内での共振現象によるためと報告している。しかし、この3種類の立体骨組構造とも、それぞれ反射率の変化はそれほど著しくなく、反射率の最大値と最小値の差は個別のデータで約

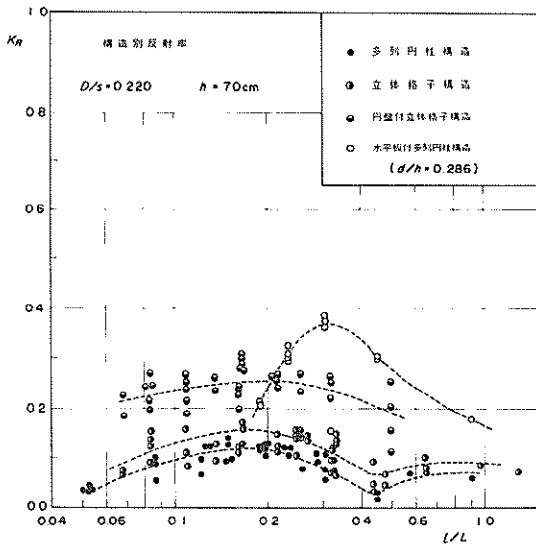


図-20 各種立体骨組構造の反射率 ($D/s = 0.220$)

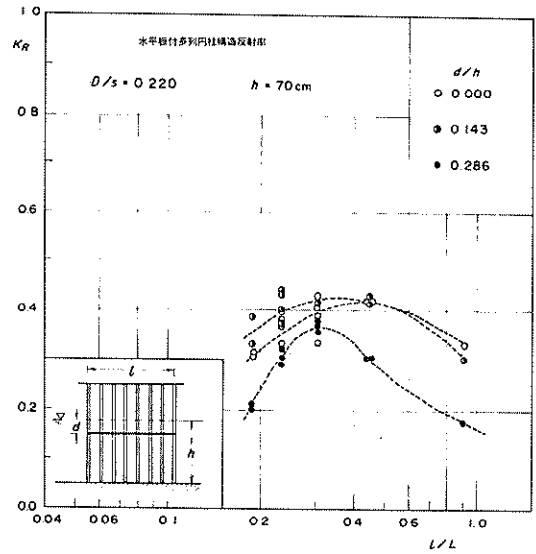


図-21 水平板付多列円柱構造の反射率

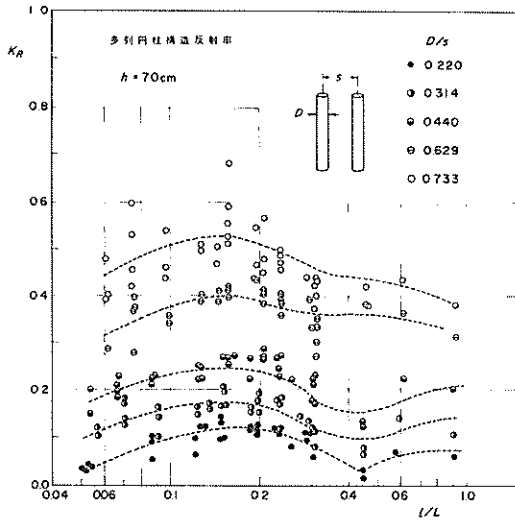


図-22 多列円柱構造の反射率

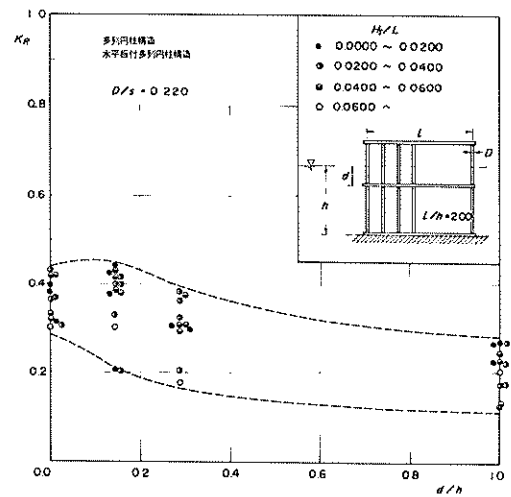


図-23 水平板の相対設置深さと反射率の関係

0.2 以下、各構造の平均的変化曲線の約 0.1 以下である。水平板付多列円柱構造の場合は、相対堤体幅が 0.2~1.0 の範囲の結果しかないが、相対堤体幅 l/L が 0.3 近傍で最大の反射率を示しており、平均的に他の立体骨組構造より反射率はやや大きい。

図-21は、多列円柱構造の種々の D/s の条件について反射率 K_R を、横軸に相対堤体幅 l/L をとり示した図である。当然のことながら、 D/s が大きくなるにしたがい、反射率 K_R は大きくなっている。しかし、各円柱間隔

それぞれの場合についての分布の傾向は先に述べた $D/s = 0.220$ の場合と同様である。

図-22は水深 h に対する水平板と静水面との距離 d の比、すなわち水平板の相対設置深さ d/h を 3 種類に変えて行った実験の反射率 K_R を、横軸に相対堤体幅 l/L をとり示したものである。先に $d/h = 0.286$ の場合については触れたが、 $d/h = 0.0$ および 0.143 の場合についても同様なことが言える。すなわち、相対堤体幅 l/L が 0.3 近傍のとき、最大の反射率を生じることがわかる。

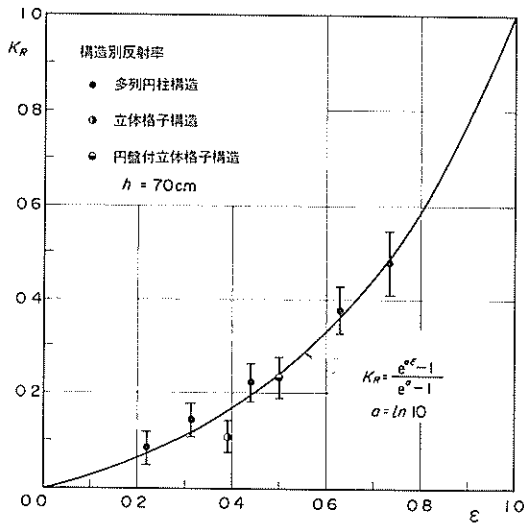


図-24 締め切り率と反射率の関係

図-23は横軸に相対設置深さ d/h をとり、波形勾配別に反射率 K_R を示したものである。 $d/h = 1.0$ の場合は水平板が水底にあるときで多列円柱構造の結果である。図からわかるように、相対設置水深 d/h が大きくなるにしたがい反射率はやや減少する傾向にある。

(2) 反射率の推定式

以上、反射率の実験結果について述べたが、ここで水平板付多列円柱構造を除く各立体骨組構造の反射率の推定式を求めておく。まず、各構造についての締め切り率 ϵ を次のように定義する。

多列円柱構造：

$$\epsilon = \frac{D}{s} \quad (45)$$

立体格子構造：

$$\epsilon = \frac{n(2sD - D^2)}{sh} \quad (46)$$

円盤付立体格子構造：

$$\epsilon = \frac{n\pi R^2}{sh} \quad (47)$$

これは静水面以下の立体骨組構造前面の総面積に対する部材の波の進行方向への投影面積の比であるが、円盤付立体格子構造の場合には円盤のみの投影面積を考えたものである。

図-24には、この締め切り率 ϵ を横軸にとり、相対

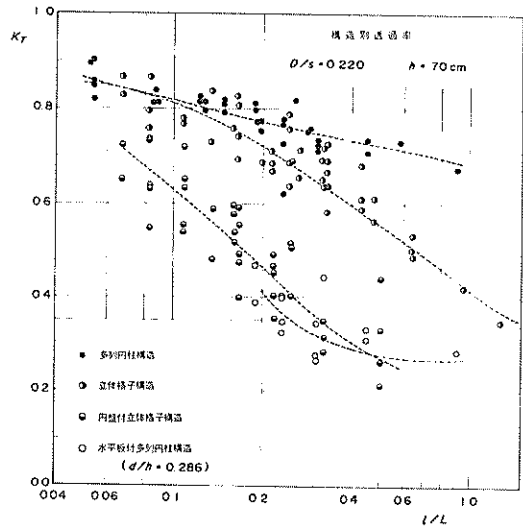


図-25 各種立体骨組構造別の透過率

堤体幅、相対水深、波形勾配の区別を考えず、反射率の全データを平均した値をプロットし、その上下にその標準偏差を示したものである。ここに、各締め切り率ごとのデータ数は多列円柱構造の場合 36、立体格子構造の場合 48、円盤付立体格子構造の場合 40 である。これからわかるように立体骨組構造の反射率 K_R は、おもにその構造の締め切り率 ϵ によって決まる。そこで、立体骨組構造の反射率の実験式として次式を考える。

$$K_R = \frac{e^{a\epsilon} - 1}{e^a - 1} \quad (48)$$

ここに、

$$a = \ln 10 \quad (49)$$

図-24中の実線は、式(48)による推定反射率である。多列円柱構造、円盤付立体格子構造の場合は実験値と良い一致を示すが、立体格子構造の場合は実験値よりやや大きめの値を与えている。

なお、水平板付多列円柱構造の場合、特に本実験で用いた構造のように締め切り率 ϵ が小さい場合には、反射は円柱部材による締め切り効果より、水平板による効果が大きいと考えられる。したがって、式(48)は水平板のように構成部材の締め切り効果以外の機構で反射を生じさせる部材を有した透過堤構造物には不相当である。また、波の進行方向に部材が数列しかない幅の狭い条件に対して適用できない。

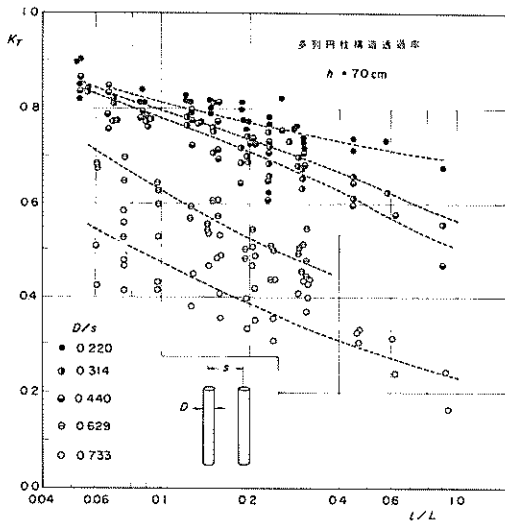


図-26 多列円柱構造の透過率

4.3 透過率

図-25は同一の円柱間隔 ($D/s = 0.220$) を持つ各種の構造について、横軸に相対堤体幅をとり透過率を示した図である。各構造とも相対堤体幅が大きくなるにしたがい透過率は減少していることがわかる。構造別では円盤付立体格子構造および水平板付多列円柱構造 ($d/h = 0.286$) の透過率が低い。

図-26は多列円柱構造の場合について各種の D/s の条件での透過率を示した図である。透過率は D/s が大きくなるにつれて減少することがわかる。

写真-5, 6は多列円柱構造 ($D/s = 0.314$, $l = 140$ cm), および円盤付立体格子構造 ($D/s = 0.220$, $R = 4.0$ cm, $l = 100$ cm) の波の作用状況を示したものである。いずれも波浪条件は周期 $T = 2.0$ s, 入射波高 $H_i = 23.8$ cm, 波長 $L = 462$ cm, 波形勾配 $H_i/L = 0.0515$ の例である。

図-27は水平板付多列円柱構造について、水平板の相対設置深さ d/h を3種類にかえて行った実験の透過率 K_T を、横軸に相対堤体幅 l/L をとり示したものである。一般に l/L が大きくなるにしたがって、透過率は減少している。特に $d/h = 0$ の場合は、 $l/L = 0.3$ 近傍で急激に透過率が減少している。この図から波形勾配、相対水深による影響に関しては不明であるが、本実験の波浪条件のもとで透過率を40%以下におさえるためには、 $0.4L$ 以上の堤体幅を必要とすることがわかる。

図-28は同じ実験結果を横軸に水平板の相対設置深

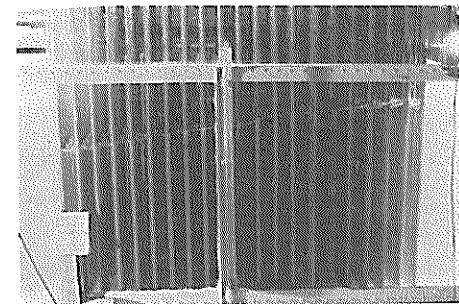
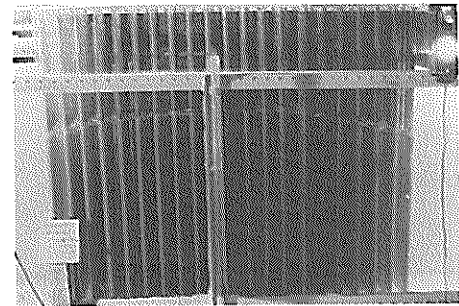
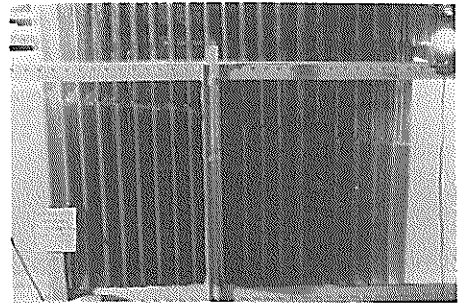
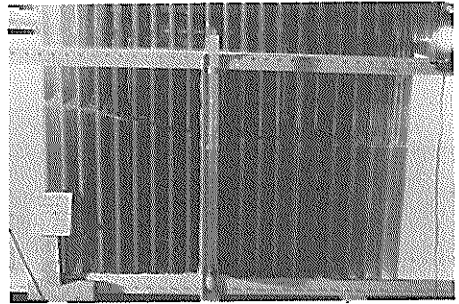
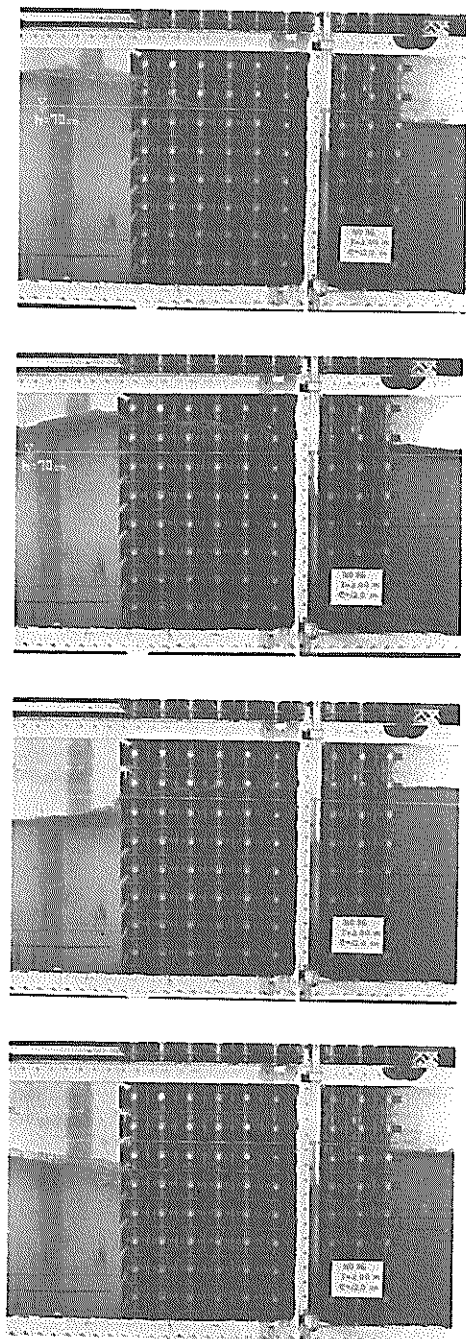
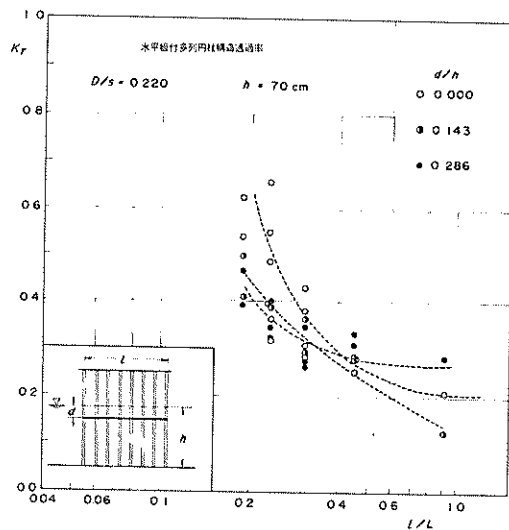


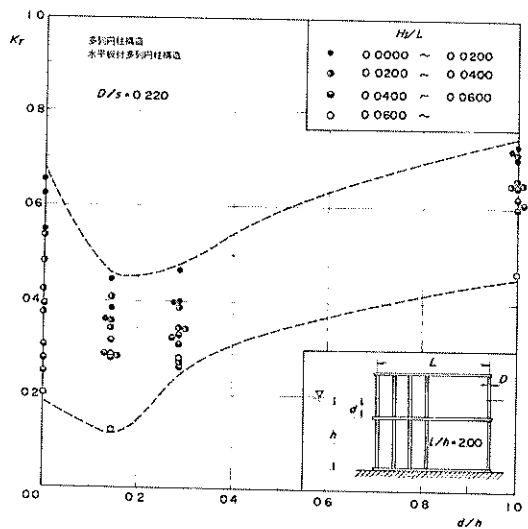
写真-5 多列円柱構造内の波の透過状況 ($D/s = 0.314$, $l = 140$ cm, $H_i/L = 0.0515$)



写真一六 円盤付立体格子構造内の波の透過状況
 $(D/s = 0.220, l = 100 \text{ cm}, R = 4.0 \text{ cm}, H_i/L = 0.0515)$



図一27 水平板付多列円柱構造の透過率



図一28 水平板の相対設置深さと透過率の関係

さ d/h をとり、波形勾配をパラメーターとして示したものである。透過率を最少とする相対設置深さがあることが認められ、本実験のもとでは $d/h = 0.143$ のとき最小となっている。

5. 見掛け抗力係数の決定と実験値との比較

5.1 見掛け抗力係数の決定

2.2の(3)において、立体骨組構造の透過率の基本式を示したが、式に含まれている反射率 K_R については既

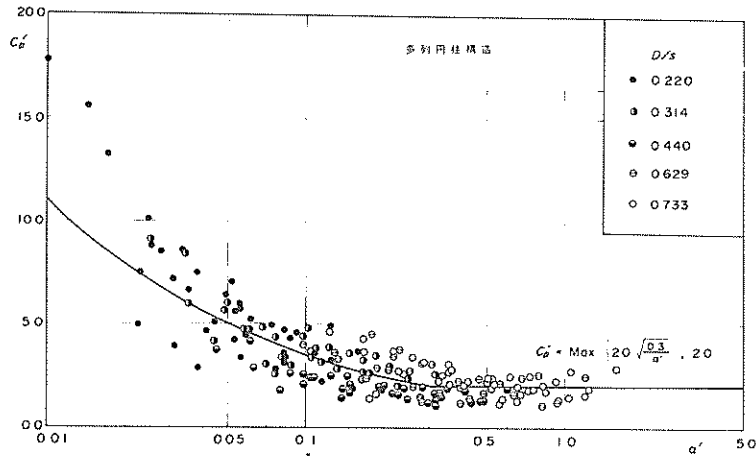


図-29 α' と C_D' の関係 (多列円柱構造)

に 4.2 の(2)で実験結果より実験式として与えた。本章においては、抗力係数 C_D を検討する。

類似の構造物の抗力係数を検討した例としては、小舟・高橋・谷本¹⁶⁾による多列円筒浮体 ($D/s=0.5$, $d/h=0.243 \sim 0.355$, ここに d は円筒の静水時の没水深さ) に対する実験がある。これは浮体に働く津波力を検討したものであるが、流速と力を測定することによって直接抗力係数を求め、 $C_D = 0.45 \pm 0.25$ の結果を得ている。そして、この C_D の平均値を用いて透過波を本研究と同じ考え方で推定しており、測定値とよく一致することを示している。また、高山・菊地・西田は同様な円筒支持浮体 ($D/s = 0.467$, $d/h = 0.350$) の通常の波 ($h/L = 0.118 \sim 0.288$) による透過率を、抗力によるエネルギー損失を考えて検討した。その結果、実験値に適合するようにするためには $C_D = 2.0$ とするのがよいことを示した。この両者の C_D の値が著しく異なっているが、これは測定法の違いによるほか、対象としている波の周期が著しく異なり、前者では円筒の占有する部分に含まれる波のエネルギー輸送率が全エネルギー輸送率の $0.243 \sim 0.355$ にすぎず大部分のエネルギーが円筒下の部分を透過するのに対し、後者ではそれが $0.390 \sim 0.634$ であるといった違いが影響しているものと考えられる。

一方、合田・Ippen は、ワイヤーメッシュフィルターの透過率の実験において、Reynolds 数が 10^3 より大きいとき抗力係数 C_D はほぼ一定であり、 $C_D = 1.8$ となることを示している。また、Reynolds 数が 10^3 より小さいとき抗力係数 C_D は Reynolds 数により変化するとし、次の式を与えている。

$$C_D = C_D' \left(\frac{UD}{\nu} \right)^\beta \quad (50)$$

ここに、

$$C_D' = 19$$

$$\beta = -0.5$$

ν : 動粘性係数

本研究においては、立体骨組構造を対象として測定した透過率 K_T および反射率 K_R を用いて、式 (36), (37), (38) より抗力係数 C_D を逆算してみる。しかし、こうして得た抗力係数 C_D には本来の意味での抗力係数の他に、実際の現象と仮定との違いの影響が含まれていることになる。したがって、本来の意味での抗力係数というより、立体骨組構造の透過率を式 (36), (37), (38) のように表わしたときの実験係数と考えた方がよく、その意味でこれを見掛け抗力係数と呼び C_D' で表わすことにする。以下各構造の見掛け抗力係数について述べる。

① 多列円柱構造

多列円柱構造の場合、水平速度成分 u のみが作用する部材で構成されているため、式 (38) の α' の部材条件の項の中では S_2/S のみが関係し、

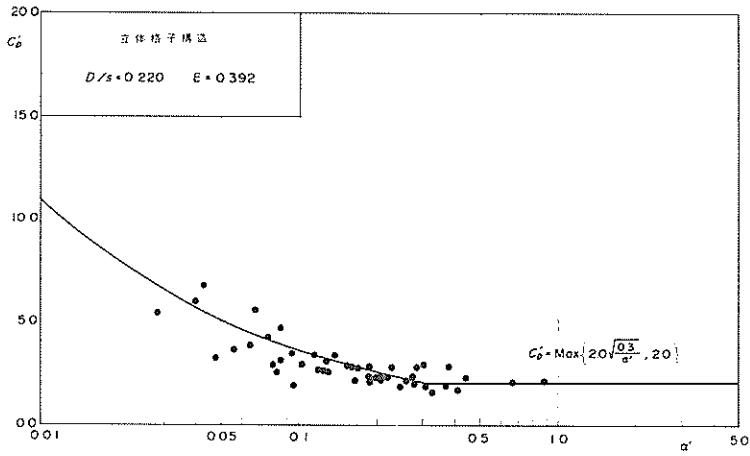
$$S_2 = Dh \quad (51)$$

$$S = sh \quad (52)$$

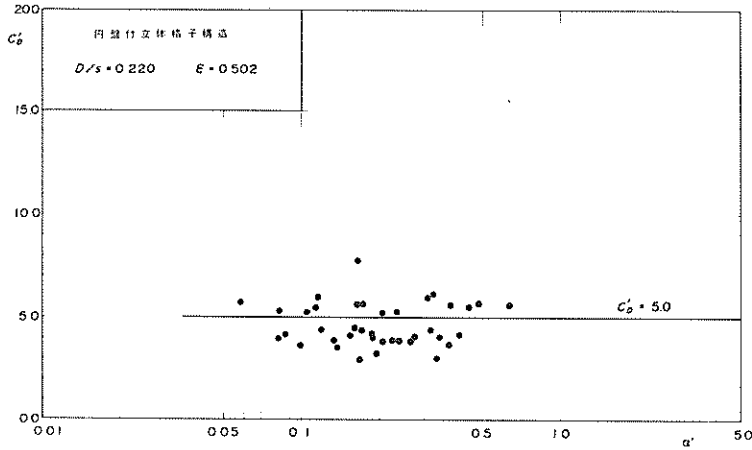
であるので、 α' は次式のようになる。

$$\alpha' = m \frac{H_L \sqrt{1-K_R^2}}{L} \frac{D}{s} F_2(kh) \quad (53)$$

この α' を用いて、式 (36) から C_D' を逆算し Reynolds 数や Keulegan-Carpenter 数等の種々のパラメーター



図—30 α' と C_b' の関係 (立体格子構造)



図—31 α' と C_b' の関係 (円盤付立体格子構造)

に対して整理してみたが、結局 α' に対して整理するのが一番よい結果となった。ただし、この逆算において K_R は測定値を用いている。図—29は多列円柱構造の α' と C_b' の関係を示したものである。この場合、 C_b' は α' が増加するとともに小さくなる傾向を有し、 $\alpha' \geq 0.3$ の条件ではほぼ一定値をとるように変化している。そこで、見掛け抗力係数 C_b' を次に示す式で与えることにした。

$$C_b' = \max \left\{ 2.0 \sqrt{\frac{0.3}{\alpha'}}, 2.0 \right\} \quad (54)$$

ただし、 $\max\{a, b\}$ は a または b のいずれか大の値を表わす。

図中の実線はこの式による α' と C_b' との間係である。

② 立体格子構造

立体格子構造の場合、水平速度成分 u のみ作用する部材、鉛直速度成分 v のみ作用する部材、水平速度成分 u かつ鉛直速度成分 v の作用する部材から構成されているため、 S_1/S 、 S_2/S 、 S_3/S が関係する。そこで、

$$S_1 = S_2 = S_3 = Dh \quad (55)$$

$$S = sh \quad (56)$$

とすると、立体格子構造のパラメーター α' は次式のようにになる。

$$\alpha' = m \frac{H/L \sqrt{1-K_R^2}}{L} \frac{D}{s} \left\{ F_1(kh) + F_2(kh) + F_3(kh) \right\} \quad (57)$$

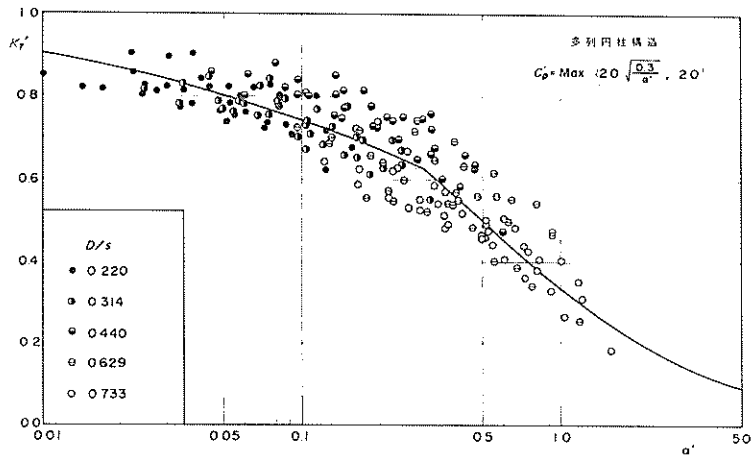


図-32 α' と C_b の関係 (多列円柱構造)

この α' を横軸にとり、見掛けの抗力係数 C_b を示したのが図-30である。この図からわかるように、 α' に対する C_b の傾向は多列円柱構造の場合と全く同じである。したがって、立体格子構造の見掛けの抗力係数 C_b を多列円柱構造と同様に式 (54) で与える。図-30中の実線は式 (54) の関係を示したものである。

③ 円盤付立体格子構造

本構造の場合も、立体格子構造と同様に S_1/S 、 S_2/S 、 S_3/S が関係する。そこで、

$$S_1 = Dh \quad (58)$$

$$S_2 = S_3 = Dh + n\pi R^2 \quad (59)$$

$$S = sh \quad (60)$$

とすると、円盤付立体格子構造のパラメーター α' は次式のようになる。

$$\alpha' = m \frac{H_1 \sqrt{1 - K_R^2}}{L} \left\{ \frac{D}{s} F_1(kh) + \frac{Dh + n\pi R^2}{sh} \left[F_2(kh) + F_3(kh) \right] \right\} \quad (61)$$

この α' を横軸にとり、見掛け抗力係数 C_b を示したのが図-31である。本構造の場合、 C_b は α' にかかわらずほぼ一定である。したがって、円盤付立体格子構造に対する見掛け抗力係数 C_b を次式で与える。

$$C_b = 5.0 \quad (62)$$

5.2 実験値との比較

① 多列円柱構造

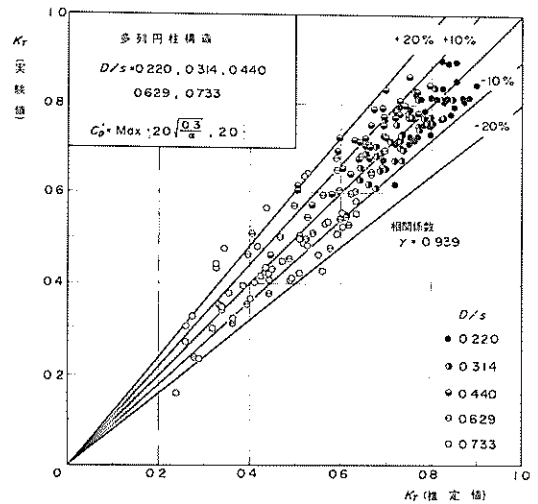


図-33 透過率の推定値と実験値の相関 (多列円柱構造)

図-32は α' に対して仮想透過率の測定値と計算値を示したものである。ここに、計算値の K_R の値については実験式 (48) の関係を用いている。 K_T の測定値はばらついているけれども α' によって、傾向的に変化し、計算値はほぼその平均的関係を表わしていることがわかる。なお、計算値の曲線の勾配が $\alpha' = 0.3$ で不連続になっているのは見掛けの抗力係数 C_b として式 (54) の実験式を用いたためである。さらに、図-33は透過率 K_T の実験式による推定値と実験値の相関を示した図である。実験値は推定値のほぼ $\pm 20\%$ の範囲に入っており、比較的良好一致を示している。この場合、相関係数 r を

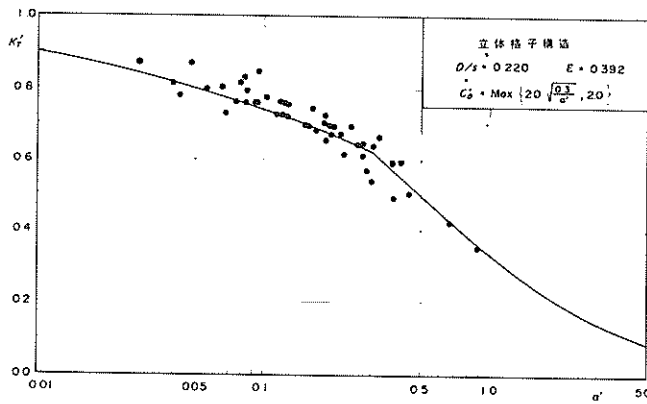


図-34 α' と K_r の関係 (立体格子構造)

求めてみると0.939である。

② 立体格子構造

図-34は α' に対する立体格子構造の仮想透過率を、図-35は透過率の推定値と実験値の相関図を同様に示したものである。この場合の相関係数 r は0.942であり、多列円柱構造より良い一致を示している。本構造の場合、透過率の実験値は推定値のほぼ $\pm 10\%$ の範囲に入っており、実験式によって $\pm 10\%$ の範囲で立体格子構造の透過率を推定できることがわかる。

③ 円盤付立体格子構造

円盤付立体格子構造に対する同様な比較を図-36、37に示す。この場合、相関係数 r は0.849と前述の2種類の立体骨組構造よりやや悪い。しかし、図よりわかるように透過率の実験値は実験式による推定値の $\pm 20\%$ の範囲に入っている。

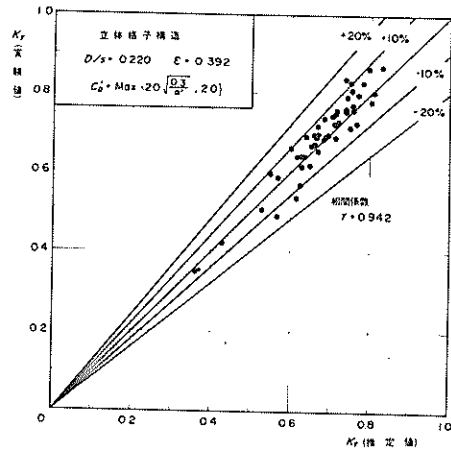


図-35 透過率の推定値と実験値の相関 (立体格子構造)

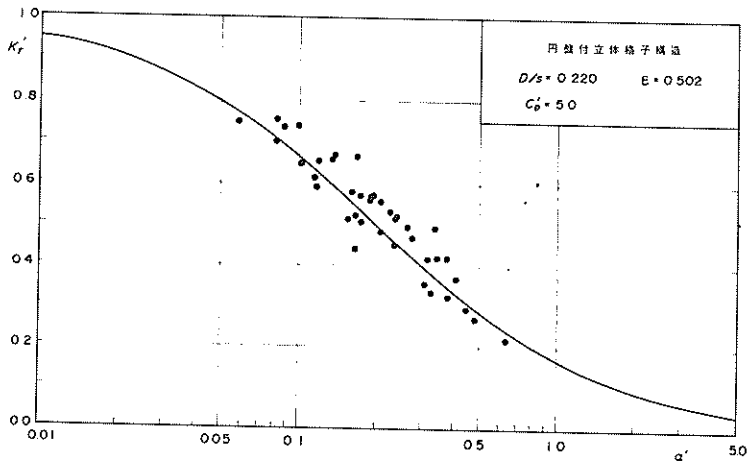
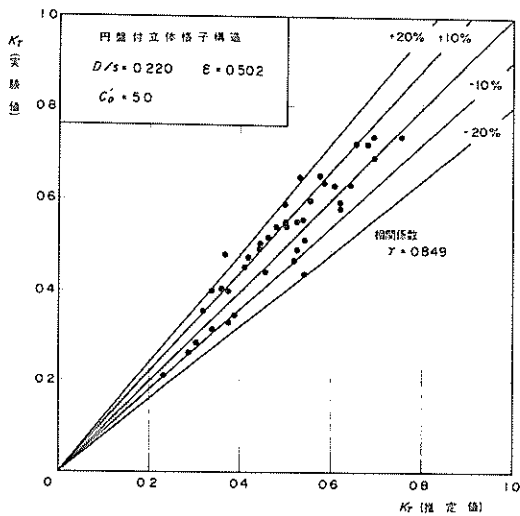


図-36 α' と K_r の関係 (円盤付立体格子構造)



図一37 透過率の推定値と実験値の相関(円盤付立体系格子構造)

5.3 既往実験結果との比較

以上、本実験の測定値と定数式による推定値の比較を行ったが、さらに既往の同種構造物に対する実験結果により検討してみる。既往実験としては、まえがきで触れたように Costello¹⁹⁾ および近藤・藤間²⁰⁾の研究がある。

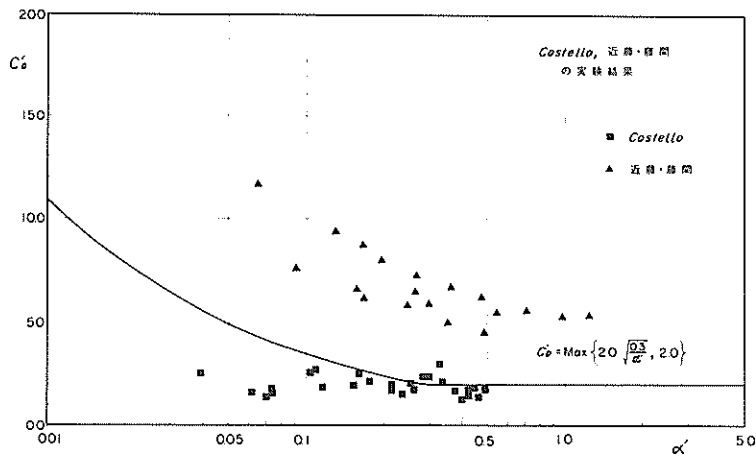
Costello の実験は直径 3/8 inches の鉛直円柱が波の進行方向、それと直交方向とも 1 inch の間隔 ($D/s = \epsilon = 0.375$) で、波の進行方向に 24 本設置された透過式構造物の透過率を求めたものであり、入射波の波形勾配は 0.01 ~ 0.02、相対水深は 0.208 ~ 0.611 の範囲であ

る。一方、近藤・藤間の実験は鉛直円柱と波の進行方向に直交する水平円柱が直径 $D (= 3.4 \text{ cm})$ に等しい間隔を持ち格子状に組まれた構造(本実験で用いた立体系格子構造から平行部材を取り除いた構造 ($D/s = 0.5$, $\epsilon = 0.75$))を対象として透過率を求めたもので、入射波の周期は 0.8 s ~ 1.4 s、入射波高は 1.2 cm ~ 10.0 cm の範囲である。

図一38は、これらの実験結果に対し式(36)より見掛け抗力係数を逆算して求めプロットしたものである。また、図一39は式(3)より求めた仮想透過率をプロットした図である。ここに、反射率の値は、近藤・藤間の場合は実測反射率を用い、Costello の場合は式(48)より推定した値を用いた。これらの図を見て次のことがわかる。Costello のデータによる C_b はほぼ 2.0 で一定であり、 a' の小さい条件で今回の結果よりやや小さい傾向にある。しかし、 K_T はそれほど違いがあるわけではなく、かなり良く一致しているということがいえる。これに対し、近藤・藤間のデータでは、見掛け抗力係数が a' に関して同様な変化の傾向を示すものの、値としては倍以上であり、したがって仮想透過率も大きく下回っている。これは、近藤・藤間の実験結果では反射率の値が式(48)で求めた値の約 37% ~ 70% と小さく、この反射率の違いとか、さらに構造条件の違いによるものと推定される。

6. 現地透過率の計算例

6.1 透過率の推定式と計算条件



図一38 a' と C_b の関係 (Costello, 近藤・藤間の実験結果)

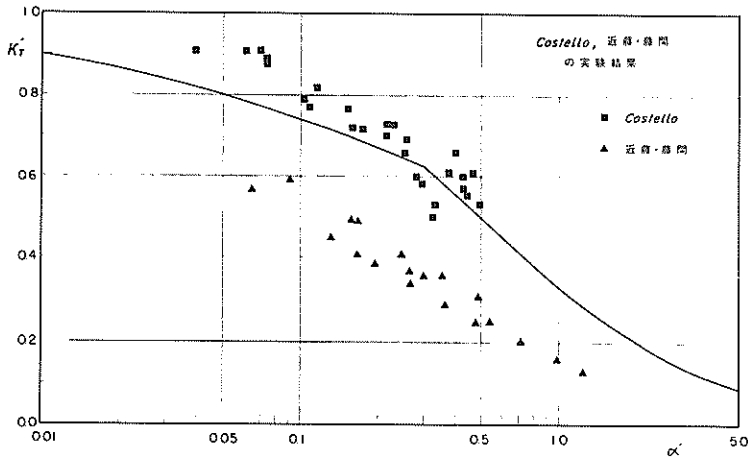


図-39 α' と K_T の関係 (Costello, 近藤・藤間の実験結果)

(1) 推定式のまとめ

本章においては、現地における立体骨組構造防波堤を想定し、種々の波浪条件、構造条件での透過率を推定してみる。まず、前章までにおいて求めた各種立体骨組構造の透過率の推定式をここでまとめておく。

$$K_T = \sqrt{1 - K_R^2} K_T' \quad (63)$$

$$K_T' = \frac{1}{1 + C_D' \alpha'} \quad (64)$$

$$K_R = \frac{e^{a\alpha} - 1}{e^a - 1}; \quad a = \ln 10 \quad (65)$$

$$C_D' = \begin{cases} \max \left\{ 2.0 \sqrt{\frac{0.3}{\alpha'}}, 2.0 \right\} & \left\{ \begin{array}{l} \text{多列円柱構造} \\ \text{立体格子構造} \end{array} \right. \\ 5.0 & \text{円盤付立体格子構造} \end{cases} \quad (66)$$

$$\alpha' = \alpha \sqrt{1 - K_R^2} \quad (67)$$

$$\alpha = m \frac{H_l}{L} \left\{ \frac{S_1}{S} F_1(kh) + \frac{S_2}{S} F_2(kh) + \frac{S_3}{S} F_3(kh) \right\} \quad (69)$$

(2) 計算条件

水深 h は 35 m を基本とし、水深の違いによる透過率の影響をみるため水深 50 m の計算例も一部示す。

波浪条件としては、二通りの方法で各立体骨組構造の透過率を求める。すなわち、波形勾配を一定として周期の変化による透過率の変化を見る計算と、波高を一定として周期の変化により透過率の変化をみる計算を行う。前者では波形勾配 H_l/L として 0.02, 0.03, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 の 6 種類、後者では波高 H_l として 2 m,

4 m, 6 m, 8 m, 10 m の 5 種類を選定した。

立体骨組構造の構造条件は次のような諸元とした。すなわち、立体骨組構造を構成する円柱部材の直径はすべて 1.1 m とし、円柱部材の間隔 (心間距離) s は、多列円柱構造の場合 1.5 m, 2.5 m, 5.0 m の 3 種、立体格子構造、円盤付立体格子構造の場合は 5.0 m の 1 種類とする。円盤付立体格子構造の円盤の半径 R は 2 m の 1 種である。また、波の進行方向への鉛直円柱数、すなわち列ユニット数 m としては 10 および 20 の 2 種類を基本とし、波浪条件を限定した計算ではこれを広く変化させた。

6.2 透過率の計算結果

(1) 波浪条件による透過率の変化

図-40(1)~42(2)は、波形勾配あるいは波高を一定として周期を変化させたときの各立体骨組構造の透過率を示した図である。図中の実線が波形勾配を、破線が波高を一定にしたときの透過率を表わしている。

このうち、図-40(1), 40(2)はともに $h=35$ m, $D=1.1$ m, $s=5.0$ m の多列円柱構造の透過率であるが、図-40(1)は $m=10$ 、図-40(2)は $m=20$ の場合である。この結果では、波形勾配が一定のとき周期が増加するにしたがい透過率はわずかに減少する傾向にある。一方、波高が一定の条件のもとでは、周期 T が増加するにしたがい透過率は増加するが、 $T=10$ s 程度より大きくなると透過率はほとんど一定となる。また、同一の周期に対しては、波高 H が大きくなるほど、すなわち波形勾配が大きくなるほど透過率は減少していること

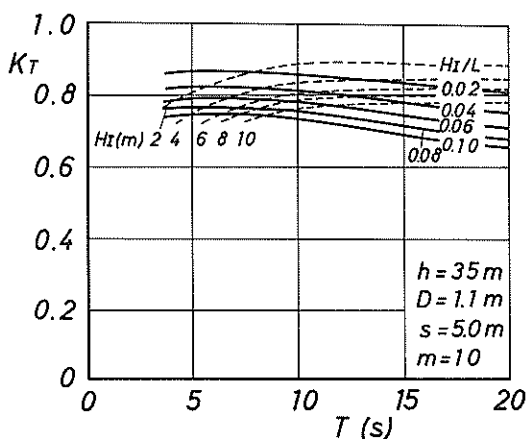


図-40(1) 透過率の計算例 (多列円柱構造 $m = 10$, $s = 5.0$ m)

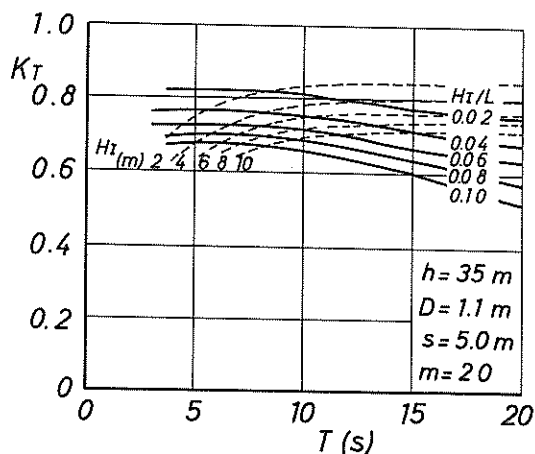


図-40(2) 透過率の計算例 (多列円柱構造 $m = 20$, $s = 5.0$ m)

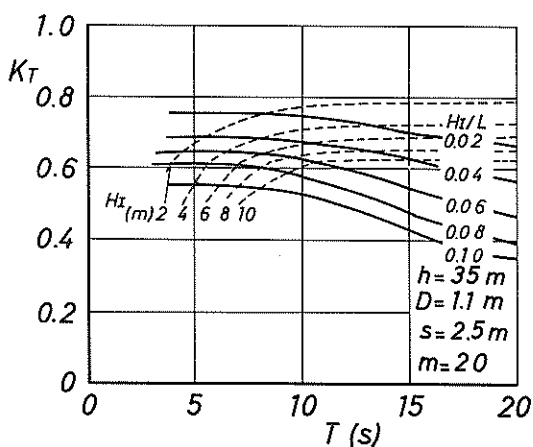


図-40(3) 透過率の計算例 (多列円柱構造 $m = 20$, $s = 2.5$ m)

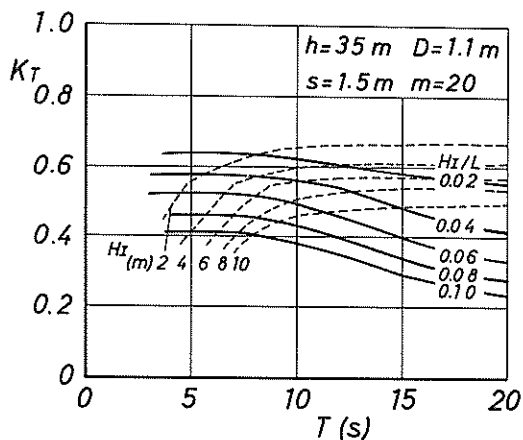


図-40(4) 透過率の計算例 (多列円柱構造 $m = 20$, $s = 1.5$ m)

がわかる。たとえば、 $m = 20$ 、 $T = 15$ s のとき、 $H_I/L = 0.02$ では $K_T = 0.78$ であるが、 $H_I/L = 0.10$ では $K_T = 0.59$ となっている。波の進行方向への鉛直円柱数 m 、換言すると堤体幅 l の影響については、当然のことながら $m = 20$ の透過率が $m = 10$ のときより全体に小さい。特に、この場合周期の長い波の減衰が周期の短い波の減衰よりやや大きいようである。

図-41(1)、41(2)は $h = 35$ m、 $D = 1.1$ m、 $s = 5.0$ m の立体格子構造の $m = 10$ および $m = 20$ のときの透過率である。本構造の場合、波形勾配が一定の条件のもとでは、透過率は $m = 10$ 、 $m = 20$ の場合とも $T = 10$ s 近傍で最大となっているものの、 $T = 5$ s ~ 20 s 範囲

では透過率の差はそれほど大きくない。たとえば $m = 20$ 、 $H_I/L = 0.04$ の場合、 $T = 5$ s ~ 20 s の入射波に対して $K_T = 0.55 \sim 0.62$ である。また、波高が一定の条件のもとでは、 $m = 10$ 、 $m = 20$ の場合とも周期が 5 s ~ 15 s にかけて透過率の増加が大きい、周期が 15 s より大きくなると透過率はほとんど一定となる。

なお、多列円柱構造や立体格子構造の場合、図-40(1)~図-41(2)にみられるように透過率の推定曲線に折れ曲がり点が生じる。これは C_0 を式(54)のように α' の条件によって $1/\sqrt{\alpha'}$ に比例する領域と一定値の領域に分けて与えているためである。

図-42(1)、42(2)は $h = 35$ m、 $D = 1.1$ m、 $s = 5.0$

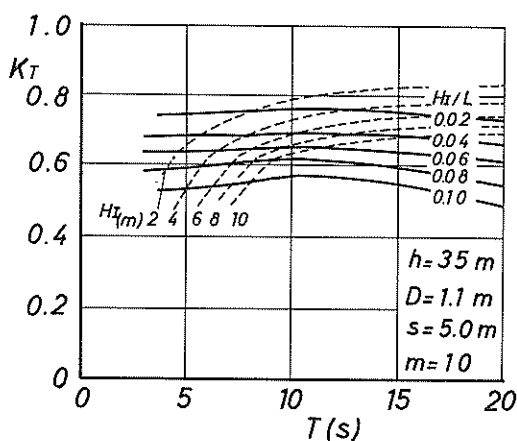


図-41(1) 透過率の計算例 (立体格子構造 $m = 10$, $s = 5.0 \text{ m}$)

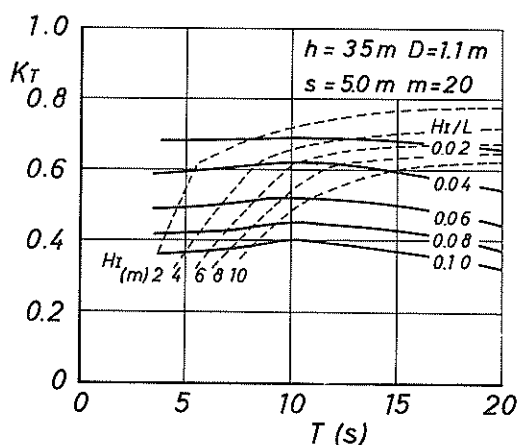


図-41(2) 透過率の計算例 (立体格子構造 $m = 20$, $s = 5.0 \text{ m}$)

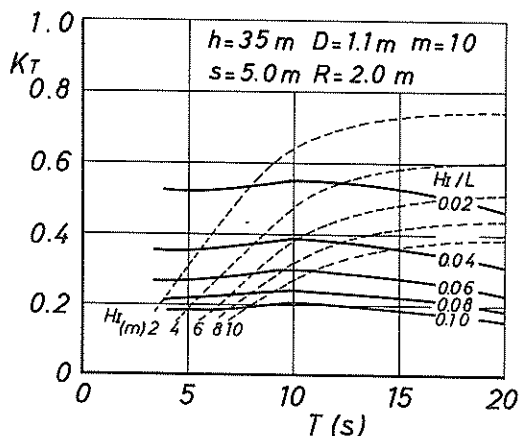


図-42(1) 透過率の計算例 (円盤付立体格子構造 $m = 10$, $s = 5.0 \text{ m}$, $R = 2.0 \text{ m}$)

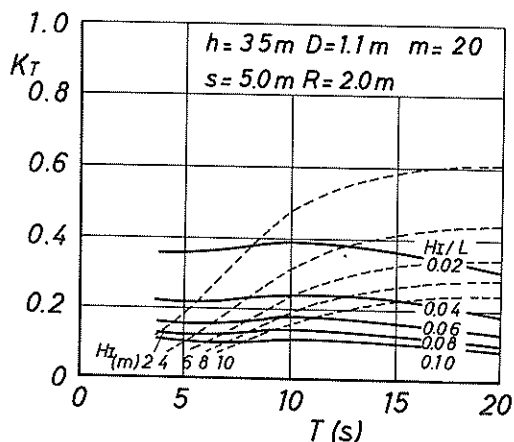


図-42(2) 透過率の計算例 (円盤付立体格子構造 $m = 20$, $s = 5.0 \text{ m}$, $R = 2.0 \text{ m}$)

m , $R = 2.0 \text{ m}$ の円盤付立体格子構造の $m = 10$, および $m = 20$ の場合の透過率である。波形勾配が一定の条件のもとでは、立体格子構造の場合と同様に $m = 10$ および $m = 20$ の場合とも $T = 10 \text{ s}$ 近傍で透過率は最大となっている。しかし、透過率の差は大きくなく、たとえば $m = 20$, $H_t/L = 0.04$ では $T = 5 \text{ s} \sim 20 \text{ s}$ の波に対して $K_T = 0.19 \sim 0.25$ である。波高が一定の条件のもとでは、 $T = 5 \text{ s} \sim 15 \text{ s}$ において透過率の増加は顕著であるが、周期がそれより大きくなるとほとんど一定となる。

以上、3種類の立体骨組構造について波浪条件による透過率の違いを述べたが、一般に波形勾配を一定とした条件のもとでは本計算条件の範囲の場合、周期による透

過率の違いは顕著でなく、波形勾配が小さくなるにしたがって透過率は大きくなるといえる。このことは波高を一定とした条件のもとで、周期が大きくなるにしたがって透過率が大きくなることからわかる。

(2) 構造条件による透過率の変化

ここでは構造条件が透過率に与える影響をみている。まず、多列円柱構造についてその円柱間隔が変化した場合を考える。前出の図-40(2), 40(3), 40(4)は $h = 35 \text{ m}$, $D = 1.1 \text{ m}$, $m = 20$ の多列円柱構造の $s = 5 \text{ m}$, 2.5 m , 1 m の場合の透過率を示している。これらの結果を比較すると、波形勾配が一定の条件のもとでは s が小さいほど、周期が大きくなることによる透過率の減少は大きいことがわかる。たとえば、 $s = 5 \text{ m}$ の場合、 $H_t/L = 0.04$,

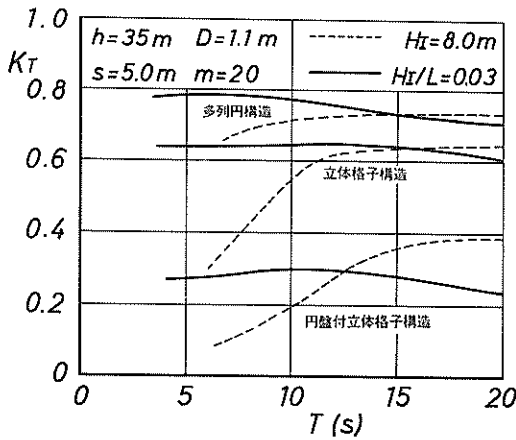


図-43(1) 透過率の計算例 (各種構造別 $h = 35\text{m}$)

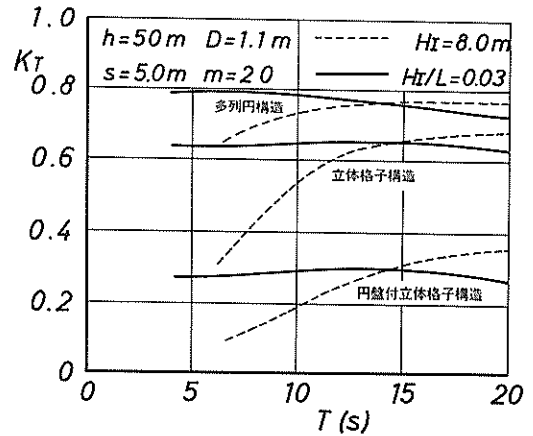


図-43(2) 透過率の計算例 (各種構造別 $h = 50\text{m}$)

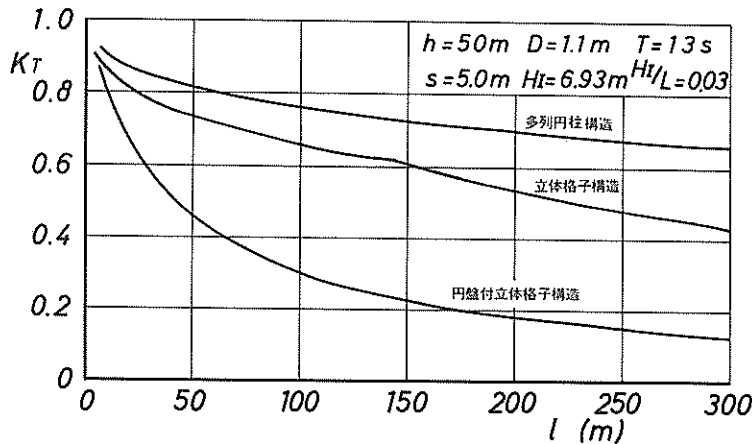


図-44 堤体幅と透過率の関係 (各種構造別 $h = 50\text{m}$)

$T = 5\text{s}$ では $K_T = 0.764$ であるが $H_I/L = 0.04$, $T = 20\text{s}$ となると $K_T = 0.676$ となり、透過率は 0.088 減少する。一方、 $s = 1.5\text{m}$ の場合、 $H_I/L = 0.04$, $T = 5\text{s}$ では $K_T = 0.573$ であるが、 $H_I/L = 0.04$, $T = 20\text{s}$ となると $K_T = 0.417$ となり、透過率は 0.156 減少する。このように円柱間隔が狭くなると周期による透過率の差は大きくなるといえる。

次に3種類の立体骨組構造間の透過率の違いを調べるため、波形勾配を 0.03 あるいは波高を 8m と一定として周期を変化させたときの透過率を1枚の図に比較して示す。図-43(1)は $h = 35\text{m}$, $s = 5.0\text{m}$, $D = 1.1\text{m}$, $m = 20$ の場合の各構造の透過率である。 $H_I/L = 0.03$ のときの透過率は多列円柱構造の場合 $0.71 \sim 0.79$, 立体格子構

造の場合 $0.61 \sim 0.65$, 円盤付立体格子構造の場合 $0.23 \sim 0.30$ である。このように本条件のもとでは、円盤付立体格子構造の透過率は立体格子構造の約半分であることがわかる。また、 $H_I = 8\text{m}$, $T = 10\text{s} \sim 15\text{s}$ の波が入射したときの透過率は、多列円柱構造の場合 $0.72 \sim 0.73$, 立体格子構造の場合 $0.54 \sim 0.63$, 円盤付立体格子構造の場合 $0.19 \sim 0.27$ である。この波浪条件のもとでも、円盤付立体格子構造の透過率は立体格子構造の半分であることがわかる。

図-43(2)は構造条件はそのまま、水深 h のみを 50m とした場合の透過率である。図-43(1)と比較することにより、透過率に対する水深の影響をみるができる。周期が約 10s 以上のところで、 $H_I/L = 0.03$ と一

定としたとき、 $h = 50$ m の透過率がやや大きくなり、 $H_t = 8$ m と一定としたときには逆にやや小さくなる傾向が認められるが、この程度の水深の違いでは透過率に大差はないといえる。

最後に、列ユニット数 m 、すなわち堤体幅 l を変化させたときの透過率を示す。図-44は $h = 50$ m、 $T = 13$ s、 $H_t = 6.93$ m ($H_t/L = 0.03$)、 $s = 5.0$ m、 $D = 1.1$ m の条件の場合の各構造の透過率である。この場合、多列円柱構造、立体格子構造の透過率は $l = 300$ m でもそれぞれ 0.65、0.43 であるが、円盤付立体格子構造では $l = 65$ m で 0.40 となる。

7. むすび

本研究による主要な結果をまとめると以下のとおりである。

- ① 抗力仕事によるエネルギー消費の考え方に基づいて、立体骨組構造の透過率 K_T の基本式を次のように表わした。

$$K_T = \sqrt{1 - K_R^2} / (1 + C_D' \alpha')$$

ここに、 K_R は反射率、 C_D' は本基本式で透過率を推定するための見掛けの抗力係数、 α' は構造条件、波浪条件によって決まるパラメータである。

- ② 反射率 K_R は、波の進行方向にある程度の列数があるとき、波の進行方向の直角面上での単位列部材の投影面積が占める比率、すなわち締め切り率 ϵ によってほぼ決まり、次の実験式を得た。

$$K_R = (e^{\alpha \epsilon} - 1) / (e^{\alpha} - 1)$$

ここに、

$$\alpha = \ln 10$$

これによると、締め切り率が 0.5 であっても反射率は 0.24 であり、立体骨組構造の反射率は一般に小さい。

- ③ 見掛け抗力係数 C_D' について次のような実験式を得た。

多列円柱構造、立体格子構造；

$$C_D' = \max \{ 2.0 \sqrt{0.3/\alpha'}, 2.0 \}$$

円盤付立体格子構造；

$$C_D' = 5.0$$

- ④ 透過率の実験値は推定式より求めた値のほぼ ± 20

% の範囲に入っている。

- ⑤ 本研究で得た推定式をそのまま適用して、現地条件に対する透過率の計算を行ってみた結果によると、たとえば水深 50 m で、周期 13 s、波高 6.93 m の波に対して、直径 1.1 m の円柱を 5 m 間隔で並べた多列円柱構造では、波の進行方向の幅が 300 m でも透過率は 0.65、これに水深方向にも 5 m 間隔で縦横に円柱部材を加えた立体格子構造とすると幅 300 m で透過率は 0.43 であるのに対して、立体格子構造の各格子間中央に半径 2 m の薄円盤を取り付けた円盤付立体格子構造では幅約 65 m で透過率が 0.4 となる。

- ⑥ 本研究では透過率推定式を得るには至らなかったが、多列円柱構造の水面下に 1 枚の水平板を取り付けた水平板付多列円柱構造の実験結果によると、透過率は円盤付立体格子構造とほぼ同程度であり、水平板の防波機能の活用が期待される。

以上、二・三の立体骨組構造の透過率に関する実験的研究の結果を述べた。一般に、この種の構造では部材の密度を高く、かつ幅を広くしていけば透過率を小さくすることができるから、これが海域利用等の沖合大水深防波堤として成り立つかどうかはその経済性にかかっている。今後、ケース・スタディなどによって具体的に検討していくことが必要である。もちろん、防波堤として実用に供していくためには、作用波力を始め、構造強度の面からの検討、耐久性、施工性など幾多の課題が残されていることはいうまでもない。特に、部材密度を増せば作用波力が増大する。本研究で定めた見掛け抗力係数は必ずしも波力のための抗力係数と一致しないけれども、一応この値を参照すれば、円盤付立体格子構造は円盤が付かないものの 2.5 倍の係数値である。さらに、投影面積の差を考えると円盤付立体格子構造には相当大きな波力が働くと推測される。また、透過率に関しても不規則波について検討することが必要である。

なお、本研究の実施にあたっては、初期の段階で高橋重雄水工部主任研究官の協力を得た。また、研究の全体を通して合田良実水工部長から貴重な御助言を頂いた。ここに記して、厚くお礼を申し上げる次第である。

(1981年6月30日受付)

参考文献

- 1) Costello, R. D. : Damping of water waves by vertical circular cylinders, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 33-4, 1952, pp. 513~519

- 2) 近藤俊郎・藤間 聡：透過性防波堤の水理特性（第2報），第18回海岸工学講演会論文集，1971，pp. 131～136
- 3) Goda, Y. and A. T. Ippen : Theoretical and experimental investigation of wave energy dissipators composed of wire mesh screens, MIT report, No. 60, 1963, 66 p.
- 4) 井島武士・江口泰彦・小林 彰：透過性防波堤と岸壁に関する研究，第18回海岸工学講演会論文集，1971，pp. 121～130
- 5) 近藤俊郎：透過性防波堤の伝達波，第16回海岸工学講演会講演集，1969，pp. 321～327
- 6) 近藤俊郎・藤間 聡：透過性防波構造物の水理特性，第17回海岸工学講演会論文集，1970，pp. 155～162
- 7) 前出2)に同じ
- 8) 近藤俊郎・藤間 聡・浅野潤一：透過性防波構造物の水理特性（第3報），第19回海岸工学講演会論文集，1972，pp. 193～197
- 9) 前出3)に同じ
- 10) 高山知司・菊地 治・西田一彦：大型浮遊構造物による波の反射および透過に関する模型実験，第26回海岸工学講演会論文集，1979，pp. 466～470
- 11) Goda, Y. and Y. Abe : Apparent coefficient of partial reflection of finite amplitude waves, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 7, No. 3, 1968, 58 p.
- 12) 伊藤喜行・千葉 繁：浮防波堤の水理に関する近似理論と応用，港湾技術研究所報告，第11巻第2号，1972，pp. 137～166
- 13) 前出1)に同じ
- 14) 前出2)に同じ
- 15) 前出2)に同じ
- 16) 小舟浩治・高山知司・谷本勝利：多列円筒浮体に働く津波力の算定法について，港湾技術研究所報告，第18巻第2号，1979，pp. 3～26
- 17) 前出10)に同じ
- 18) 前出3)に同じ
- 19) 前出1)に同じ
- 20) 前出2)に同じ

記号一覧表

A_1	: ユニット内における直交部材の合成流速方向への投影面積	q	: ユニットの z 軸方向の長さ
A_2	: ユニット内における鉛直部材の x 軸方向への投影面積	R	: 円盤の半径
A_3	: ユニット内における平行部材の z 軸方向への投影面積	r	: ユニットの x 軸方向の長さ
a_i	: 通過入射波振幅	S	: 静水面以下の立体骨組構造前面面積
a'_i	: 仮想通過入射波振幅	S_1	: 列ユニット内における直交部材の合成流速方向への投影面積
a_R	: 反射波振幅	S_2	: 列ユニット内における鉛直部材の x 軸方向への投影面積
a_T	: 伝達波振幅	S_3	: 列ユニット内における平行部材の z 軸方向への投影面積
C_D	: 抗力係数	s	: ユニットの y 軸方向の長さ
C'_D	: 見掛け抗力係数	T	: 入射波周期
c_g	: 入射波の群速度	u	: 水粒子水平速度成分
D	: 円柱部材の直径	u_i	: i 列目の列ユニット内の水平速度成分
\overline{E}_{Loss}	: 単位時間あたりの平均エネルギー損失	u_{ij}	: (i, j) ユニット内の水平速度成分
F	: 部材に働く波力	v	: 水粒子鉛直速度成分
F_D	: 部材に働く抗力	v_i	: i 列目の列ユニット内の鉛直速度成分
F_I	: 部材に働く慣性力	v_{ij}	: (i, j) ユニット内の鉛直速度成分
F_{Hij}	: (i, j) ユニットの直交部材の抗力	\overline{W}_i	: i 列目のユニットによる単位幅、単位時間あたりの平均エネルギー損失量
F_{Vij}	: (i, j) ユニットの鉛直部材の抗力	\overline{W}_{H_i}	: i 列目の列ユニットの直交部材による単位幅、単位時間あたりの平均エネルギー損失量
F_{Pij}	: (i, j) ユニットの平行部材の抗力	\overline{W}_{V_i}	: i 列目の列ユニットの鉛直部材による単位幅、単位時間あたりの平均エネルギー損失量
H_I	: 通過入射波波高	\overline{W}_{P_i}	: i 列目の列ユニットの平行部材による単位幅、単位時間あたりの平均エネルギー損失量
H'_I	: 仮想通過入射波波高	$\overline{W}_{H_{ij}}$: (i, j) ユニットの直交部材による単位幅、単位時間あたりの平均エネルギー損失量
H_R	: 反射波波高	$\overline{W}_{V_{ij}}$: (i, j) ユニットの平行部材による単位幅、単位時間あたりの平均エネルギー損失量
H_T	: 伝達波波高	$\overline{W}_{P_{ij}}$: (i, j) ユニットの平行部材による単位幅、単位時間あたりのエネルギー損失量
H_{Healy}	: Healy の方法で求めた分離入射波高 (ただし有限振幅性に対して補正した値)	w_0	: 流体の単位体積重量
H_{max}	: 反射波領域における合成波の最大波高	α	: 通過入射波高 H_I によるパラメーター
H_{min}	: 反射波領域における合成波の最小波高	α'	: 仮想通過入射波高 H'_I によるパラメーター
h	: 透過式構造物設置位置での水深	ε	: 立体骨組構造の締め切り率
i	: 波の進行方向への列ユニット番号	γ	: 推定透過率と実測透過率の相関係数
j	: 鉛直下方向へのユニット番号	σ	: 入射波の角周波数 ($2\pi/T$)
K_R	: 反射率	n_I	: 入射波波形
K_T	: 透過率	n_R	: 反射波波形
K'_T	: 仮想透過率	n_T	: 伝達波波形
K'_{T_i}	: i 列目の列ユニットでの仮想透過率	θ_R	: 反射波位相
K_{Loss}	: エネルギー逸散率	θ_T	: 伝達波位相
k	: 波数 ($2\pi/L$)	θ_x	: x による位相角
L	: 通過入射波の波長		
l	: 立体骨組構造防波堤の堤体幅		
m	: 列ユニット数		
n	: 静水面以下の鉛直方向へのユニット数		

港湾技研資料 No. 394

1981.9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 阿部写真印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.