

浮防波堤に関する研究

——筏型防波柵の性能について——

宇田 居 吾 一* 鴻 上 雄 三**

目 次

- 1 まえがき
- 2 野矢の潤付近の波浪特性
- 3 実験施設
 - (1) 実験装置
 - (2) 測定方法
 - (3) 消波構造物
 - 1) 木 棧
 - 2) 浮防波板
 - 3) 筏型防波柵
 - (4) 実験波の範囲
- 4 波の energy の伝達

- (1) 木棧による透過波高の減衰
- (2) 木棧の組合わせによる波高減衰
- (3) 浮防波板による波の energy の伝達
- 5 実験結果とその考察
 - (1) 木棧の空隙率と透過率
 - (2) 木棧群の列数と透過率
 - (3) 浮防波板の吃水と透過率
 - (4) 浮防波板の列間隔と透過率
 - (5) 筏型防波柵の性能
- 6 むすび

1 まえがき

近年沿岸水産資源の潤渇から魚貝類、海草類の養殖技術が進歩し、漁業はいまや農業と同じく海を耕し稚魚、種苗を養殖し収穫するという転換期に達しており、各地で養殖施設の整備拡張が進められている。

噴火湾北岸伊達町有珠地区でも、天然の地形と海象に恵まれ海苔の養殖が盛んで、野矢の潤地区では網数 480 棚、年間約 120,000 帖の生産をあげ、さらに種苗センターの建設により、道内養殖場への稚魚、種苗の供給の一元化が企てられている。

海草類の養殖に必要とされる自然条件は、

1) 種苗の仮殖期（海藻は 9～10 月）に海上が静穏である

2) 潮の干満により種苗に適当な干湿状態を与える

3) 海水の流通により種苗の腐食を防ぐ

などで、このために干満差の大きい海域の湾奥部の静穏な場所が選ばれ、養殖期間を通じて 50～60 cm が限界波高といわれる。

湾口部に来襲する波は、屈折、回折などの影響をうけ energy の集中、発散が行なわれるので、消波のために湾口全体を考慮する必要がなく、特定範囲だけの対策が

得られればよい場合が多い。考えられる消波の方法を列举すれば次のとおりである。

- 1) caisson などの島式防波堤
- 2) 捨石, tetrapod などの潜堤
- 3) concrete pile などによる打杭並堤
- 4) 空気防波堤
- 5) 流れによる防波堤
- 6) 浮防波堤

1)～3) は固定式、4)～6) は可動式に属し、このうち 1)～5) はかなり大規模な工法となり多額の経費を要するので、経済効果を考慮すれば不適当となり、さらに、特定期間を任意地域で使用する目的のためには、可動式の浮防波堤が選択される。

浮防波堤にもいろいろな型が考案され、機能について研究されている¹⁾が、実用化の段階には程遠いようである。当研究室では、伊達町野矢の潤地区を対象に、なるべく経費の安い簡便な施設による消波方法の研究を開発局官房開発調査課から依頼され、河川水制に用いられる並杭工の水流 energy の減殺効果と、手近に容易に得られる素材の利用の点から着目して、筏型防波柵を浮防波堤として用いることを考えた。

この報告は、防波柵の空隙率、配列および吃水と波高減衰率との関係など、その水理学的性能について実験検

* 港湾研究室長 ** 同副室長

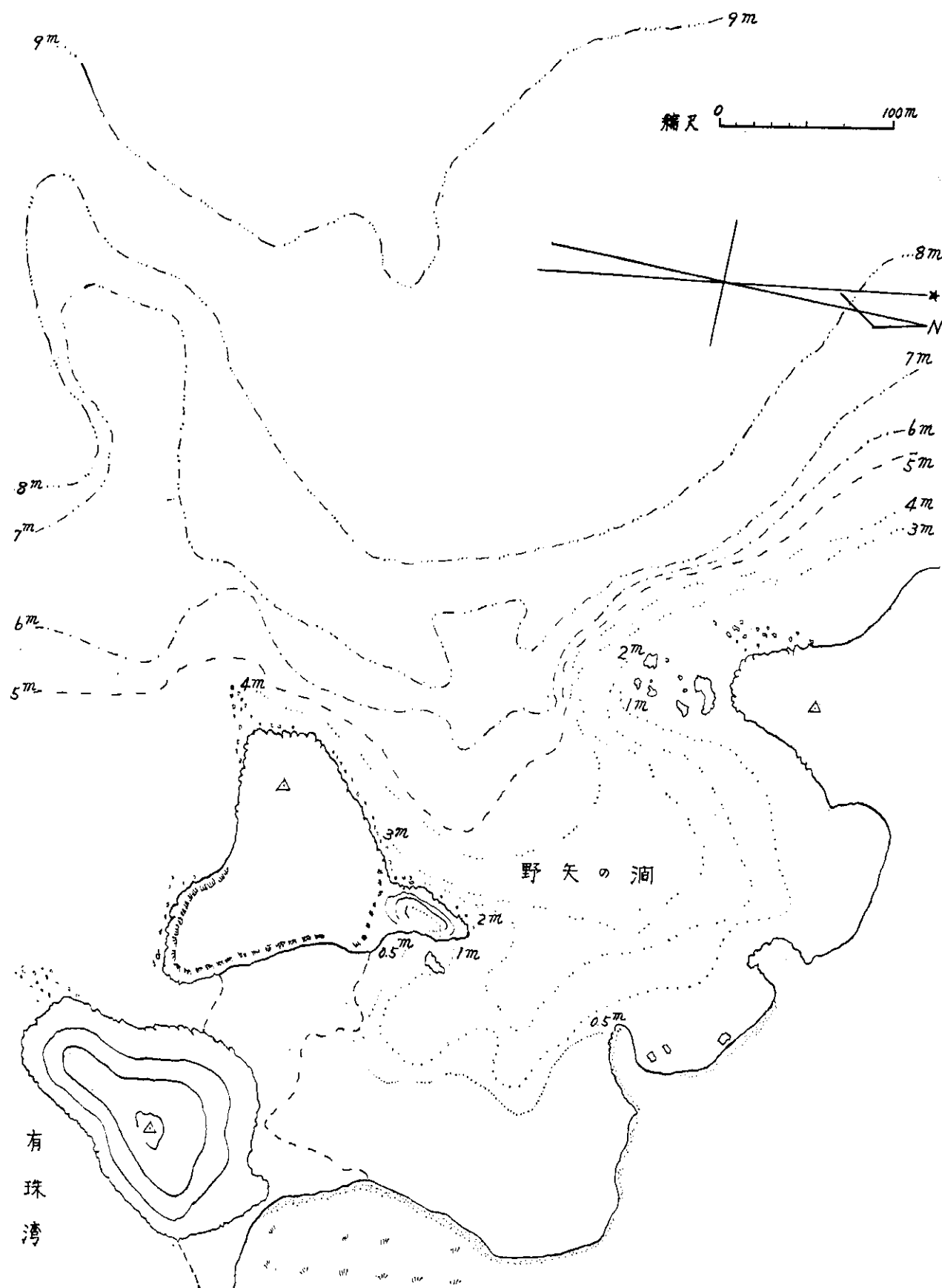


図-1 野矢の洞付近深浅図

2 野矢の潤付近の波浪特性

澗内に襲来する波浪の観測は行なわれていず、詳細は今後の調査にまたなければならないが、約 8 km 東寄りの伊達町紋別地区での目盛桿による目視観測が、室蘭港

また、図-2 から、有意義波の年間平均波高、周期は 0.35 m, 5.5 sec; 年 1 回出現波は 1.2 m, 11.0 sec と見積られる。一般に有意義波高 $H_{\frac{1}{3}}$ と最大波高 H_{max} との間には $H_{max}/H_{\frac{1}{3}}=1.81$ の関係があり、 $H_{max}=2.2$ m が算出される。しかし、これは深海波の場合で、浅海では比がもう少し小さいから $H_{max}=2.0$ m 程度と考えられよう。周期も風波で 6.0 sec, ウネリで 8 sec が噴火湾の特性とみるのが妥当である。

表-1 伊達港波浪観測表 (36.10.1~37.3.31 1日2回目測)

[illegible]

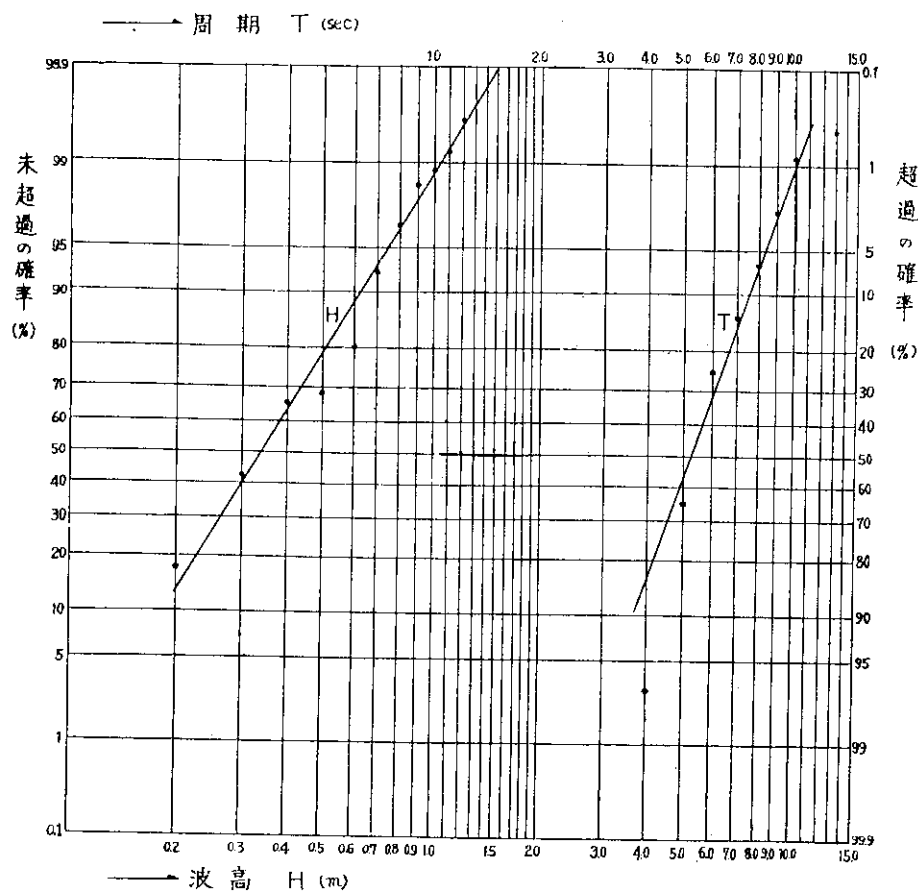


図-2 波高周期の出現確率

3 実験施設

(1) 実験装置

実験水路は $19.0 \times 0.8 \times 1.0$ m のガラス張りで、一端に flutter 型起波機を設置し、他端は反射波防止のため緩勾配の小砂利斜面とした。図-4 は水路の縦断を示し、消波構造物を設置する前後の水深 h は一様 30 cm とし、 $1/20$ の縮尺で実験を行なった。

(2) 測定方法

波高の測定は銀線による抵抗線波高計を用い、図-4 に示す位置での値を pen-writing oscillograph に自記させた。すなわち、入射波と消波構造物による反射波との合成波の腹および節の波高を H_1, H_2 、消波構造物の透過波高を H_t として読取り、入射波高 H_i は $(H_1 + H_2)/2$ 、反射波高 H_r は $(H_1 - H_2)/2$ から求め反射率 $\alpha = H_r/H_i$ 、

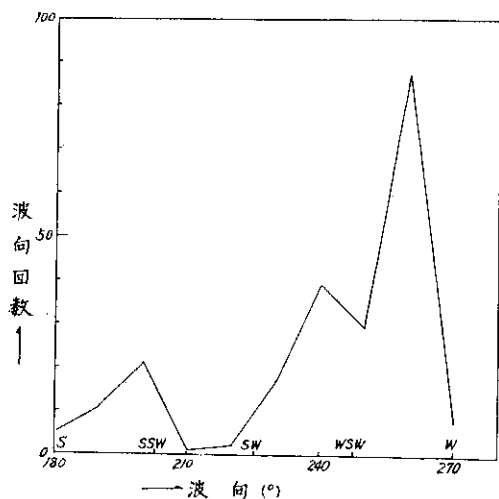


図-3 波向の出現頻度

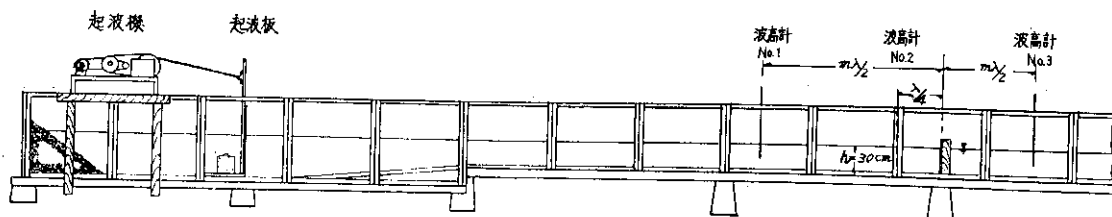


図-4 実験ガラス水路一般図

透過率 $\tau = H_t/H_i$ を算出した。

(3) 消波構造物

筏型防波柵の形状を決める要素としては、素材の直径 b 、素材の間隔 d 、すなわち防波柵の空隙率 P と、考える場所の水深 h と防波柵の吃水 c との比すなわち相対吃水 c/h 、およびその縦方向（波の進行方向）への配列の数 n が考えられる。

これらの組み合わせによる現象を同時に扱うのは混乱を招くので、次のような模型消波構造物により空隙率、吃水、空隙の組み合わせと透過率との関係を、それぞれ単独に実験解析した。

1) 木 棧

水路中間部の1断面に、図-5のような木棧を並べ、その間隔を変えて所要の空隙率を求めた。実験に用いた木棧の寸法は表-2のとおりである。

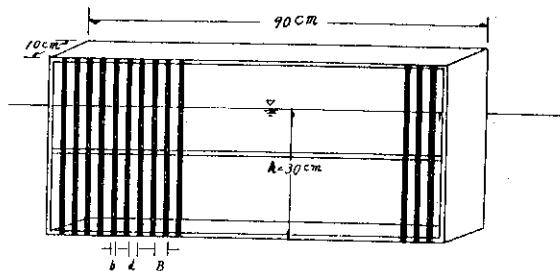


図-5 木棧配置見取図

表-2 木棧の寸法

木棧幅 $b=1.0\text{ cm}$					
木棧間隔 $d\text{ (cm)}$	0.1	0.3	0.5	1.0	3.0
空隙率 $P\text{ (%)}$	9.1	23.1	33.3	50.0	75.0

2) 浮防波板

図-5の木棧部を板に張り替え、板の下端が任意の間隔だけ上下できるように装置し、所要の吃水を与えた。実験ではこれを6.0 cmにとった。

3) 筏型防波柵

空隙率、吃水、空隙の組み合わせなどについて個々に求められる結果の総合から、必要な筏型防波柵の形状が算出されるが、結果を確認するため図-6のような防波柵を作製した。この場合、防波柵は真鍮棒で固定してあるが、水中に錨止めて波による上下運動を与えた場合と比較した。

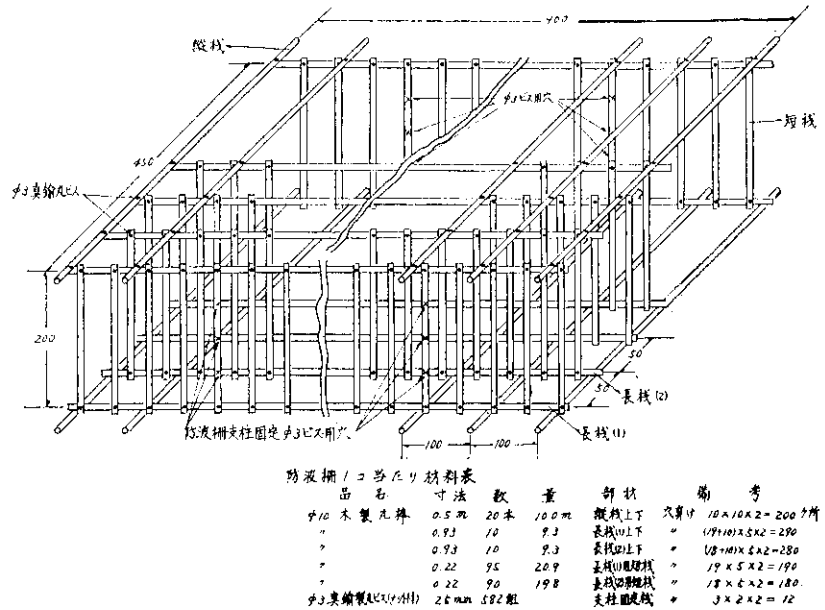


図-6 筏型防波柵構造見取図

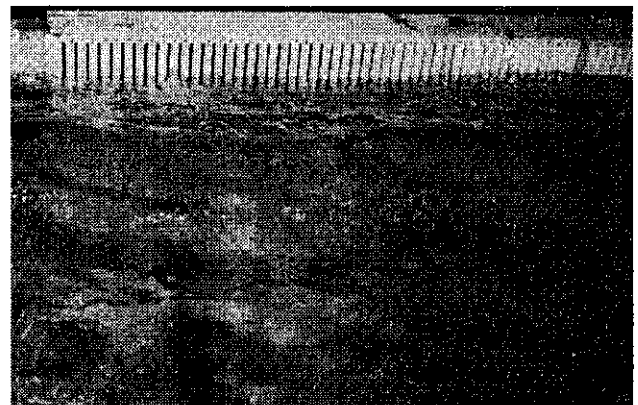


写真-1 木 棧 (1 列)

(4) 実験波の範囲

実験に用いた波は、波高 5~15 cm (現地 1~3 m)、周期 1.34, 1.79 sec (6, 8 sec)、波長 204, 237 cm (40.9, 57.4 m) で、水深はつねに 30 cm (6 m) とした。

4 波の energy の伝達

波の進行中に障害物が置かれれば、energy の伝達が阻害され、透過する波は減衰し、1 部の energy は反射をうける。また、波の energy は水面付近に集中し、水深の深い場所ほど小さいことが知られている。

障害物が密な物体であれば、透過波はまったく 0 になるが、受ける波力が大きく構造物の破壊を伴いやすく、空隙が大きければ、透過波高減衰の効果が少なくなる。また、障害物の吃水も波の伝達に影響することが予知される。

(1) 木棧による透過波高の減衰

いま、波の energy の横方向への流れがないと仮定し、水深 h の場所に波の進行の直角方向に、幅 b 、間隔 d の

木棧群が、静水面上から水底まで1列に並べられた場合を考える。入射波高および energy を H_i , E_i とし、透過波のそれらを H_t , E_t とし、さらに木棧による反射 energy を E_r とすれば、 $E_i = E_t + E_r$ となる。各 energy の時間的平均をそれぞれ $\bar{E}_i$, $\bar{E}_r$, $\bar{E}_t$ とし、単位波振幅 $B = b + d$ を考えれば

$$\bar{E}_i = \frac{\rho g H_i^2}{16} C \left(1 + \frac{4\pi h/\lambda}{\sinh 4\pi h/\lambda} \right) B \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\bar{E}_r = \frac{\rho g H_i^2}{16} C \left(1 + \frac{4\pi h/\lambda}{\sinh 4\pi h/\lambda} \right) b \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\therefore \bar{E}_t = \bar{E}_i - \bar{E}_r = \frac{\rho g H_i^2}{16} C \left(1 + \frac{4\pi h/\lambda}{\sinh 4\pi h/\lambda} \right) B \left(1 - \frac{b}{B} \right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{一方, } \bar{E}_t = \frac{\rho g H_t^2}{16} C \left(1 + \frac{4\pi h/\lambda}{\sinh 4\pi h/\lambda} \right) B \quad \dots\dots\dots(4)$$

であり、(3)、(4)式は等しいから

$$\tau_p = \frac{H_t}{H_i} = \sqrt{1 - \frac{b}{B}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに τ_p は透過率である。

木棧の空隙率は $P = d/B = 1 - b/B$ であるから、 τ_p と P は関数関係にあることがわかる。また透過率と反射率との間には、 $\tau_p = 1 - \alpha$ の関係があるから、(5)式により P と τ_p , α の相関が表-3のとおり数値計算される。

表-3 P と τ_p , α の相関

木棧幅 (b) (cm)	木棧間隔 (d) (cm)	単位波振幅 (B) (cm)	空隙率 (P) (%)	透過率 (τ_p) (%)	反射率 (α) (%)
1.0	0.1	1.1	9.1	30.2	69.8
1.0	0.2	1.2	16.7	40.8	59.2
1.0	0.3	1.3	23.1	47.0	52.0
1.0	0.4	1.4	28.6	53.5	46.5
1.0	0.5	1.5	33.3	57.7	42.3
1.0	0.6	1.6	37.5	61.2	38.8
1.0	0.7	1.7	41.2	64.2	35.8
1.0	0.8	1.8	44.4	66.7	33.3
1.0	0.9	1.9	47.4	68.8	31.2
1.0	1.0	2.0	50.0	70.7	29.3
1.0	1.5	2.5	60.0	77.5	22.5
1.0	2.0	3.0	66.7	81.7	18.3
1.0	3.0	4.0	75.0	86.6	13.4
1.0	4.0	5.0	80.0	89.4	10.6

(2) 木棧の組合わせによる波高減衰

前項と同様に、一様水深の水中に幅 b , 間隔 d の同じ空隙率をもつ木棧列群が並べられるとする。この場合、第1列目の木棧群により減衰された透過波が、第2列目の木棧群により同じ割合だけ波高の減衰をうけ、順次同

じような繰返しが行なわれる。ただし、木棧群の列間隔は影響しないものとする。

このように、同じ割合の減衰をうける現象は等比級数として扱える。すなわち、入射波高を H_i , 波高減衰の割合(公比)を τ_p , 第 n 項(末項)を H_n とすれば

$$H_n = H_i \tau_p^{n-1} \quad \dots\dots\dots(6)$$

(6)式で $n=1$ とすれば $H_n = H_i$ となり入射波高を表わすが、この場合には減衰だけを考えるから、(6)式の初項を省略し第2項を初項とする級数を考えればよい。

$$H_n = H_i \tau_p^n \quad \dots\dots\dots(6')$$

この研究目的では、入射波高 2 m, 消波構造物設置後の所要波高が 0.6 m であるから、種々の空隙率に対する木棧群の列数 n は、(5), (6)' 式を用いて計算できる。その1例を示せば表-4のとおりである。

表-4 空隙率と木棧群列数の関係

単位波振幅 (B) (m)	木棧幅 (b) (m)	木棧間隔 (d) (m)	空隙率 (P) (%)	透過率 (τ_p) (%)	列数 (n)
1.0	0.2	0.8	80.0	0.89	10
0.8	0.2	0.6	75.0	0.87	8
0.7	0.2	0.5	71.4	0.84	7
0.6	0.2	0.4	66.7	0.82	6
0.5	0.2	0.3	60.0	0.78	5
0.4	0.2	0.2	50.0	0.71	4

(3) 浮防波板による波の energy の伝達

水深 h において波高 H_i , 波長 λ をもつ波の水深方向の energy 分布を考える。Gerstner の trochoidal 理論によれば、水面から水深 C までの energy E_c は²⁾

$$E_c = \frac{1}{8} \rho g H_i^2 \lambda \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\sinh 2\pi/\lambda(h-C)}{\sinh 2\pi/\lambda \cdot h} \right)^2 + \frac{\sinh 4\pi/\lambda(h-C)}{\sinh 4\pi/\lambda \cdot h} \right\} \right\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\therefore E_c/E_i = 1 - \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\sinh 2\pi/\lambda(h-C)}{\sinh 2\pi/\lambda \cdot h} \right)^2 + \frac{\sinh 4\pi/\lambda(h-C)}{\sinh 4\pi/\lambda \cdot h} \right\}$$

ここに E_i は入射波の energy である。

吃水 C の浮防波板による反射率を α_c , 吃水以下の部分からの透過率を τ_c とすれば、(5)式と同様に

$$H_t = H_i \sqrt{1 - \alpha_c}$$

$$\therefore \tau_c = \frac{H_t}{H_i} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\sinh 2\pi/\lambda(h-C)}{\sinh 2\pi/\lambda \cdot h} \right)^2 + \frac{\sinh 4\pi/\lambda(h-C)}{\sinh 4\pi/\lambda \cdot h} \right\}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに H_t は浮防波板による透過波高である。

5 実験結果とその考察

(1) 木棧の空隙率と透過率

写真-1のように、1列の木棧にいろいろな空隙率を与えて、透過率の変化を調べれば図-7が得られる。図の実験曲線から、 τ_p 、 α はともに $1/4$ 円弧で表わされ、それぞれ P の関数として図から

$$\tau_p = \sqrt{P(200-P)} \quad (\%) \dots\dots\dots (9)$$

$$\alpha = 100 - \sqrt{P(200-P)} \quad (\%) \dots\dots\dots (10)$$

で示される。

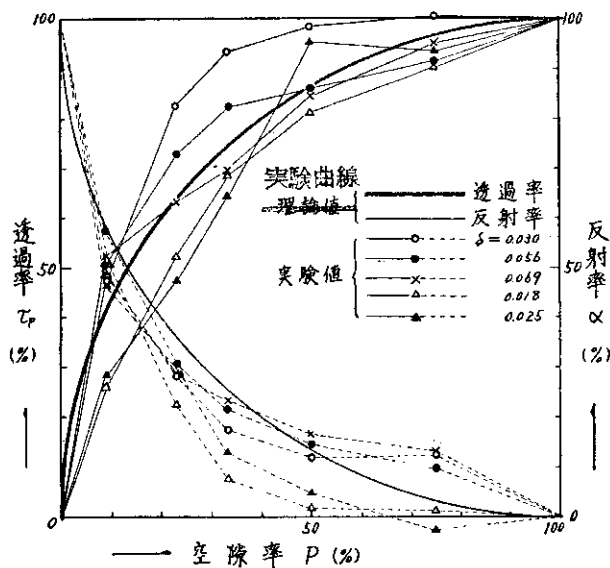


図-7 木棧の空隙率と透過率の関係

実験では波の種類 (T , δ) による差が認められず、測定値のばらつきがあるが、全般に表-3の理論値より τ_p は大きく、 α は小さい。これは波 energy の横方向への移動がないと仮定して計算しているが、実際には木棧辺からの回折が影響することを意味する。

(2) 木棧群の列数と透過率

木棧1列の場合の透過率が理論値より大きく表われるので、 $P=75, 50\%$ について木棧を2列ずつ増加した場合の実験を行ない(写真-2)、結果を図-8に示す。計算

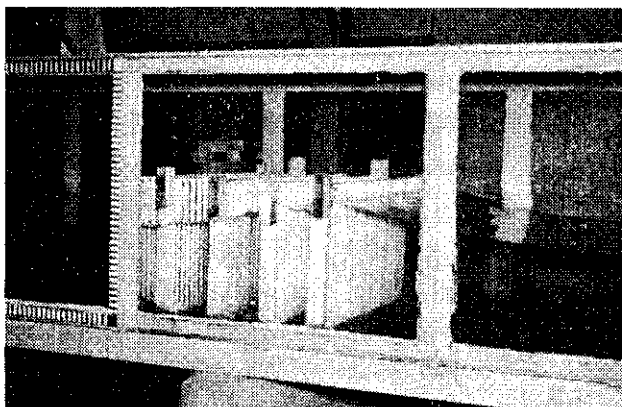


写真-2 木棧群 (10列)

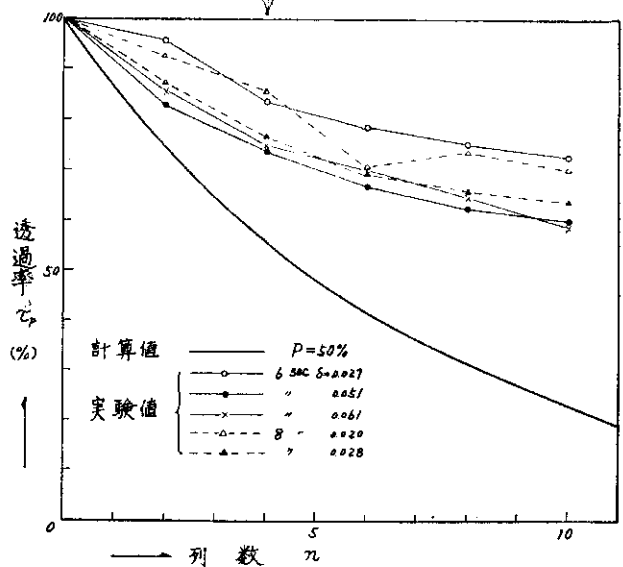
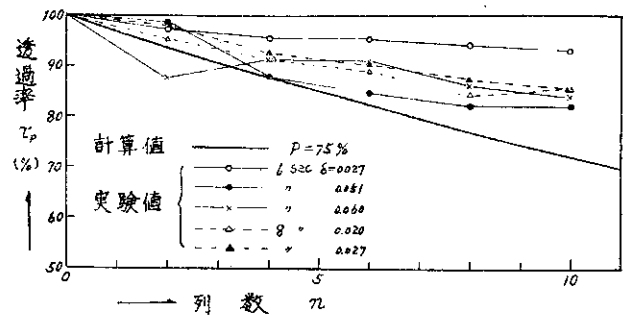


図-8 木棧群の列数と透過率

曲線は(6)'式から求められ、実験値は平均して波高減衰率(1-透過率)の40%だけこれより大きいことがわかる。

(3) 浮防波板の吃水と透過率

防波柵の吃水または相対吃水も消波機能に影響する要素となる。解析の便のために浮防波板について実験し(写真-3)、その吃水以下の部分からの透過率を、(8)式から求められる理論値と比較すれば図-9のとおりである。

理論値と同じく、実験でも短周期波が減衰しやすく、また δ の大きい波ほど理論値に近いことがわかる。一般に実験値は5~15%理論値より大きく、これは吃水上部

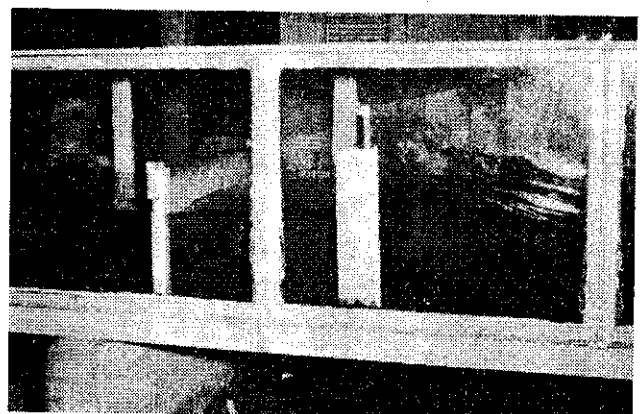


写真-3 浮防波板の吃水と列間隔の実験

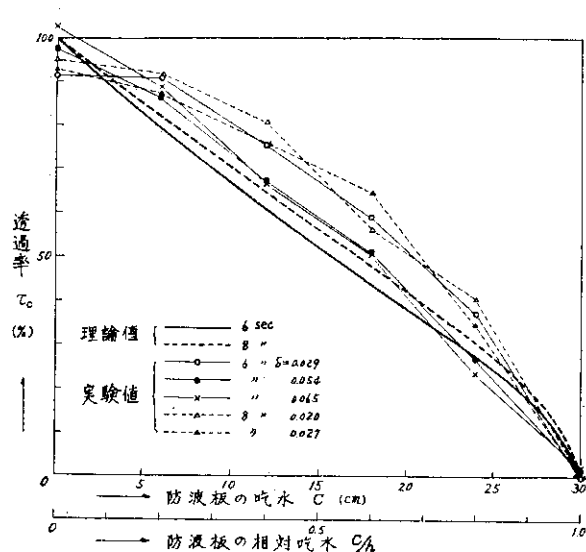


図-9 浮防波板の吃水と透過率

の波の energy が防波板下端を回折することが原因と考えられる。

図-10 は、離岸堤の天端高と越波による港内への伝達波高との関係を示す、米国海岸浸食局と California 大学の実験結果であり、浮防波板による消波機構とは逆に、障害物の設置により碎波を生じさせて消波する場合で、変数のとり方が異なり対比はできないが、参考までに記載する。

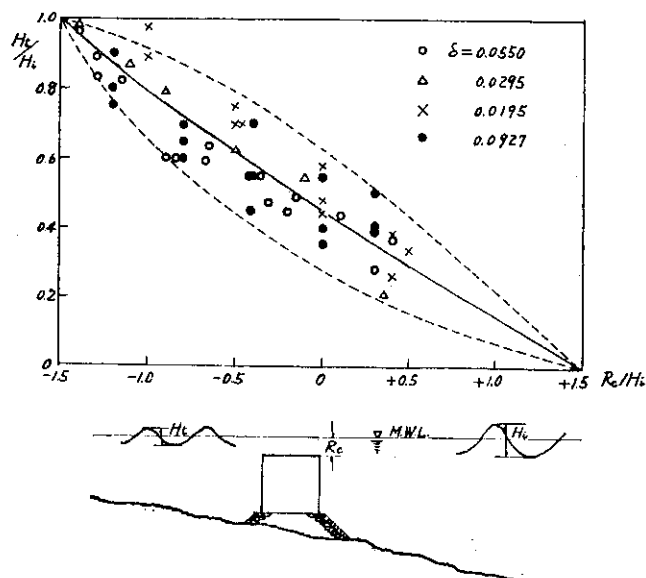


図-10 離岸堤の天端高と伝達波高の関係

(4) 浮防波板の列間隔と透過率

防波柵の列間隔により消波効果が異なると考えられるので、浮防波板 2 個の列間隔を 10, 20, 30, 50, 100 cm とした場合の実験を行ない (写真-3), 結果を図-11 に示す。

この図から長周期波ほど波高が減衰しにくく、列間隔が大きくなれば全般に 10~15% の減衰を示すことがわ

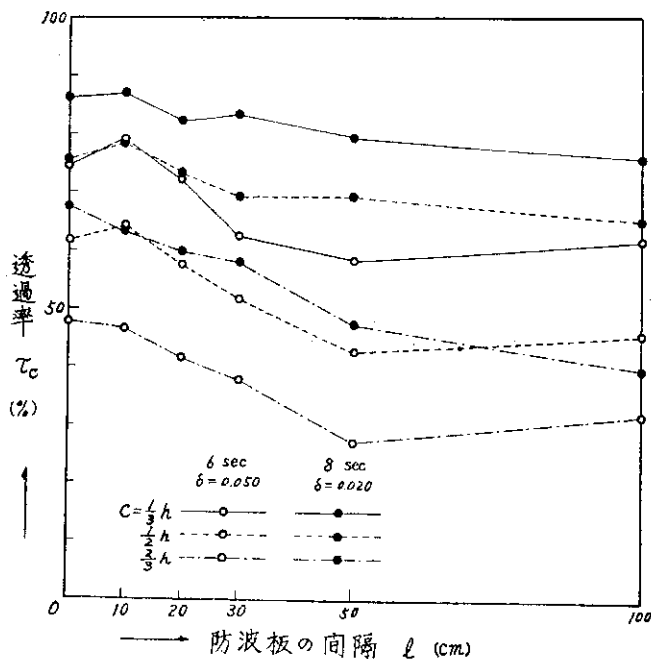


図-11 防波板の列間隔と透過率

かるので、波の進向方向の木柵は離れた方がよいといえるが、施工上の限度を考えれば効果は期待できない。

(5) 筏型防波柵の性能

図-6 のような吃水 C 、空隙率 P をもつ防波柵の 1 列の透過率を τ_p 、吃水以下の部分からの透過率を τ_c とし、単位波高の入射波が初めの 1 列の柵の上下をそれぞれ $(1-\tau_c)\tau_p$ 、 τ_c ずつ透過し、2 列目の柵の上下から両者の和の $(1-\tau_c)\tau_p$ 、和の τ_c ずつ、以下同じような割合を透過すると考えれば、 n 列の柵による透過率 τ_{pc} は $\tau_{pc} = \{(1-\tau_c)\tau_p + \tau_c\}^n$ ここに、 τ_p は(9)式または図-7 から、 τ_c は(8)式または図-9 から与えられる。

図-12 は $P=80\%$ 、 $C=\frac{1}{3}h$ 、 $T=6, 8$ sec の場合を示す。実験値は防波柵を水底から固定した場合 (写真-4) と、ゴム紐で宙吊りにし、鉋止めによる波の上下動を与えた浮動式の場合 (写真-5) について示してある。

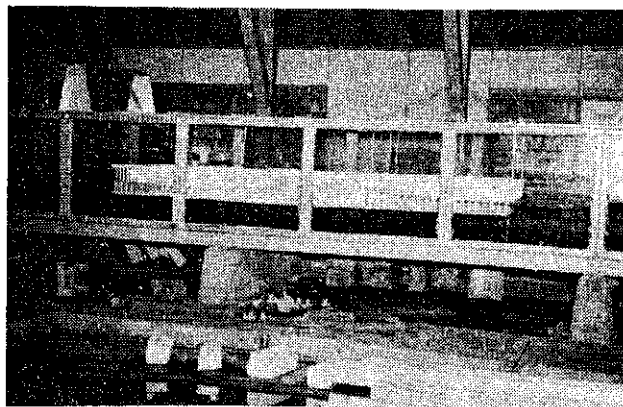


写真-4 筏型防波柵 (固定式)

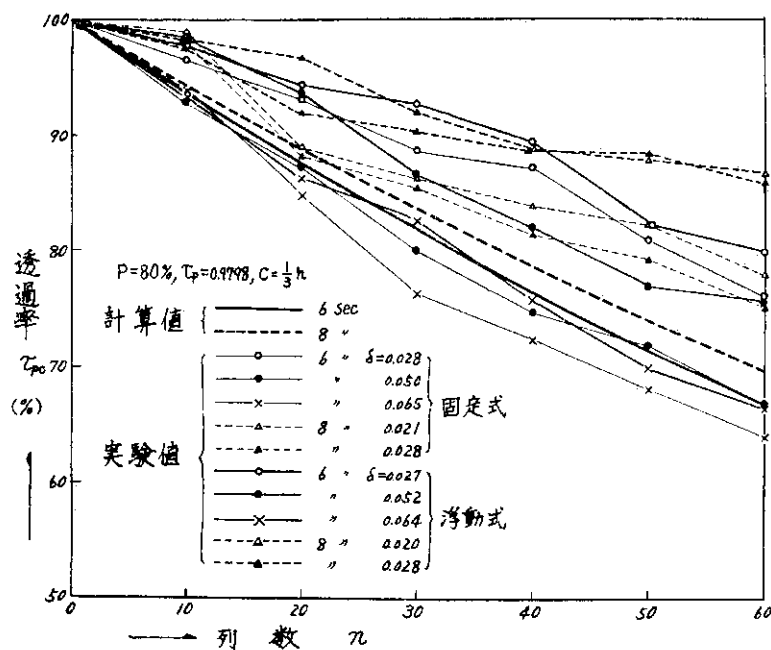


図-12 筏型防波柵の性能

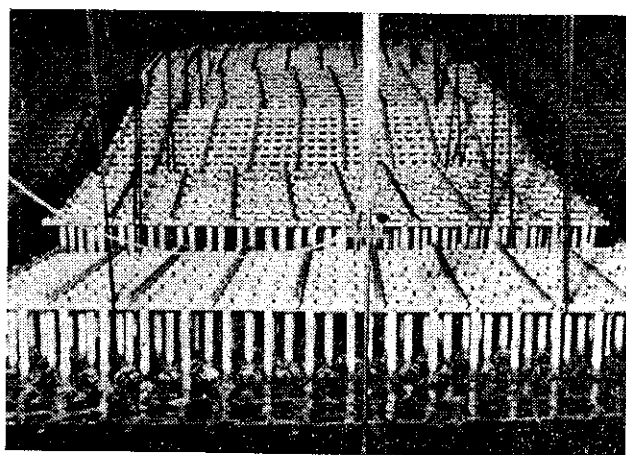


写真-5 筏型防波柵（浮動式）

固定式の場合、短周期波で δ の大きい波の実験値は計算値に一致するが、 δ が小さいか長周期波では大きく、波高減衰の効果が少ない。

浮動式の場合には、固定式よりも全般に減衰効果が小さい。これは防波柵が前後に連結されているだけで、上下方向の運動の拘束をうけず波動に同調するため、防波

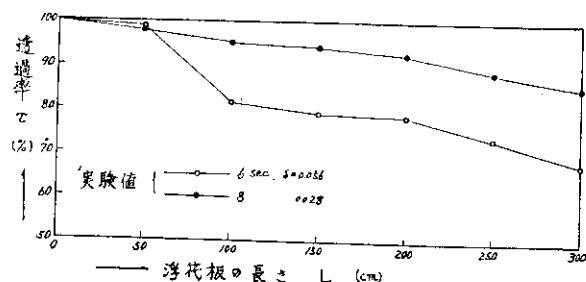


図-13 浮筏板の性能

柵の波 energy を減殺する実質部分が減少するためである（写真-5）。従って、浮動式の消波効果を大にするためには、錨で固定して波による防波柵の上向きの運動をできるだけ抑制することが必要である。

図-13 は筏の効果を検討するため、筏の代わりに長さ 50 cm の板を連ねた場合を示すもので、やはり長周期波の透過率が大きく、防波柵の浮動式とほぼ同じ効果が認められる。

図-14 は $P=50, 60, 70, 80\%$, $C=\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}h$, $T=6, 8$ sec の場合の n , τ_{pc} の相関を示し、筏型防波柵の形状決定に用いる計算図である。

6 む す び

以上の実験結果と解析から、筏型防波柵の消波機能に影響する要素としては、空隙率、吃水および波の進行方向への配列数が重要であることが知られる。

この研究の目的である透過波高を 30 % に抑えるために要する C, P, n の相関は、図-14 から表-5 のとおり求められる。この表から、たとえば一定の吃水 $C=\frac{1}{3}h$ について P と n との関係を調べれば、 P を 70 % から 50 % にする場合 1.4 倍の材料増であるが、 n は $1/3$ に減少する。また、吃水について比較すれば、 $C=\frac{1}{3}h$ と $\frac{2}{3}h$ とでは静水面下の部分の材料は 2 倍になるが、 n は $1/2$ に減るから同量である。しかし、静水面上の部分も消波の役割を果たすから、これを考えれば材料は少なくなる。

表-5

P		70	60	50
n	$C=\frac{1}{3}h$	80以上	45	28
	$\frac{1}{2}h$	57	31	19
	$\frac{2}{3}h$	42	24	15

従って、空隙率を小さく吃水を深くすれば消波能力が増大することがわかる。しかし、空隙率を小さくすればうける波力が増して破壊を伴うから、 $P=50\%$ が限度と考えられる。また、吃水を深くすれば浮力が増してこれに要する錨など繫留法の問題が生ずることになる。

以上、消波性に関する水理学的考察からは、筏型防波柵が浮防波堤として用いられる可能性はあるが、予期以上に透過率が大きく、波力に対する耐久性、浮力または繫留法など解決されるべき点が多く残され、今後の研究

または実地試験を経ることが必要である。

(昭和 37 年 9 月)

参考文献

- 1) 水理委員会： 資料 昭和36年度水理学研究の現況，土木学会誌 Vol. 47, No. 3, 1962. 3.
- 2) 永井莊七郎，久保弘一： 浮防波堤に関する研究，第 17 回 土木学会 年次学術講演会講演概要，第Ⅱ部，1962. 5.

終わりにこの実験研究に当たり，多大の御協力を願った開発調査課の関係係官に深く謝意を表わし，実験測定と整理には，当研究室大黒技術員の労によったことを付記する。

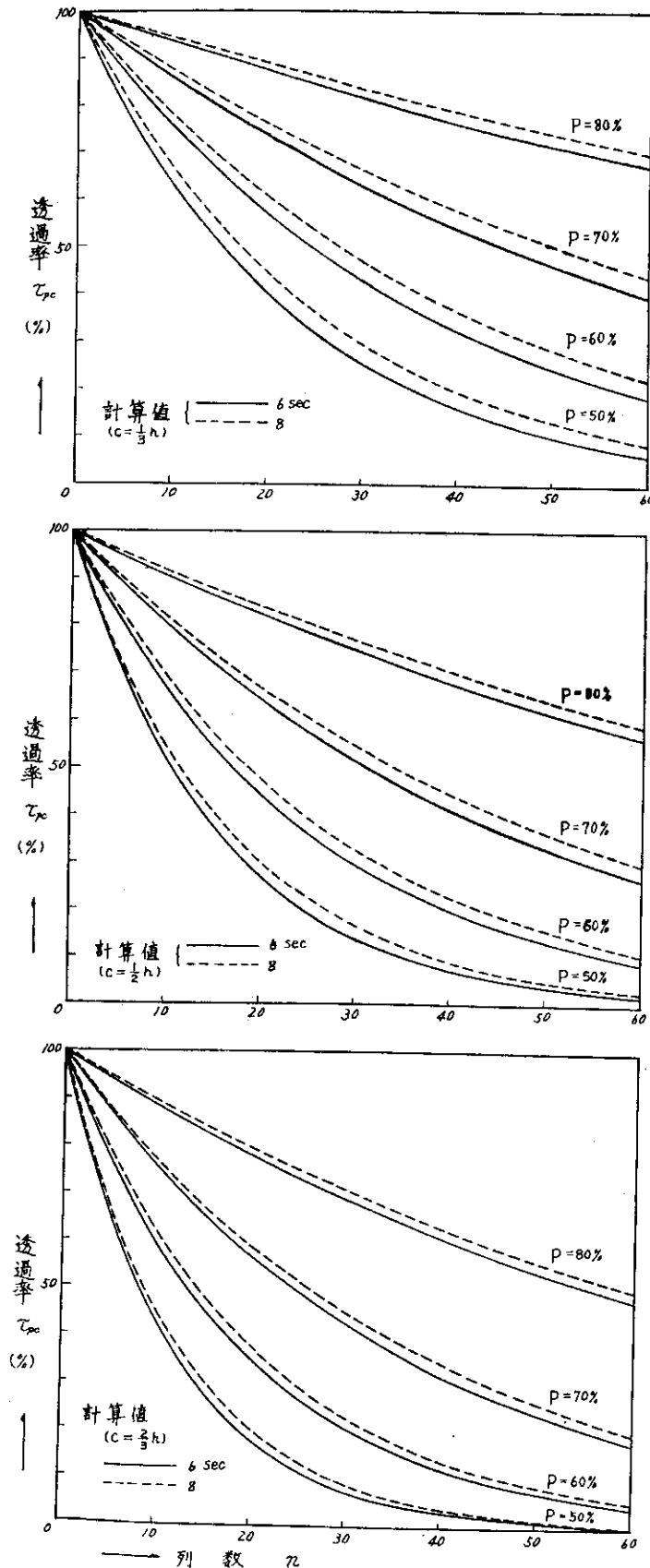


図-14 後型防波柵の形状決定の P, C, n, τ_{pc} 相関図