

九州大学 正員 井島 武士 同 学主員 塩沢 俊彦
同 正員 小林 彰 同 正員 江口 泰彦
同 学主員 永永 浩毅

著者等は 柱錐状のソリの積み上げによる防波堤や消波（六角柱の両面にフランジを有するプロップで それらを積み上げた時全体としては水平な板と柱とを組み合わせた構造となる。）についての研究を行ってきたが 元の実験研究によりこの方式が実用上有効であることを確認した。本報告においてはその防波堤における波の伝播に 対して理論的な説明を試み 又その検証として実験を併せ行った。

1. 防波堤の構造

1枚以上の水平な板とそれに直交する柱とから成る構造は防波堤であるが 今回は取扱を単純化す為 図1の如く長さ2 l の板と静水面に1枚板は 静水面と水深 h の中間に更に1枚水平に固定したものについて調べた。

2. 理 論

ここでは 紙面の都合上1枚板からなる防波堤について大略を述べるとするが 2枚板の場合も大體同様である。

現象を速度ポテンシャルを有する完全流体の2次元運動と見なして 図1の様に x, z 軸をとり (I) ($x \geq l, -h \leq z \leq 0$), (II) ($-l \leq x \leq l, -h \leq z \leq 0$), (III) ($x \leq -l, -h \leq z \leq 0$) の3つの領域を区分し 各領域における速度ポテンシャルを ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 とする。 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 について 各々次のラプラス式が成立せねばならぬ。

$$\partial^2 \phi / \partial x^2 + \partial^2 \phi / \partial z^2 = 0 \quad (1)$$

各速度ポテンシャルは 式(1)と境界条件とから各々以下の様に決定される。

領域(I)では $x \rightarrow \infty$ で ϕ_1 は有限 $z = -h$ で $\partial \phi_1 / \partial z = 0$

$$z = 0 \text{ で } \partial \phi_1 / \partial t^2 + g \partial \phi_1 / \partial t = 0 \quad (2)$$

$$\text{よって } \phi_1(x, z, t) = e^{i\omega t} \left[(A e^{ikx} + B e^{-ikx}) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-knx} \frac{\cos kn(z+h)}{\cos knh} \right] \quad (3)$$

領域(II)では $z = 0, z = -h$ で $\partial \phi_2 / \partial z = 0$

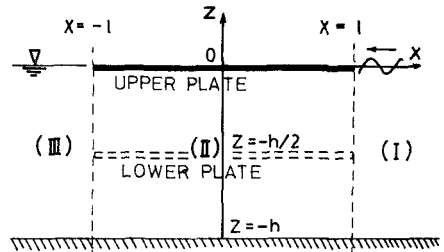
$$\phi_2(x, z, t) = e^{i\omega t} \sum_{n=0}^{\infty} \left(D_n \cosh \frac{n\pi x}{h} + E_n \sinh \frac{n\pi x}{h} \right) \cos \frac{n\pi z}{h} \quad (4)$$

$$\text{領域(III)では } \phi_3(x, z, t) = e^{i\omega t} \left[F e^{ikx} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} G_n e^{-knx} \frac{\cos kn(z+h)}{\cos knh} \right] \quad (5)$$

ここで A, B, C_n, F は 各々入射波 反射波 定常波 透過波を表わす定数 D_n, G_n も含めてこれらは境界条件より定まる定数である。又 ω は入射波の frequency $2\pi/T$, k は $2\pi/L_0$ (3式より) 導かれる波数より定まる定数である。 $0.2h/g = (2\pi h/L_0) = kh \tanh kh = -knh \tanh knh$

各領域の境界において 流体運動が連続である為には 速度 圧力について連続である必要があり次式が成立つ。

$$x = l \text{ で } \partial \phi_1 / \partial x = \partial \phi_2 / \partial x \quad \partial \phi_1 / \partial t = \partial \phi_2 / \partial t \quad (6)$$



$$x = -l \quad \partial \phi_2 / \partial x = \partial \phi_3 / \partial x \quad \partial \phi_2 / \partial t = \partial \phi_3 / \partial t \quad (7)$$

式(3) (4) (5)において $Ae^{ikl} = a$, $Be^{-ikl} = b$, $Ce^{ikl} = c$, $D \cosh \frac{rhl}{h} = dr$, $E \sinh \frac{rhl}{h} = er$
 $F e^{ikl} = f$, $G e^{ikl} = g$ $\frac{kh}{\pi} = \lambda_0$, $\frac{rhl}{\pi} = \lambda_n$ とおいて (6), (7) に代入して 計算を行ってゆくと

$$(b+f)e^{-i\theta r} + i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_0^2 + r^2}{\lambda_n^2 - r^2} \cdot \frac{\lambda_n + r \tanh rH}{\sqrt{\lambda_0^2 + (r \tanh rH)^2}} (C_n + g_n) = a e^{i\theta r} \quad (8)$$

(こゝで) $\theta r = \tan^{-1} \left(\frac{r}{\lambda_0} \tanh rH \right)$

$$(b-f)e^{-i\theta r} + i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_0^2 + r^2}{\lambda_n^2 - r^2} \cdot \frac{\lambda_n \tanh rH + r}{\sqrt{(\lambda_0 \tanh rH)^2 + r^2}} (C_n - g_n) = a e^{i\theta r} \quad (9)$$

(こゝで) $\phi_{rn} = \frac{\lambda_0^2 + r^2}{\lambda_n^2 - r^2} \cdot \frac{\lambda_n \tanh rH + r}{\sqrt{(\lambda_0 \tanh rH)^2 + r^2}}$

の2式を得る。これらをも、 C_n , f , g_n にわたる連立方程式と見なして解く。更に若干の計算の後 dr , D_0 , Er を求める。即ち u が与えられれば b , C_n , dr , D_0 , Er , f , g_n が求まり 従つて 各ポテンシャルが決まる。(式は略す)

これらの結果を元に 反射率 透過率 圧力の値にして求める。即ち反射率を K_r 透過率を K_t とすれば

$$K_r = |b/a| \quad K_t = |f/a|$$

例(II)における圧力を p 流体密度を ρ 重力加速度を g 入射波の振幅を α とすると

$$p/\rho g = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \alpha e^{i(kl + \omega t)} \left[\frac{D_0}{\alpha} + \sum_{r=1}^{\infty} \left(\frac{dr}{\alpha} \frac{\cosh rH \lambda/l}{\cosh rH} + \frac{er}{\alpha} \frac{\sinh rH \lambda/l}{\sinh rH} \right) \cosh rH \lambda/l \right] \quad (10)$$

水平板に接する部分の圧力を $p_z=0$ とすれば (10) で $z=0$ とおくと

$$p_z=0/\rho g = \alpha e^{i(kl + \omega t)} \left[\frac{D_0}{\alpha} + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{dr}{\alpha} \frac{\cosh rH \lambda/l}{\cosh rH} + \frac{er}{\alpha} \frac{\sinh rH \lambda/l}{\sinh rH} \right] \quad (11)$$

水平板における平均圧力は 全圧力を P_0 とすると $P_0/\rho g \cdot 2l$ で与えられる。

$$P_0/\rho g \cdot 2l = \frac{1}{l} \int_{-l}^l p/\rho g \cdot dx = \alpha e^{i(kl + \omega t)} \cdot 2l \left[\frac{D_0}{\alpha} + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{dr}{\alpha} \frac{\tanh rH}{rH} \right] \quad (12)$$

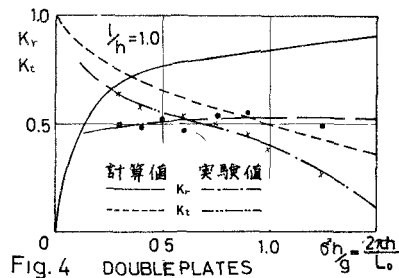
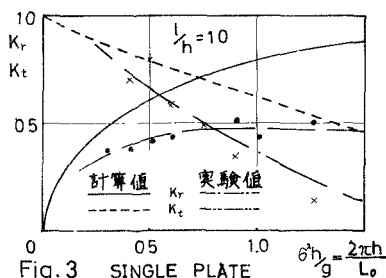
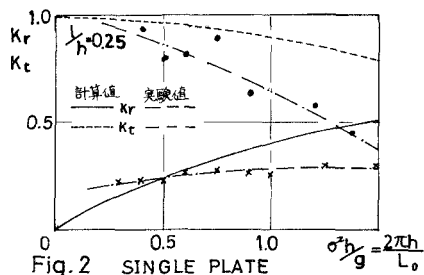
3 実験

上記の理論の検証の為に理論と同様な条件で反射率 透過率 圧力についての実験を行った。幅 100 cm 深さ 60 cm 長さ 20 m の造波水槽を用い 水深を 40 cm とし 波高を容量式波高計で 波丘を トランスデューサーを用いて測定した。

4 計算及び実験の結果

(1) 反射率 K_r , 透過率 K_t

図2, 3, 4 に $2\pi h/L_0 (=0.2h/g)$ に関する K_r , K_t の値を示す。これによると板幅が増すと K_r は著しく増加し 反対に K_t は著しい減少を示す。(図2, 3 参照) 又2板取の場合の K_r が1板取に比し K_r は大きく K_t は小さい。(図3, 4 参照)



(2) 水平板に作用する圧力

図5に 静水面上に位置する水平板に作用する単位長さ当たりの平均圧力 $P_u/4\rho g a l$ (P_u は水平板生幅に働く単位奥行き当りの全圧力) を $2\pi h/L_0$ についてプロットして、 $\sigma^2 h/g$ がこれによつて $2\pi h/L_0$ が増すと平均圧力は減少しており、又 $\sigma^2 h/g$ が増す程、即ち板幅が小さくなる程減少している。2枚板の場合、1枚板に比し若干圧力が大きい。(しかし計算値より $\sigma^2 h/g$ が 0.4 以下ではこの傾向は逆になつていた。)

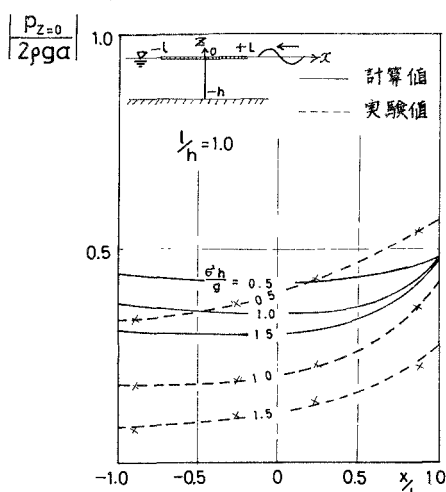


Fig. 6 PRESSURE DISTRIBUTION TO PLATE (SINGLE PLATE)

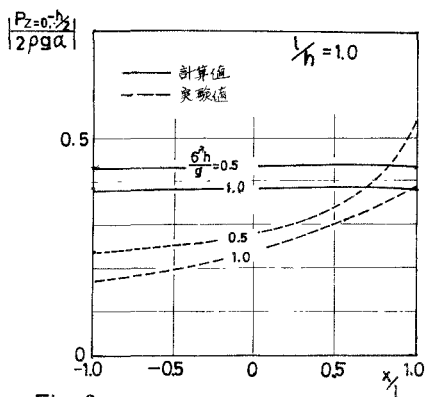


Fig. 8 PRESSURE DISTRIBUTION TO LOWER PLATE (DOUBLE PLATES)

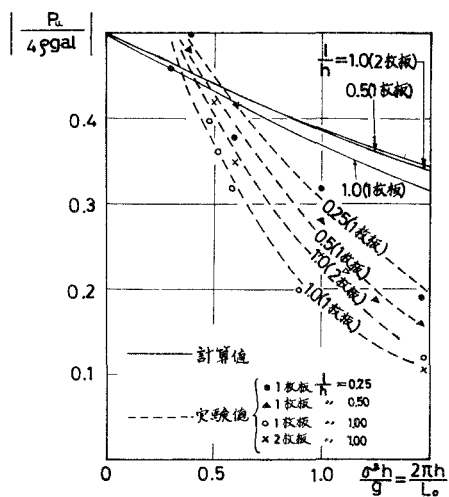


fig. 5 AVERAGED UPLIFT TO PLATE

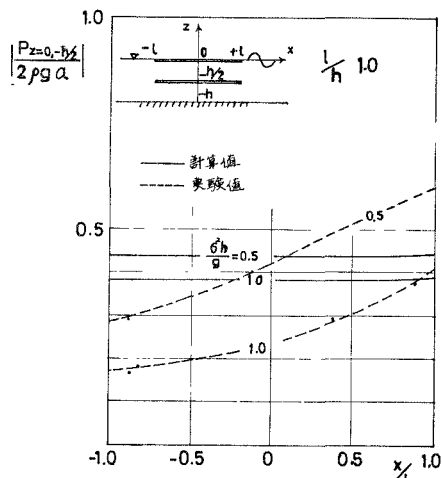


Fig. 7 PRESSURE DISTRIBUTION TO UPPER PLATE (DOUBLE PLATES)

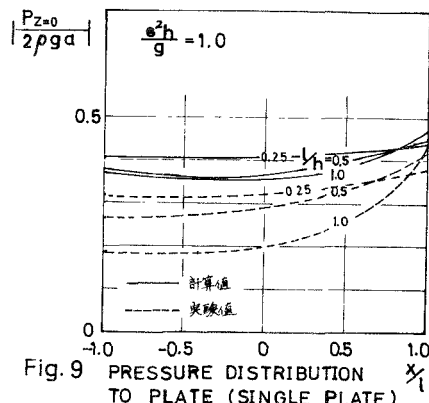


Fig. 9 PRESSURE DISTRIBUTION TO PLATE (SINGLE PLATE)

図6, 7, 8に1枚板及び2枚板防波堤の各水平板に作用する単位波高当りの圧力分布を示す。これによると堤の前端付近で圧力が大きく後端に行くにつれ断片的に減少する傾向にあるが計算値によればこの変化の度合いは板数を増すことにより弱まる。しかし実験値では必ずしもこのことは認められない。

h/h_0 が減少すると圧力は水平板の前端部を除けば大体において増大し又圧力分布は一様になる傾向を示している。その例として1枚板防波堤における $2\pi h/L_0 (=0.4/g) = 1.0$ の場合を図9に示す。

5 結 論

水平板の幅及び枚数を増せば波の反射は増し、透過は減少する。特に板の幅は大きな影響を与える。このことから水平板下に位置する水鏡がそれ自身防波堤の役割を果たし、波の透過を妨げ反射を促すものと考えられこの傾向は、板幅が増すに従い強くなる。

反射率、透過率値共に実験値の方が小さいがこれは実際の場合には波のエネルギーの損失があり予期した結果である。

圧力は、板幅が大きくなるにつれ減少する傾向にある(しかし全圧は板幅が大きい程大である)。又波長の大きな波程圧力は大きい。

圧力分布は堤の前端で最も大きく後端に行く程減少し且つ勾配も小さくなるが計算値によると板の枚数を増すことにより圧力分布は、平均化される。又、板幅が狭い程圧力分布が平均化している。

以上の全体的に見て計算値と実験値の値そのものについては、充分な一致を見なかったが、傾向としてはほぼ一致している。尚、実験においては越波が主になり、或いは波高が大きくなるにつれ、空気が水平板下に流入して翼力の影響が見受けられたり或いは水平板その他によるエネルギー損失も考えられるなど理論的に考慮されない条件がはいってきたこと等幾つかの問題点が残されている。