

垂直板に作用する波力およびエネルギー損失

河野 二夫*・福岡 弘文**・高野 重利***

1. ま え が き

海浜の保護や水産生物の生息環境保全の立場から設置される水中離岸堤(潜堤)の機能に関し一般の潜堤の構造は複雑なため解析的取扱いが難かしいので潜堤として最も単純な垂直板による波の変形問題を扱ったものである。著者ら(1981)はリーフによる波の変形について運動量保存則を用いた手法を提案した。本論文でも同じ手法を適用しているが、とくに運動量方程式に含まれる境界面に働く流体力(垂直板に作用する波力)に注目して実験を行ない理論的考察を行なったものである。潜堤による波高減衰効果に関しては従来より多くの研究成果が発表されているが運動量保存則を用いた例はみあたらない。

2. 実験装置および実験内容

実験に用いた水槽は長さ15m, 高さ1m, 幅0.6mの鋼製水路で側壁の片面の1部分はガラス張りになっている。図-1に示すように水路の中央は隔壁板で仕切り, 一方の水路では入射波を計測し, 他方の水路には造波板より約9mの位置に垂直板を固定した。水路末端にある

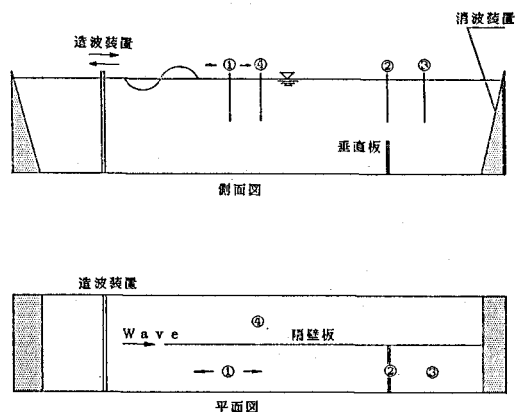


図-1 実験装置(造波水槽)

消波装置の部分で2つの水路は通水している。図中に示した①と③および②と④はおのおの部分重複波, 通過波および垂直板上の波形と入射波形を計測するための容量式波高計である。図-2には垂直板に作用する波圧と垂直板全体に作用する波力の計測装置を示してある。

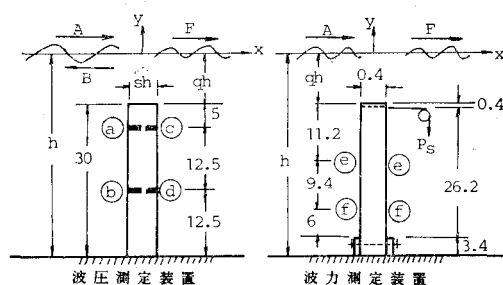


図-2 実験装置(波圧と波力の計測)

図-2で③, ④, ①, ②は圧力変換器(共和電業, PGM-05 KG)で受圧面積は 1.13 cm^2 である。同変換器を厚さ $sh=5\text{ cm}$ のタキロン板に固定した。右の図はMoment法により波力を計測する装置の断面図で厚さ 0.4 cm , 幅 4.3 cm , 高さ 30 cm (底部 3.4 cm は固定)の焼青銅板の表裏の対称の位置に至ゲージ③, ④を貼り, これをトランスジューサーとして波力による焼青銅板の変位を直流増幅器によってビジグラフに記録させた。水路幅は 30 cm であるので焼青銅板の両側は幅 12.7 cm , 厚さ 1 cm の亚克力板を焼青銅と 1.5 mm の間隔を取って固定した。図中の p_s は検定用の静荷重であるが, 波力の計測では空中での静荷重に対する歪ゲージの歪曲線を求めた後で造波による歪ゲージの応答をビジグラフに記録して解析のために用いた。他方波圧の検定は水槽の水深を増減することによって行なった。

実験条件は水深 $h=33.3, 37.5, 42.9$ および 50 cm で周期は $0.8\sim 3$ 秒, 入射波高は $3.6\sim 12\text{ cm}$ の範囲にある。なお図-2で数値の単位は cm である。

3. 理 論

(1) 反射率(K_r)

ポテンシャル接続法で K_r を算定するのであるが同手

* 正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木工学科

** 宮崎大学大学院 工学研究科

*** 正会員 宮崎大学技官 工学部土木工学科

法は Kono ら(1988)も詳細に説明しているので本文では要点だけ説明する。図-3 で A, B, F は入射波, 反射波, 通過波を示すが領域(1), (2), (3)の速度ポテンシャルは各領域の水面と水底の境界条件を満足する Laplace の方程式の解として得られる。次に各領域の相隣る接界面でポテンシャルと水粒子速度の水平成分が連続し, さらに垂直壁面 (CD, EF) で水粒子速度の水平成分が零になる条件式によって n, m (正の整数) を含む8個の連立方程式が得られる。これらの方程式には $\cosh, \cos$ 関数が含まれるが, これらが直交関数系をなすことを利用すると $(4+2n+2m)$ 個の連立1次方程式が得られるのでその解として未定係数 B/A などが求められ反射率を K_{rp} とすれば次式で算定される。ただし, 実際の反射率 (K_r とする) はエネルギー損失などによりポテンシャル計算による K_{rp} の値より小さくなると判断し, 比例係数 α を用いて式 (3-2) のように補正した。

$$K_{rp} = |B/A| \dots \dots \dots (3-1)$$

$$K_r = \alpha \cdot K_{rp} \dots \dots \dots (3-2)$$

K_{rp} の値は $n=m=3$ とし, 潜堤幅の比率は $S=0.05$ として Gauss の消去法により数値計算して求めた。

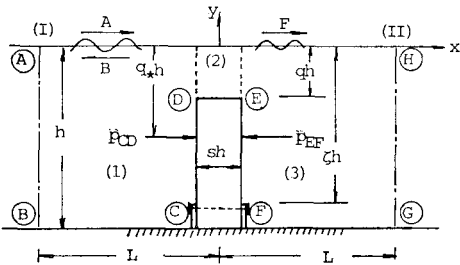


図-3 領域区分と垂直板に作用する波圧

(2) 垂直板前面に作用する波圧と波力

垂直板全体に作用する波の作用力を波力と定義し, 垂直板の単位面積に作用するものを波圧と定義する。図-3 で静水面より深さ y の点の水圧強度 p は次式で与えられる。式の中で ρ は水の密度, g は重力の加速度, t は時間, ϕ は速度ポテンシャル, $f(t)$ は時間項で水面 ($y=\eta$) における p を大気圧 ($p=0$) に等しいとして与える。

$$p = -\rho gy - \frac{\rho}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right\} - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + f(t) \dots \dots \dots (3-3)$$

微小振幅部分重複波の ϕ の値を上式に代入し式中に含まれる $\cosh k(h+\eta)$ などを展開し微小項を省略すると p の時間変動部分について式 (3-4) が求められる。

$$p/\rho g H_i = p_1 \cdot \cos \sigma t + (p_2 + p_3) \cos 2\sigma t \dots \dots (3-4)$$

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{1+K_r}{2} \cdot \frac{\cosh kh(1-q_*)}{\cosh kh} \\ p_2 &= \frac{\pi \delta_i}{4 \sinh 2kh} \cdot \{ (1+K_r)^2 \sinh^2 kh(1-q_*) \\ &\quad - (1-K_r)^2 \cdot \cosh^2 kh(1-q_*) \} \\ p_3 &= \frac{\pi \delta_i}{8 \tanh kh} \{ (1-K_r)^2 - 3(1+K_r)^2 \tanh^2 kh \} \end{aligned} \dots \dots \dots (3-5)$$

式 (3-4) で右辺第1項は局所慣性力, 第2項は対流項, 第3項は $f(t)$ の項に対応する。なお, k は波数, σ は角周波数, H_i は入射波高, δ_i は波形勾配である。

以上は波圧の式であるが, 波力は入射波側と通過波側の合成波圧になる。後述するように図-3 の p_{CD} (CD 面の波圧) は式 (3-4) の右辺第1項の値が実験値よく一致する。他方, p_{EF} (EF 面の波圧) は Ippen(1966) や堀川ら(1962)の研究によると部分重複波が形成されるため複雑になるので本文では単純に通過波による局所慣性力に比例するとして式 (3-6) のように仮定した。

$$\begin{aligned} \frac{p_{CD}}{\rho g H_i} &= \frac{1+K_r}{2} \cdot \frac{\cosh kh(h+y)}{\cosh kh} \cos(\sigma t + \gamma_1) \\ \frac{p_{EF}}{\rho g H_i} &= \beta_* \cdot \frac{K_t}{2} \cdot \frac{\cosh kh(h+y)}{\cosh kh} \cos(\sigma t + \gamma_2) \end{aligned} \dots \dots \dots (3-6)$$

上式で β_* は比例係数である。また波圧の合力を算定する場合は基本周波数 (水面波形と同じ) 以外の倍周波数成分が含まれるなどのため水面波形との間に位相差を生ずる。実験によると p_{CD} の分布形に対し time lag ($\gamma_1 > 0$) となり p_{EF} に対し time lead ($\gamma_2 > 0$) となって発生し, これらの位相差は kh の値が増大すると大きくなる。波力 (ΔP) は次式のように得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{\rho g H_i^2} &= \frac{1}{\rho g H_i^2} \int_{-\zeta h}^{-\sigma h} (P_{CD} - P_{EF}) dy \\ &= \frac{1}{4\pi \delta_i} \frac{\sinh kh(1+q) - \sinh kh(1-\zeta)}{\cosh kh} \\ &\quad \times \frac{\sqrt{(1+K_r)^2 + \beta_*^2 \cdot K_t^2 - 2\beta_*(1+K_r)K_t \cdot \cos(\gamma_1 - \gamma_2) \times \cos(\sigma t + \gamma_3)}}{\dots \dots \dots (3-7)} \end{aligned}$$

以上の式で K_t は通過率であり, γ_3 は波力と水面波形との間の位相差である。式 (3-7) で位相差を無視すれば $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ とし $\beta_* = \beta$ とおくと次式に変換される。

$$\frac{\Delta P}{\rho g H_i^2} = \frac{1}{4\pi \delta_i} \cdot \frac{\sinh kh(1-q) - \sinh kh(1-\zeta)}{\cosh kh} \times (1+K_r - \beta K_t) \cdot \cos \sigma t \dots \dots (3-8)$$

β と β_* の関係は $|p_{EF}/p_{CD}| = \xi$ とおき次式になる。

$$\frac{\beta}{\beta_*} = \frac{1}{\xi} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \xi \{ 2 \cos(\gamma_1 - \gamma_2) - \xi \}} \right\} \dots \dots \dots (3-9)$$

(3) 通過率 (K_t)

運動量保存則を適用して通過率を算定する。図-3 に示すように検査面④～⑥を取り運動量方程式を考えるのに垂直板より L (1 波長) の場所に断面 (I), (II) を設定すると運動量方程式は式 (3-10) で与えられる。

$$M_{II} - M_I = P_I - P_{II} - \overline{\Delta P} \quad (3-10)$$

ここで M_I , P_I は断面 (I) での流入運動量と部分重複波の圧力と静水圧, M_{II} と P_{II} は断面 (II) での流出運動量と通過波による圧力と静水圧である。 $\overline{\Delta P}$ は式 (3-8) で $\zeta=1$ として計算される。 ϕ_i, ϕ_r, ϕ_t を入射波, 反射波, 通過波の速度ポテンシャルとし, 式 (3-8) で ΔP が正の範囲で考えると各項は以下のように積分される。

$$\begin{aligned} M_I &= \rho \int_{-h}^0 \int_{-T/4}^{T/4} \left\{ \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \phi_r}{\partial x} \right)^2 \right\}_{x=L} dy dt \\ M_{II} &= \rho \int_{-h}^0 \int_{-T/4}^{T/4} \left\{ \left(\frac{\partial \phi_t}{\partial x} \right)^2 \right\}_{x=L} dy dt \\ P_I &= \rho \int_{-h}^0 \int_{-T/4}^{T/4} \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \frac{\partial \phi_r}{\partial t} - gy \right)_{x=L} dy dt \\ P_{II} &= \rho \int_{-h}^0 \int_{-T/4}^{T/4} \left(\frac{\partial \phi_t}{\partial t} - gy \right)_{x=L} dy dt \end{aligned} \quad (3-11)$$

$$\begin{aligned} \overline{\Delta P} &= \int_{-T/4}^{T/4} \Delta P dt = \frac{\rho g H_i}{k\sigma} \frac{\sinh kh(1+q)}{\cosh kh} \\ &\times (1 + K_r - \beta K_t) \quad (3-12) \end{aligned}$$

式 (3-11) の右辺を計算した結果と式 (3-12) を式 (3-10) に代入すると K_t は次式で計算される。

$$\begin{aligned} K_t &= \{ \sqrt{A_1^2 - 4A_2 - A_1} \} / 2 \quad (3-13) \\ A_1 &= B_1(1 - \beta \cdot B_2) \\ B_1 &= 4 \tanh kh / (n\pi^2 \delta_i) \\ B_2 &= \sinh kh(1 - q) / \sinh kh \\ A_2 &= (K_r + 1) \{ K_r - 1 - B_1(1 - B_2) \} \\ n &= (2kh + \sinh 2kh) / 2 \cdot \sinh kh \end{aligned} \quad (3-14)$$

(4) エネルギー逸散率 (ϵ)

波の 1 周期 (T) 当りのエネルギー逸散量を ΔE とすればエネルギー逸散率 ϵ は次式で求められる。

$$\epsilon = \Delta E / (T \bar{E}_i \cdot C_g) = 1 - K_r^2 - K_t^2 \quad (3-15)$$

ここで $\bar{E}_i$ と C_g は入射波のエネルギー密度と群速度である。式 (3-2) を仮定したことを前提にして反射波と通過波に対するエネルギー逸散率を ϵ_r , ϵ_t とすれば ϵ_r と ϵ_t は次式で算定される。

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= (K_{rp})^2 - (K_r)^2 = (K_{rp})^2 (1 - \alpha^2) \\ \epsilon_t &= \epsilon - \epsilon_r \end{aligned} \quad (3-16)$$

4. 実験結果と考察

(1) 反射率に対する実験的補正係数 (α)

式 (3-2) で K_{rp} をポテンシャル接続法で計算し, 実験で得られた反射率 K_r との比較から α を逆算した結果

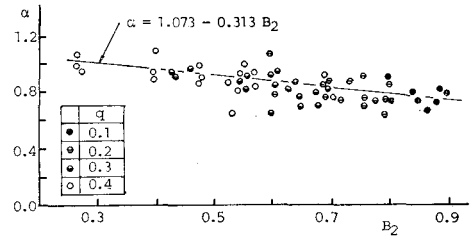


図-4 反射率に対する補正係数 (α)

を図-4 に示した。平均値と思われる値を目視によって実線で示したが実験の範囲内では次式になる。

$$\alpha = 1.073 - 0.313 \cdot B_2 \quad (4-1)$$

B_2 は式 (3-14) の中に示してある。図によると q の値が小さくなる程 α の値は減少している。一般にエネルギー逸散量は q が小さい程増大するのでエネルギー逸散量の大きさが反射率に影響していると推測される。

(2) 垂直板に作用する波圧と位相差

図-2 に示す垂直板の入射波側の③, ⑥点の波圧について実測値と式 (3-5) の計算値を比較したのが図-5～図-7 に示してある。計算値は式 (3-5) によるが式中に含まれる K_r の値は式 (3-2) の右辺に式 (4-1) と式 (3-1) の計算値を代入して求めたものであり, 波形勾配は $\delta_i=0.07$ と仮定してある。

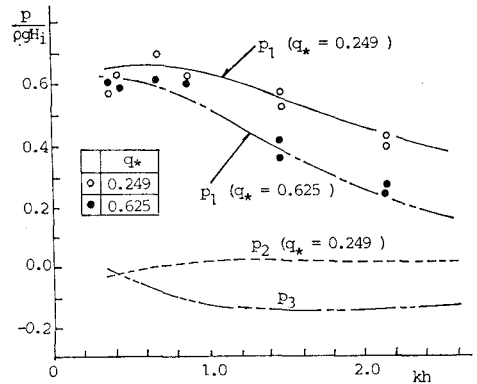


図-5 $\overline{CD}$ 面の波圧 ($q=0.1$)

図によると入射側の壁面に作用する波圧分布は局所慣性力による計算値とよく一致する。

図-2 に示す通過波側の③, ⑥点の波圧は理論的考察が苦難のため対応する位置での入射波側の波圧の比較を行なった。その結果の 1 例を図-8 に示した。実験結果によると kh の値が増大する程両面の波圧の比率は 1 に近い値になる。 p_d/p_b についても全く同様の結果が得られた。 kh の値が増大するのは相対的には表面波の性質が強くなることになるので潜堤近傍は通過波も部分重複波的な波圧が作用することを示すと判断される。

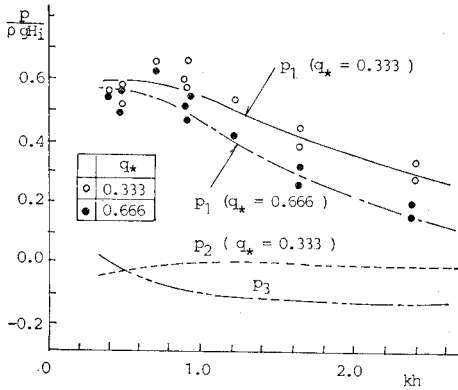


図-6 $\overline{CD}$ 面の波圧 ($q=0.2$)

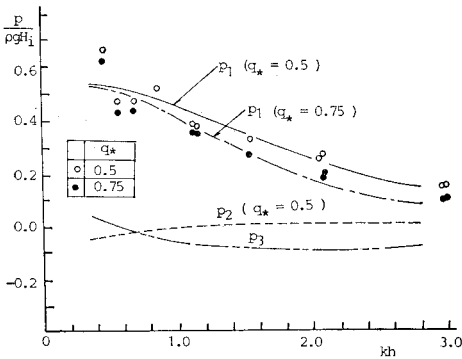


図-7 $\overline{CD}$ 面の波圧 ($q=0.4$)

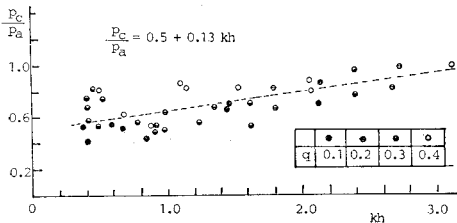


図-8 入射波側と通過波側の波圧の比較

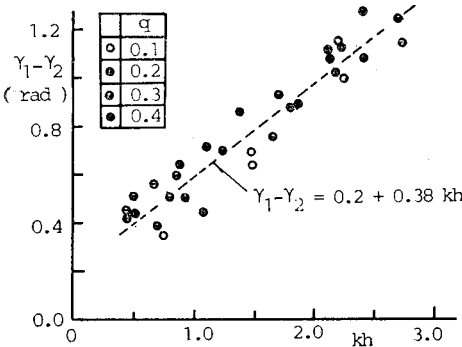


図-9 波圧波形と水面波形の位相差

図-9 には式 (3-7) に示す位相差 ($\gamma_1 - \gamma_2$) と kh の関係を示した。 γ_1 と γ_2 は図-2 で入射波側の波圧波形と通過波側の波圧波形が水面波形に対する位相差である。

位相差は波圧の基本周波数成分と倍周波数成分の比率に関係し、この比率が増大 (1 に近づく) する程大きくなると考えられる。 図-5～図-7 によりこの比率は kh の増加と共に増大していることと図-9 の結果は一致する。(ただし、 $\gamma_1 > 0$ で $\gamma_2 < 0$ である)。

(3) 垂直板に作用する波力

垂直板全体に作用する単位幅当りの波力は式 (3-7) または式 (3-8) で計算される。一般の潜堤の場合は $\zeta=1$ である。式の中には実験的補正係数 β_* や β が含まれているので本論文ではこれらの係数を moment 法による波力の実験結果から逆算して求めその特性を明らかにした。moment 法により波力を計測する実験は河野 (1978) も扱ったので本文ではその説明を省略する。

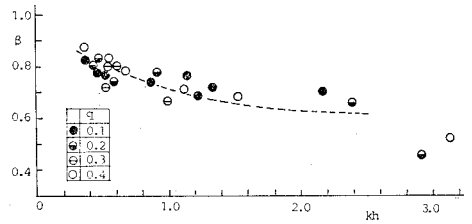


図-10 補正係数 β と kh の関係

図-10 には β の値と kh の関係を示した。また図-11 には式 (3-9) による β_* の計算値を示してある。

β_* の計算値は ξ として図-8 の中に示した目視による平均値 (p_c/p_a に対する点線の実験式) を採用し、($\gamma_1 - \gamma_2$) の値は図-9 に示した同様の実験式を採用した。また β の値は図-10 に示した実験値の平均値 (目視で引いた点線上の値) を読み取って β_* の値を求めた。

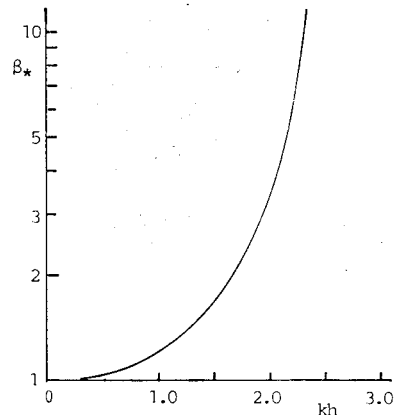


図-11 β_* の計算値と kh の関係

β_* は波圧の補正係数である。実際の波圧は既述のように kh が増加すると部分重複的な波圧になるが計算では通過波の波圧を仮定したので β_* は 1 より大きな値に増大する。他方, β は垂直板全体に作用する波力の補正係数であるから当然 β_* より小さな値になる。また実際の波力 (ΔP) は位相差の大きい (kh の大きい) ほど位相差を無視した計算上の ΔP より大きくなるので式 (3-8) に定義した β の値は kh の増大に伴って減少する。

(4) エネルギー逸散率

式 (3-15) と (3-16) で計算したエネルギー逸散率と実験値の比較を図-12 と図-13 に示した。計算値は K_r を式 (3-2) で, K_t を式 (3-13) で計算し α は式 (4-1) の実験式を用い δ_i は 0.07 と仮定した。図-12 によると kh の値が増加する程エネルギー逸散率 (ϵ , ϵ_t) は増加する。河野ら (1981) の実験によるとポテンシャル理論に基づく K_t の計算値は kh の増加に伴って実験値より大きな値になることから判断して上記の傾向は理解される。 q が 0.1 以外の場合も同様の傾向になる。

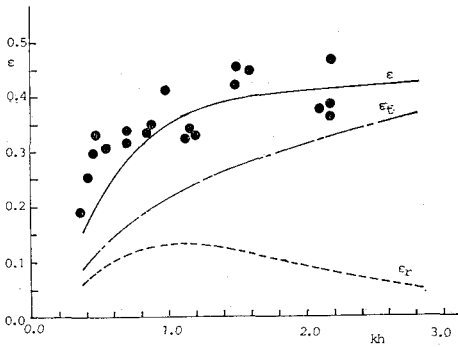


図-12 エネルギー逸散率 ($q=0.1$)

図-13 の実験値は Shankar ら (1984) によるが計算値と実験値は比較的良好一致している。

5. 結 論

潜り垂直板による波の変形問題に関し反射率についてはポテンシャル理論を適用し, 通過率については運動量保存則を適用した手法を提案してきたが, 本研究では運

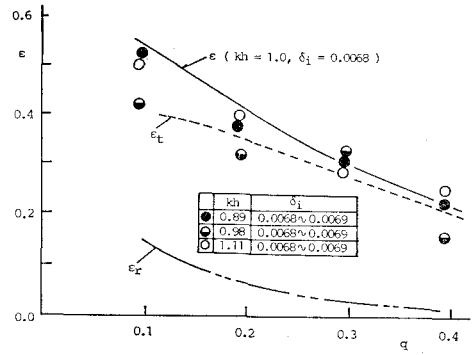


図-13 エネルギー逸散率と q の関係

動量方程式に含まれる境界面に働く流体力 (垂直板に働く波力) に注目し理論的・実験的な検討を行ない考察を行なった。さらに垂直板による波のエネルギー損失について考察を加えた。主要な結論は次のようになる。

- (1) 入射波側の波圧の実験値は微小振幅波理論による局所慣性力の計算値に比較的良好一致する。
- (2) 通過波側の波圧は浅水度が増加するに伴って入射波側の波圧の大きさに近い値まで増大する。
- (3) 入射波側と通過波側の波圧波形の位相差は浅水度の増加に伴って大きくなる。
- (4) 垂直板による波のエネルギー逸散率は運動量保存則を適用した計算値と実験値が比較的良好一致する。

参 考 文 献

- 河野二夫・津嘉山正光 (1981): リーフによる波の変形に関する研究, 土木学会論文集, 第 307 号, pp. 27~38.
- 河野二夫 (1978): エフィーラ形魚礁に作用する流体力, 第 33 回年講概要集, pp. 730~731.
- 堀川清司・鮮干 澈 (1962): 潜堤周辺における波動の変形, 第 17 回年講概要集, pp. 141~142.
- Ippen, A. T. (editor). (1966): Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill Book Company, Inc., p. 34.
- Kono, T. and T. Shinteni (1988): Reflection and Transmission Coefficients of Surface Waves by a Vertical Thin Barrier, memoris of Faculty of Eng., Miyazaki Univ., No. 18, pp. 1~18.
- Shankar, N. J. and V. H. Fatt. (1984): Effects of Submerged Wall on Attenuation of Incident Waves, Proc. 4th Congress of APD-IAHR, Vol. 1, pp. 325~338.