

波の遡上、越波および反射の関連性について（第3報）*

——水面波形と越波量の相關特性——

高 田 彰**

1. ま え が き

計画天端高に対する越波量は防災上きわめて重要な問題点である。

重複波領域に設置される鉛直壁が不規則な波群の侵入波に対して、越波を完全に防止することは現実の問題として非常に難しい。

本研究は重複波領域における鉛直壁の越波量を対象として、有限振幅重複波理論の水面波形と越波量の相關特性を実験的に検討したものである。

そこで、有限振幅重複波の各種の理論式の適合性を検討し、第3次近似式（Tadjbakhsh-Keller式）が適合性のよいことがわかったので、ここでは、第3次近似式の水面波形（空間波形および時間波形）と越波量の相關特性を無風の場合について明らかにしている。

2. 理論的考察

2・1 有限振幅重複波の水面波形

重複波の理論波形は種々発表されているが、実験波形と適合性のよい理論波形を選び出すために、Sainflou式¹⁾、Miche式²⁾、第2次近似式（浜田式）³⁾、第3次近似式（Tadjbakhsh-Keller式）⁴⁾および第4次近似式（合田式）⁵⁾の5種類の理論式を比較の対象とする。

(1) 壁面に波の峯があるときの空間波形

静水面をx軸とし、鉛直壁面をz軸上向きに正とする。堤脚水深hにおける入射波について、鉛直壁面の水位変動 $\eta(t/T)$ の1/2を入射波高Hと定義する。

$$H = \frac{\eta(t/T)_{\max} - \eta(t/T)_{\min}}{2} \dots\dots\dots (1)$$

周期をT、波長をL、 $k=2\pi/L$ とすれば、空間波形 $\eta(x)$ の各種の理論式はそれぞれ次のように示される。

i) Sainflou 式¹⁾

$$\eta_s(x) = H \cos kx_0 + \frac{H^2}{2} k \coth kh \dots\dots\dots (2)$$

$$x = x_0 - H \coth kh \cdot \sin kx_0 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 x_0 ：静止時における静水面水分子の座標

ii) 第2次近似式（浜田式）²⁾

$$\eta_{II}(x) = H \cos kx + \frac{1}{8} H^2 k (3 \coth^3 kh + \tanh kh) \cos 2 kx \dots\dots\dots (4)$$

iii) Miche 式³⁾

$$\eta_m(x) = \eta_{II}(x) + \frac{1}{2} H^2 k (1 - \cos 2 kx) \coth kh \dots\dots\dots (5)$$

iv) 第3次近似式（Tadjbakhsh-Keller式）⁴⁾

$$\eta_{III}(x) = \left\{ \epsilon_A H + \frac{1}{2} (\epsilon_A H)^2 k^2 (b_{11} + b_{31}) \right\} \cos kx + \frac{1}{8} (\epsilon_A H)^2 k (3 \coth^3 kh + \tanh kh) \cos 2 kx + \frac{1}{2} (\epsilon_A H)^3 k^2 (b_{13} + b_{33}) \cos 3 kx \dots\dots (6)$$

ここで、 ϵ_A , b_{11} , b_{13} , b_{31} および b_{33} はそれぞれ次のように示される。

$$b_{11} = \frac{1}{32} (3 \omega^{-2} + 6 \omega^{-1} - 5 + 2 \omega) \dots\dots\dots (7)$$

$$b_{13} = \frac{3}{128} (9 \omega^{-2} + 27 \omega^{-1} - 15 + \omega + 2 \omega^2) \dots (8)$$

$$b_{31} = \frac{1}{128} (-3 \omega^{-2} - 18 \omega^{-1} + 5) \dots\dots\dots (9)$$

$$b_{33} = \frac{3}{128} (9 \omega^{-3} - 3 \omega^{-2} + 3 \omega^{-1} - 1) \dots\dots (10)$$

ここで、 $\omega = (\tanh kh)^2 \dots\dots\dots (11)$

$$\epsilon_A = \frac{A}{H} = S^{1/3} \left\{ \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{S}{27}} \right)^{1/3} + \left(\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{S}{27}} \right)^{1/3} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

(A：微小振幅重複波の振幅)

ここで、

$$S = \frac{2}{H^2 k^2 (b_{11} + b_{13} + b_{31} + b_{33})} \dots\dots\dots (13)$$

v) 第4次近似式（合田式）⁵⁾

$$\eta_{IV}(x) = \eta_{III}(x) + \frac{1}{6} k^3 (\epsilon_A H)^4 \{ (b_{02} + b_{22} + b_{42}) \cos 2 kx + (b_{04} + b_{24} + b_{44}) \cos 4 kx \} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 b_{02} , b_{22} , b_{24} , b_{04} , b_{42} および b_{44} はそれぞれ次のように示される。

* 第1報は土木学会論文報告集, No.182, (1970-10).

第2報は第17回海岸工学講演会論文集, (1970-11).

** 正会員 工修 中部工業大学助教授 土木工学教室

$$b_{02} = \frac{1}{512\sqrt{\omega}} (-27\omega^{-2} + 288\omega^{-1} + 168 \\ - 210\omega - 45\omega^2 + 18\omega^3) \dots\dots\dots (15)$$

$$b_{22} = \frac{1}{512\sqrt{\omega}} (-81\omega^{-4} - 54\omega^{-3} + 423\omega^{-2} \\ - 583\omega^{-1} + 108 - 195\omega - 18\omega^2) \dots\dots\dots (16)$$

$$b_{42} = \frac{1}{512(3+4\omega)\sqrt{\omega}} (-81\omega^{-3} - 1053\omega^{-2} \\ + 63\omega^{-1} - 283 + 282\omega) \dots\dots\dots (17)$$

$$b_{04} = \frac{1}{512\sqrt{\omega}} (54\omega^{-3} + 243\omega^{-2} + 198\omega^{-1} \\ + 6 - 198\omega + 63\omega^2 + 18\omega^3) \dots\dots\dots (18)$$

$$b_{24} = \frac{1}{512(3+\omega)\sqrt{\omega}} (324\omega^{-3} + 2484\omega^{-2} \\ - 1152\omega^{-1} - 2072 + 1092\omega + 420\omega^2 \\ - 72\omega^3) \dots\dots\dots (19)$$

$$b_{44} = \frac{1}{512(5+\omega)\sqrt{\omega}} (405\omega^{-4} + 81\omega^{-3} \\ + 522\omega^{-2} - 262\omega^{-1} + 1 + 21\omega) \dots\dots\dots (20)$$

なお、 $\eta_{\text{III}}(x)$ および $\eta_{\text{IV}}(x)$ の H は式(1)で定義されたとしたが、進行波の入射波高 H_t より 0~15%程度大きく、両者は次式で示される⁵⁾。

$$\frac{H}{H_t} = 1 + \frac{\frac{1}{4}(k\varepsilon_A H)^2\{\omega - \omega^{-1} + 2 + 4(b_{31} + b_{13})\}}{2 + (k\varepsilon_A H)^2(b_{11} + b_{33})} \dots\dots\dots (21)$$

一方、重複波が生ずると L は変化して次式で示される⁵⁾。

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh kh \left\{ 1 + \frac{1}{64}(k\varepsilon_A H)^2(9 \coth^4 kh \right. \\ \left. - 12 \coth^2 kh - 2 \tanh^2 kh - 3) \right\} \dots\dots\dots (22)$$

微小振幅波の波長 L_A と比較すれば、 $L/L_A = 0.9 \sim 1.15$ 程度の変化がある⁵⁾。

しかし、本研究では近似的に $H_t \approx H$, $L \approx L_A$ とみなして実験値および計算値を整理することにした。

(2) 壁面における時間波形

時間波形 $\eta(t/T)$ の各種の理論式は次のように示される。

i) Sainflou 式¹⁾

$$\eta_s(t/T) = H \cos nt + \frac{H^2}{2} k \coth kh \cdot \cos^2 nt \\ (n = 2\pi/T) \dots\dots\dots (23)$$

ii) 第2次近似式²⁾

$$\eta_{\text{II}}(t/T) = H \cos nt + \frac{H^2}{8} k (3 \coth^3 kh - \coth kh) \\ \times \cos 2nt + \frac{H^2}{4} k \coth 2kh \dots\dots\dots (24)$$

iii) Miche 式³⁾

$$\eta_{\text{III}}(t/T) = \eta_{\text{II}}(t/T) \dots\dots\dots (25)$$

iv) 第3次近似式⁴⁾

$$\eta_{\text{III}}(t/T) = \left\{ \varepsilon_A H + \frac{1}{2} k^2 (\varepsilon_A H)^3 (b_{11} + b_{13}) \right\} \cos nt \\ + \frac{1}{8\sqrt{\omega}} k (\varepsilon_A H)^2 \{1 + \omega \\ + (3\omega^{-1} - 1) \cos 2nt\} \\ + \frac{1}{2} k^2 (\varepsilon_A H)^3 (b_{31} + b_{33}) \cos 3nt \\ \dots\dots\dots (26)$$

v) 第4次近似式⁵⁾

$$\eta_{\text{IV}}(t/T) = \eta_{\text{III}}(t/T) + \frac{1}{6} k^3 (\varepsilon_A H)^4 \{ (b_{22} + b_{24}) \cos 2nt \\ + (b_{42} + b_{44}) \cos 4nt + b_{02} + b_{04} \} \dots\dots\dots (27)$$

(3) 波頂高

壁面に波の峯があるときの波頂高と水面波形は密接な関連性があると考えられる。

静水位上の波頂高 R は次式で示される。

$$\frac{R}{H} = 1 + \delta \dots\dots\dots (28)$$

$$\delta = \frac{\eta(t/T)_{\text{max}} - H}{H} = \frac{2\{\eta(t/T)_{\text{max}} + \eta(t/T)_{\text{min}}\}}{\eta(t/T)_{\text{max}} - \eta(t/T)_{\text{min}}} \dots\dots\dots (29)$$

ここで、 δ : 非線形効果を表わす項。有限振幅重複波の理論式によって異なるが、前述の理論式より、それぞれ次のように示される。

i) Sainflou 式¹⁾

$$\delta_s = \frac{1}{2} k H \coth kh \dots\dots\dots (30)$$

ii) 第2次近似式²⁾

$$\delta_{\text{II}} = \frac{1}{8} k H (3 \coth^3 kh + \tanh kh) \dots\dots\dots (31)$$

iii) Miche 式³⁾

$$\delta_{\text{III}} = \delta_{\text{II}} \dots\dots\dots (32)$$

iv) 第3次近似式⁴⁾

$$\delta_{\text{III}} = \varepsilon_A^2 \cdot \delta_{\text{II}} \dots\dots\dots (33)$$

v) 第4次近似式⁵⁾

$$\delta_{\text{IV}} = \delta_{\text{III}} + \frac{1}{6} (kH)^3 \varepsilon_A^4 (b_{02} + b_{22} + b_{42} \\ + b_{04} + b_{24} + b_{44}) \dots\dots\dots (34)$$

2.2 水面波形と越波量の相関特性

越波量が多くなると重複波は部分重複波に移行すると考えられる。土屋・山口によれば、越波による重複波高の減少量を考慮して、無越波時の H を補正した値を越波時の入射波高とみなして取り扱えば、重複波理論が適用できるとしている⁷⁾。

しかし、やや不便であるので、本研究では近似的に無越波時の空間波形および時間波形と越波量の相関特性を検討することにする。

(1) 空間波形と越波量の相関

$\eta(x)$ と一周期 T の越波量 Q を関連づける場合に次の二つの方法が考えられる。

- i) 仮想天端高 H_c における越波角度 β (図-1)
- ii) 空間波形の容積 V_c の越波量係数 a (図-2)
- i) 越波角度 β による相関

図-1 に示すように斜線部分の波形の容積 V_β が Q に

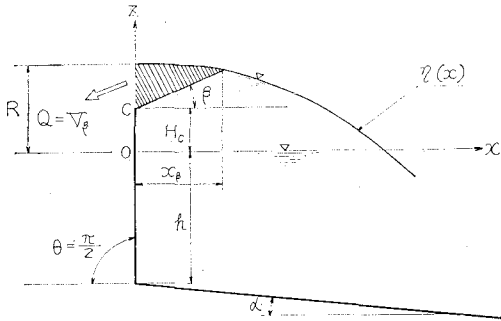


図-1 空間波形と越波量の相関 (越波角度 β)

等しいとおくことにより次式で関連づけることができる。

$$Q = V_\beta = \int_0^{x_\beta} \{ \eta(x) - (x \tan \beta + H_c) \} dx \quad \dots\dots\dots (35)$$

ここで、 x_β は図-1 に示されるが、次式で求められる。

$$\eta(x_\beta) = x_\beta \tan \beta + H_c \quad \dots\dots\dots (36)$$

これらより、 β の特性が系統的に説明がつけばよいことになる。

- ii) 越波係数 a による相関

図-2 に示すように、斜線部分の波形の容積 V_c に越波量係数 a を乗じた aV_c が Q に等しいとおくことにより、次式で関連づけることができる。

$$Q = aV_c = a \int_0^{x_c} \{ \eta(x) - H_c \} dx \quad \dots\dots\dots (37)$$

ここで、 x_c は図-2 に示されるが、次式で求められる。

$$\eta(x_c) = H_c \quad \dots\dots\dots (38)$$

これらより、 a の特性が系統的に説明できればよいことになる。

(2) 時間波形と越波量の相関

越波現象を刃形全幅堰の越波現象に近似すれば、越波

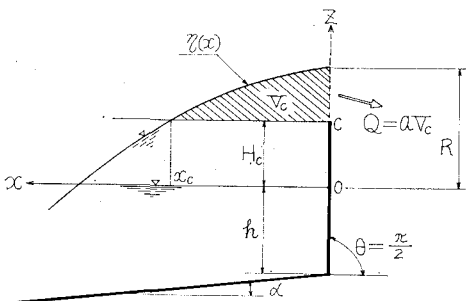


図-2 空間波形と越波量の相関 (越波量係数 a)

量は定常な堰の越流量として取扱うことができる^{8)~11)}。

しかし、定量的に十分解明されたとはいえないように考えられる。

本研究は、そのような観点から有限振幅重複波の理論波形を用いて検討する。

水面の上昇時と下降時の越波を分けて考え、図-3 に示す記号を用いれば、一般式は次式で示される。

$$\begin{aligned} Q &= Q_{up} + Q_{down} = \int_{(t_c)_u}^T q_u dt + \int_T^{(t_c)_d} q_d dt \quad \dots\dots\dots (39) \\ &= \frac{2}{3} \sqrt{2g} C'_{up} \int_{(t_c)_u}^T \left[\left\{ \eta'(t/T) + \frac{U^2(t/T)}{2g} - H_c \right\}^{3/2} - \left\{ \frac{U^2(t/T)}{2g} \right\}^{3/2} \right] dt + \frac{2}{3} \sqrt{2g} C'_{down} \\ &\quad \times \int_T^{(t_c)_d} \left[\left\{ \eta'(t/T) + \frac{U^2(t/T)}{2g} - H_c \right\}^{3/2} - \left\{ \frac{U^2(t/T)}{2g} \right\}^{3/2} \right] dt \quad \dots\dots\dots (40) \end{aligned}$$

ここで、

Q_{up} および q_u : 水面の上昇時の越波量および越波流量

Q_{down} および q_d : 水面の下降時の越波量および越波流量

C'_{up} : 水面の上昇時の越波流量係数

C'_{down} : 水面の下降時の越波流量係数

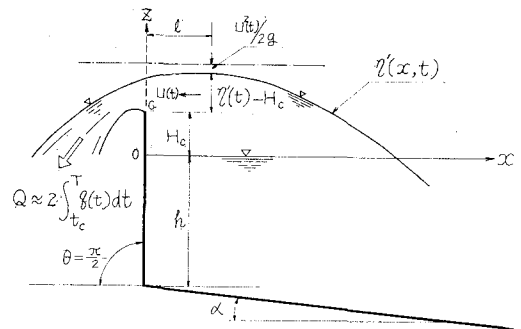


図-3 (a) 時間波形と越波量の相関 (越波流量係数 K)

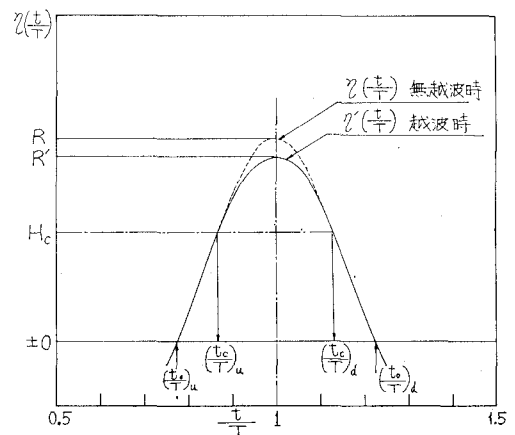


図-3 (b) 時間波形と越波

$\eta'(t/T)$: 越波時の壁面での時間波形

$U(t/T)$: 壁前面の接近流速

$(t_c)_u$: 上昇時に $z=H_c$ に達する時間。図-3 (b) に示されるが、 $\eta'(t_c/T)=H_c$ より求まる。ただし、 $(t_c/T)_u=0.75\sim 1$ の間で決めるものとする。

$(t_c)_d$: 下降時に $z=H_c$ に達する時間。図-3 (b) に示されるが、 $\eta'(t_c/T)=H_c$ より求まる。ただし、 $(t_c/T)_d=1\sim 1.25$ の間で決める。

いま、近似的に上昇時と下降時の波形が対称とし、 $C'_{up} \approx C'_{down}$ とすれば、次式のように書き換えられる。

$$Q = 2 C' \int_{(t_c)_u}^T q dt = \frac{4}{3} \sqrt{2g} C' \times \int_{(t_c)_u}^T \left\{ \eta'(t/T) - H_c \right\}^{3/2} dt \quad \dots\dots (41)$$

$\eta'(t/T)$ については、土屋・山口の実験⁷⁾によれば、越波による重複波高の減少量を考慮して、無越波時の入射波高を補正した値を越波時の H とみなせば、有限振幅重複波理論の水面波形が適用できる。

しかし、 H_c/H が変化すれば、 $\eta'(t/T)$ も変化するので、その都度複雑な計算をし直す必要を生じやや不便である。

そこで、実用的に次の二つの方法が考えられる。

- i) 無越波時の理論波形 $\eta(t/T)$ と Q の相関
 - ii) $\eta'(t/T)$ を台形近似波形とみなした Q との相関
- ii) の方法は土木学会論文報告集に投稿中¹²⁾であるので、ここでは i) の方法について検討することにする。

$\eta'(t/T)$ の代りに $\eta(t/T)$ を用いることにすれば、式(41)は次のように書き換えられる。

$$Q = \frac{4}{3} \sqrt{2g} K \int_{t_c}^T \{ \eta(t/T) - H_c \}^{3/2} dt \quad \dots\dots (42)$$

しかし、直接に積分することが困難であるので、Tschebyscheff の方式で平均値法による関数の数値積分法を用いることにすれば次式で示される。

$$Q = \frac{1}{3} \sqrt{2g} K \{ F(t_1/T) + F(t_2/T) + F(t_3/T) + F(t_4/T) \} \left(1 - \frac{t_c}{T} \right) \quad \dots\dots (43)$$

ここで、 t_c は次式より求められる。

$$\eta(t_c/T) = H_c \quad \dots\dots (44)$$

$$(t_c/T) = 0.75 \sim 1$$

$$F(t_n/T) = \{ \eta(t_n/T) - H_c \}^{3/2} \quad \dots\dots (45)$$

$$(n=1, 2, 3 \text{ および } 4)$$

$$\left. \begin{aligned} t_1/T &= 0.8973 t_c/T + 0.1027 \\ t_2/T &= 0.5938 t_c/T + 0.4062 \\ t_3/T &= 0.4062 t_c/T + 0.5938 \\ t_4/T &= 0.1027 t_c/T + 0.8973 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (46)$$

これらより、 K の特性が系統的に説明できれば、 $\eta(t/T)$ と Q の相関特性が明らかになる。

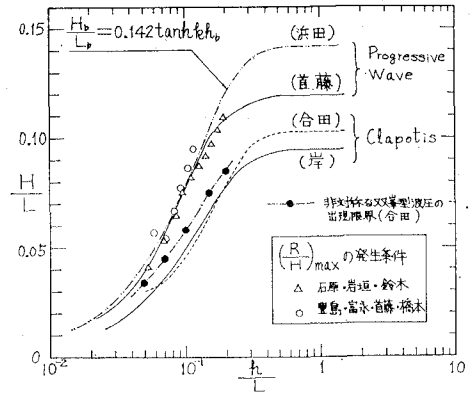


図-4 進行波および重複波の碎波限界と $(R/H)_{\max}$ の発生条件

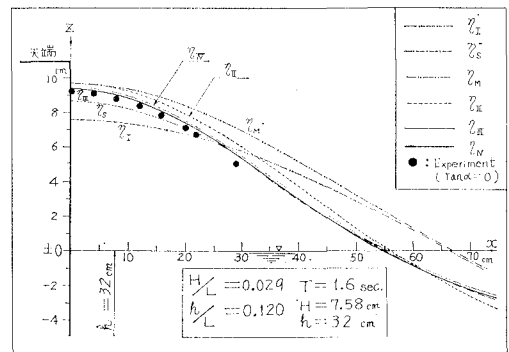


図-5 壁面における空間波形の理論値と実験値の比較

3. 実験方法

厳密には、図-4に示される重複波の碎波水深より深い領域を実験の対象とすべきであるが、重複波的な性質は、一般に進行波の碎波点付近まで維持され⁵⁾、鉛直壁における波の打ち上げ高は進行波の碎波点直後において最大となる^{13)~16)}ことが明らかにされているので、本研究では、進行波の碎波水深より深い領域に有限振幅重複波理論が適用できるとして考える。

$(R/H)_{\max}$ を生ずる条件は図-4に示されるように、浜田の進行波の碎波限界の実験式¹⁷⁾および首藤の進行波の碎波限界の理論値¹⁸⁾とはほぼ一致するので、近似的に浜田の実験式を本研究の碎波限界とする。すなわち次式で示される範囲を対象とする。

$$\frac{H}{L} \leq 0.142 \tanh kh_b \quad \dots\dots (47)$$

(h_b : 碎波水深)

なお、図-4には、重複波の碎波限界として、岸の理論式¹⁹⁾、合田の第3次近似解および実験値(非対称な双峯型波圧の出現限界⁵⁾)を示してある。

越波の実験は、 $\tan \alpha = 0$ および $1/10$ における鉛直壁について、進行波の碎波水深より深い領域の波を用いて行なった。

なお、 $\tan \alpha = 1/10$ の実験は岩垣らの実験結果の無次元表示²⁰⁾を換算した値を採用している。

Q の測定は第 6 波～第 10 波の累積越波量の平均値を採用し、 $\eta(x)$ の測定は写真撮影 (シャッター速度 1/250 sec) より求めた。

また、 H, R および $\eta(t/T)$ は抵抗線式水位計で測定し、 L は T を測定して L_A を求め、 $L \approx L_A$ として整理した。

4. 実験結果とその考察

4.1 重複波の水面波形

(1) 空間波形

図-5 は、 $\eta_s(x), \eta_{II}(x), \eta_{III}(x), \eta_{IV}(x)$ および $\eta_{IV}(x)$ の理論波形と実験波形を比較したものである。

これより、 $\eta_{III}(x)$ および $\eta_{IV}(x)$ の適合性がよく、特に $\eta_{III}(x)$ が最も実験波形に近似している。このような傾向は $\tan \alpha \leq 1/400$ における種々の H/L の波でも確かめることができた。

(2) 時間波形

図-6 は、 $\eta_s(t/T), \eta_{II}(t/T), \eta_{III}(t/T), \eta_{IV}(t/T)$ および $\eta_{IV}(t/T)$ の理論波形と実験波形を比較したものである。

これより、 $\eta_{III}(t/T)$ および $\eta_{IV}(t/T)$ の適合性がよく、とくに $\eta_{III}(t/T)$ が最も実験波形に近似している。このような傾向は $\tan \alpha \leq 1/400$ における種々の H/L の波について行なった土屋・山口の実験⁷⁾ においても明らかにされている。

(3) 波頂高

R/H は式 (28) より求められるので、式中の δ の各種理論式と実験値を比較検討する。

図-7 は $\delta_s, \delta_{II}=\delta_{III}, \delta_{IV}$ および δ_{IV} の理論式と実験値を比較したものである。

これらより、一般に δ_{III} および δ_{IV} の適合性が非常によいことがわかる。

以上の考察より、本研究では、 $\eta_{III}(x)$ および $\eta_{III}(t/T)$ と Q の関連特性を検討することにする。

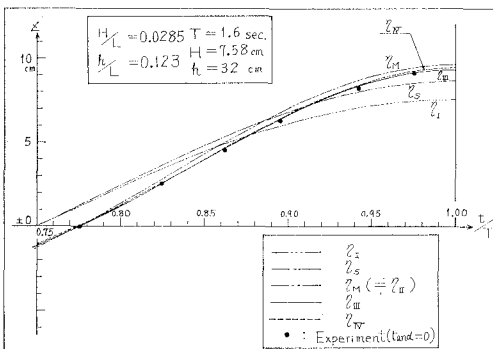


図-6 時間波形の理論値と実験値の比較

4.2 $\eta_{III}(x)$ と Q の関連特性

(1) β_{III} の特性

式 (35) に式 (6) を代入すれば次式のようにになる。

$$Q = \int_0^{x_{\beta_{III}}} \{ \eta_{III}(x) - (x \tan \beta_{III} + H_c) \} dx \\ = \frac{1}{k} \left\{ \varepsilon_A H + \frac{1}{2} (\varepsilon_A H)^2 k^2 (b_{11} + b_{31}) \right\} \sin k x_{\beta_{III}} \\ + \frac{1}{16} (\varepsilon_A H)^2 (3 \coth^3 kh + \tanh kh) \sin 2 k x_{\beta_{III}} \\ + \tanh kh \sin 2 k x_{\beta_{III}} + \frac{1}{6} (\varepsilon_A H)^3 k \\ \times (b_{13} + b_{33}) \sin 3 k x_{\beta_{III}} \\ - \left(\frac{x_{\beta_{III}}^2}{2} \tan \beta_{III} + H_c x_{\beta_{III}} \right) \dots \dots \dots (48)$$

ここで、 $\beta_{III} : \eta_{III}(x)$ を用いた場合の越波角度

$x_{\beta_{III}}$: 式 (36) に式 (6) を代入して求められる。

いま、 $\tan \beta_{III}$ におよぼす $H_c/H, H/L$ および h/L の影響を調べる。

i) $\tan \beta_{III}$ と H_c/H の関係

図-8 は H/L をパラメーターにして $\tan \beta_{III}$ と H_c/H の関係を表わしたものである。これらより、 H_c/H にほぼ無関係に一定となることがわかる。

ii) $\tan \beta_{III}$ と H/L および h/L の関係

図-9 は $h/L = 0.12 \sim 0.18$ における $\tan \beta_{III}$ が H/L によってどのように変化するかを示したものである。

これより、重複波の碎波点付近で $\tan \beta_{III}$ が極大になることがわかる。

すなわち、重複波の碎波水深より深い領域では H/L が小さいほど $\tan \beta_{III}$ も小さくなり、重複波の碎波水深より浅い領域では H/L が大きいほど $\tan \beta_{III}$ が小さくなる。

(2) a_{III} の特性

式 (37) に式 (6) を代入すれば次式のようにになる。

$$Q = a_{III} \int_0^{x_c} \{ \eta_{III}(x) - H_c \} dx \\ = a_{III} \left[\frac{1}{k} \left\{ \varepsilon_A H + \frac{1}{2} (\varepsilon_A H)^2 k^2 (b_{11} + b_{31}) \right\} \sin k x_c \right. \\ + \frac{1}{16} (\varepsilon_A H)^2 (3 \coth^3 kh + \tanh kh) \sin 2 k x_c \\ + \frac{1}{6} (\varepsilon_A H)^3 k (b_{13} + b_{33}) \sin 3 k x_c - H_c x_c \left. \right] \\ \dots \dots \dots (49)$$

ここで、 $a_{III} : \eta_{III}(x)$ を用いた場合の越波量係数

x_c : 式 (38) に式 (6) を代入して求められる。

いま、 a_{III} におよぼす $H_c/H, H/L$ および h/L の影響を調べる。

i) a_{III} と H_c/H の関係

図-10 は H/L をパラメーターにして a_m と $(R_m - H_c)/H$ の関係を表わしたものである。

これらよりかなりバラツキはあるが、近似的に次式で示される。

$$a_m \propto \left(\frac{R_m}{H} - \frac{H_c}{H} \right)^{c_1} \dots\dots\dots (50)$$

ここで、 c_1 : 実験定数 (>0)。これまでの実験の範囲では $0.15 \sim 0.52$ であり、平均的に $c_1 \approx 0.4$ となる。

ii) a_m と H/L の関係

図-11 は、 $H_c/H=0.8 \sim 1.1$ において h/L をパラメーターとして、 H/L の影響を表わしたものである。

これより、近似的に次式で示される。

$$a_m \propto (H/L)^{c_2} \dots\dots\dots (51)$$

ここで、 c_2 : 実験定数 (>0)。これまでの実験の範囲では $1 \sim 1.8$ であり、平均的に $c_2 \approx 1$ となる。

iii) a_m と h/L の関係

図-12 は、 $H_c/H=0.8 \sim 1.1$ において H/L をパラメーターとして h/L の影響を表わしたものである。

これより、実験値のバラツキはあるが、近似的にほぼ一定の値になることがわかる。

iv) a_m の算定式とその適合性

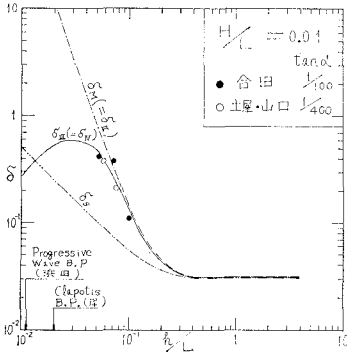


図-7 (a) $H/L=0.01$

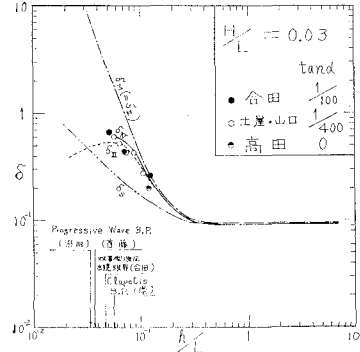


図-7 (b) $H/L=0.03$

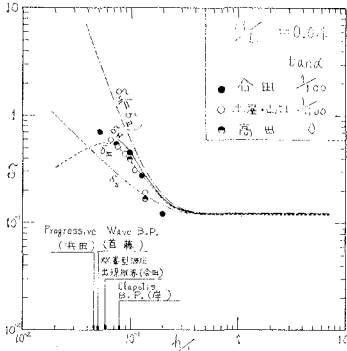


図-7 (c) $H/L=0.04$

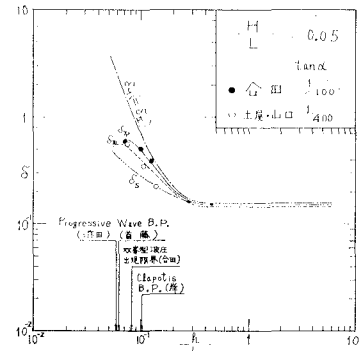


図-7 (d) $H/L=0.05$

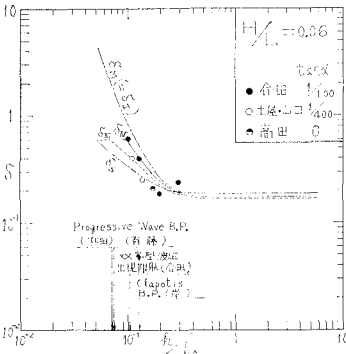


図-7 (e) $H/L=0.06$

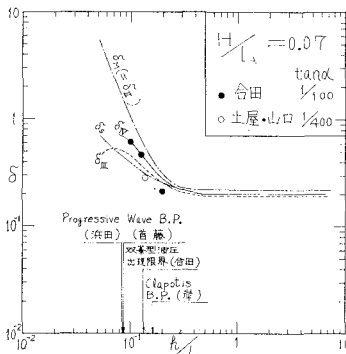


図-7 (f) $H/L=0.07$

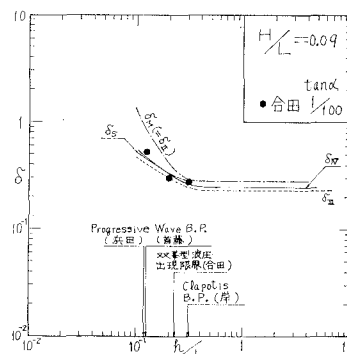


図-7 (g) $H/L=0.09$

図-7 δ の理論値と実験値の比較

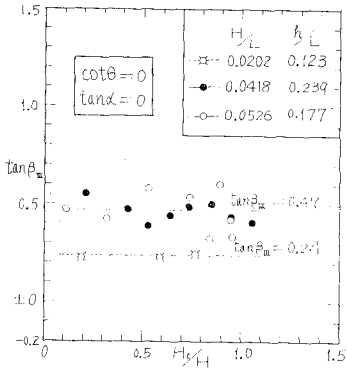


図-8 (a) $\tan \beta_m$ と H_c/H の関係

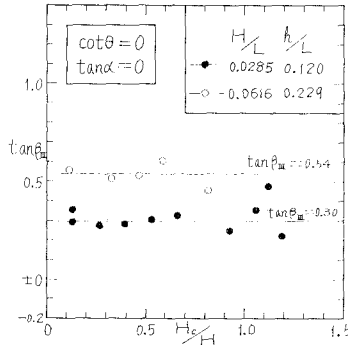


図-8 (b) $\tan \beta_m$ と H_c/H の関係

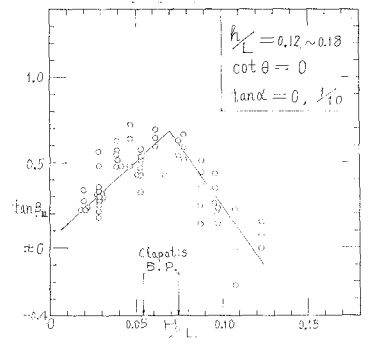


図-9 $\tan \beta_m$ と H/L の関係

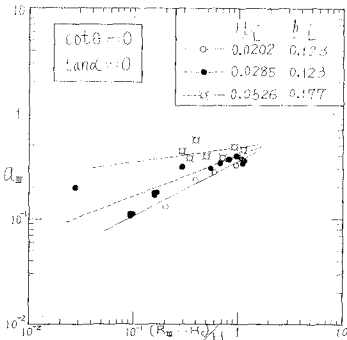


図-10 (a) a_m と $(R_m - H_c)/H$ の関係

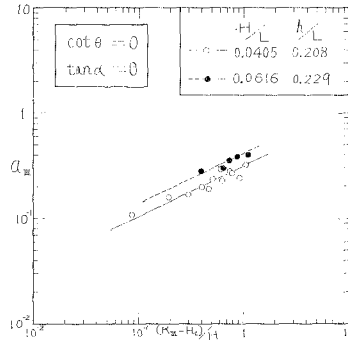


図-10 (b) a_m と $(R_m - H_c)/H$ の関係

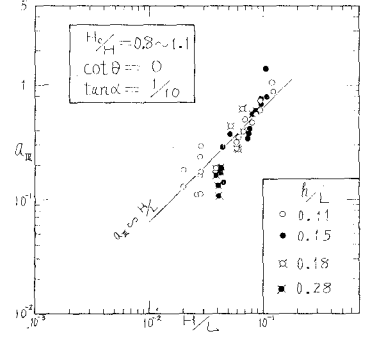


図-11 a_m と H/L の関係

無風条件におけるこれまでの実験によれば、 $a_m=0.1 \sim 1.4$ の範囲の値であるが、近似的に次式で算定できる。

$$a_m = \lambda_a \left(\frac{R_m}{H} - \frac{H_c}{H} \right)^{0.4} \cdot \frac{H}{L} \dots\dots\dots (52)$$

ここで、 λ_a ：実験定数。これまでの無風条件の実験によれば、 $5.7 \sim 18$ の範囲の値であるが、平均的に $\lambda_a \approx 12$ の値である。

ゆえに、 $\tan \alpha = 1/10$ 、 $H_c/H \leq 1.2$ の場合の a_m の算定式は近似的に次式で示される。

$$a_m = 12 \left(\frac{R_m}{H} - \frac{H_c}{H} \right)^{0.4} \cdot \frac{H}{L} \dots\dots\dots (53)$$

図-13 の実験線は式 (53) を式 (49) に代入して計算した越波量 Q_{a_m} を示し、 Q_{exp} と比較したものである（点線は $\eta_m(t/T)$ より導かれる QK_m であり、これについては後で述べる）。

これらより、 Q_{a_m} は Q_{exp} の傾向とかなりよく合っており、式 (53) の適合性がかなりよいことがわかる。なお、式 (53) より求まる Q_{a_m} の精度は次式で示される範囲である。

$$Q_{exp} = (0.4 \sim 1.5) Q_{a_m} \dots\dots\dots (54)$$

ただし、 $\tan \alpha = 1/10$ 、 $H_c/H \leq 1.2$ の場合である。

4.3 $\eta_m(t/T)$ と Q の相関特性

式 (43) に式 (26) を用いれば次のようになる。

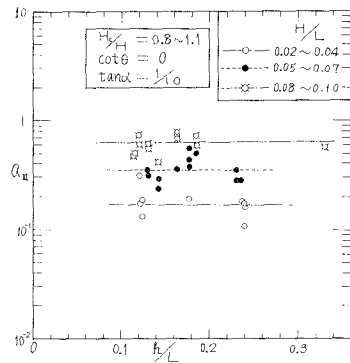


図-12 a_m と h/L の関係

$$Q = \frac{1}{3} \sqrt{2g} K_m \{ F_m(t_1/T) + F_m(t_2/T) + F_m(t_3/T) + F_m(t_4/T) \} \left(1 - \frac{t_c}{T} \right) \dots\dots\dots (55)$$

$$\text{ここで、} F_m(t_N/T) = \{ \eta_m(t_N/T) - H_c \}^{3/2} \dots\dots\dots (56)$$

いま、 K_m におよぼす H_c/H 、 H/L および h/L の影響を調べる。

i) K_m と H_c/H の関係

図-14 は H/L をパラメーターにして K_m と H_c/H の関係を示したものである。

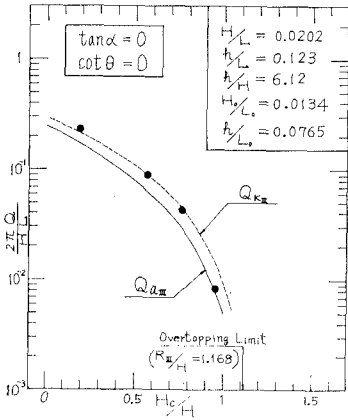


図-13 (a) $H/L=0.0202$

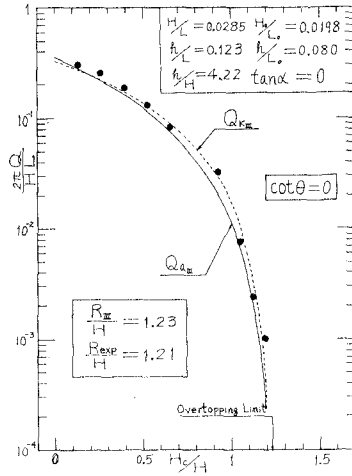


図-13 (b) $H/L=0.0285$

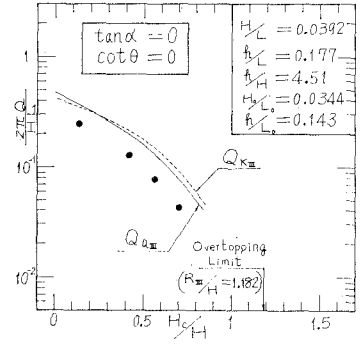


図-13 (c) $H/L=0.0392$

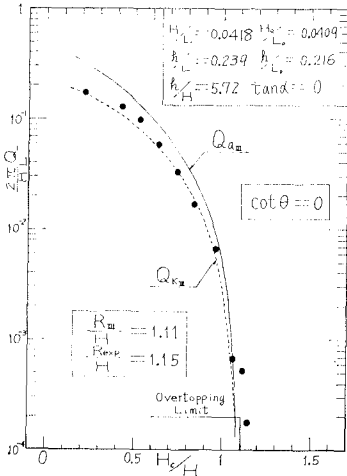


図-13 (d) $H/L=0.0418$

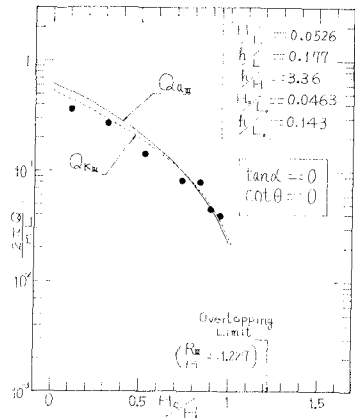


図-13 (e) $H/L=0.0526$

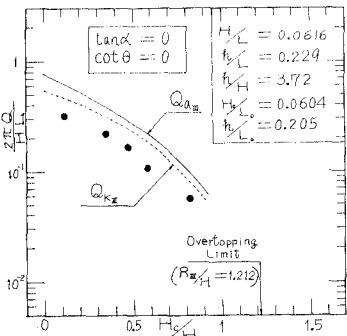


図-13 (f) $H/L=0.0616$

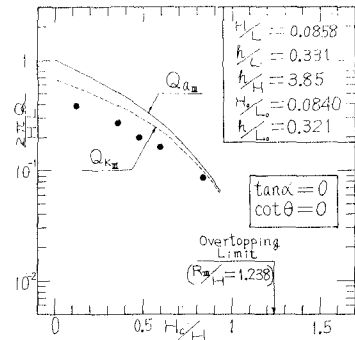


図-13 (g) $H/L=0.0858$

図-13 鉛直壁の越波量算定式の適合性

これらより、近似的に次式で示される。

$$K_{III} \propto 10^{\xi_1 (H_c/H)} \dots\dots\dots (57)$$

ここで、 ξ_1 : 実験定数 (>0)。これまでの実験によれば、 $0.14 \sim 0.38$ であるが、平均的に $\xi_1 \approx 0.23$ の値である。

ii) K_{III} と H/L の関係

図-15 は $H_c/H = 0.8 \sim 0.9$ について $h/L = 0.12 \sim 0.18$ における H/L の影響を調べたものである。

これより、近似的に次式で示される。

$$K_{III} \propto 10^{\xi_2 (H/L)} \dots\dots\dots (58)$$

ここで、 ξ_2 : 実験定数 (<0)。これまでの実験によれば、 $\xi_2 \approx -3.3$ となる。

iii) K_{III} と h/L の関係

図-16 は $H_c/H = 0.8 \sim 0.9$ について、 $H/L = 0.06 \sim 0.08$ における h/L の影響を調べたものである。

これより、実験値のバラツキはあるが、 h/L の影響は比較的小さく、 K_{III} は近似的にほぼ一定とみなすことができる。

vi) K_{III} の算定式とその適合性

無風条件におけるこれまでの実験によれば、 $K_{III} = 0.23 \sim 1.25$ の範囲の値であるが、近似的に次式で算定できる。

$$K_{III} = \lambda_K \times 10^{[0.23(H_c/H) - 3.3(H/L)]} \dots\dots\dots (59)$$

ここで、 λ_K : 実験定数。これまでの無風条件の実験によれば、 $0.39 \sim 0.9$ の範囲の値であるが、平均的に $\lambda_K \approx 0.65$ となる。

ゆえに、 $\tan \alpha = 1/10$, $H_c/H \leq 1.2$ の場合の K_{III} の算定式は近似的に次式で示される。

$$K_{III} = 0.65 \times 10^{[0.23(H_c/H) - 3.3(H/L)]} \dots\dots\dots (60)$$

図-13 の点線は式 (60) を式 (55) に代入して計算した越波量 $Q_{K_{III}}$ を示し、 Q_{exp} と比較したものである。

これらより、 $Q_{K_{III}}$ は Q_{exp} の傾向とかなりよく合っており、式 (60) の適合性がかなりよいことがわかる。なお、式 (60) より求まる $Q_{K_{III}}$ の精度は次式で示される範囲である。

$$Q_{exp} = (0.5 \sim 1.3) Q_{K_{III}} \dots\dots\dots (61)$$

ただし、 $\tan \alpha = 1/10$, $H_c/H \leq 1.2$ の場合である。

なお、これまで議論してきた方法は、式 (42) の直接積分が困難であり、あらかじめ $\eta_{III}(t/T)$ を図示して読み取った値を基に数値積分しなければならないので、やや不便であると考えられる。

そこで、著者は $\eta_{III}'(t/T)$ を台形波形に近似して Q と関連づけた結果、かなりよい相関特性が得られた。

それらについては、土木学会論文報告集に投稿中¹²⁾である。

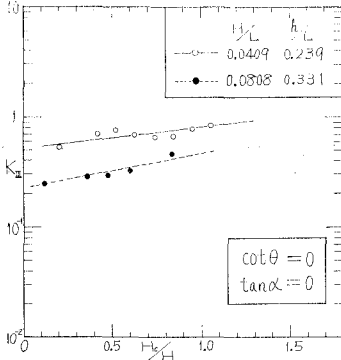


図-14 (a) K_{III} と H_c/H の関係

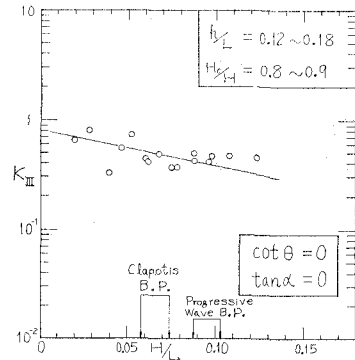


図-15 K_{III} と H/L の関係

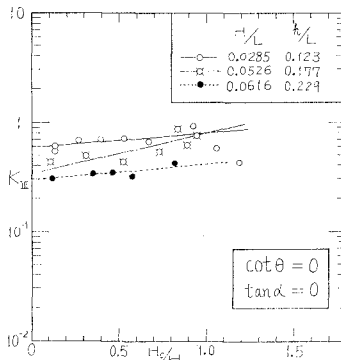


図-14 (b) K_{III} と H_c/H の関係

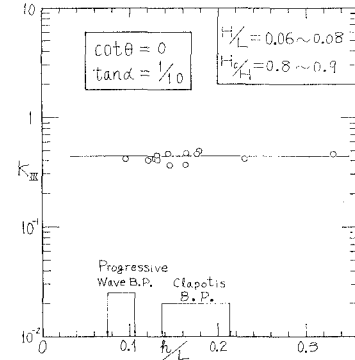


図-16 K_{III} と h/L の関係

5. 結 論

$\eta_m(x)$ と Q_{exp} は越波角度 β_m および越波量係数 a_m を導入することにより関連づけられ、 $\eta_m(t/T)$ と Q_{exp} は越波流量係数 K_m を導入することにより関連づけることができる。

本研究では、 $\tan \alpha = 0$ および $1/10$, $H_c/H \leq 1.2$ の場合に β_m , a_m および K_m の特性を明らかにし、さらに a_m および K_m については算定式を提案することができた。

主な成果を要約すれば次のとおりである。

(1) 重複波の水面波形

$\tan \alpha \leq 1/100$ において第3次近似式および第4次近似式の $\eta(x)$, $\eta(t/T)$ および R/H は実験値とよく合うので、算定式としてかなりの精度が期待できる。また、それらの適用範囲は近似的に式(47)で示される進行波の砕波水深より深い領域である。

(2) $\eta_m(x)$ と Q_{exp} の相関特性i) $\tan \beta_m$ の特性

$\tan \beta_m$ は $0 \sim 0.7$ の範囲の値であるが、 H_c/H に無関係ではほぼ一定の値であり、重複波の砕波点付近で極大値を生ずる。

ii) a_m の特性

a_m は $0.1 \sim 1.4$ の範囲の値であるが、 H_c/H が大きいほど、 H/L が小さいほど減少する。

$\tan \alpha = 1/10$, $H_c/H \leq 1.2$ における a_m の算定式は近似的に式(53)で示され、その精度は式(54)で示される範囲内である。

(3) $\eta_m(t/T)$ と Q_{exp} の相関特性

K_m は $0.23 \sim 1.25$ の範囲の値であり、 H_c/H が大きいほど、 H/L が小さいほど増加する。

$\tan \alpha = 1/10$, $H_c/H \leq 1.2$ における K_m の算定式は近似的に式(60)で示され、その精度は式(61)で示される範囲内である。

謝辞：本研究の一部に科学研究費の奨励研究(A)および特定研究(代表者 北海道大学尾崎 晃教授)を使用した。ここに記して深く感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- Sainflou, G. : Essai sur les Disques Maritimes Verticales, Annales des Ponts et Chaussées, Vol. 98, No. 4, 1928.
- Miche, M. : Mouvements Ondulatoires de La Mer en Profondeur Constante ou Décroissante. (I~IV), Annales des Ponts et Chaussées, Vol. 121, 1944, pp. 25~78, 131~164, 270~292, 369~406.
- 浜田徳一：表面波の2次干渉, 第11回海岸工学講演会講演集, Nov., 1964.
- Tadibakhsh, I. and Keller, J. B. : Standing Surface Waves of Finite Amplitude, J. Fluid Mech., Vol. 8, Part 3, 1960.
- 合田良実・柿崎秀作：有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 5, No. 10, June, 1966.
- Goda, Y. and Abe, Y. : Apparent Coefficient of Partial Reflection of Finite Amplitude Waves, Report of the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Vol. 7, No. 3, Sept., 1968.
- 土屋義人・山口正隆：越波のある場合の重複波の特性について, 第17回海岸工学講演会講演集, Nov., 1970.
- 福井芳郎・中村充・白石英彦・佐々木泰雄, 津波の研究(II)——般津波の堤防におよぼす影響——第9回海岸工学講演会講演集, Oct., 1962.
- 福井芳郎・中村充・白石英彦・佐々木泰雄：堤防の津波対策に関する水理学的研究, 農林省農業土木試験場報告, Vol. 1, Feb., 1963.
- 吉川秀夫・椎貝博英・河野二夫：直立壁の越波に関する実験, 土木学会第22回年次学術講演会講演概要, 第II部, May, 1967.
- 吉川秀夫・椎貝博英・河野二夫：海岸堤防の越波に関する基礎的研究(1), 第14回海岸工学講演会講演集, Oct., 1967.
- 高田彰：有限振幅重複波の時間波形と越波量の相関特性, 土木学会論文報告集に投稿中。
- 石原藤次郎・岩垣雄一・鈴木雄太：海岸堤防の設計, 特にその有効高について, 第2回海岸工学講演会講演集, Nov., 1955.
- 豊島修・首藤伸夫・橋本宏：海岸堤防への波のうちあげ高—海底勾配1/30, 第11回海岸工学講演会講演集, Nov., 1964.
- 豊島修・首藤伸夫・橋本宏：海岸堤防への波のうちあげ高—海底勾配1/20, 第12回海岸工学講演会講演集, Nov., 1965.
- 高田彰：波の遡上, 越波および反射の関連性について, (第2報), 一堤脚水深の影響, 第17回海岸工学講演会論文集, Dec., 1970.
- Hamada, T. : Breakers and Beach Erosion, Report of Transportation Technical Research Institute, Report No. 1, 1951.
- 首藤伸夫：有限振幅波について—高次級数解による進行波の砕波限界, 建設省土木研究所報告, Vol. 111, Sept., 1962.
- 岸 力：海岸堤防に関する研究(2)—有限振幅の浅水重複波, 建設省土木研究所報告, Vol. 90, March, 1955.
- 岩垣雄一：海岸堤防論, 水工学シリーズ, 64—08, 土木学会水理委員会, July, 1964.