



Title	護岸上を越波する段波の反射率と波力に関する研究 - サーフビートなど長周期波の反射率と波力の算定式 -
Author(s)	仲座, 栄三; 津嘉山, 正光; 牧野, 敏明; 北村, 康司; 川満, 章秀; 坂本, 哲史
Citation	琉球大学工学部紀要(58): 35-40
Issue Date	1999-09
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/15827
Rights	



護岸上を越波する段波の反射率と波力に関する研究 ——サーフビートなど長周期波の反射率と波力の算定式——

仲座栄三*・津嘉山正光*・牧野敏明**・北村康司**・川満章秀***・坂本哲史***

Forces and Reflections of Long period Waves Overtopping Sea Walls

Eizo NAKAZA*, Seikoh TSUKAYAMA*, Tosiaki MAKINO**,
Yasushi KITAMURA**, Akihide KAWAMITU***, Tetushi SAKAMOTO***.

Abstract

Sea walls are usually designed only for protection against storm waves, with no account being taken of the effect of long waves, e.g. Tsunamis or Bore-like surf beats. The estimation of the effectiveness of sea walls as protection against long waves is very important in the field of coastal countermeasures, particularly on coral reef coasts, where long waves can cause abnormally high rises in water levels.

The establishment of estimation methods for wave forces, i.e. summing up the effect of long and short wave forces, has a special significance for coastal engineers working on reef coasts. There is as yet no formula for the estimation of either the force or reflection of strong non-linear long waves.

In this study, we offer empirical calculation formulae for wave forces and wave reflections. The wave force formula has been derived from hydrostatic wave pressure, whilst the wave reflection coefficient was derived from the energy flux conservation rule.

Key words: Wave Force, Wave Reflection, Tsunami, Surf Beat, Wave Overtopping, Coral Reef Coast

1. はじめに

海岸部に建設されている護岸の多くは、風波やうねりを対象としたものであり、津波など長周期波に対するものではない。こうした通常の護岸が津波など長周期波を外力の対象外として設計されているとしても、既存の護岸が津波発生時や長周期変動を伴う高潮発生時に、如何なる大きさの波に耐え得るか、あるいは津波の遡上や反射がどの程度かを予測しておくことは、沿岸部の防災を考える上で非常に重要な事であると言える。

また、うねり性の高波が来襲する時、海岸部では波高が

2 mを越えるようなサーフビート現象が発生することが多々ある。場合によっては護岸の被災や高潮災害の主因が大波高を有するサーフビートの発生にあり、その挙動は段波性の津波と酷似していること等が指摘されている(仲座ら, 1988a, 1988b, 1991)。従来、通常の護岸設計においては、こうした大規模なサーフビートなど長周期波の波力や越波、あるいは反射波の影響などは殆ど検討されてなく、既設護岸などの再検討も急務と言える。

津波力に関する研究としては、松富(1991)や池野ら(1998)など、これまで数多く行われているものの、津波あるいは段波が護岸を越波する際の波力や反射率に関してはあまり研究例がなく、十分に解明されているとは言い難い。

本研究では、津波やサーフビートなど長周期波を有する高潮などが通常の護岸に来襲する場合を想定し、その反射率及び波力を実験的に明らかにすると共に、その算定式を提案するものである。

受理 1999年6月7日

* 環境建設工学科

(Dept. of Civil Engineering and Architecture)

** 理工学研究科 生産エネルギー工学専攻

(Graduate Student, Graduate School of Engineering and Science)

2. 理論的検討

2-1 波速及び内部流速

分散を無視した有限振幅長周期波の波速は、次式で与えられる。

$$\frac{c}{\sqrt{gh}} = \sqrt{1 + 3/2 H/h + 1/2 (H/h)^2}, \quad h > 0 \quad \text{--- (1)}$$

ここで、 h 及び H は図-1 に定義するとおりである。内部流速については、長波近似を用いれば、

$$u = \sqrt{g/hH}, \quad h > 0 \quad \text{--- (2)}$$

で与えられる。

式 (1) 及び (2) は、前面水深がゼロ ($h=0$) となる時適用できないため、別に算定式が必要となる。この場合、適当な理論式が無いため、後述の実験より経験式として与える。すなわち、波速及び内部流速は、

$$c = 2\sqrt{gH}, \quad h = 0 \quad \text{--- (3)}$$

$$u = 2\sqrt{gH}, \quad h = 0 \quad \text{--- (4)}$$

で与えられる。

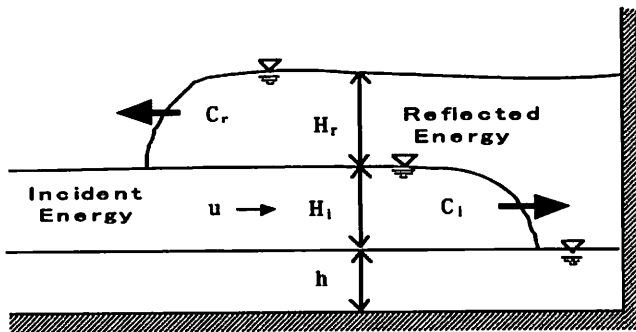


図-1 段波の波高及び波速の定義

2-2 反射率

風波やうねりなど、非越波時の有限振幅波の反射率を求めるには、Goda&Abe(1968)らの理論が利用可能である。護岸上を波が越波する場合に対しては、越波量算定に吉川ら(1967)の算定式を適用し、エネルギーフラックスの観点から導いたMizuguchi(1993)の理論式や仲山・水口(1995)の実験的研究、また梅山(1995)の研究などがある。しかしながら、越波とソリトン分裂を伴う強非線形浅海長周期波の反射率を与える解析解は存在しない。

本研究では、Mizuguchiの理論を基礎に、流れを遡上する長波の特性を考慮できるように、波速の算定に段波理論を適用し、越波を伴う場合の段波の反射率算定式を理論的に求める。

越波が生じない場合、入射段波と反射段波とに関するエネルギーフラックスの保存式は以下のように与えられる。

$$E_i C_i = E_r (C_r - u_i) \quad \text{--- (5)}$$

ここで、 E_i 及び E_r は入射波及び反射波の単位体積当たりのエネルギーである。また、 C_i 及び C_r は入射波及び反射波の波速(=群速度)、 u_i は入射波の内部流速である。エネルギーが波高の二乗に比例するとすると、式 (5) より、反射率が次式で与えられる。

$$K_r = \sqrt{C_i / (C_r - u_i)} \quad \text{--- (6)}$$

次に、入射段波と反射段波とが図-1 で示されるような関係にあると、式 (1) を求めたと同様な考え方から、反射段波の波速が次式で与えられる。

$$C_r - u = \sqrt{g(h+H_i)} \left\{ 1 + \frac{3}{2} \frac{H_r}{(h+H_i)} + \frac{1}{2} \left(\frac{H_r}{h+H_i} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad \text{--- (7)}$$

$h=0$ となる場合、すなわち入射段波の波速及び内部流速に、式 (3) 及び (4) を使い、反射段波の波速として式 (7) を用いると、 $C_r - u > 0$ となる(反射波が遡上する)場合を考えると $K_r > 2.02$ が得られる。すなわち、段波の壁面衝突によるエネルギー逸散を考えなければ、反射率が1.0以上となり、反射段波は入射段波の波高以上の大きさの段波を形成させることで入射段波に付随する流れを遡上できることになる。

次に、越波が生じる場合を考える。この時、入射エネルギーの一部は、護岸上の越流によって護岸背後に伝播される。そこで、まず越波によるエネルギー損失を見積もる必要がある。

Mizuguchi(1993)と同様に、吉川ら(1967)の越波流量算定理論に従えば、越波流量は次式で近時される(図-1参照)。

$$q = \sqrt{2gH} H \alpha k^{3/2} H^2 \left(1 - \frac{R}{kH} \right)^{3/2}, \quad H = H_i + H_r \quad \text{--- (8)}$$

ここで、 k 及び α は定数である。このとき、越流のエネルギーフラックスは、

$$EF_L = 2\sqrt{gH_i} H_i^2 \left[\alpha_E \sqrt{\frac{1+K_r}{2}} k^{3/2} (1+K_r)^2 \left\{ 1 - \frac{R}{k(1+K_r)H_i} \right\}^{3/2} \right] \quad \text{--- (9)}$$

で与えられる。ここに、 α_E は比例定数である。式 (5) に式 (9) を考慮して越波が生じる場合の反射率を求めることができ、以下のように与えられる。

$$K_r^2 = \frac{2}{\sqrt{1+3/2K_r+1/2K_r^2}} \left[\alpha_r \frac{(1+K_r)^{3/2}}{\sqrt{2}} k^{3/2} \left\{ 1 - \frac{R}{k(1+K_r)H_1} \right\}^{3/2} \right]$$

— (10)

$$K_r^2 = \frac{\left\{ 1 + \frac{3}{2}(H_1/h)^2 \right\}^2 - LE}{\left(1 + \frac{H_1}{h} \right)^{1/2} \left\{ 1 + \frac{3}{2}K_r \frac{1}{1+H_1/h} + \frac{1}{2}K_r^2 \left(\frac{1}{1+H_1/h} \right)^2 \right\}^{1/2}}$$

— (11)

ここで、

$$LE = \sqrt{H_1/h} K_r^2 \alpha_r (1+K_r)^{3/2} k^{3/2} \left(1 - \frac{1}{k(1+K_r)} \frac{R}{H_1} \right)^{3/2}$$

— (12)

2-3 波力算定式

護岸に作用する津波力に対しては、松富(1991)や池野(1998)らが算定式を提案している。しかしながら、これらの算定式は護岸越波を生じない場合のものであり、越波が生じる際の津波力算定式は現在のところ与えられていない。以下では、津波力に静水圧分布を仮定した算定式を提案する。

図-2に、後述する実験で得られた前面水位変動と波力(単位幅当たりの水平波力)との時間変動波形の一例を示す。図示のとおり、波形は入射段波が衝突する瞬間に大きな衝撃砕波が作用している。しかしながら、波力の最大値は前面水位が最大となる場合に生じており、波力の最大値は前面水位の最大値を知ることで理論的に算定可能と言える。反射率が式(10)及び(11)で与えられるならば、図-1で示すように、護岸前面の最大水位は、入射波高と反射率とから求め得る。この時、護岸前面の波圧分布に静水圧分布を仮定すると、最大波力として次式が求められる。波圧の分布形を図-3に示した。

$$P = \rho g h (1+K_r) H_1 + \frac{1}{2} \rho g (1+K_r)^2 H_1^2$$

— (13)

3. 実験装置及び実験方法

実験装置の概要を図-5に示す。実験には、長さ2.9m、幅0.25mの二次元開水路を用いた。水路の上流側にはゲ-

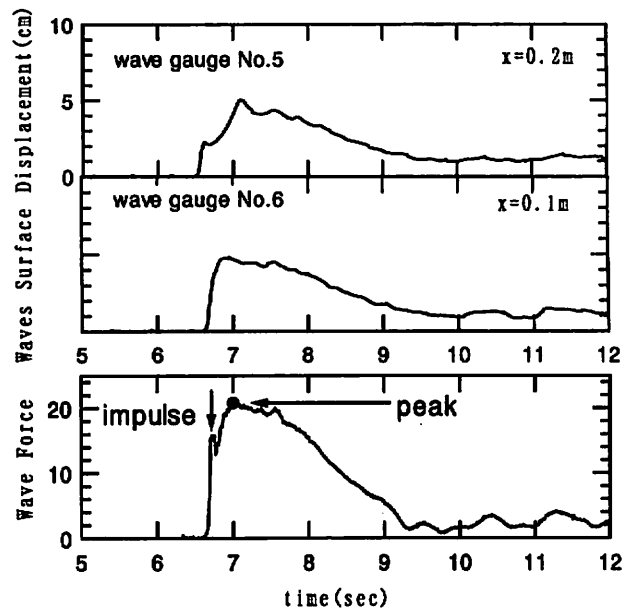


図-2 前面水位変動と水平波力波形の関係

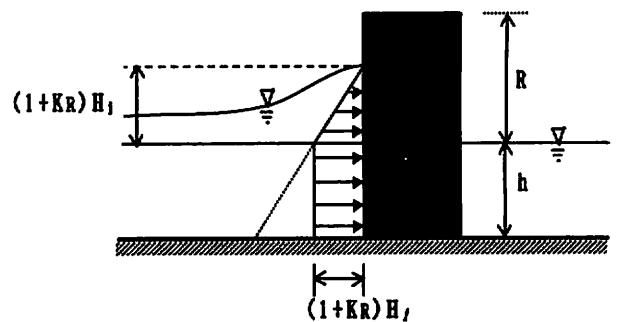


図-3 波圧分布

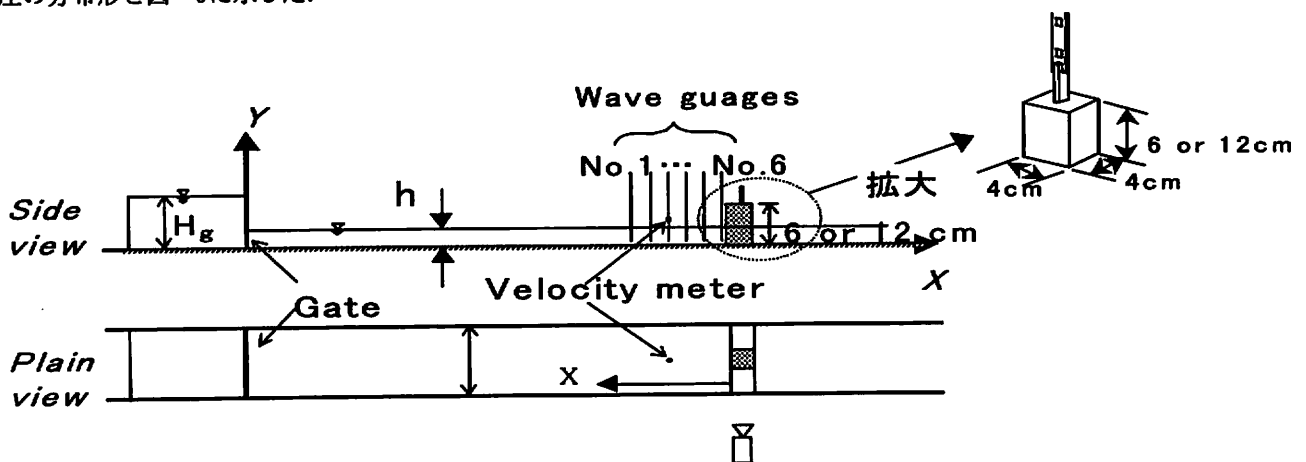


図-4 実験装置概要

トが設けてあり、下流側には護岸モデルが設置されている。実験の相似則にはフルード則を用い、長さの縮尺を1/100とした。流速の測定には2台の超小型プロベラ式流速計を用い、水表面の測定には容量式波高計を用いた。また、波速や水塊のスプラッシュ等の測定にはビデオカメラを用いた。

実験では、ゲートで仕切った貯水槽に所定の水量を貯え、ゲートを急開することで段波を発生させた。6台の容量式波高計は護岸直前とその前面に10cmピッチで計6台設置した。表-1に、実験ケースとその諸元を示す。表に示すよ

表-1 実験ケース

(a) $d=6.0\text{ cm}$

H_i (cm) h (cm)	$H_i=5$	$H_i=7$	$H_i=9$	$H_i=11$	$H_i=13$	$H_i=15$	$H_i=17$	$H_i=19$
0.0	caseA01	caseA02	caseA03	caseA04	caseA05	caseA06	caseA07	caseA08
1.5	caseB01	caseB02	caseB03	caseB04	caseB05	caseB06	caseB07	caseB08
3.0	caseC01	caseC02	caseC03	caseC04	caseC05	caseC06	caseC07	caseC08
4.5			caseD01	caseD02	caseD03	caseD04	caseD05	caseD06
6.0				caseE01	caseE02	caseE03	caseE04	caseE05

(b) $d=12.0\text{ cm}$

H_i (cm) h (cm)	$H_i=9$	$H_i=13$	$H_i=15$	$H_i=17$	$H_i=19$
0.0	caseF01	caseF02	caseF03	caseF04	caseF05
3.0		caseG01	caseG02	caseG03	caseG04
6.0		caseH01	caseH02	caseH03	caseH04

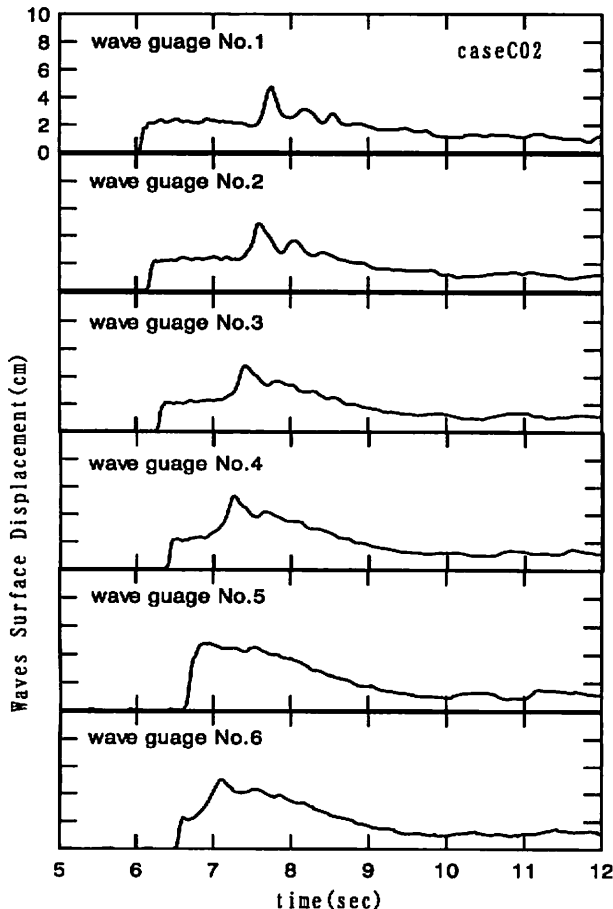


図-5 入射及び反射段波波形($H_i/h=1.0$)

うに、護岸モデルとしては通常の海岸護岸及び防波堤を想定し、設置水深を0~19cm、護岸高を6cm及び12cmとした。設定された護岸前面水深及び護岸高に対し、ゲート水深 H_g を5~19cmと変えることで、入射波高を1cm~6cmと変化させた。本研究における入射波及び反射波の波高の定義は図-1に示てある。

4. 実験結果

図-5に、case-C02に対する水面波形の時間変動を示す。入射段波先端にソリトン分裂は見られず、逆に反射波の先端にソリトンの分裂が見られる。図-6は、段波前面水深が深くなったcase-E04に対する水面波形である。入射段波及び反射波のフロントには明瞭なソリトン分裂が見られる。波高水深比が $H_i/h < 0.75$ において、入射波フロントにソリトン分裂が見られた。波高水深比が $H_i/h > 1.0$ となる場合は明瞭なソリトン分裂は見られず、段波の先端に激しい碎波現象が生じていたことから、この場合、非線形性と碎波の乱れによる拡散とが釣り合った状態にあると判断される。

図-7に、波高計による水面波形及びビデオカメラ画像から得られた入射段波の波速と波高水深比との関係を示す。図中実線は、式(1)による計算値である。図示のとおり、計算値と実測値とは良く一致している。図-8に、入射段波

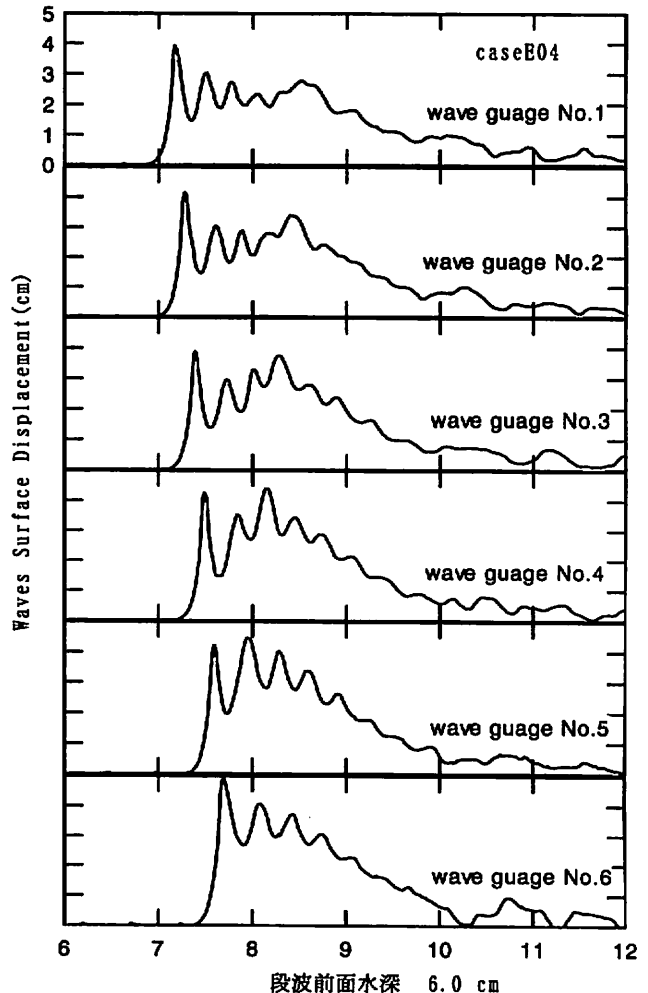


図-6 入射及び反射段波波形($H_i/h=0.53$)

前面水深がゼロ ($h = 0$) の場合の波速の実験値を示す。図中の曲線は、式 (3) で与えられる近似曲線である。図中の Δ 印は内部流速に対する実験値である。内部流速について、式 (4) は非常に良い近似曲線となっている。図-9に、実

験によって得られた反射率を示す。図中の実線は、式 (10) 及び (11) で与えられる計算値である。計算値は実験値と良く一致しており、提案する算定式の妥当性が示された。

図-10に、 $R/h=3.0$ 及び $R/h=\infty$ の場合に対し、式 (13) による算定値と実験値との比較を示す。図中破線は、松富 (1991) の計算値であり、点線は広井式による算定値である。また、 \circ 印は非越波時の実験値であり、 \bullet 印は越波が生じる場合の実験値である。提案する式 (13) は、越波時、非越波時共に実験値と良く一致している。一方、松富の算定値は、非越波時に対しても、彼らが指摘するように過大評価気味である。また、広井式による算定値は過小評価となっている。

5. おわりに

津波が護岸を越波する際の反射率と津波力について実験的に検討し、エネルギーフラックスの保存則からそれらの

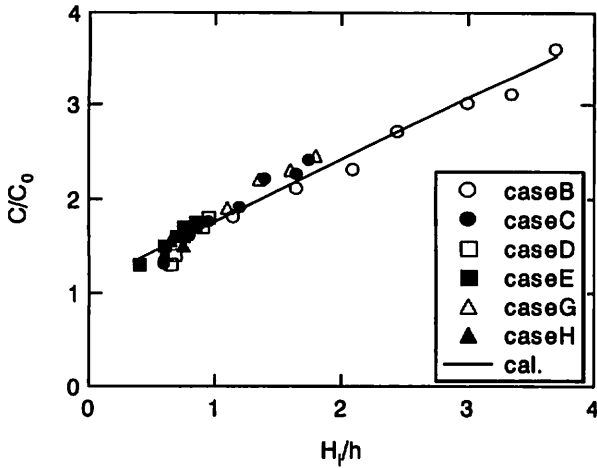


図-7 波速と波高水深比の関係

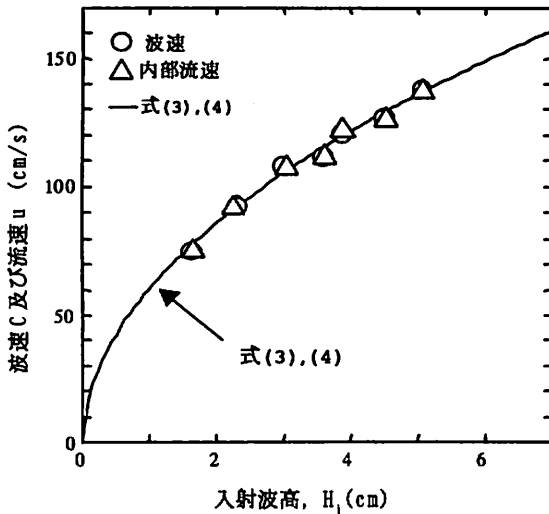


図-8 波速の計算値と実験値との比較

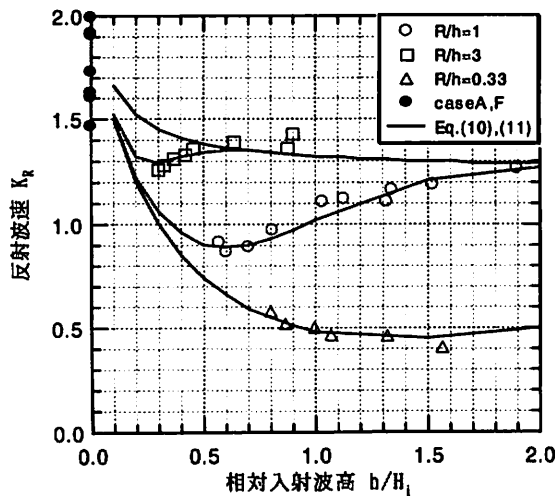
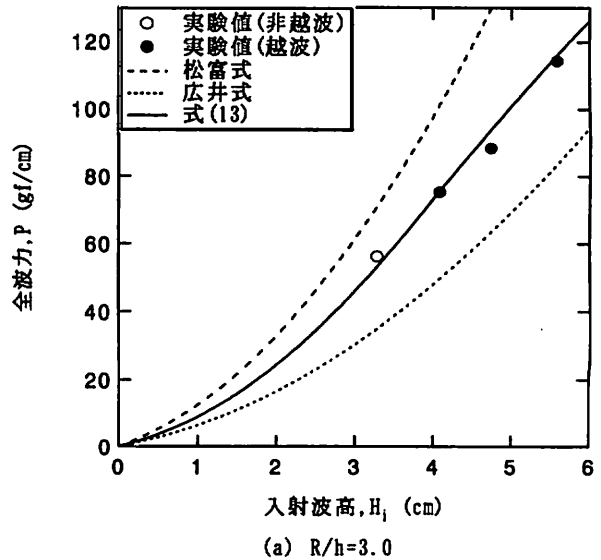


図-9 反射率の計算値と実験値の比較



(a) $R/h=3.0$

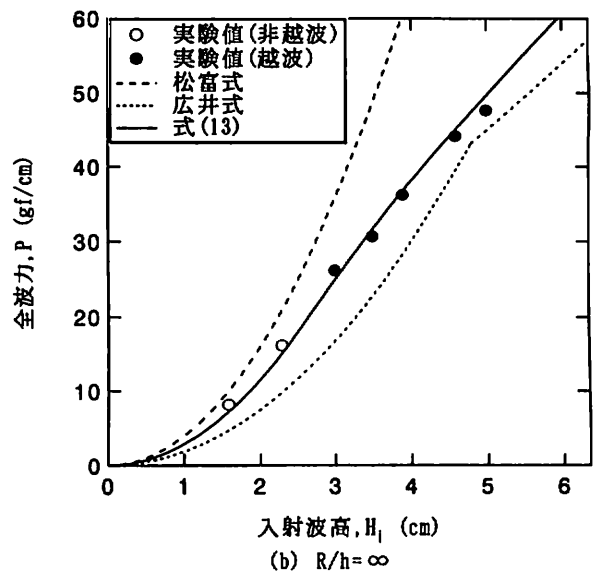


図-10 全波力の実測値と計算値との比較

算定式の提案を行った。反射波の算定手法は、Mizuguchi (1993)が短周期波を対象とした解析手法に類似しているものの、反射長周期波が入射波に付随する流れを遡るという観点から、その流れを考慮した段波の波速を導入した所に特色がある。また、ドライベット上を遡る長波及びその反射波に対する波速と内部流速の算定式を新たに提案した。波圧に関しては、実験結果に基づき、波圧分布に静水圧分布を仮定して算定式の提案を行った。これらの算定式の妥当性は実験値との比較で示した。

本研究は、津波やサーフビートなど長周期波の反射や波力を取り扱ったものである。今後は、ここで提案した算定式の適用範囲やサーフビートと個々波とが同時に存在する場合の詳細検討を行う予定である。

ところで、津波の遡上高の予測や越波流量の算定には、津波が護岸などを越える際の波力や反射率、あるいは越波流量等の知見が必要である。特に、波力の算定結果次第では、護岸倒壊という条件の下で、津波の遡上を予測する必要があり、普通の護岸がたとえ津波を外力の対象外としていたとしても、それに作用する波力の見積もりは重要であると言える。

津波の入射波高から反射率と津波力が算定可能となれば、想定した津波に対し、現存の海岸護岸が耐えるかなどの検討が可能であるのみでなく、反射波波高及び越流量などが算定可能となる。このようなことから本研究成果は、今後の津波（あるいは高潮）氾濫予測や防災対策に対し、貴重な知見を与え得るものと考えられる。

本研究の実験及び実験結果の整理に当たり、琉球大学環境建設工学科技官宇座敏吉氏及び4年次学生谷村欣仁君にご協力を頂いた。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- 池野正明・松山昌史・田中寛好(1998): ソリトン分裂津波の大陸棚上での変形とその防波堤設計波圧に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 366-370.
- 梅山元彦(1995): 越波による護岸前面での非線型波動特性について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 801-805.
- 吉川秀雄・椎貝博美・河野二夫(1967): 海岸堤防の越波に関する基礎的研究(1), 海岸工学講演会論文集, 第14回, pp. 118-122.
- 河野二夫・高野重利・津田博規(1993): 曲面護岸と各種断面護岸による越波量の比較, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 681-685.
- 仲座栄三・日野幹雄(1988a): リーフ海岸におけるBore状サーフビートによる災害の実態調査, 海岸工学講演会論文集, 第35回, pp. 202-206.
- 仲座栄三・津嘉山正光・日野幹雄・大城勉(1988b): 波群津波の津波力に関する研究, 海岸工学講演会論文集, 第35回, pp. 597-601.
- 仲座栄三・津嘉山正光・日野幹雄・田場浩(1991): リーフ上の護岸越波に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 511-515.
- 仲山高志・水口優(1995): 傾斜壁における越波量と反射率について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 791-795.
- 松富英夫(1991): 砕波段波衝突時の圧力分布と全波力, 海岸工学論文集, 第38巻 pp. 626-630.
- Goda, Y. and Abe, Y. (1968): Apparent coefficient of partial reflection of finite amplitude waves, Rep., Port and Harb. Res. Inst., Vol. 7, No. 3, pp. 3-58.
- Mizuguchi, M. (1993): Wave overtopping rate over a vertical wall and reflection coefficient, Coastal Eng. Jpn, Vol. 36, No. 1, pp. 107-104.