

砕波後の波の変形に関する研究(1)

佐 伯 浩*・佐々木幹大**

1. 緒 言

砕波後の波の変形については、波高の変化に対して多くの研究が発表され、また実験が行なわれている。しかし、汀線部まで測定された例はないようである。また砕波後の波は、一見、段波理論や孤立波理論で近似できそうな予測がたつが、そのためには、砕波後の波の運動機構が明らかにされねばならない。運動機構を知るものとして、波速があるが、砕波後の波の波速を調べたものとしては、堀川らの研究、豊島らの研究が発表されているが、砕波後の波は、多くの気泡を含み、さらに、波形がなめらかではないので、測定値がばらつきがちなため、波速から運動機構を探るには困難が伴う。さらに、砕波後の波には、大きな質量輸送量が伴うために、平均水位の上昇(wave set up)が著しく、汀線近傍においては、波高と平均水位の上昇高は、ほぼ同じオーダーとなり、砕波後の波、特に汀線近傍の波の運動機構を明らかにするためには、wave set up を無視するわけにはいかない。そこで、本研究では、まず平均水位上昇の量を明らかにし、次に波高の変化、波速の変化を調べ、砕波後の波の変形過程を明らかにしようとしたものである。

2. 実験装置と実験方法

実験は長さ 24 m、幅 0.8 m、深さ 0.8 m の鋼ガラス張り水槽で行なった。水底勾配は、 $S=1/50$ で、底部はアクリル板である。波高の測定は、主に抵抗線式波高計を用い、汀線近傍の水深の非常に浅い所は、特別に作製した抵抗線式波高計を用いた。また、平均水位は、得られた波形を積分して平均値を求めた。また、波速の測定は波形の変形が大きいくことを考慮して 5 cm 間隔に波高計を設置して変形が無視できるくらいの間隔にした。また、wave step up の測定には、予備実験の結果、60 波ぐらい通過した後では一定の値を示すことが明らかになったので、60 波通過後から測定を行なった。また、本実験においては、平均水位面の振動は見られなかった。

3. Wave set up について

Longuet-Higgins と Stewart は Radiation Stress の効

果の一つとして、斜面上を進行する波では、砕波点より沖側では、砕波点に近づくにつれて平均水位が下がること(set down)を理論的に明らかにした。Saville, Bowen, 豊島, 佐伯らの実験結果は、これを裏づけている。Bowen は $S=1/12$, 豊島らは $S=1/20, 1/30$, 佐伯らは $S=1/50$ と水底勾配が異なっているのに、比較的实验値が理論値とよく一致していることは注目に値する。これに対して、砕波後の set up については、Bowen が Longuet-Higgins らの理論を応用して式を導いている。砕波後の波高の変化を次式のごとく仮定する。

$$H=\gamma(h+\bar{\eta}) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 h : 静止水深、 $\bar{\eta}$: radiation stress による静止水面より平均水面までの set up の量、 H : 静止水深 h の点の波高、 γ : 係数

Radiation stress と圧力差がつり合うことになり、それにより平均水面が勾配を有し、set up の現象がおこることになる。若干の計算の後、次式を得る。

$$\frac{d\bar{\eta}}{dx} = -k \frac{dh}{dx} \dots\dots\dots (2)$$

ただし k は次式で示される。

$$k = \frac{1}{1 + \frac{8}{3\gamma^2}} \dots\dots\dots (3)$$

Bowen は、 $S=1/12$ で実験を行ない、まず、実験によって式(1)が成立することを示し、次に、式(1)より求める γ と k の関係を示す式(3)も実験値と比較的よい一致を示すことを確かめ、Putnam の行なった $S=1/14$, $S=1/19$ の値も式(3)を満足することを示した。 $S=1/50$ のわれわれの実験においては、 H と $(h+\bar{\eta})$ の関係を調べてみると図-1で示される。この図から明らかなるように、砕波点と汀線近傍を除くと、式(1)の関係は、ほぼ満足されていることになる。さらに $(H/h+\bar{\eta})$ と (h/h_B) の関係を示したものが図-2である。縦軸の $(H/h+\bar{\eta})$ は γ に相当するのであるが $0.2 < (h/h_B) < 0.8$ では、 γ の値は一定と見なされるが、汀線近傍と、砕波点近傍では (h/h_B) によって γ はかなり変化している。図-1より、各 (H_0/L_0) に対して、 H と $(h+\bar{\eta})$ の比が2本の直線で近似されるとし、汀線側を γ_1 , 砕波線側を γ_2 として、式(3)より k_1, k_2 を求めたものと、図-2より、 $0.2 < h/h_B < 0.8$ の間で

* 正会員 北海道大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 北海道大学工学部大学院

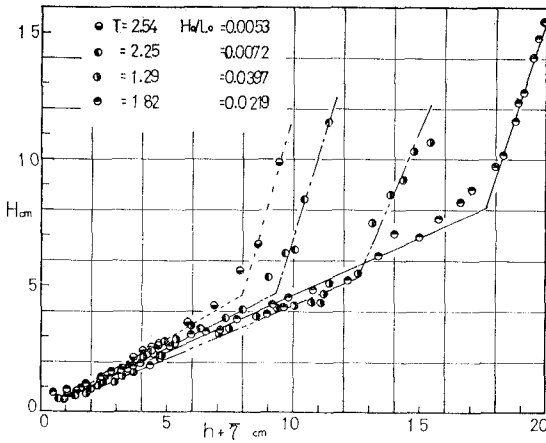


図-1

表-1

H_0/L_0	k	k_1	k_2	k_3
0.0397	0.091	0.068	0.114	0.078
0.0219	0.103	0.069	0.821	0.080
0.0072	0.093	0.084	0.642	0.085
0.0053	0.119	0.112	0.669	0.101

$(H/h + \bar{\eta})$ が、各 (H_0/L_0) に対して一定と考えた時の値 k_3 をとし、また、 $\bar{\eta}$ の変化から直接求めたものを k とすると、 k の値は、表-1 のごとくなる。

表-1 より明らかなように、 $\bar{\eta}$ の変化から直接求めた k と γ から式 (3) により求めた k_1, k_2, k_3 とは、異なるが、 k_3 が一番近い値を示している。また、Longuet-Higgins らも指摘しているが、 $S=1/50$ では (H_0/L_0) に関係なく、ほぼ一定の k の値を示していて、4つの平均値は、 $k=0.101$ である。図-3 に、 $S=1/50$ の著者の値と、豊島らの $S=1/20, 1/30$ の場合の $\bar{\eta}$ の図よりわれわれが計算したものと、 $S=1/12$ の Bowen の値を示した。この図から明らかなように、 $S=1/20, 1/30, 1/50$ の場合には、 (H_0/L_0) に関係なく、 k は、ほぼ一定値を

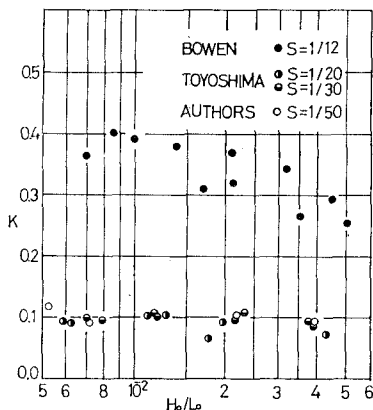


図-3

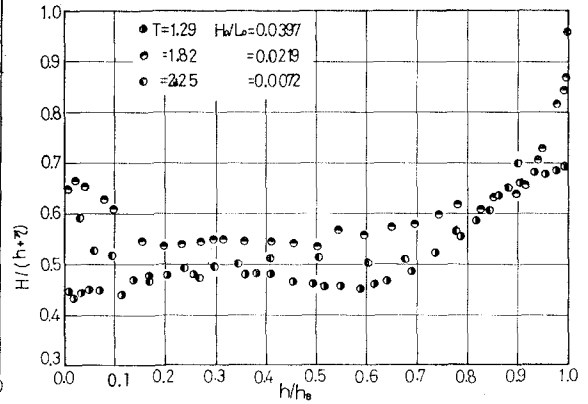


図-2

とっている。また Bowen の $S=1/12$ の場合には、実験値にばらつきが見られるが、 (H_0/L_0) が大きくなるにつれて、 k は小さい値を示している。また、 $S \leq 1/20$ では、 k は水底勾配 S に関係なく、ほぼ一定の値を示していて、 $k \approx 0.10$ となる。Bowen の k 値は、他の実験値にくらべて 2~4 倍大きい値を示しているが、これは、豊島らとわれわれのデータは、直接 $\bar{\eta}$ を実測して、汀線部と碎波点の間の $\bar{\eta}$ の変化から k を求めているのに対して、Bowen は、打上げ高の平均値と碎波点との間で k を求めているので、 k の計算方法の違いも原因の一つと思われる。さらに、式 (2) を積分すると次の式 (4) を得る。

$$\bar{\eta} = -kh + \bar{\eta}_s \quad 0 \leq h < h_B \quad \dots\dots\dots (4)$$

式 (4) は、平均水面上昇 (set up) の式を示す。 h , h_B は、静止水の場合の水深と碎波水深を示し、 $\bar{\eta}_s$ は $h=0$ すなわち静止水の汀線部の平均水位の上昇量 (set up) である。次に $\bar{\eta}_s$ の量を調べたものが、図-4 である。図-4 から明らかなように、 $S \leq 1/20$ の範囲では、 (H_0/L_0) に関係なく、また水底勾配 S に関係なく、ほぼ一定の値を示していて、 $(\bar{\eta}_s/H_B) \approx 0.1$ である。 $S=1/12$ の場合は、 $S \leq 1/20$ の $(\bar{\eta}_s/H_B)$ より 2 倍ほど大きい値を示している。以上の結果より、 k と $(\bar{\eta}_s/H_B)$ がわかると、 $\bar{\eta}$ が決定されることになるが、 $S > 1/20$ の場合

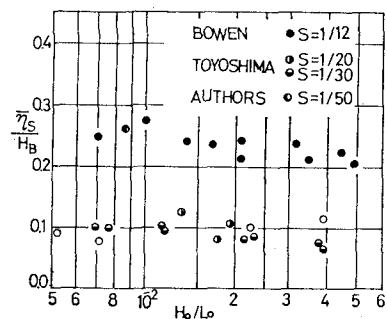


図-4

には, Bowen の k の決定方法に問題があるので詳細な実験が望まれる。また, 合田の報告によると, 日本海沿岸の港湾での実測値からも $\bar{\eta}_s \approx 0.1 H_{1/3}$ の関係が見出されているとのことで, $H_{1/3} \approx H_B$ と考えると, 図-4 に示されているわれわれの結果とよく一致しているといえる。よって, 近似的には, 平均水面形は次式で示される。

$$\bar{\eta} = -0.1h + 0.1H_B \dots\dots\dots (5)$$

Set up の大きさは, 汀線近傍では, 波高よりも大きいことは, 砕波後の波の運動機構を明らかにするうえで重要である。

4. 砕波後の波高変化

砕波後の波高変化に関する研究としては, Horikawa & Kuo の $S=1/20, 1/30, 1/65, 1/80$ の実験, 中村・白石・佐々木の $S=1/10, 1/20, 1/30, 1/50, 1/100$ の実験, 榎木・岩田・中辻の $S=1/15$ の実験, 豊島・富永・橋本による $S=1/30$ の結果が報告されている, しかし, 砕

波点から汀線部まで測定された例はない。図-5 の(a), (b) に $S=1/50$ の (H/H_B) と (h/h_B) の関係を示す。図-5 において, (a) 図は spilling breaker であり, (b) 図の場合は, plunging breaker である。図-5 をまとめたものが図-6 である。この図から明らかなように, 砕波後の波高変化は, 砕波の形態によって, かなり異なることがわかる。特に, 砕波点直後が著しく, われわれの実験結果では, spilling breaker の場合の方が, plunging breaker の場合より波高は大きい。また, 完全な spilling breaker の場合には, (H_0/L_0) は異なっている, (H/H_B) は同じ値を示している。図-6 には, 中村らの結果も示されているが, 中村らの実験値は, 速水の求めた碎

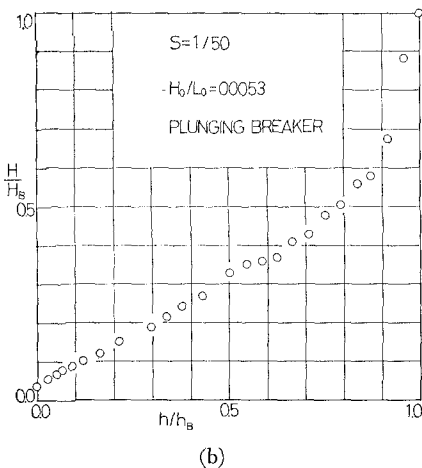
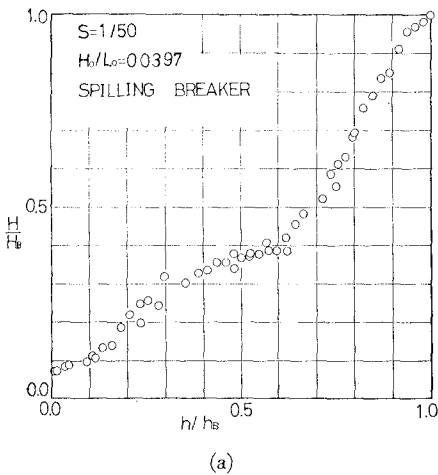


図-5

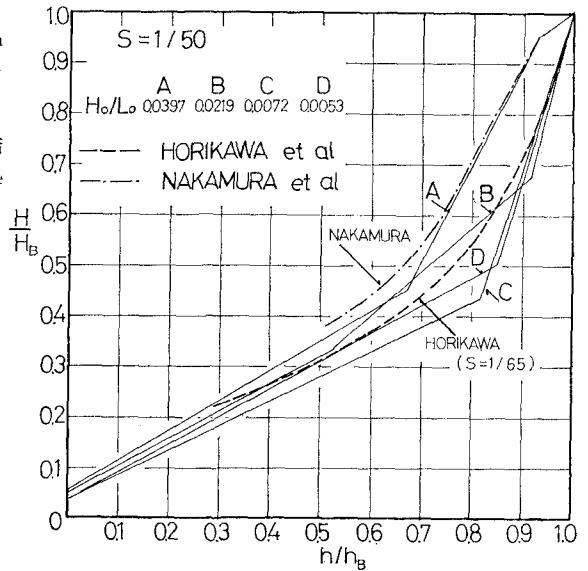


図-6

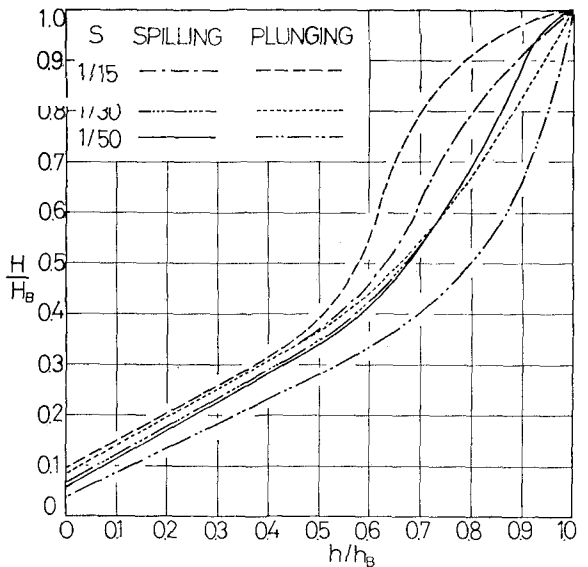


図-7

波形態の分類図から判断すると、ほとんどが、spilling breaker 型の碎波をしていると思われるので、われわれの場合の spilling breaker type の線に一致しているものと思われる。Horikawa らの求めた実験曲線は、比較的数据にばらつきがあり、その平均的な曲線を求めているので、図のような値を示すものと思われる。よって、 $S=1/50$ の場合でも、碎波後の波高変化は、碎波形態によって異なることが明らかになった。榎木らは、 $S=1/15$ で詳細な実験を行ない、その結論として、 (H_0/L_0) 別には明確な変化は認められないが、 $(h/h_B) \geq 0.4$ の範囲では、spilling 型碎波の波の波高減衰の方が plunging 型碎波のそれより大きく、 $(h/h_B) \leq 0.4$ では両者の区別のないことを報告している。これに対して、豊島らは、 $S=1/30$ で実験を行ない、データを spilling breaker type のそれとに分けて図化しているが、それによると、両 type の波高減衰には、ほとんど差は認められず、わずかに、 $(h/h_B) < 0.7$ で、plunging breaker の方が波高減衰が小さいことを示している。以上のことから判断して、 $S > 1/30$ では、spilling breaker type の碎波の方が波高減衰が大きく、 $S < 1/30$ では、それとは逆に、plunging breaker の方が波高の減衰が著しいことが明らかとなった。また、 $S=1/30$ では、碎波の形態による差はあまり認められなかった。各勾配に対して、碎波の形態別に波高減衰の状態を表わしたものが図-7である。一般に碎波の形態は水底勾配 S と (H_0/L_0) によって決まるから、 $S > 1/30$ では、 (H_0/L_0) が大きほど波高減衰が大きくなり、 $S < 1/30$ では、 (H_0/L_0) が小さいほど、波高減衰が大きくなる。このような現象は、孤立波の碎波後の波高変化においても起こっている。孤立波の場合には、 $S=1/75$ を境とし、これと同じ傾向である。

次に、波高の変化を (H/h) と (h/h_B) で表わしたものが図-8の(a),(b)である。これらの図より、碎波直後は (H/h) は比較的急に小さくなり、その後一定の値を保ち、汀線近傍に近づくと、急激に大きくなっている。これについては、Horikawa の場合もわれわれの場合と同じ曲線となっている。このように波高の変化は、大きく3つの部分に分けられるようである。これは、図-5を両対数紙にプロットしてみると (H/H_B) と (h/h_B) の線は3つに折れることと一致している。今まで波高の変化に対しては、静止水深を用いて整理したが、これを平均水深 $(h+\bar{\eta})$ で整理したものが図-2である。この場合は、汀線近傍では、set up により水深が大きくなるため、図-8より急ではないが、3つの領域に分けられるようである。図-9は碎波後の波の波頂高、すなわち、平均水面 $(h+\bar{\eta})$ より波頂までの高さ $(\bar{\eta}_0)$ を示したものである。汀線近傍では実験値はばらつきが大きい、碎波点から汀線に近づくにしたがって、 $(\bar{\eta}_0/H)$ は小さくなる。平均水面は式(4)で与えられるので、波高

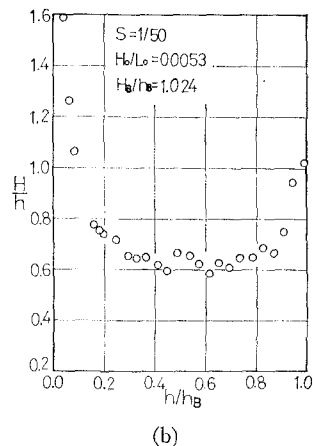
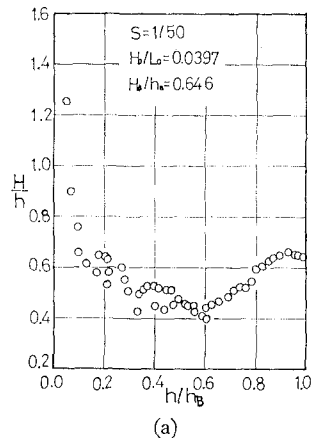


図-8

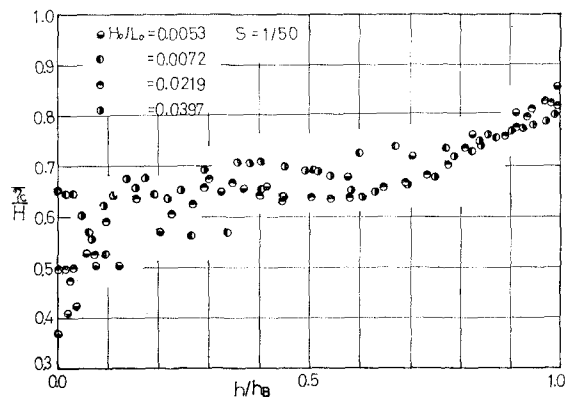


図-9

H は図-5より求まるから、図-9で $\bar{\eta}_0$ が求まり、よって、波峰・波谷の包絡線が求まることになる。

5. 碎波後の波の波速

碎波後の波速の測定は、Horikawa らにより、 $S=1/30$ の場合が発表されているが、実測値は大きく分散している。波速の定義は Keulegan らにより、詳細に検討され

ている。砕波後の波は変形が急激におこり、また、breaking point 近傍では表面にかなりの気泡を含むため、測定に誤差を伴うのはやむを得ないことである。今回のわれわれの実験では、砕波点近傍を除いては、波形の変形が無視できると思われる 5 cm 間隔に波高計を設置して波速を求めた。

実験値は、数波 (3~6 波) の波速の平均値である。汀線近傍では、われわれが以前に試作した波高計を用いて測定した。測定結果の一部を図-10に示す。(a) は、spilling breaker の例であり、(b) は plunging breaker の波速の測定例である。前節の波高の変化のところでも、砕波後の波の運動機構が3つの領域に分かれることを述べたが、それに従って、波速も3つに分けて記した。breaking region は、breaking point から、波高が急激に減衰する領域をさす。shore line region は汀線近傍の (H/h) あるいは $(H/h+\bar{\eta})$ が急に大きくなる領域をさし、stable region は、前の2つの間の領域で、波高の変化が比較的安定した領域をさしている。図-10の波砕の測定結果より、3つの領域によって、波速の変化過程が異なっている。(a) の spilling breaker の場合、breaking point の波速から、stable region に入るまでに、無次元波速 $(c/\sqrt{gh})$ は大きくなるのに対して、(b) の plunging breaker の場合は逆に $(c/\sqrt{gh})$ は小さくなる。また、shore line region の波速は、前の2領域と違って、孤立波の波速と段波の波速の中間の波速を示す。孤立波の場合、砕波後は、bore inception point から汀線にかけては、段波の理論波速によく一致していることが筆者の一人、佐伯の実験で示されているが、周期波の場合は段波の波速より小さく、これは、return current の影響とも考えられる。また、stable region から、shore line region へかけての波速変化も、孤立波の場合とよく似ているが、 $(c/\sqrt{gh})$ は、2割程小さくなっている。また、平均水深 $(h+\bar{\eta})$ を用いて整理したものが、図-11 (a), (b) である。これから明らかなことは、 $(c/\sqrt{g(h+\bar{\eta})})$ は、1.0~1.2の間であり、cnoidal wave の波速に近いことを示している。

以上、波高、波速の変化は、3つの領域に分けられることが明らかとなった。

最後に、本研究は文部省科学研究費 (代表

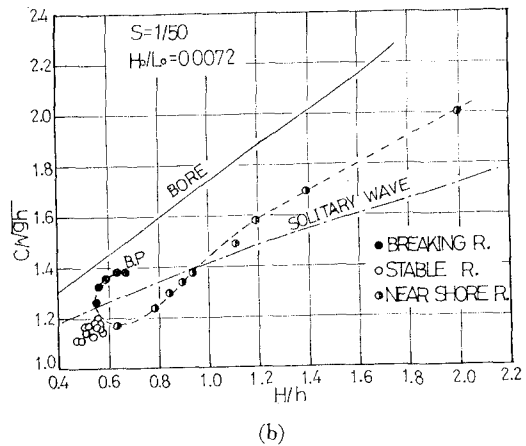
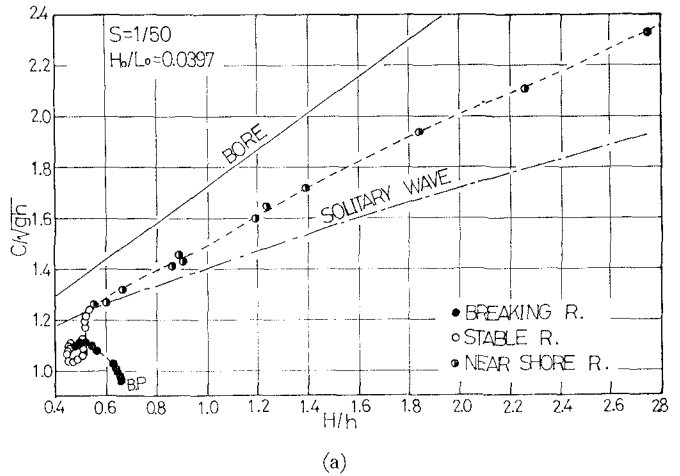


図-10

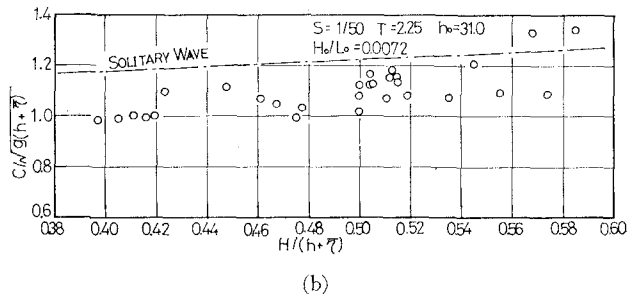
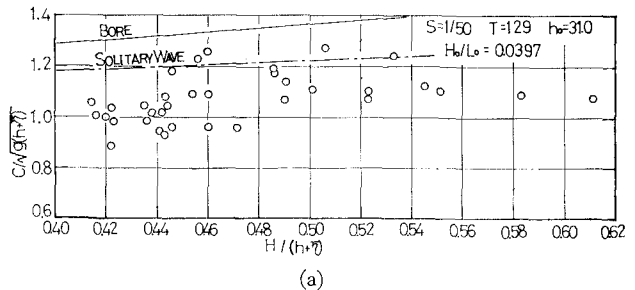


図-11

者, 岩垣雄一教授) による研究成果の一部であることを付記するとともに, 本研究に協力していただいた, 北大工学部酒井謙太郎氏, ならびに, 現銭高組の大久保常雄君に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Horikawa, K. and C. T. Kuo: Proc. of 10th Conf. on Coastal Eng., 1966.
 - 2) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄: 第13回海岸工学講演会論文集, 昭41年.
 - 3) 豊島 修・富永正昭・橋本 宏: 土木研究所報告 133号, 昭43年.
 - 4) Bowen, A. J. et al.: Jour. Geophys. Res., Vol. 73, 1968.
 - 5) 榎木 亨・岩田好一朗・中辻啓二: 第16回海岸工学講演会論文集, 昭44年.
 - 6) Kishi, T. and H. Saeki: Proc. of 10th Conf. on Coastal Eng., 1966.
 - 7) 佐伯 浩・佐藤滋男・尾崎 晃: 第19回海岸工学講演会論文集, 1972.
 - 8) Saeki, H. et al.: Coastal Eng. in Japan, Vol. 14, 1971.
-