

砕波後の波の変形に関する研究 (2)

佐々木幹夫*・佐伯浩**

1. 緒 言

砕波後の波の変形について前回の報告では、水底勾配 $S=1/50$ に対して波高の変化、波速の変化、砕波後の平均水位の変化 (Wave Set-up) について調べた。その結果、砕波後の波の運動機構が3つの領域に分けられることがわかった。砕波点近傍の Breaking Region、汀線近傍の Shoreline Region、それらの中間の領域で比較的安定した運動をしている Stable Region である。今回は、水底勾配 $S=1/12, 1/15, 1/17, 1/20, 1/90$ の場合について実験を行った。そして砕波後の波高の変化、平均水位の変化について詳しく調べた。砕波後の波高の変化については、周期波については、堀川ら¹⁾の研究、中村ら²⁾の研究、豊島ら³⁾の研究、それに我々の実験結果⁴⁾が報告されている。今回はこれらの砕波後の波高をまとめた。また、平均水位の変化については、Bowen⁵⁾の $S=1/12$ の実験、豊島ら³⁾の研究、佐伯ら⁴⁾の研究があるが、さらに、 $S=1/15, 1/17, 1/20, 1/90$ の結果を追加して、平均水位の上昇量 (Wave Set-up) についてまとめた。

2. 実験装置と実験方法

実験は長さ 24 m、幅 0.6 m、深さ 1 m の鋼ガラス張り水槽で行った。水底勾配は $S=1/12, 1/15, 1/17, 1/20, 1/90$ 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、汀線部の水深の浅い所は、特殊抵抗線式波高計を用いた。平均水位は、得られた波形を積分して平均水位を求めた。波高の測定は、砕波点近傍では 5 cm 間隔に測定した。平均水位の上昇 (Wave Set-up) の測定には予備実験の結果、60 波通過後から測定を行った。砕波後の波には、特に Breaking Region では多量の気泡を含むため、データにばらつきがあるが、実験対象の性質上やむを得ない。

3. Wave Set-up について

Longuet-Higgins と Stewart は Radiation Stress の効果によって、海底斜面上を進行する波は、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り

(Wave Set-down)、砕波後は、平均水位が上昇すること (Wave Set-up) を理論的に示した。この平均水位変化は沿岸流の発生、発達に寄与するとともに、Shoreline 近傍では、平均水位の上昇量と波高が同じくらいの大きさになることから、砕波後の波の変形機構を明らかにするのに必要である。この Surf Zone における Wave Set-up に関する実験としては、Bowen⁵⁾が $S=1/12$ について詳しい実験を示している。また、豊島ら³⁾によって $S=1/20$ と $S=1/30$ の実験がなされたが、測定点が少ないため、若干の誤差があるようである。さらに、佐伯・佐々木⁴⁾によって $S=1/50$ の結果が示された。砕波後の Set-up については、Longuet-Higgins & Stewart の基本式を用いて Bowen が式を導いた。砕波後の波高の変化を次式のごとく仮定する。

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

ここで、 h : 静止水深、 $\bar{\eta}$: 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。砕波後の波の単位幅、単位長当りのエネルギーを、 $E = \rho g H^2 / 8$ とし、Radiation Stress と圧力差がつり合うことより、若干の計算の後、次式を得る。

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

ただし、 K は次の式 (3) で表わされる。

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

まず、式 (1) の仮定の妥当性を調べてみると、Bowen⁵⁾の $S=1/12$ の場合は、Breaking Point 近傍を除いて、式 (1) の関係を満足している。また、著者らの $S=1/50$ の場合には、Stable Region では $H/(h + \bar{\eta})$ が一定となっているが、Breaking, R., Shoreline, R. では、 (h/h_B) によって、 γ の値が変っていることがわかった。しかしこの Stable R. で求めた γ より式 (3) で K を求めたものが、一番実験値に近い。今回の各勾配における式 (1) の適応度を調べた結果の一部を図-1 の (a), (b) に示す。

Bowen の場合と同様、我々の場合も、 $S=1/12, 1/15, 1/17$ では砕波点近傍を除いて、式 (1) を満足する。

図-1 の (a) は $S=1/17$ の場合である。これから明

* 学生会員 北海道大学工学部大学院

** 正 会 員 北海道大学助教授 工学部土木工学科

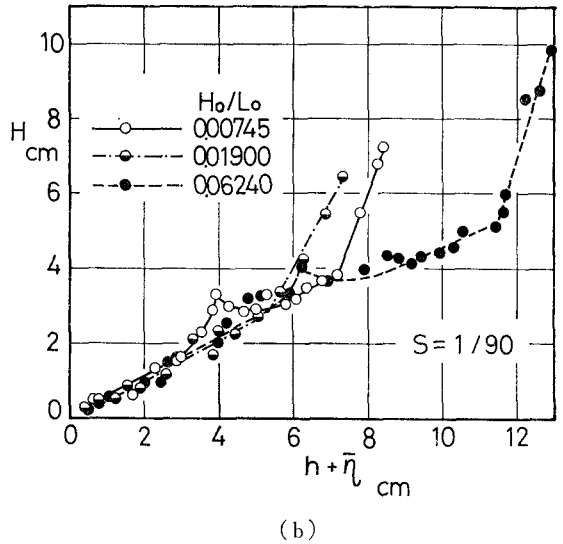
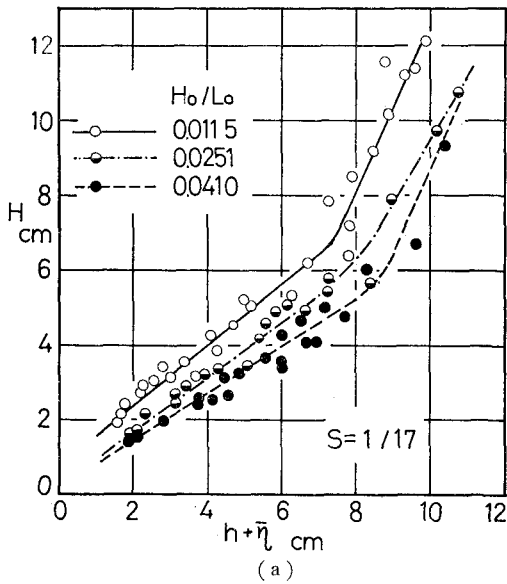


図-1

らかなように、式(1)が砕波後のすべての領域にわたって満足しているわけではない。 $S=1/17$ の場合、沖波の波形勾配(H_0/L_0)が小さいほど、 γ は大きくなる傾向があるが、それほど、顕著ではない。また(b)の $S=1/90$ 場合には、 $S=1/17$ の場合と違って、(H_0/L_0)に関係なく γ はほぼ一定の値となっている。水底勾配 S が緩いほど、 γ の値が(H_0/L_0)に無関係に一定値になる傾向がある。以上式(1)については、水底勾配が急な場合($S>1/20$)、Breaking Region $h/h_B>0.8$ を除いて成立しているし、また、海底勾配 S が $S<1/50$ では、Breaking RegionとShoreline R.を除いてはほぼ式(1)を満足していることがわかった。また、式(1)の係数 γ の値は、急勾配の場合($S>1/20$)は、(H_0/L_0)が小さいほど、 γ の値が大きくなる傾向があり、水底勾配 S が緩くなると($S<1/50$)、(H_0/L_0)が小さいほど、 γ の値が大きくなるが、急勾配の波ほど顕著ではなく、ほぼ一定とみてさしつかえない。

次に平均水面の勾配を表わす式(2)を積分すると、 $\bar{\eta}$ は次の式(4)で表わすことができる。

$$\bar{\eta} = -Kh + \bar{\eta}_s \quad \text{.....(4)}$$

$\bar{\eta}_s$ は、静止時の汀線における平均水位の上昇値を示す。その一例を図-2の(a)、(b)に示す。これから明らかなように、静止水深 h と $\bar{\eta}$ は直線関係にあることが

わかる。また、Wave Set-up は砕波点直後から起こるのではなく、Breaking Point から汀線にかけてのある領域は、Breaking Point における Wave Set-down の値とほぼ同じ値を取り、その後、直線的に $\bar{\eta}$ は増大することになる。図-2の(a)は、 $S=1/17$ で、(b)は $S=1/90$ を示す。次に、(H_0/L_0)に対する K の値を各勾配別に記入したものが図-3である。これより水底勾配 S が大きくなるほど K の値は大きくなり、さらに、若干のデータのばらつきはあるが、沖波の波形勾配(H_0/L_0)によ

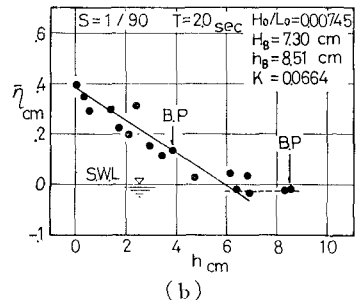
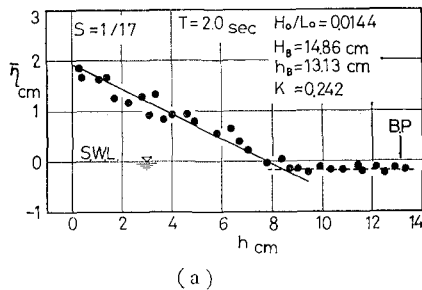


図-2

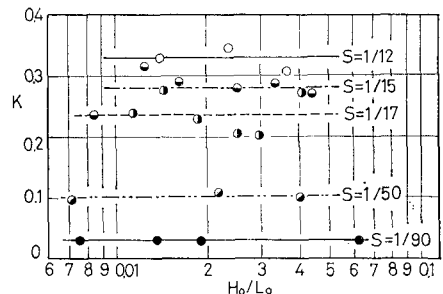
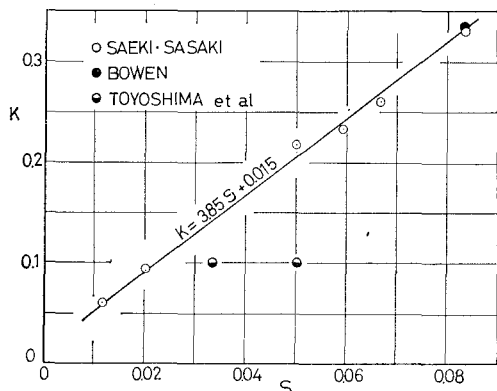


図-3

る変化に較べて、水底勾配 S の効果が非常に大きく、 K は、水底勾配 S によって決定されるとしてよい。これは、 r の値の場合も、 (H_0/L_0) に関係はあるが、それより水底勾配 S によって大きく変化していることと一致する。また、今回の実験値と前回の $S=1/50$ のデータの各勾配に対する平均値の K と S との関係を示したものが図—4 である。これに $S=1/12$ の Bowen⁹⁾ の実験値と、 $S=1/20$, $1/30$ の豊島ら⁸⁾ の結果を示した。これによる



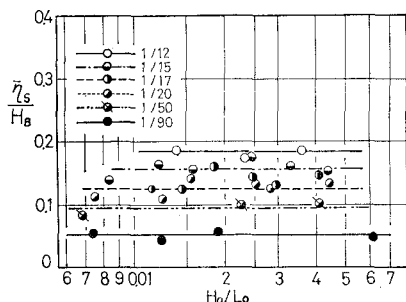
図—4

と、豊島らのデータは若干はずれているが、我々のデータと、Bowen ののはよく一致していることがわかる。これは、豊島らの実験値は数点の測定から K を求めているためと思われる。 K と S の関係は直線で近似できる。

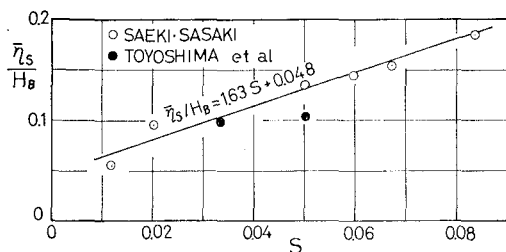
$$K = 3.85S + 0.015 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{1}{90} \leq S \leq \frac{1}{12}, \quad 0.006 \leq H_0/L_0 \leq 0.05$$

次に、式 (4) の $\bar{\eta}_s$ を調べた。汀線における平均水位の上昇量 $\bar{\eta}_s$ が得られれば、式 (4) で示される $\bar{\eta}$ が決定できることになる。汀線部における $\bar{\eta}$ の値 $\bar{\eta}_s$ は、その点の波高とほぼ同じ値となるくらい大きい。Breaking Point の波高を H_B とするとき、 $(\bar{\eta}_s/H_B)$ と (H_0/L_0) の関係を示したものが図—5 である。この $(\bar{\eta}_s/H_B)$ の値も (H_0/L_0) による変化より、勾配 S による変化のほうが大きい。若干のばらつきはあるが、一応 (H_0/L_0) に無関係



図—5



図—6

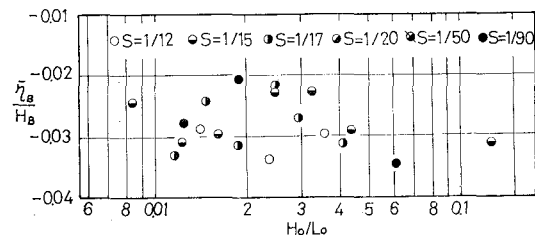
で、 S のみに依存するとして、各勾配ごとに $(\bar{\eta}_s/H_B)$ を平均すると $(\bar{\eta}_s/H_B)$ と S の関係は、図—6 のごとくなり、 $(\bar{\eta}_s/H_B)$ と S は直線の関係となり次式で示される。

$$(\bar{\eta}_s/H_B) = 1.63S + 0.048 \quad \dots\dots\dots (6)$$

以上により、式 (4) で示される $\bar{\eta}$ は結局、水底勾配 S と砕波波高 H_B で近似値に表わされることになる。

$$\bar{\eta} = -(3.85S + 0.015)h + (1.63S + 0.048) \cdot H_B \quad \dots\dots\dots (7)$$

次に、前にも述べたように、Wave Set-up が Breaking Point からすぐ始まるのではない。図—2 に示したように、Breaking Point の点の平均水位の低下量 (Wave Set-down) と同じ値がしばらく続いて、それから Wave Set-up が始まることになる。Breaking Point における低下量を $\bar{\eta}_B$ とすると $(\bar{\eta}_B/H_B)$ と (H_0/L_0) の関係を図—7 に



図—7

示す。データにばらつきはあるが、 $(\bar{\eta}_B/H_B)$ は $(\bar{\eta}_s/H_B) \approx -0.03$ となる。このことから、式 (7) より、この Set-down から Set-up に移る水深を h_t で表わせば、 h_t は式 (8) で表わされる。

$$\begin{aligned} -0.03 H_B &= -(3.85S + 0.015)h_t \\ &\quad + (1.63S + 0.048) \times H_B \\ \therefore h_t &= \frac{1.63S + 0.078}{3.85S + 0.015} \cdot H_B \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

よって、この h_t は、水底勾配と砕波波高によって決まることになる。また、式 (7) の適用範囲は、式 (5) の範囲のほかに、水深 h が、 $h \leq h_t$ の範囲でのみ適用可能となる。また、 $S=1/90$ のような非常に緩傾斜の場合には、沖側で主砕波が起こり、砕波後また新しい波が形成されて、その波が砕波する。このように、主砕波のあと

に砕波が起ころても、Wave Set-up に対しては、主砕波が大きな比重を占める。すなわち、砕波後、新しい波が形成されても Set-down を起こすことはない。図-2の(b)は、この2回砕波の例であるが、Set-down は起こらない。このときの波高の変化は、図-10のごとくである。

4. 波高の変化

砕波後の波高の変化に関する実験は、Horikawa & Kuo¹⁾、中村・白石・佐々木²⁾、榎木・岩田・中辻⁶⁾、そして佐伯・佐々木⁴⁾によってなされている。前回の報告で、我々は $S=1/50$ の詳細な結果を示し、その結論として、砕波後の波高の減衰は、砕波の形態により異なっていて、 $S>1/30$ では、Plunging Breaker に較べて、Spilling Breaker のほうが減衰が大きい、これも Breaking Region の範囲内だけで、他の領域ではそれほど差がない。また、 $S<1/30$ では、それとは逆に、Plunging Breaker のほうが減衰が大きいという結果を示した。今回は、 $S=1/12, 1/15, 1/17, 1/20, 1/90$ の測定結果を求めたので、我々の測定結果と以前に得られた多くの研究者によって得られた結果をまとめた。まず、 $S=1/12$ の場合を調べてみると、これは Bowen が $0.007<H_0/L_0<0.05$ の範囲で、我々が $0.01<H_0/L_0<0.04$ の範囲で実験を行った。Iversen、速水の砕波形態の分類では、両実験の範囲とも、Plunging Breaker である。Bowen⁵⁾ のデータは、整理の方法が我々のと異なっていて、 (h/h_B) のかわりに (X/X_B) を使い、 X_B が Breaking Point から、Run-up の平均値までの距離をとっているので正確には判断できないが、 (H_0/L_0) の違いによる、 (H/H_B) の値は明らかでないが (H_0/L_0) が大きいほど (H/H_B) が大きくなっている。我々のデータでも、 (H_0/L_0) が大きいほど、 (H/H_B) も大きくなっている。しかし、この差も $(h/h_B)>0.6$ の範囲のみで、 $(h/h_B)<0.06$ では (H_0/L_0) に関係な

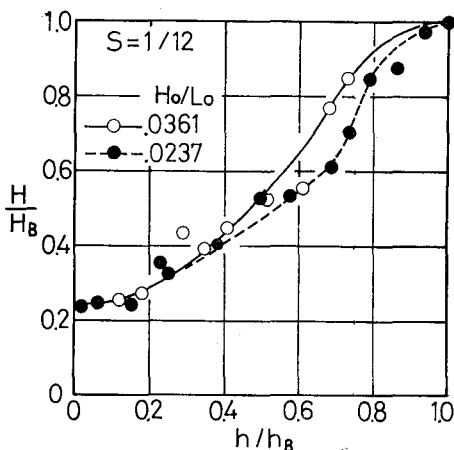


図-8

く (H/H_B) の値はほぼ同じである。この結果を 図-8 に示す。Spilling Breaker の範囲の実験値 $H_0/L_0>0.05$ のデータがあればより明瞭な結果が得られると思われる。次に、 $S=1/15$ の場合は、榎木らの研究と我々の今回のデータがある。榎木らの場合は、 $(H_0/L_0)>0.064$ の完全に Spilling Breaker と $(H_0/L_0)<0.031$ の Plunging Breaker の場合の実験を行っている。これによると、明

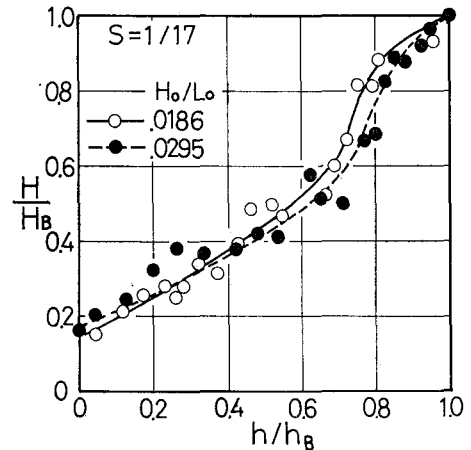
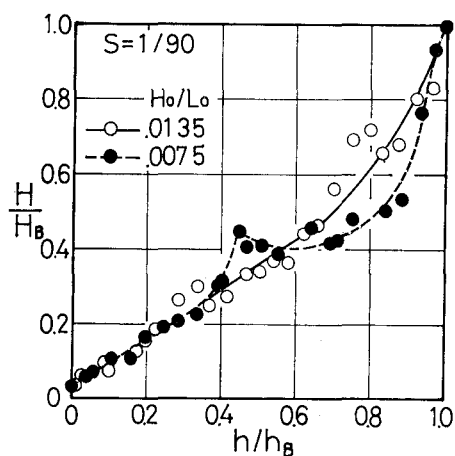


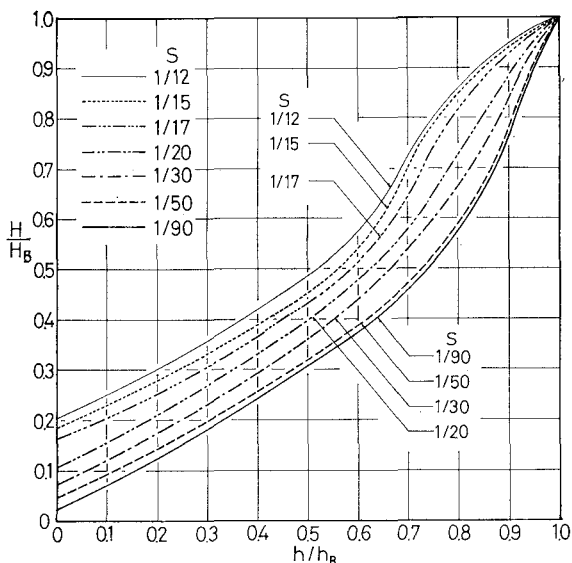
図-9

らかに Spilling Breaker のほうが波高の減衰が著しい。今回の我々の実験データは全て Plunging Breaker の範囲であるが、榎木らの結果と較べて、 $(h/h_B)>0.7$ では我々の実験値のほうが減衰が大きく、 $(h/h_B)<0.7$ では、榎木らのほうが減衰が激しい。次に、 $S=1/20$ 場合を調べてみると、堀川らのデータは全て、Plunging Breaker であるが、実験範囲が、 $0.008<H_0/L_0<0.017$ と狭いために、 (H_0/L_0) による違いは明確でない。また、我々も $0.0074<(H_0/L_0)<0.0425$ の範囲で実験を行ったが、堀川らの値より若干小さかった。次に、 $S=1/30$ の場合は、堀川らの場合は実験値が $H_0/L_0<0.017$ で全て Plunging Breaker であると思われ波高の減衰は $S=1/20$ と同じく (H_0/L_0) に無関係である。また、豊島らは、 $H_0/L_0<0.025$ (Plunging Breaker の領域) と $H_0/L_0\geq 0.025$ (Spilling Breaker の領域) に分けて整理しているが、それによると、 $(h/h_B)>0.6$ の範囲では、 $H_0/L_0\geq 0.025$ のほうが減衰が大きく、これは、 $S=1/50$ の場合は、 $S\geq 1/30$ の場合とは違って、Plunging Breaker のほうが波高の減衰は大きい。しかし、Plunging Breaker でも、 (H_0/L_0) が大きいほう、つまり Spilling Breaker に近いほうが減衰が小さいとは限らない。この場合も、 $(h/h_B)>0.7$ の Breaking Region の範囲では、砕波の形態によって差があるが、 $(h/h_B)<0.7$ の値は砕波の形態に関係なくほぼ同じ減衰の仕方である。次に $S=1/90$ の結果を 図-10 に示す。 $S=1/90$ のときの Spilling Breaker と Plunging Breaker の境界は、速水らの分類では、 $H_0/L_0\approx 0.016$ で



図—10

あるが、我々の実験では、 $H_0/L_0 \approx 0.0075$ の波でも完全な Plunging Breaker とはならず、Spilling Breaker に近い状態であったことから、 $S=1/90$ くらいの緩勾配では完全な Plunging Breaker は起こらないようである。この $S=1/90$ でも、 $S=1/50$ の場合と同じく、完全な Spilling Breaker (H_0/L_0 が大きい) ほど (H/H_B) が大きく Plunging Breaker のほうが波高の減衰が著しい。しかし、これも $(h/h_B) > 0.8$ の Breaking Region の範囲で、他の領域ではほとんど差がない。また、この $S=1/90$ の場合、 $(H_0/L_0) = 0.0075$ の波は 2 度の砕波を起こしている。この場合も 2 度目の砕波の所で、Shoaling によって、一度 (H/H_B) が大きくなっているが、それも局部的に大きくなっているだけで、他の波とほとんど同じ減衰状態であって、2 度目の砕波の影響はきわめて小さいことがわかる。これは、前節の Wave Set-up の場合においても同じで 2 度目の砕波は Wave Set-up にほとんど影響を与えていない。以上 $S=1/50$ と $1/90$ は、よく似かよった波高の減衰であることが明らかとなった。以上で、 $S > 1/30$ の急勾配の場合には一般に、Plunging Breaker の波に較べて、Spilling Breaker の波のほうが波高の減衰が大きいたことが明らかとなり、また、同一の水底勾配 S であれば、砕波形態が同じであれば、 (H_0/L_0) に関係なく、ほぼ同じ (H/H_B) となる。しかし、詳しくみると、 $S=1/12$ の場合は、Bowen の場合も我々の場合も (H_0/L_0) が大きいほど、同じ Plunging Breaker でも、 (H_B/H_0) は大きい。この砕波の形態によって波高の減衰が異なるのは、主に Breaking Region の範囲内であって、他の領域では砕波形態、 (H_0/L_0) にあまり関係ない。また、 $S < 1/30$ の比較的緩勾配においては、 $S > 1/30$ とは逆に Plunging Breaker のほうが波高減衰が著しいがこの場合も、Breaking Region の範囲内であって、他の範囲では、砕波形態、 (H_0/L_0) に関係ない。この $S=1/12 \sim 1/90$ の (H/H_B) と (h/h_B) の関係を我々の実験値と堀川ら、榎木らのデータをまとめたものが 図—11 である。これは、我々の

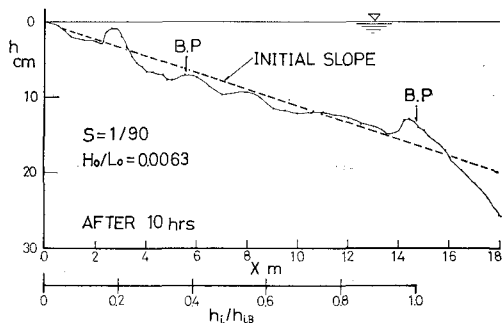


図—11

データと堀川、榎木のデータを用い、砕波形態別の値を平均したものである。また、 (H/H_B) と $(h+\bar{\eta})/(h_B+\bar{\eta}_B)$ の関係を調べてみたが、 $\bar{\eta}$ が直線的に変化することと、その変化率が波高の減衰に較べて小さいために、求められたグラフは、ほぼ 図—8~10 と同じであった。

5. 移動床での波高変化との比較

図—12 は初期海底勾配 $S=1/90$ の場合で、周期 2.52 秒、沖波波高 6.2 cm、 $(H_0/L_0) = 0.0063$ の波を 10 時間当てたときの海底形状である。これに用いた砂の径は



図—12

$d_{50} = 0.22$ mm でほぼ均一粒径とみてよい。このときの波高の変化を示したものが 図—13 である。図中の h_i は、波を当てるまえの initial の水深で、 h_{iB} は砕波点における initial の水深である。この 図—13 と水底が Rigid な場合の 図—10 の $(H_0/L_0) = 0.0075$ の図を比較すると、比較的良好一致している。すなわち、 $(h/h_B) \approx 0.8$ 近辺では、Rigid の場合のほうが若干小さくなっているが、これは、実際的水深が initial depth より小さく

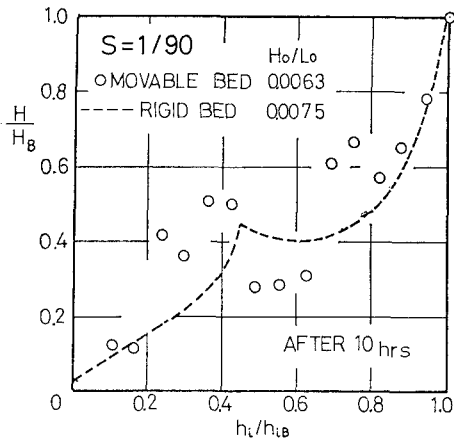


図-13

なっているためと思われる。また、第2の砕波点での波高も、Movable Bed の場合のほうが大きい、これは、実際の水深が initial depth より小さいためと思われる。以上より、移動床の場合、水底に Bar 等ができて、局所的な波高の変動は大きい、全体的な傾向は、Rigid Bed

の場合と変化がない。

最後に、本研究を行うに当たり、実験装置の準備に協力して戴いた北大工学部の酒井謙太郎氏、ならびに実験に協力して戴いた、現愛知県庁の中山好博君に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Horikawa, K & C.T. Kuo: A Study on Wave Transformation inside Surf Zone, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., 1966.
- 2) 中村・白石・佐々木: 砕波による波の変形に関する研究, 第13回海岸工学講演会講演集, 1969.
- 3) 豊島・富永・橋本: 土木研究所報告, 133号, 昭43年.
- 4) 佐伯・佐々木: 砕波後の波の変形に関する研究(1), 第20回海岸工学講演会論文集, 1973.
- 5) Bowen, A.J., D.L., Inman, V.P. Simons; Wave Set-down and Set-up, J.G.R. Vol. 73, 1968.
- 6) 榎木・岩田・中辻: 砕波の内部機構に関する基礎的研究(第1報), 第15回海岸工学講演会講演集, 1969.