

汀線より陸側にある堤防への波のうちあげ

細 井 正 延*・石 田 昭**

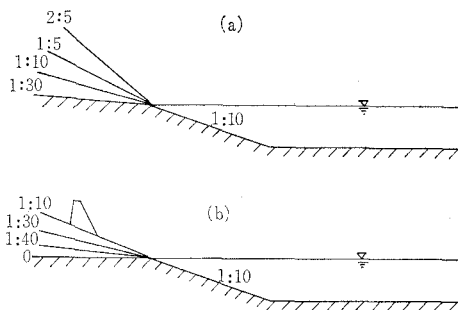
1. ま え が き

太平洋に直面した海岸では非常に大きなエネルギーをもつ波が来襲することが多いので、このような海岸に堤防を築造する場合には、水深が深い所では波のエネルギーが大きいので堤防が破損しやすく、したがって汀線付近かあるいは汀線より陸側に設置するのが普通である。これらの研究については著者は以前にその一部について検討を行っており¹⁾、また Hunt²⁾, Saville³⁾ が複合勾配の堤防のり面に対するものとして同様の実験を行なっているにすぎない。実際の海岸地形を見ると、汀線より海側の水底勾配が急な場合には汀線より陸側の勾配の方が水底勾配よりもゆるやかなことが多い。この陸側勾配の大きさが陸上に置かれた堤防への波のうちあげ高さにどのような影響を与えるかについて実験を行なったのが本研究の主な目的であり、また小段型構造の堤防に対する波のうちあげ高さを求める場合にも有効である。陸上に堤防を置く場合にはその位置が汀線から遠くなるほど、陸側の海岸の粗度、浸透、風が波のうちあげ高さに大きな影響をもつものと考えられる。ここではそれらの中の粗度の影響を検討する目的で、初めに堤防を置かない場合のうちあげ高さについて実験を行ない、その結果を Keller, Levine, Whitham による bore の取り扱いの方法および Freeman, Mèhauté による rarefaction wave の方法を用いて検討した。つぎに汀線および陸側のいろいろな位置に堤防を置き、陸側の勾配を種々に変えてうちあげ高さを測定し、陸側勾配、汀線から堤防までの距離、波形勾配、波高などとの関係を調べた。その結果戻り流れの強さが波のうちあげ高に大きな影響を与えること、とくに堤防に遡上した水塊が段波状態をなして海側へ戻る場合に、これと碎波後に現われる進行段波とが重合して大きな重複段波が発生しこのために大きなうちあげ高さになることがわかった。

2. 実験装置および方法

実験に使用した水路は長さ 18.75 m, 幅 0.6 m, 高さ 1.2 m の両面ガラス張り鋼製の 2 次元波動水槽で、一端にフラッタ型の造波装置があり、他端に模型を設けた。水深を 30 cm とし静水面を汀線と一致させ、汀線より

図—1 海岸および堤防の模型



海側の水底勾配は 1/10 とし、これより陸側の勾配を種々に変えた。すなわちまず堤防を置かない場合には 1/30, 1/10, 1/5, 2/5 (1/5, 2/5 の場合は海岸勾配というよりも汀線に 1/5, 2/5 勾配の堤防を置いたと考えた方が適当である) の 4 種類とし、つぎに堤防を置いた場合は 1/10, 1/30, 1/40, 0 の 4 種類としこの上に 1 割勾配の堤防を汀線から種々の位置に置いた。海岸および堤防模型は滑面仕上げ木製である。使用した波は沖波換算波高 6 cm, 10 cm, 12 cm, 周期 1.05 sec, 1.11 sec, 1.27 sec, 1.46 sec, 1.72 sec で波形勾配は 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06 の 5 種類である。波の測定には抵抗線式波高計と電磁オシログラフおよび 8 mm カメラを用いた。

3. 実験結果

(1) 海岸への波のうちあげ高さ

前にのべたように堤防が陸上に置かれている場合にはうちあげ高さに対して陸側の粗度の影響が大きいに考えられるので、まず堤防を置かずに 1/30 と 1/10 勾配上へのうちあげ高さを測定し、ついで 1/5, 2/5 の勾配に対しても測定を行なった。この実験に用いた波は沖波換算波高 $H_0=10$ cm, 沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.06, 0.02$ の 2 種類で、静水位から鉛直に測ったうちあげ高さは表—1 に示されている。うちあげ高さや粗度および波の性質との関係について、Freeman と Mèhauté⁴⁾ は粗度と鉛直加速度を考慮した波動方程式および連続式を

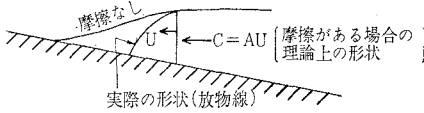
表—1 うちあげ高さ

陸側勾配	1/30	1/10	1/5	2/5
波形勾配 0.06	2.5 cm	3.8 cm	5.6 cm	8.1 cm
0.02	3.9	6.9	10.3	14.0

* 正 会 員 工 博 名古屋工業大学教授 土木工学科

** 学生会員 名古屋工業大学大学院学生

図-2 Rarefaction wave の先端



用い、孤立波を与えて特性曲線法によって汀線における流速を求め、さらに汀線では bore が消滅して rarefaction wave と考えて計算の便宜上その先端で $C=A \cdot U$ ($A < 1/2$) なる関係が成り立つとした。ただし $C = \sqrt{gh}$ (h は先端部の水深) で、 U はその場所の流速である (図-2)。このような関係を用いて各位置における流速およびうちあげ高さを次式のように導いている。

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{u_s^2}{2g} - \left[S + \frac{f}{A^2} \right] \frac{x}{(1+A)(1+2A)} \quad (1)$$

上式で $u=0$ と置く

$$R = \frac{u_s^2 (1+A)(1+2A)}{2g \left(1 + \frac{f}{A^2 S} \right)} \quad (2)$$

ここで u_s : $x=0$ すなわち汀線における陸方向への最大流速、 u : 汀線から x の距離の所の流速、 S : 陸側勾配、 f : 摩擦応力を $\tau = \rho f u^2$ とした場合の摩擦係数、 R : 静水位から鉛直方向に測った波のうちあげ高さである。われわれは式 (3) を用いて A の値を求めたのであるが、この場合に f の値は滑面乱流として適当に仮定したが、最も問題になるのは u_s の値である。Freeman, Mèhauté は崩れ波の碎波状態を考え、しかも碎波後は水底摩擦だけによるエネルギー損失を考えて特性曲線法で u_s を求めたのである。われわれの実験では巻き波で碎け、碎波後にも波の前面が崩れてエネルギー消費が行なわれると考えられるので上記の計算法を使用することができない。本実験の $H_0/L_0=0.06$, 0.02 の碎波点は汀線からほぼ 115 cm および 125 cm の所にあるが、落下点はほぼ 70 cm および 80~90 cm の所であるから、30 cm くらいの所でようやく比較的に明瞭に識別できる程度の段波状の水面移動が見られる。したがって汀線から 20 cm 離れた位置における段波の形状および波形の移動速度を 8 mm カメラで調べ、Keller, Levine, Whitham³⁾ の方法を用いて汀線における流速を求めた。この理論と前記の Mèhauté の理論は汀線で段波が消滅し運動エネルギーだけが存在すると考えているが、実際に汀線で水面変化を測定したところかなり大きな水深が現われるので、この影響も考慮しなくてはならない。このような場合の計算はむずかしいので、上記の Whitham の方法を用いて汀線における u_s を求めることにした。彼は水底が一様勾配の静水中を段波が進行する場合に任意の位置における段波の移動速度、流速、高さの変化を与える式をつぎのように導い

ている。

$$h_0 = B \frac{(M^2 - 0.5) \cdot e \{0.2808 \cdot \tan^{-1}(M + 0.6769)/0.3179\}}{(M-1)^{0.8} (M-0.7471)^{1.18} (M^2 + 1.354 M + 0.5593)^{1.173} (M+2.393)^{1.673}} \quad (3)$$

$$M = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

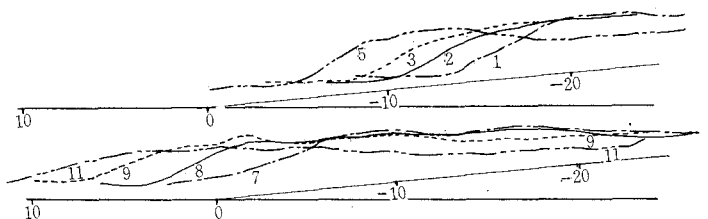
$$U = \sqrt{\frac{g \cdot h(h_0 + h)}{2h_0}} \quad (5)$$

$$\frac{U}{\sqrt{g \cdot h_0}} = M \sqrt{2M^2 - 1} \quad (6)$$

$$\frac{\eta}{h_0} = \frac{h - h_0}{h_0} = 2(M^2 - 1) \quad (7)$$

ここで B : 定数、 U : 段波の移動速度、 h_0 : 静水面から水底までの深さ、 h : 段波の最高水位における水深、 η : 静水面上段波の最高水位までの高さである。表-1 に示す実験の中で、 $H_0/L_0=0.06$ 、陸側勾配 1/10 について段波の波形変化を示すと図-3 のようである。これから -20 cm の所では $h_0=2.6$ cm, $h=5.2$ cm, $U=60$ cm/sec あって、同様にして表-1 の全部についてそれぞれの値を求めた。以下にそれらの値を用いて式 (3)~(6) から汀線における $U=u_s$ を求め、つぎに式 (2) から B を算定した。

a) $H_0/L_0=0.06$, $S=1/10$ $h_0=2.6$ cm, $h=5.2$ cm から式 (5) によって U を求めると 87.5 cm/sec となって測定値よりも大きい。これは段波が -20 cm の所を汀線に向って通過する以前から戻り流れが存在するためであると考えられ、したがって v を戻り流れの速度とすると式 (5) の代りに $60+v = \sqrt{\frac{g \cdot h(h_0 + h)}{2h_0}} = 87.5$ としなければならないであろう。かなり大胆ではあるが式 (5) の U に測定値 60 cm/sec を代入し、また $h_0=2.0$ cm として h を求め、これらから式 (4) の M を算定することにした。また式 (5) は水底摩擦の影響を考慮していないが、本実験の場合には摩擦の影響は非常に少ないと考えられる。このようにして $h=2.96$ cm, $M=1.111$ となり、式 (3) から $B=3.178$ となる。汀線では段波が消滅して $h=0$ と考えているから $M=\infty$ となり、したがって汀線での流速は式 (6) から $U=u_s=98.4$ cm/sec となる。つぎに式 (2) において滑面木板では $f=0.003 \sim 0.004$ と仮定し、 $u_s=98.4$ cm/sec, $R=3.83$ cm, $S=0.1$ を代入して A を求めると、 $f=0.003$ の場合には

図-3 段波の移動状態 ($S=1/10$)

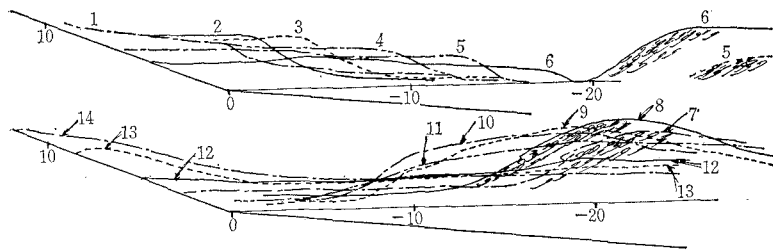
$A=0.17$, $f=0.004$ では $A=0.19$ となる。

b) $H_0/L_0=0.06$, $S=1/30$ -20 cm の所の h , h_0 , U の値は実測によれば $S=1/10$ の場合とほぼ同じであったから, $u_s=98.4$ cm/sec, $R=2.47$ cm, $S=1/30$ を代入すると, $f=0.003$ に対して $A=0.20$, $f=0.004$ に対して $A=0.22$ となる。

c) $H_0/L_0=0.06$, $S=\sin \theta=1/5.1$ ($\tan \theta=1/5$) $h=5.4$ cm, $h_0=2.4$ cm, $U=70$ cm/sec, したがって $M=1.180$, $B=5.3$ で $u_s=127.3$ cm/sec となる。式 (3) から $f=0.003$ に対して $A=0.12$, $f=0.004$ に対して $A=0.13$ である。

d) $H_0/L_0=0.06$, $S=\sin \theta=2/5.39$ ($\tan \theta=2/5$) 図-4 のように戻り段波と汀線へ向う段波とが -20 cm の付近で重複して大きな水面上昇が現われ, これが汀線方向へ移動して大きなうちあげ高を生じさせる。この場合には $h=6$ cm, $h_0=2.8$ cm, $U=76$ cm/sec であるから, $M=1.22$, $B=6.678$ となり, $u_s=142.7$ cm/sec である。したがって $f=0.003$ に対して $A=0.11$, $f=0.004$ に対して $A=0.12$ である。

図-4 段波の移動状態 ($S=2/5.39$)



e) $H_0/L_0=0.02$ の波では -20 cm の所の h , h_0 , U の値は陸側勾配が $1/10$ でも $1/30$ でもほぼ等しく, $h=7.0$ cm, $h_0=2.7$ cm, $U=70$ cm/sec である。したがって $M=1.180$, $B=5.310$, $u_s=127.3$ cm/sec となる。 $S=1/30$ の場合 $f=0.003$ では $A=0.19$, $f=0.004$ では $A=0.21$ で, $S=1/10$ の場合 $f=0.003$ では $A=0.18$, $f=0.004$ では $A=0.20$ である。

以上の A の値をまとめて示すと表-2 のようである。なお $H_0/L_0=0.02$, $S=1/5$, $2/5$ の場合には戻り段波と進行段波とが重合して空気を多量に混入した大きな重複波を生じて精度のよい測定ができなかった。表-2 からわかるように, A の値は摩擦係数が大きい方が大きいのは当然であるが陸側勾配が急になると小さくなっているのはどのような意味をもっているのだろうか。 $2/5$ の

表-2 A の値

H_0/L_0	f 陸側勾配	1/30	1/10	1/5	2/5
0.06	0.003	0.20	0.17	0.12	0.11
	0.004	0.22	0.19	0.13	0.12
0.02	0.003	0.19	0.18	—	—
	0.004	0.21	0.20	—	—

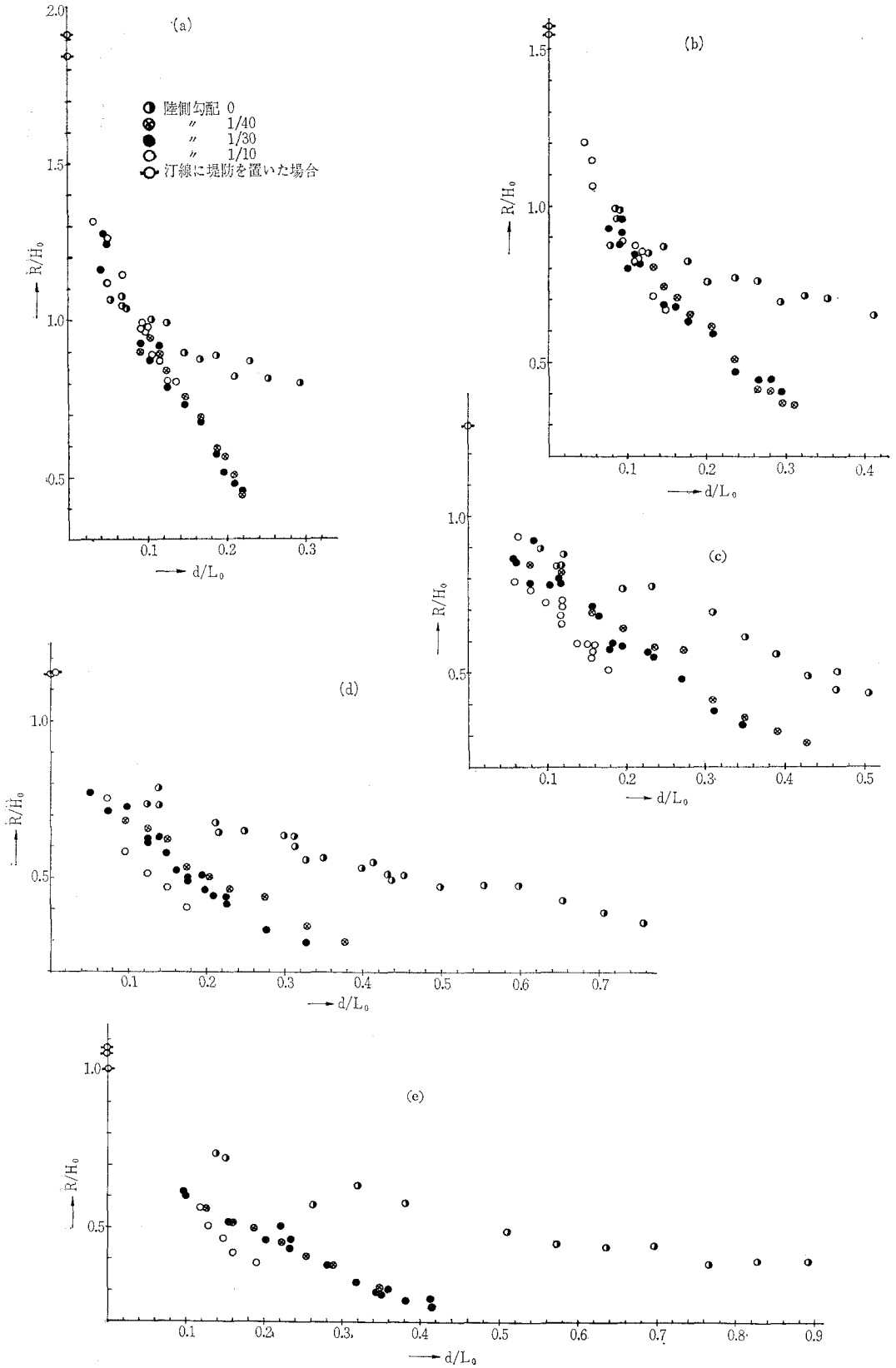
場合には式 (3) の形から考えても, $f=0.003 \sim 0.004$ では $A < 0.15$ であるが, 実際に勾配が急なほど rarefaction wave の先端が尖っているように見える。ただしどの勾配の場合にも f は一定としておくと無理があるのかもしれないし, とくに勾配がゆるいほど wave の先端が最高うちあげ点に達してわずかの距離しか戻らないうちにつぎの wave が遡上してくるので, ちょうどある厚さに水がたまっている上に wave が遡上してくるとい現象を呈している。したがって勾配がゆるいほど f の値が小さいと考えれば A の値も小さくなるわけであるが, かりに $H_0/L_0=0.06$, $S=1/10$, $f=0.002$ としても $A=0.15$ であるからそれほど小さくはならない。また波形勾配の違いによっては A の値は変わらないようである。この実験では u_s の算定方法に問題点があるから, さらに多くの実験を行なって沖波の規模と段波の形状, 移動速度, u_s との関係を調べ, また陸側部分の粗度を変えて A の性質を検討するつもりである。 A が決定されれば式 (1) によって汀線から任意の距離における流速が求まり, したがってここに堤防を置いた場合のうちあげ高さが算定されることになる。

(2) 堤防への波のうちあげ高さ

汀線から陸側へいろいろの距離 d の所に 1 割勾配の堤防を置いてうちあげ高さ R を測定し, 横軸に d/L_0 を縦軸に R/H_0 をとり, 陸側勾配を

パラメーターとして波形勾配別に図示すると図-5 (a) ~ (e) のようになる。各図とも d/L_0 が大きくなるにつれて R/H_0 が小さくなっているが, 同一の d/L_0 に対しては陸側勾配がゆるやかなほど R/H_0 が大きい。また d/L_0 がある値以上になると, 陸側が水平な場合には他の勾配にくらべて R/H_0 の値がいちじるしく大きくなっている。 $H_0/L_0=0.02$, 0.03 の場合には $1/10$, $1/30$, $1/40$ のいずれの勾配でも R/H_0 はほぼ同じで, 水平な場合だけがいちじるしく大きい。 $H_0/L_0=0.04$, 0.06 では $1/10$ に対する R/H_0 が最も小さく, $1/30$, $1/40$ はほぼ同じである。 $H_0/L_0=0.05$ では $1/10$, $1/30$, $1/40$, 0 の順序に大きくなっている。すなわち陸側勾配が急になるほど汀線から同じ距離の所に堤防を設けてもうちあげ高さは小さく, とくに波形勾配が大きくなるにつれて $1/10$, $1/30$ (または $1/40$) のそれぞれの R/H_0 の値に明確な差異が現われてくる。(1) の海岸への波のうちあげ高さの所で述べた結果を用いて堤防を置いた場合のうちあげ高さを求めて比較してみよう。たとえば $H_0/L_0=0.06$, $S=1/10$ の場合に, $d=30$ cm に対して $R=3.9$ cm が測定され, $H_0/L_0=0.06$, $S=1/30$, $d=30$ cm では $R=4.8$

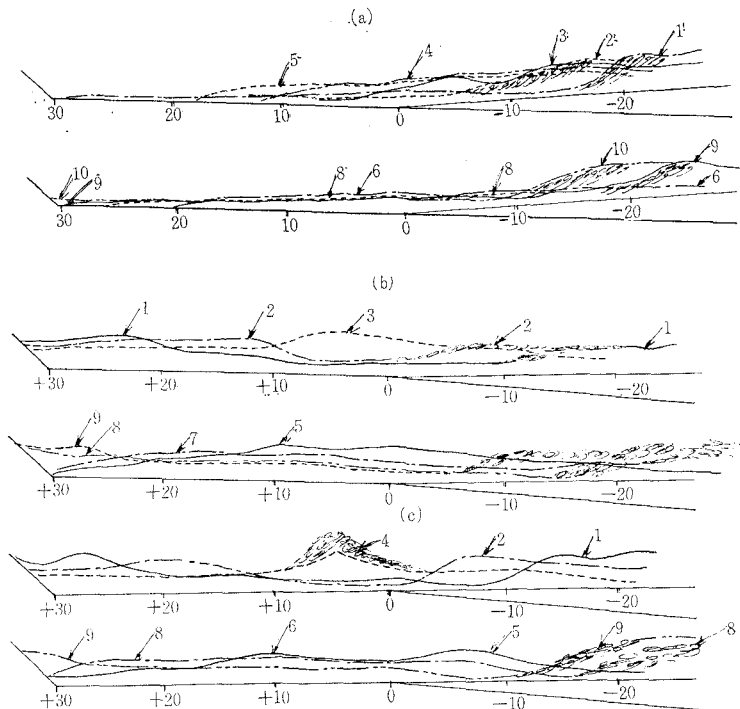
図—5 堤防への波のうちあげ高さと堤防位置との関係



cm が測定されていて、 $1/30$ の方が大きい。いま式 (1) で $f=0.004$, $A=0.19$, $S=1/10$, $x=30$ cm として $u^2/2g$ を求めると 1.09 cm であるから静水面上の高さは 4.09 cm であり、つぎに $f=0.004$, $A=0.22$, $S=1/30$, $x=30$ cm とすると $u^2/2g=2.96$ cm で静水面上の高さは 3.96 cm で $1/10$ の場合にほぼ等しい。つぎに $H_0/L_0=0.02$, $d=30$ cm の場合には、 $1/10$ に対しては $u^2/2g=4.70$ cm で静水面上 7.70 cm, $1/30$ に対しては $u^2/2g=6.10$ cm で静水面上 7.10 cm で $1/30$ の方が小さい。また同様に $H_0/L_0=0.02$ で $d=60$ cm に対しては、 $1/10$ で $u^2/2g=1.14$ cm で静水面上 7.14 cm, $1/30$ では $u^2/2g=3.95$ cm で静水面上 5.95 cm で $1/30$ の方が R/H_0 の値がかなり小さい。すなわち式 (1) で計算したうちあげ高さは陸側勾配が急なほど大きくなるが、測定の結果ではこれと反対である。この原因を確かめるために 8 mm カメラによって水面変化の状態を観察した結果、陸側勾配がゆるい場合には堤防から反射して沖側へ向う段波が現われ、これが進行段波と重畳して大きな重複段波が生じるためであることがわかった。この重複段波の大きさと発生する場所とによってうちあげ高さが異なるのであるが、これらは沖波の性質、陸側勾配、堤防位置に左右されるのである。たとえば $H_0/L_0=0.06$ で $d=30$ cm, $S=1/10$, $1/30$, 0 のそれぞれの水面変化の状態は図-6 (a)~(c) のとおりである。(a) は波がよ

い場合とほぼ同じで、したがって戻り段波は発生しない。(b) は $1/30$ 勾配の場合で戻り段波と進行段波が汀線 (0 cm) と陸側へ 10 cm ($+10$ cm) の間で重複し、これがふたたび堤防に衝突する。(c) は勾配が 0 でこの場合にはかなり大きな戻り段波が現われて $0 \sim +10$ cm の所で重畳して、顕著な重複波が形成される。このように陸側勾配の大きさによって戻り段波の発生する状態が異なっている。前記の式 (1) による計算結果では $1/30$ と $1/10$ とではうちあげ高さがほぼ等しくなっているが、実際には $1/30$ では戻り段波が発生するためにうちあげ高さがさらに増大するのであろう。つぎに $H_0/L_0=0.02$, $d=30$ cm の場合には図-7 (a)~(c) にみられるようにいずれの勾配の場合でも非常に大きな戻り段波が現われて、これが進行段波と $-20 \sim -30$ cm の所で重複して大きな重複段波が形成されこれが堤防方向に移動する。 $H_0/L_0=0.02$, $d=60$ cm の場合には、 $S=1/10$ では波の先端がわずかに堤防にあたる程度であり、 $S=1/30$ で非常に弱い戻り段波が現われる。前記式 (1) による計算結果では $1/30$ の方がうちあげ高さ約 1.2 cm 小さいが、この場合に現われる弱い戻り段波の影響をうけて、うちあげ高さがちょうど $1/10$ の場合と同じくらいになったのであろう。勾配が 0 の場合には強い戻り段波が生じて $+10$ cm 付近で大きな重複段波が現われるので、うちあげ高さは前二者よりも高くなっている。以上のすべてに共通した点は、陸側勾配が水平の場合には勾

図-6 Rarefaction wave の変化の状態
($H_0/L_0=0.06$)



配がある場合に比べて、堤防が汀線から離れるほどうちあげ高さの差が次第に大きくなる。Herbich, Sorensen および Willenbrock⁹⁾は小段をもった堤防へのうちあげ高さの実験を行なった結果、小段幅が大きくなると Saville の複合断面の方法による推算値よりうちあげ高

さが大きくなることを示し、その理由として波が引いた時に小段の上に残った水がつぎの波がうちあげられた時に一緒になって遡上するためであろうとしているが、本実験によれば上述のように戻り段波の影響が現われるためであろうと考えられる。したがって幅の広い表小段を

図-7 Rarefaction wave の変化状態
($H_0/L_0=0.02$)

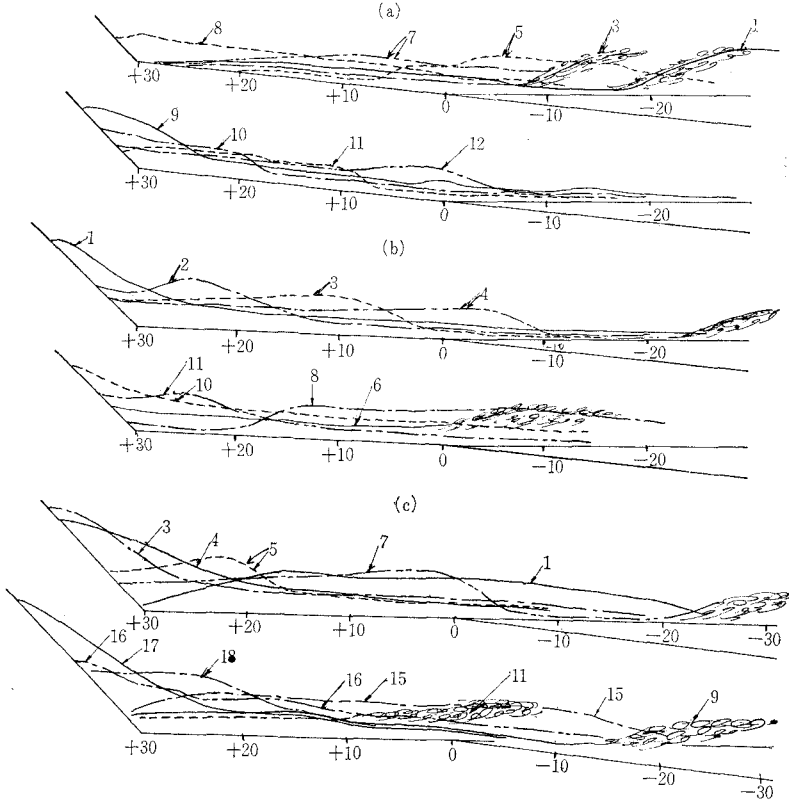
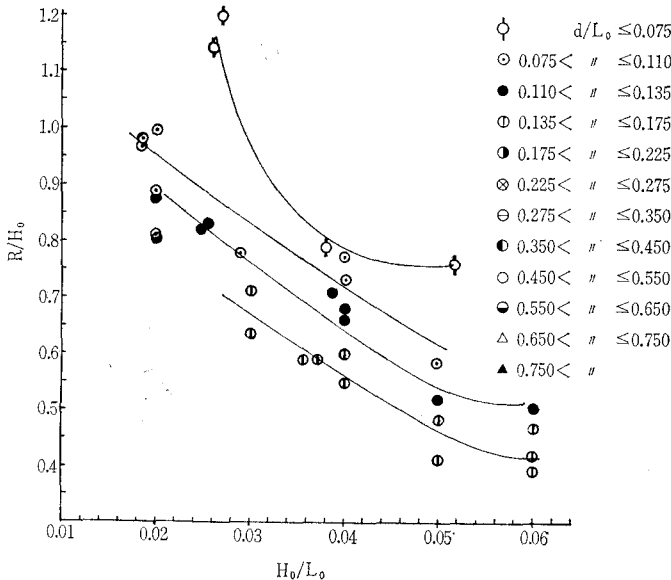
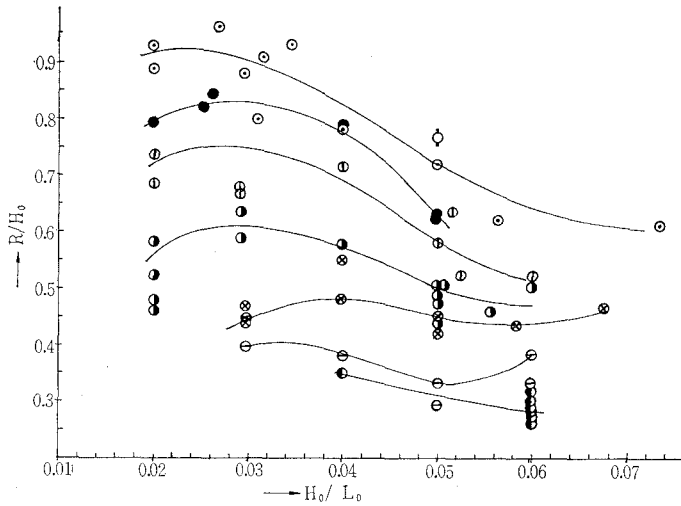


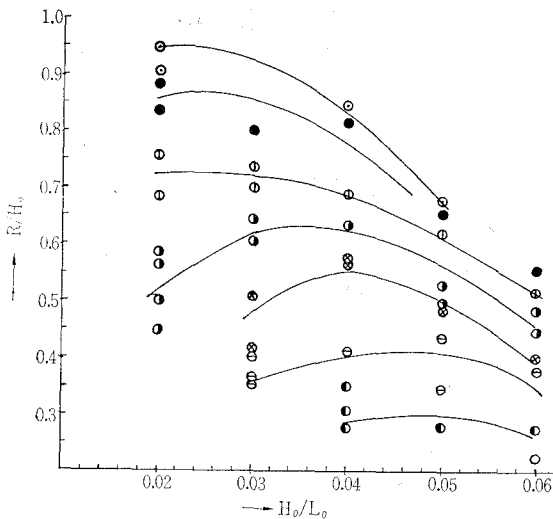
図-8 うちあげ高さと波形勾配との関係



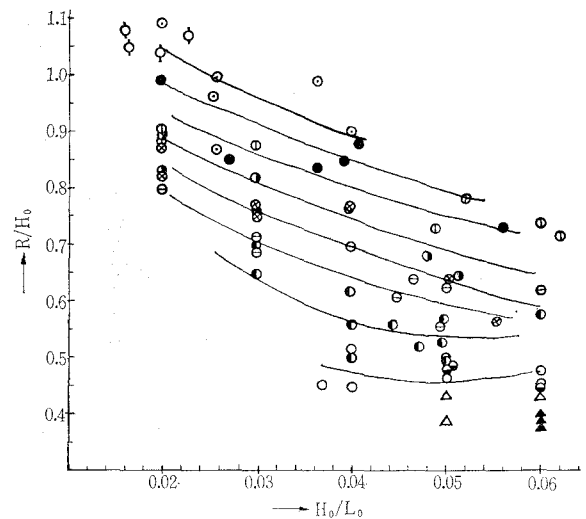
(b)



(c)



(d)



もつ堤防を造る場合には、小段は水平になるのを避けてできるだけ勾配をもたせるようにすれば、同一幅の小段に対してうちあげ高さは小さくなるし、あるいは同じうちあげ高さに対して小段幅を短くすることができる。

つぎに上記の実験について、横軸に H_0/L_0 を縦軸に R/H_0 をとり、 d/L_0 をパラメーターとして各勾配別に図示すると 図-8 (a)~(d) のようになる。一部の実験値を除いて R/H_0 は H_0/L_0 が大きくなるにつれて減少する。

4. 結 論

(1) 海岸に波がうちあげられる場合に、陸側勾配が $1/10$ より小さければ反射の影響はほとんど認められな

いが、勾配が $1/5$ の場合にはその影響が認められとくに $2/5$ では強い戻り段波が生じて進行段波と重複しそのためにうちあげ高さが非常に大きくなる。また式 (2) 中の A の値は陸側勾配が大きいのほど小さくなるが、汀線における流速の算定方法に問題があるので将来この点を検討し、また粗度を変えて実験を行なうつもりである。

(2) 陸側に堤防を置いた場合には、堤防の位置が汀線から遠ざかるにつれてうちあげ高さが減少する。また陸側勾配が小さいほどうちあげ高が大きいが、これは堤防からの反射段波が進行段波と重複して大きな重複段波が生ずることによる。

(3) 陸側が水平の時には、堤防が汀線から離れるにしたがって勾配がある場合に比べてうちあげ高さがか

なり大きくなるが、これも戻り段波の影響によるものである。したがって堤防に小段を設ける場合には小段を水平にせず、少しでも勾配をつける方がよい。

最後に本研究の実験の実施について当研究室の森直樹君の協力を得たことを記し謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 細井正延・三井 宏：碎波点より陸側にある 堤防への波のうちあげ，第9回海岸工学講演会講演集，昭和37年10月。
- 2) Ira A. Hunt：“Design of Sea-Walls and Break-

waters”，Trans. ASCE, Vol. 126, Part IV, 1961.

- 3) Th. Saville：“Wave Run-up on Composite Slopes”，Proc. of 6th Conf. on Coastal Engineering, 1958.
- 4) J.C. Freeman and B.L. Méhauté：“Wave Breakers on a Beach and Surges on a Dry Bed”，Proc. ASCE, Vol. 90, No. HY 2, 1964.
- 5) H.B. Keller, D.A. Levine and G.B. Whitham：“Motion of a Bore over a Sloping Beach”，Journ. of Fluid Mechanics, Vol. 7, 1960.
- 6) J.B. Herbich, R.M. Sorensen and J.H. Willenbrock：“Effect of Berm on Wave Run-up on Composite Beaches”，Proc. ASCE, Vol. 89, No. WW 2, 1963.