

砕波点より陸側にある海岸堤防への波のうちあげ

細 井 正 延*・三 井 宏**

1. ま え が き

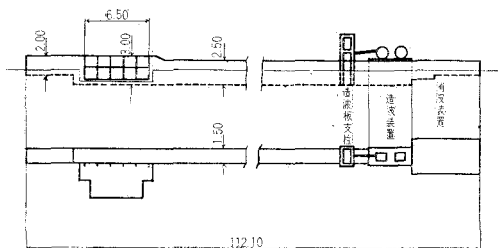
南九州、南四国、紀伊半島先端部、静岡県などの南東方向に太平洋に面した海岸では、大きなエネルギーをもつ波が来襲しやすい。このような海岸に高波の侵入防止を目的とする海岸堤防を建設する場合には、水深の大きな地点では波のエネルギーが大きいため、堤防の構造的見地から、波のエネルギーが減少している砕波点より陸側に堤防を位置させることが多いようである。堤防のり先の相対水深、波形勾配、相対打ち上げ高、堤防形状、海岸地形などの間の関係については、わが国および諸外国ですでに数多くの研究がなされており、水理公式集などにもこれらの一部が取り上げられている。堤防への波の打ち上げの問題は理論的な取り扱いが困難なため、模型実験により解明することが多いのであるが、堤防位置が砕波点をすぎて陸側に行くにしたがって波のエネルギーは減少し、打ち上げの現象も小さくなって、小さな模型ではその様相をつかむことが困難になってくる。そこで、いままでの研究成果の再検討と実験精度を上げる意図をもって、筆者たちは大型の2次元造波水路を使い、砕波点より陸側に置かれた堤防への波の打ち上げ高に主眼を置いて模型実験を行なった。

2. 実 験

(1) 実験装置

使用した水路は図-1に示すような土木研究所赤羽分室にある幅1.5m、長さ112.1mのコンクリート製半地下式の造波水路である。造波装置は50HP電動機駆動による上端懸架のピストン型である。水路のはほぼ中央と水路端の模型部にそれぞれ沖波測定用および砕波測定用の波高計を設置してある。この波高計は実験の初期には測定範囲70cm、接点間隔5mmの段変ネオン管点滅型の

図-1 実験水路(単位 m)

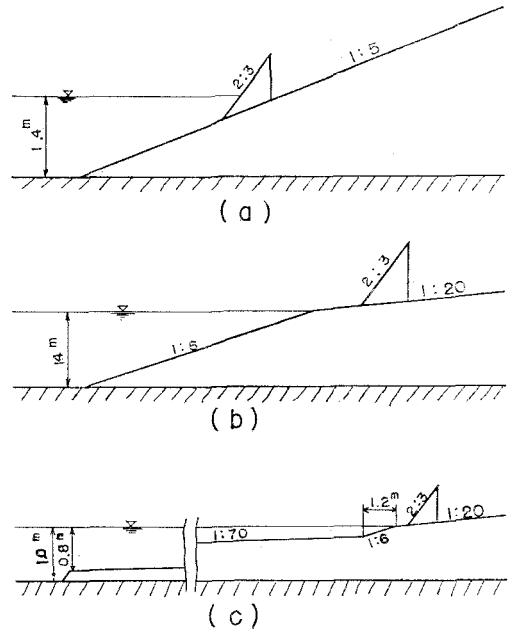


波高計を用い、実験後期には測定範囲50cm、接点間隔5mmの段変抵抗型波高計をペン書きオシログラフに結んだものを用いた。なお、砕波観測用として、さらに8ミリ撮影機を併用した。

(2) 模 型

模型堤防の斜面勾配はすべて1:1.5とし、模型海岸は図-2に示す3種類を使った。模型はすべて杉板製滑面であって、原型の地名は、図-2(a)が三重県熊野市付近の海岸、図-2(b)が静岡県田子浦海岸、図-2(c)が静岡県大井川、天龍川河口付近の海岸である。いずれも、つぎに述べる波の大きさと関連して、縮尺はだいたい1/30である。

図-2 海岸の模型



(3) 波

実験に使った波の諸元は、微小振幅波による深海波に換算して、熊野海岸では波高 H_0 は9.8から65.4cm、波形勾配 H_0/L_0 は0.005から0.10で、田子浦海岸では表-1に示す16種類である。大井川、天龍海岸では表-2に示す20種類中No.9の波を除いて、No.1からNo.12の波を使った。No.9およびNo.13からNo.20までの波については、実験計画の都合によりまだ実験中ではあるが、まもなく終る予定である。

(4) 実験方法

測定事項を大別すると2つある。1つは堤防を置かな

* 正員 工博 建設省土木研究所 海岸研究室長

** 正員 工修 建設省土木研究所 海岸研究室

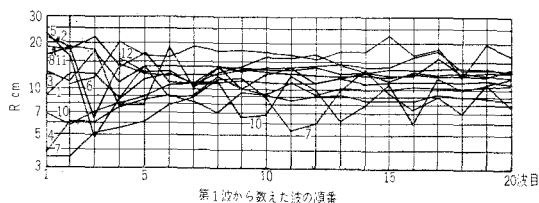
表-1 田子浦海岸の波の諸元

No.	H_0/L_0	H_0 (cm)	L_0 (cm)
1	0.006	11.3	1895
2	0.01	5.9	560
3	"	8.0	728
4	"	15.4	1293
5	"	20.7	2022
6	0.02	16.4	825
7	"	24.3	1280
8	"	30.0	1654
9	"	32.0	1960
10	0.03	11.5	440
11	"	14.5	505
12	"	24.5	807
13	0.04	33.2	825
14	"	36.7	850
15	0.05	22.0	450
16	0.06	28.7	462

表-2 大井, 天龍海岸の波の諸元

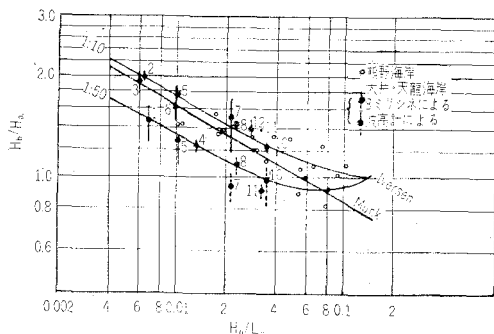
No.	H_0/L_0	H_0 (cm)	L_0 (cm)
1	0.005	6.9	1223
2	"	11.8	2136
3	"	18.9	3301
4	0.01	7.4	755
5	"	16.7	1803
6	"	29.9	3301
7	0.02	12.4	624
8	"	24.5	1312
9	"	41.1	2253
10	0.03	18.5	624
11	"	30.1	1055
12	"	44.4	1597
13	0.04	24.8	624
14	"	34.7	899
15	"	45.7	1223
16	0.05	30.9	624
17	"	38.4	790
18	"	46.5	975
19	0.06	37.0	624
20	"	47.6	825

図-3 打ち上げ高の連続目読値



場合の打ち上げ高についても、1 番目からだいたい 25 番目までの打ち上げ高を連続目読し、無堤の場合と同様に 10 番目以後の打ち上げ高はほぼ定常状態に達していることが認められたので、この 10 番目以後の打ち上げ高の平均と最大最小値を求めた。

図-4 砕波高



い場合の海岸への打ち上げ高、砕波高、砕波水深の測定で、他の 1 つは堤防を置いた場合の堤防への打ち上げ高である。

熊野海岸についての実験では、沖波高および砕波高をネオン管点減式波高計により目読した。堤防設置位置はのり先水深 d にして、 $-20, -10, 0, 10, 20, 40, 50, 60$ cm の 8 種類であった。ただし、負は静水面より上方、正は静水面より下方に測った値につける。それぞれの堤防位置および波に対して、最初から 15 番目の波以後の打ち上げ高を目読した。

田子浦海岸についての実験では、沖波高および砕波高は段変抵抗式波高計によりペン書き オッシロ グラフに記録させ、さらに砕波高を 8 ミリ撮影機で記録した。堤防のり先水深 d は $0, -5, -10, -15, -20, -25$ cm の 6 種類で、それぞれの波に対して最初から 15 番目以後の打ち上げ高の平均を目読した。

大井, 天龍海岸についての実験では、沖波高と砕波高の測定記録は田子浦海岸と同様であるが、記録の読み取りに際し、砕波高は平均値を算出したほか、最大と最小の値も読み取った。堤防位置 X_b (砕波点から海方向に測ったのり先までの距離) は砕波長 L_b の $-4.5, -4.0, -3.5, -3.0, -2.5, -2.0, -1.5, -1.0, -0.75, -0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5$ 倍の地点である。上記 2 海岸の実験では、ある一つの地点の堤防位置を固定し、波を変えて平均打ち上げ高を目読したのであるが、この海岸の実験では波の方を固定して、ある一つの波に対し堤防位置をいろいろ変えて打ち上げ高を測定した。堤防を置かない場合の 1 番目から 20 番目までの打ち上げ高の連続目読値を示すと 図-3 のようになり、No. 7 と No. 10 の波を除いては、10 番目以後の打ち上げ高はだいたい定常状態に達していると思われる。堤防を置いた

3. 実験結果

(1) 砕波

図-4 は熊野海岸および大井, 天龍海岸における砕波高 H_b と深海波高 H_0/L_0 との関係を示す実験結果である。田子浦海岸については、8 ミリの撮影機で実験後に再現したら砕波点の判定を誤っていたことがわかったので、この図には示さなかった。なお、水平部の水深 d_0 と深海波高 H_0 との比 d_0/H_0 の値は、熊野海岸で $2.3 \sim 14.3$ 、田子浦海岸で $2.5 \sim 28.0$ 、大井, 天龍海岸で $2.3 \sim 11.7$ であった。図-4 にはまた、Munk¹⁾ および Iversen²⁾ の提案した値も示してある。この図によると、段変抵抗式波高計と 8 ミリ撮影機とで測定した大井, 天龍海岸の砕波高は、8 ミリによる値が波高計による値のだいたい 1.3 倍大きくなっていることがわかる。このような水の抵抗変化を測定する形式の波高計には問題点があるようである。ネオン管点減式の波高計を使った熊野海岸の砕波高はそうとうばらついており、波高を再検討しようとしたが波高記録ができない形式なので、これも不都合な点があるようである。大井, 天龍海岸の沖波も段変抵抗式波高計で測定したので、砕波と同様に小さな値が出ているとすれば、図-4 の点はもっと左下方にくるものと思われる。今後の実験では、沖波も 8 ミリで同時記録する予定である。以上のことを考慮に入れると、 H_b/H_0 と H_0/L_0 との関係は Iversen が示した傾向

に合致するようである。

つぎに、図-5 は同じ実験における砕波水深 d_b と波形勾配 H_0/L_0 との関係を示したものである。この図によると、砕波水深と波形勾配との関係は Iversen の示したものと傾向は同じようであるが、前述のように H_0 が小さめに出ているかもしれないことを考慮に入れても（砕波で 1/1.3 倍であったから、この値よりも大きいだろう）、実験結果の絶対値は Iversen の示した値より大きくなるようである。

図-4、図-5 を通じて大井、天龍海岸における No. 1

と No. 4 の波による

値はほかの波による

値とくらべて特にか

けはなれている。こ

の2つの波がほかの

波と異なっていた点

は、ほかの波がだい

たい1/70 勾配部で砕

波していたのに、こ

の波は 1/6 勾配部で

砕波したことであ

る。なお、1/70 勾配部で砕波し、さらに 1/6 勾配付

近で2次砕波をする波もあった。

(2) 打ち上げ高

図-6、図-7、図-8 は縦軸に打ち上げ高 R と深海波高 H_0 との比 R/H_0 をとり、横軸に堤防のり先水深 d と深海波長 L_0 との比 d/L_0 をとり、波形勾配 H_0/L_0 ごとに実験結果を整理したもので、これまでもよく行なわれている図示法である。これらの図中の点で×印のついたものは、堤防を置かない場合の打ち上げ高である。図-7 の左方の点で、堤防を置かない場合の点の値より大きいものがあり、散乱が大きいのは打ち上げ高の判定に実験者の個人誤差が入ったためと思われ、あとで試験してみた結果、堤防が汀線をはなれて陸側に置かれるほど、打ち上げ高の最大値を読み取る傾向が実験者にあることがわかったので、実験曲線は堤防を置かない場合の実験値に合うように書き入れた。これらの図に示す打ち上げ高は、いままでに発表された実験結果と同様に砕波点付近で最大値となるようである。図-6、7 に使った海岸をくらべてみると、汀線より海側の海岸地形はほぼ同じであるが、汀線より陸側の海岸地形

図-5 砕波水深

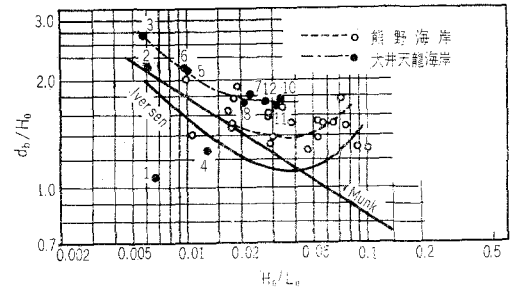


図-6 熊野海岸での打ち上げ高

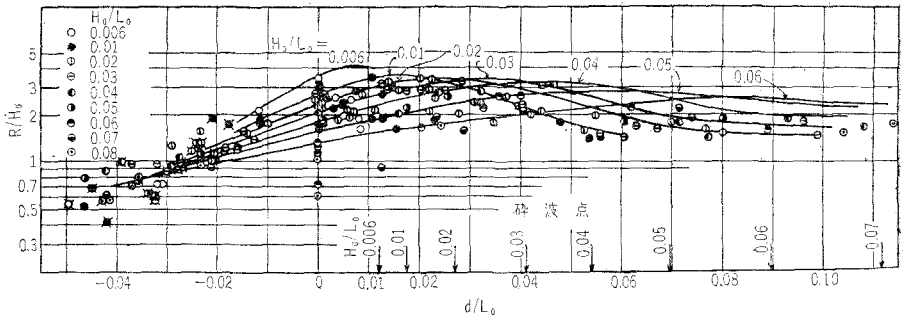


図-7 田子浦海岸での打ち上げ高

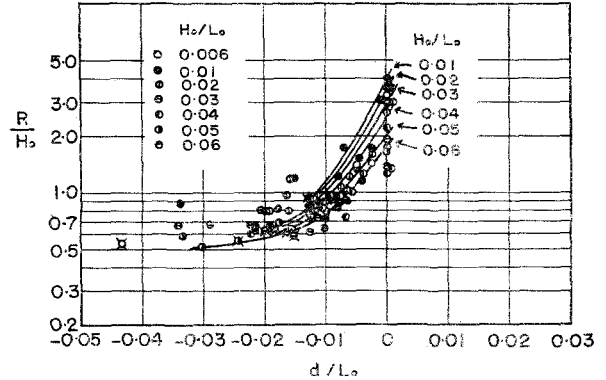
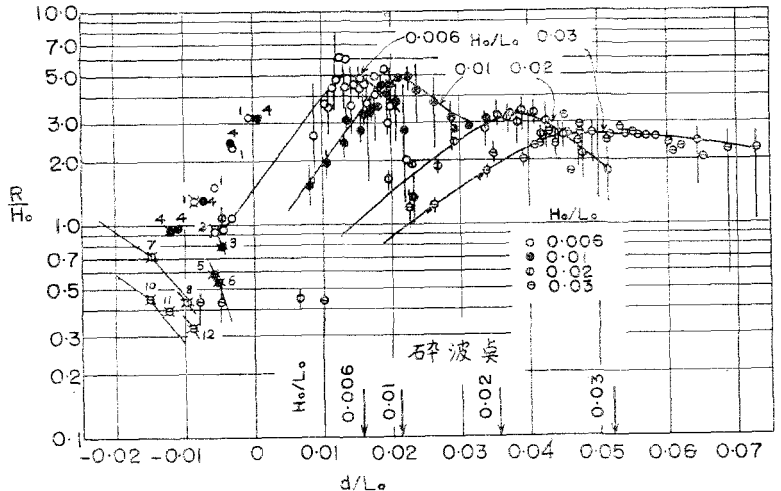


図-8 大井、天龍海岸での打ち上げ高



は図-7の方が緩勾配となっている。したがって、両図において汀線より陸側の打ち上げ高をくらべてみる。汀線より陸側の海岸勾配が急である図-6の方が図-7よりも同一の d/L_0 に対して少し大きい打ち上げ高を与えるようである。すなわち、汀線より陸側の海岸勾配がゆるいほど、のり先水深 d の減少にともない急激に打ち上げ高は減少するようである。

図-8に使った海岸は、汀線より陸側の海岸勾配は図-7と同じであるが、汀線より海側の勾配はずっとゆるくなっている。図-8の実験では表-2に示したように同一波形勾配であるが、大きさの異なる3つの波をそれぞれ用いたのであるが、砕波点より海側における相対打ち上げ高 R/H_0 の値はこの図のような図示法で整理すると、波の大きさに関係なくよく一致するようである。ところが、砕波点より陸側の打ち上げ高は、たとえば No. 1 および No. 4 の波のようにかなりかけはなれた値を示すものが出てくる。No. 1 と No. 4 の波は砕波の項で述べたように砕波水深や砕波高がほかの波とかかけはなれた値を示しているから、このような砕波点より陸側における打ち上げ高にはこれらの砕波特性の相違が主因となっているものと思われる。また、図-8の左方に示してある無堤の場合の打ち上げ高は、いずれの波形勾配においても、波高の小さい順番に上から並んでいるが、このような無堤の場合の打ち上げ高には砕波特性が特に影響するのではないと思われる。

図-9 複合斜面と仮想勾配
(d の符号は静水面より上方に負、下方に正をとる)

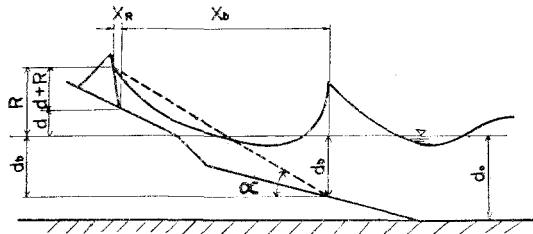
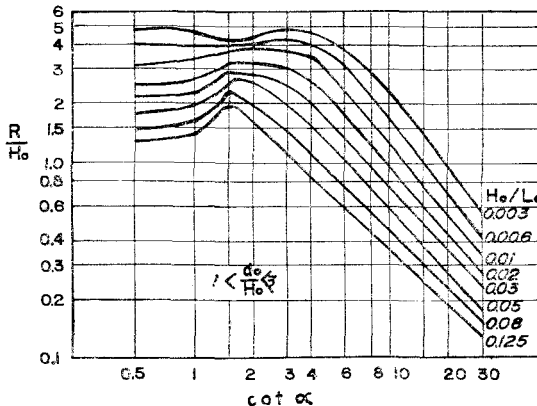


図-10 一様勾配斜面への打ち上げ高



Saville⁹⁾ は一様勾配斜面への打ち上げの実験曲線を用いて、複合勾配斜面への打ち上げ高を推定する方法を提案している。これは、図-9に示すような仮想一様勾配 $1 : \cot \alpha$ の斜面への打ち上げ高と実際に一様な $1 : \cot \alpha$ の勾配をもつ斜面への打ち上げ高とは等しくなるという想定にもとづくもので、まず H_0/L_0 を与えて図-5に併記した Munk の曲線により d_b を求め、つぎに R を仮定して仮想勾配 $\cot \alpha$ を計算し、この $\cot \alpha$ に対応する R の値を図-10に示す一様勾配斜面に対する実験曲線から読みとり、最初に仮定した R と一致するまで逐次計算を行なう方法である。

上述の方法を変形して、 $\cot \alpha$ と R との関係を求めてみる。

$$\cot \alpha = \frac{X_b + X_R}{d_b + R} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 X_b : 砕波点から堤防のり先までの水平距離

X_R : 堤防のり先から打ち上げの最高点までの水平距離

式(1)を図-9に示す幾何学的関係を用い、図-2に示す熊野海岸、田子浦海岸、大井、天龍海岸に適用すれば、それぞれ以下ようになる。

熊野海岸

$$\cot \alpha = \frac{5.0 d_b + 1.5 R}{d_b + R} \dots\dots\dots (2)$$

田子浦海岸

$$\cot \alpha = \frac{6.0 d_b - 20.0 d + 1.5 (R + d)}{d_b + R} \\ = \frac{6.0 d_b + 1.5 R - 18.5 d}{d_b + R} \dots\dots\dots (3)$$

大井、天龍海岸

$$\cot \alpha = \frac{X_b + 1.5 (d + R)}{d_b + R} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $d_b \geq 0.20 \text{ m}$ のとき、

$$d \geq 0.20 \text{ m} \text{ なら } X_b = 70.0 (d_b - d) \dots\dots\dots (5)$$

$$0 \leq d \leq 0.20 \text{ m} \text{ なら } X_b = 70.0 (d_b - 0.20) \\ + 6.0 (0.20 - d) \dots\dots\dots (6)$$

$0 \leq d_b \leq 0.20 \text{ m}$ のとき

$$0 \leq d \leq d_b \text{ なら } X_b = 6.0 (d_b - d) \dots\dots\dots (7)$$

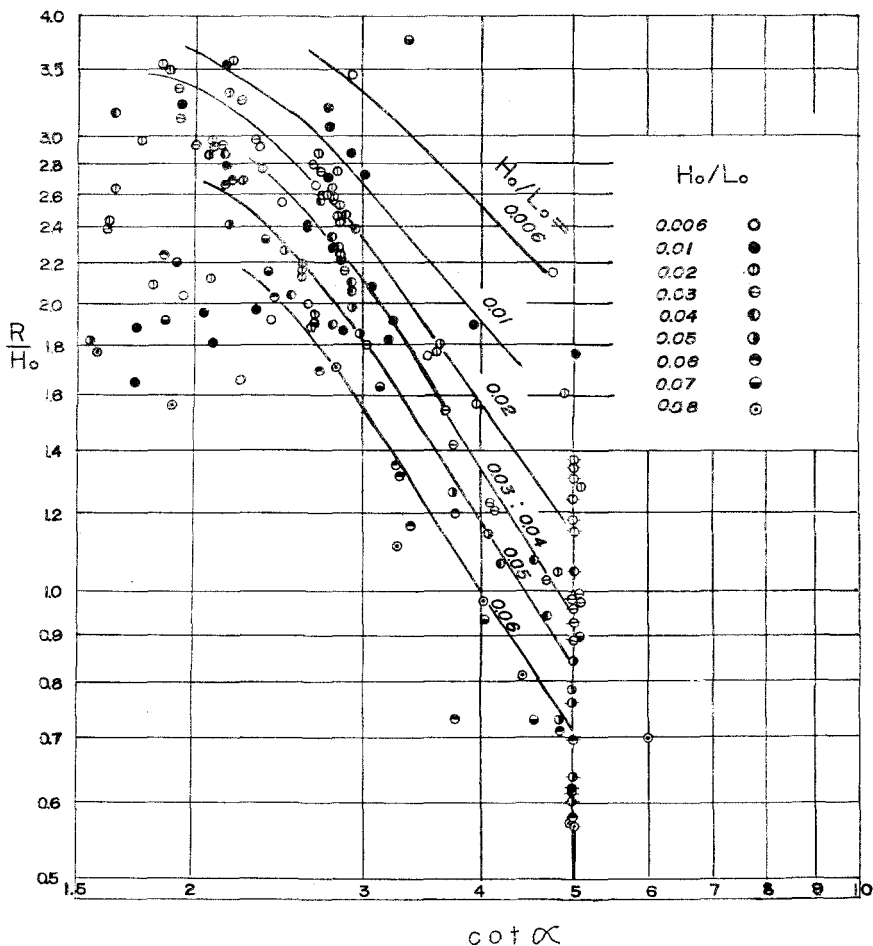
$$d \leq 0 \text{ なら } X_b = 6.0 d_b - 20.0 d \dots\dots\dots (8)$$

これらの式の基本形は式(4)であって、図-5から砕波水深を求めるとき便利のように、また、式(5)から式(7)を無次元にすると混乱をきたさないという意味からも、式(4)をつぎの形に書きかえておけば使用上便利であろう。

$$\cot \alpha = \frac{X_b/H_0 + 1.5 (d/H_0 + R/H_0)}{d_b/H_0 + R/H_0} \dots\dots\dots (9)$$

上式を使って横軸に $\cot \alpha$ 、縦軸に R/H_0 をとり、 H_0/L_0 をパラメーターとして実験結果を整理すると、それぞれ、図-11~13のようになった。もし、Savilleの想定が正しければ、これら3つの図は一致するはずである。図

図-11 熊 野 海 岸



—11 と 図-12 はわりあい一致するようだが、図-13 はこの2つとはだいぶ異なっている。したがって、汀線より海側の海底地形が同じ場合は、汀線より陸側の海岸地形が若干変化しても、Saville の方法によれば、ほぼ同じような $\cot \alpha$ と R/H_0 との関係が得られるが、汀線より陸側の海岸地形が同一であっても、汀線より海側の海底地形が変われば $\cot \alpha$ と R/H_0 との関係は異なる値を示すことがわかる。換言すれば、 $1 < d_0/H_0 < 3$ の範囲において、Saville の想定は、砕波点より陸側の仮想勾配への打ち上げ高は H_0/L_0 のみに支配されるとしたのであるが、筆者たちの実験結果からは、砕波点近傍をふくむ海側の海底勾配も H_0/L_0 の同様、支配的であると思われるのである。ただし、 d_0/H_0 の値は Saville のそれより大きい範囲であったから、もし d_0/H_0 の値がもっと小さくなれば海底勾配の影響はそれほどきいてこないのかもしれない。

図-13 の右下方部にある無堤の場合の打ち上げ高は、図-8 の図示法によるものより少し改善されたが、やはり小さな波に対するものほど R/H_0 の値が大きいのは気

になることである。No. 1 と No. 4 の波のように 1/6 勾配部で砕波するものを除外して考えると、Saville の方法を使ったのであるから、一応、砕波点より陸側の海岸形状と波の大きさの影響は取り除かれているはずである。それにもかかわらず、無堤の場合の打ち上げ高に、まだ波の大きさが影響している原因の一つは、2次砕波を生ずるものと生じないものがあることであろう。2次砕波を生ずるものについては、2次砕波水深および2次砕波高を生ずるような相当深海水高で整理すれば良好な結果が得られるかもしれない。しかし、2次砕波の問題は複合断面の海岸上での砕波特性とともに未解決であるので、今後の研究にまっほかはない。

4. む す び

堤防のり勾配を 1:1.5 とし、汀線より海側の海岸勾配を変えた場合、および汀線より陸側の海岸勾配を変えた場合の3つの実験結果を比較した結果をまとめると、つぎのようになる。

(1) 砕波高、砕波水深とも Iversen の行なった実験

図-12 田子浦海岸

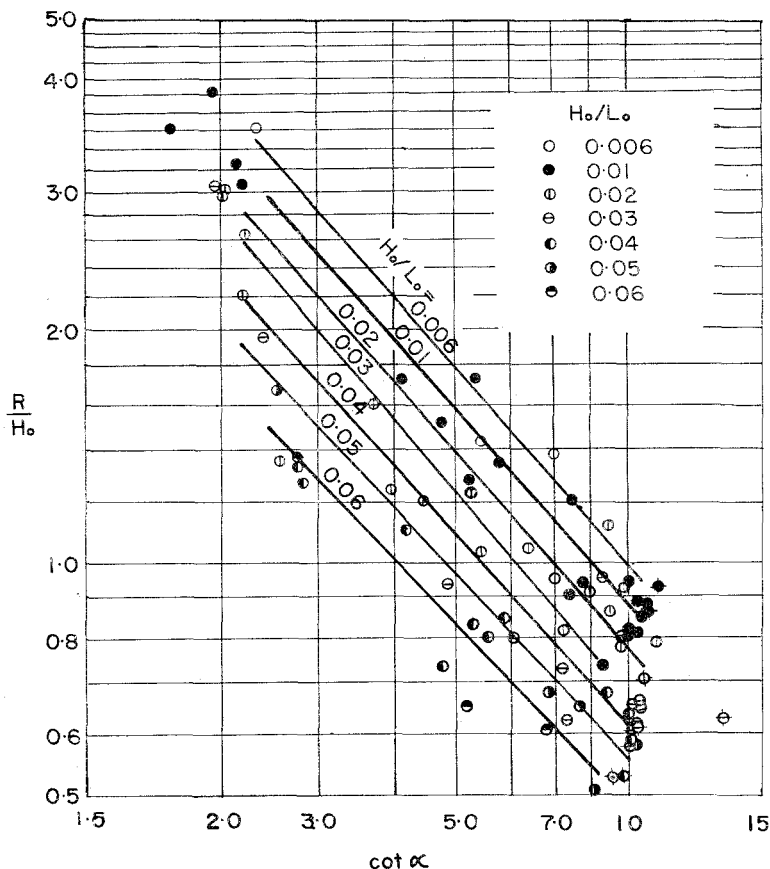
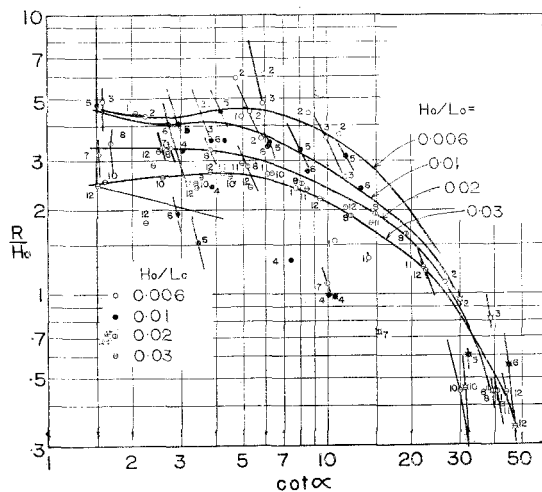


図-13 大井, 天龍海岸



結果の傾向と合うが、碎波水深の絶対値には若干の相違が認められる。

(2) Savilleの提案した方法では、 R/H_0 は H_0/L_0 と $\cot \alpha$ との関数になるのであるが、筆者たちの実験結果では、 R/H_0 は H_0/L_0 と $\cot \alpha$ のほか、さらに水中部の海底勾配がつけ加わった関数となる。ただし、 d_0/H_0 の値は2.0~12ぐらいである。

最後に、この実験に終始協力していただいた井沢忠治、堀内靖章、開沼貞夫の3技官に厚く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Munk, W.H.: 海岸工学 I, 第3章, 土木学会海岸工学委員会訳, 丸善, (昭.30.9.1).
- 2) Iversen, H.W.: 海岸工学 II, 第1部第1章, 土木学会海岸工学委員会訳, 丸善, (昭.30.11.25).
- 3) Saville, T.Jr.: Wave Run-up on Composite Slopes, Coastal Engineering, (1958.)