

海岸堤防への波のうちあげ高

—海底勾配 1/30—

豊島 修*・首藤伸夫*・橋本 宏*

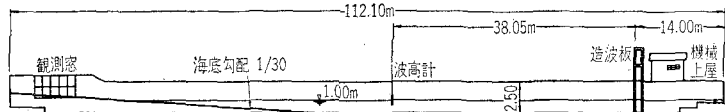
1. はじめに

海岸堤防の波のうちあげ高は、入射波の特性などによって変動するものであり、この入射波の沖波特性 H_0 , L_0 や、堤防位置をあらわす h , 海底勾配, 堤防勾配などの因子によって表示されているのが普通である。今回 1/30 の海底勾配上に各種の堤防をおいてうちあげ高を測定したが、堤防上へのうちあげ高と、堤防前面での波形態、波にもとづく平均水面変動量などの水理諸現象との間にどのような関連がみられるかに注意した。また定量的に十分といえる関係を導びくには至っていないが、 R/H_0 の変動が、どのような水理現象と結びついているかを考えた結果を報告する。

2. 実験方法

実験は土木研究所・赤羽分室内の大型水路の一端に 1/30 の海底を設けて行なった。水路は図-1 に示すよう

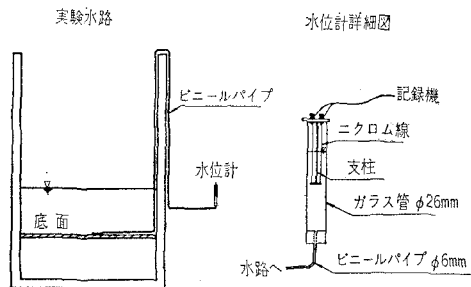
図-1 大型水路側面図



に延長 112m, 幅 1.5m, 高さ 2.5m のコンクリート製で一部ガラス張りである。造波機は 2 つのヒンジをもつフラッター型であり、V.S. モーターによって運転される。

測定は海底勾配 1/30 上での砕波後の波の変形のうちあげ高、およびこの海底に 5 分、1 割、2 割、3 割の

図-2



り勾配をもつ堤防を設置した場合のうちあげ高について行なった。水路の水深一定部における波高、周期は電気抵抗式波高計で測定しペンオッシュロに自記させた。

1/30 海底勾配上での砕波点および砕波後の波高、波速の変化は水路側壁に 50 cm 間隔で目盛を取り付けこれをシネカメラ 2 台で撮影し、それより測定した。波速は 50 cm の間隔を進むコマ数によりこの間の平均波速を求めた。砕波水深は砕波点を目測しこれより求めた。平均水面の変化は図-2 のような装置で測定しペンオッシュロに自記させた。

実験条件は周期 1.4~3.3 sec, 深海波高 2~50 cm, 波形勾配 0.002~0.08 であり水路水深はほぼ 1.0 m で行なっている。

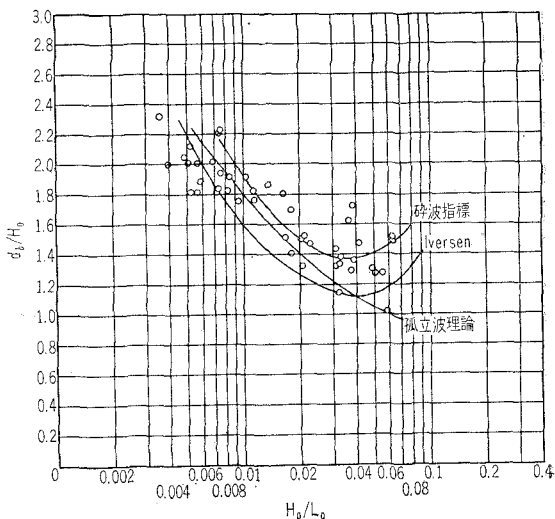
3. 砕波後の変形

堤防にうちあげる波については現在まで種々の研究および実験^{1), 2), 3)}が行なわれてきており、その現象を大きく分けるものとしては堤防前面の波の

状態、とくに砕波の状態を知ることが必要である。そのためにまずここでは海底勾配 1/30 上での砕波条件と砕波後の波の変形について調べてみた。

砕波水深 d_b と深海波高 H_0 , 深海

図-3 砕波水深



* 正会員 建設省土木研究所

図-4

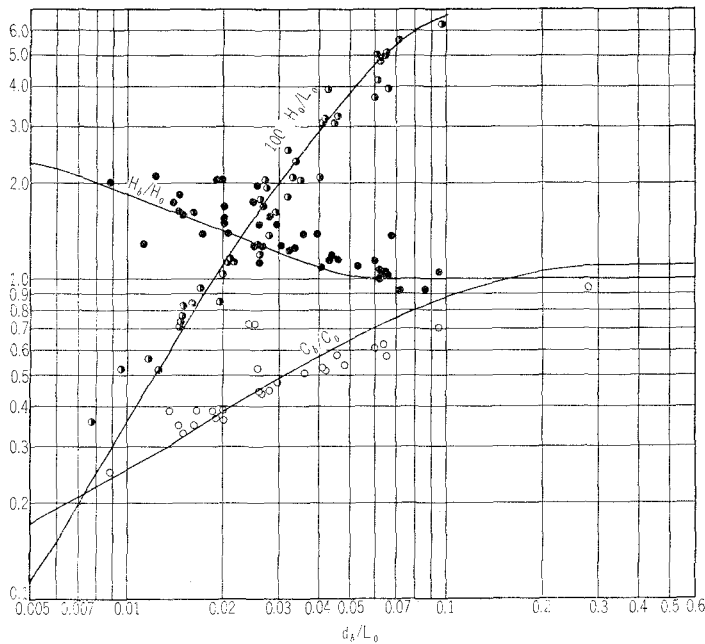
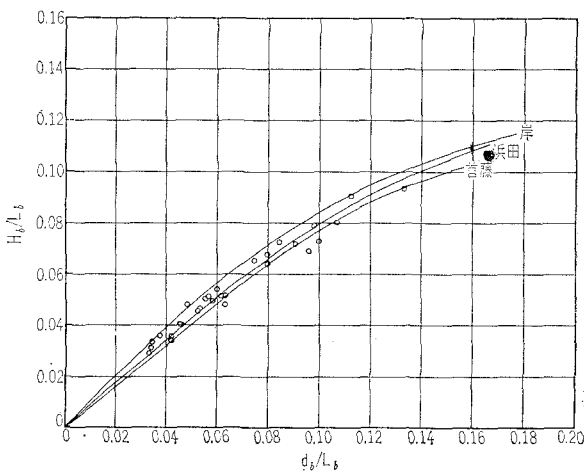


図-5



波長 L_0 の関係を図-3に示す。この図には Iversen⁴⁾、砕波指標⁵⁾および孤立波理論⁶⁾による値も示してある。これによると砕波指標が実験値の平均値を示しており、孤立波理論は波形勾配の小さい値では合っているが大きくなると異なっている。Iversen の値は d_b/H_0 の値が小さく Scale effect によるものと考えられる。Iversen の実験は波高 0.1~0.4 ft (3~12 cm), 周期 0.8~2.5 sec であり、この実験では波高 3~45 cm, 周期 2.0~3.8 sec である。砕波波高 H_b 、波速 C_b と深海波の関係を図-4に示す。図には砕波指標を合せて示してある。これによると砕波波速は d_b/L_0 が小さい場合には砕波指標で表わされるが、大きくなるにしたがって微小振幅波理論の波速に近づいていく。砕波波高は砕波指標より大きい値

を示している。

有限振幅波理論^{7), 8), 9)}による砕波限界と比較を行なうと図-5 のようになる。各式とも大きな違いはないが浜田の式とはほぼ一致している。

砕波後の波高および波速の変化について調べてみると波の峰と谷は図-6 波速は 図-7 のように表わされる。8 mm シネ 2 台では砕波後の変化をすべて撮影することはむずかしいため波高の小さいときは汀線の近くを、大きくなるにしたがって砕波点付近を測定している。そのため測定値は一つの波ではなくそれぞれの実験値をまとめて示した。砕波後の波の峰は砕波点で最高となりこれが落下して砕ける。このため砕波点近くでは波の峰は大きく変動している。汀線に近づくにしたがって減少し、また変動は小さくなる。図によると波峰は水深に比例して減少しており水深のほぼ 1.6 倍である。

谷は峰ほど変動せず水深の 0.8 倍程度である。砕波後の波高は孤立波理論による値 $H_b=0.78d$ にかなりよく一致している。

砕波後の波速は図-7 に示されるように孤立波理論で与えられる $C=\sqrt{1.6gd}=\sqrt{gY_b}$ (Y_b : 峰高) で表されると考えてよい。砕波点における波速は $\sqrt{gY_b}$ と異なっているが砕波後は平均的には一致している。なお静水時の汀線では平均水深は 0 とならず波速はある値をもっている。

砕波点近くの平均水面が静水面どのように異なるか、またこれが波のうちあげにどのように影響するかを調べるために平均水面を測定した。Longuet-Higgins と Stewart^{10), 11)} によると波が水深の変化しているところを進むとその平均水面は変化し砕波点では下降し、汀線では上昇することが認められ、また Saville¹²⁾ によって実験的にも確かめられている。一般にはこの平均水面の変化は小さく影響は少ないと思われるが汀線では考慮しなければならない。この実験では砕波点での降下量は Longuet-Higgins の理論値の 1.2 倍、砕波点から汀線までの水面勾配は 1/300 であった。

4. 波うちあげ高

1/30 勾配上での波のうちあげ高は図-8 のように表わされる。この図はうちあげ高 R と深海波の関係を示したもので、水路水深すなわち 1/30 勾配ののり先水深 h と波長 L_0 の比をパラメーターとして示したものである。これによるとのり先水深の影響があり $h/L_0 > 0.15$ とし

図-6 碎波後の波の変形

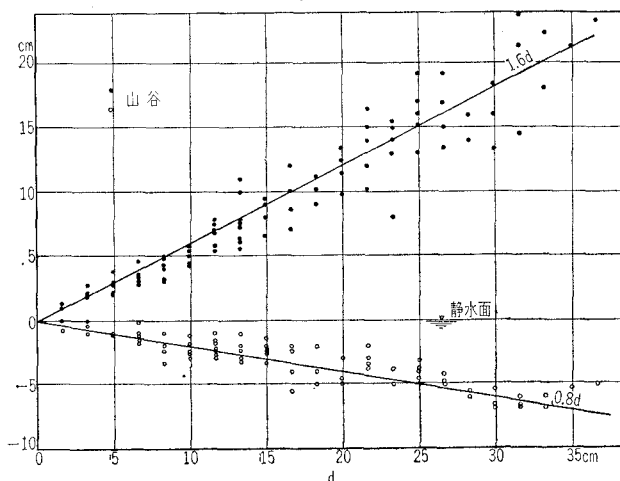


図-7 碎波後の波速

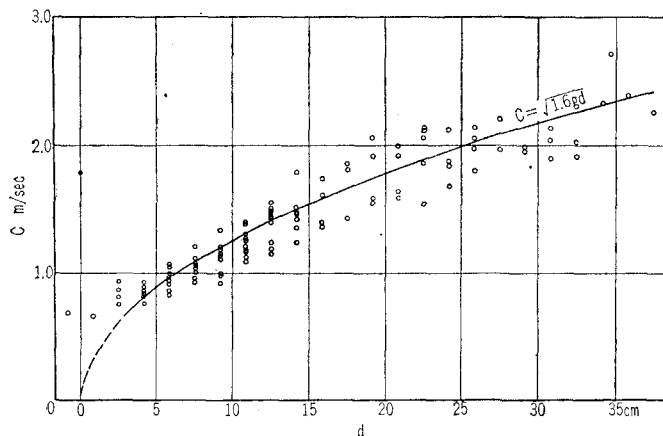
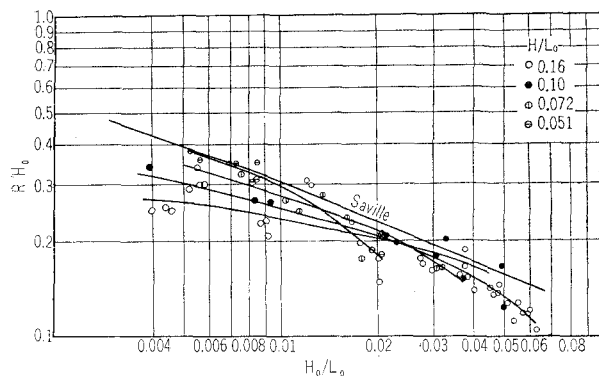
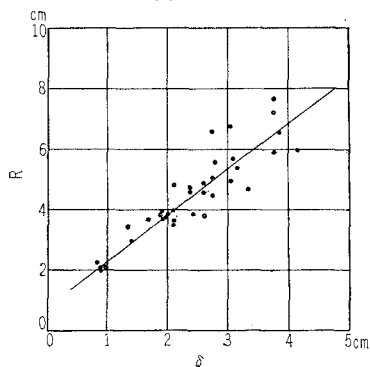


図-8



ればならないことを示している。この図には Saville¹³⁾ による実験値も示しており、この値は2割程度大きくなっている。この実験値は h/H_0 の比が3以上であるがこれを h/L_0 になおすと波形勾配の小さい場合にはそれに相当する h/L_0 の値も小さく、 h/L_0 の影響が大きく表われている。なお $h/L_0=0.05$ の場合には Saville の実験

図-9



値とあまり差がなくさきに述べたことによるものと思われる。1/30 勾配のようなゆるい斜面上での碎波後の波高はほぼその場所の水深によって決定されるが、汀線近くになると平均水面の上昇が影響する。うちあげ高は汀線における水位上昇量 δ と関係があり図-9 に示すように表わされる。このことは波のうちあげ高と汀線での波高がほぼ一定の関係にあることを示している。

1/30 の海底上に5分、1割、2割、3割の堤防を設置した場合の波のうちあげ高について実験を行なった結果を図-10~17 に示す。この図は h/L_0 をパラメーターとして R/H_0 と H_0/L_0 の関係を示したものである。これによるといずれのり勾配をもつ堤防でも波形勾配によって相対うちあげ高 R/H_0 が変化することを示している。

すなわち波形勾配の小さいときは R/H_0 も小さくある値で最大となり、波形勾配が増加するにしたがってまた R/H_0 も減少している。この状態は h/L_0 の値によって R/H_0 の値は異なっているがその傾向は同じである。 h/L_0 の値が小さい場合には R/H_0 は H_0/L_0 の増加とともに減少するが h/L_0 が大きくなるにしたがって H_0/L_0 のある値で R/H_0 の最大値が生ずる。さらに h/L_0 が大きくなると H_0/L_0 の影響は少なくなりほぼ一定値に近づく。

堤防のり勾配による違いは h/L_0 の小さい場合にはあまりないが大きくなるにしたがって表われている。 $h/L_0=0$ のときは R/H_0 は2割がもつ

とも大きく5分の場合が小さい。 $h/L_0=0.01$ では5分、1割、2割、3割の順に R/H_0 は小さくなっている。 $h/L_0=0.02$ の場合には1割が大きく他はほぼ同じである。 $h/L_0=0.03$ では5分、1割、2割はほぼ同じであるが3割は R/H_0 が最大となる。 H_0/L_0 の値が異なっている。 $h/L_0=0.05$ 以上になると R/H_0 の最大値は大き

く変化しないがその生ずる H_0/L_0 の値が異なっている。 $h/L_0=0.02$ より小さい場合には各のり勾配とも同じ曲線であったものが h/L_0 の大きくなると異なってくるのは波が堤防がゆるくなるにしたがってのり面上で砕波するためと考えられる。だいたいの傾向としては1~2割のり勾配のときに R/H_0 は大きくなると考えてもよいと思れる。

以上述べた値が波のどのような状態と関係があるかについて調べてみる。ある h/L_0 について考えてみると H_0/L_0 の小さい場合には堤防前面における波は重複波と

なり、 R/H_0 は一定値になっている。 H_0/L_0 が大きくなるにしたがって前面での波は重複波から重複波の砕波を生じ、さらに H_0/L_0 が大きくなるにしたがって進行波型の砕波に移っていく。これにしたがい R/H_0 も増加しある最大値をとって減少する。進行波型の砕波が生ずるとうちあげ高は H_0 の影響は受けずに堤防のり先水深で決定され则认为てもよい。これは砕波後の波高がほぼ水深によって決定されることから当然のことと思われる。さらに H_0/L_0 が大きくなると R/H_0 は一定値に近づくと考えられるが実験値が少ないため明らかでは

図-10 堤防のり勾配5分

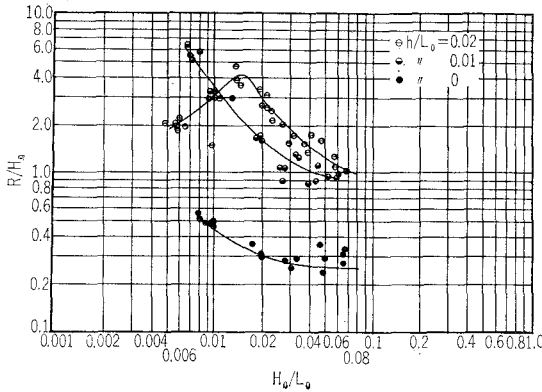


図-13 堤防のり勾配1割

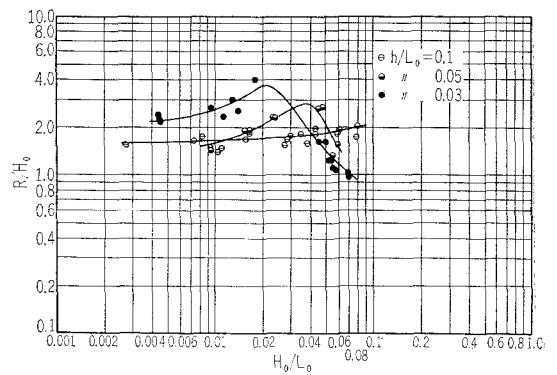


図-11 堤防のり勾配5分

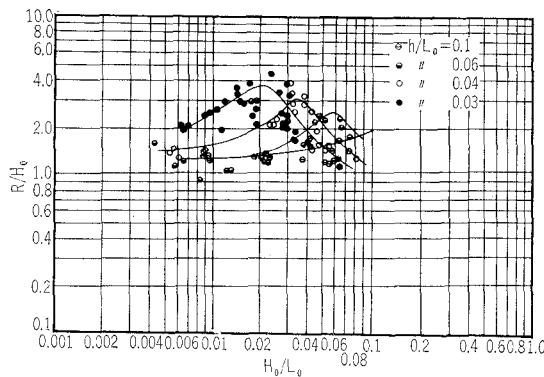


図-14 堤防のり勾配2割

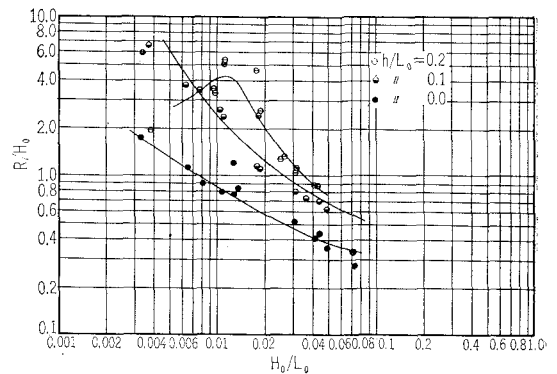


図-12 堤防のり勾配1割

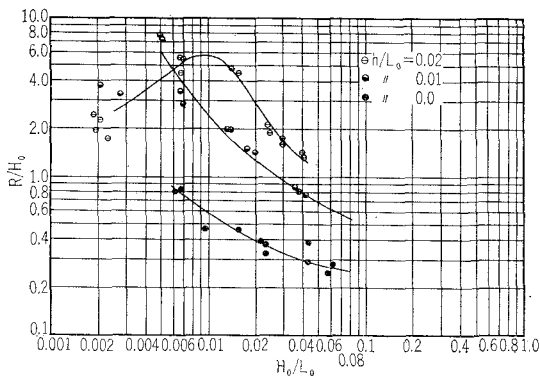


図-15 堤防のり勾配2割

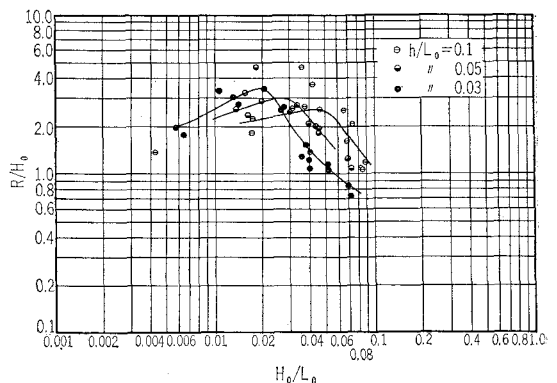


図-16 堤防のり勾配3割

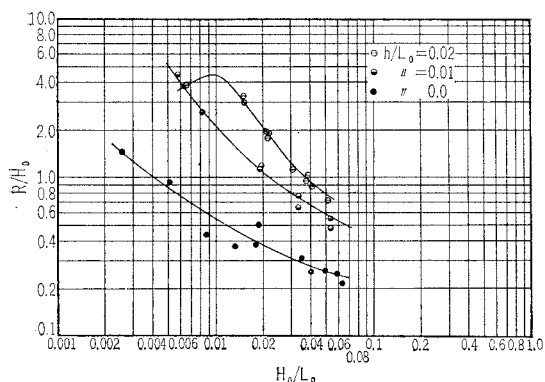


図-17 堤防のり勾配3割

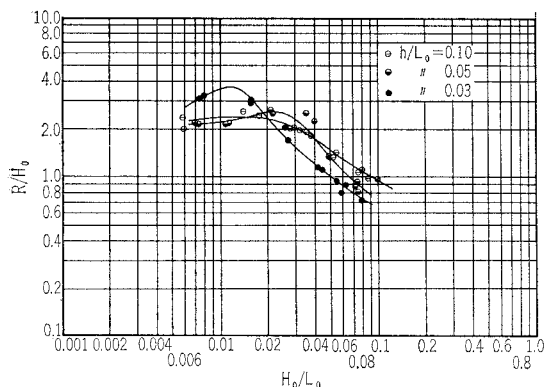
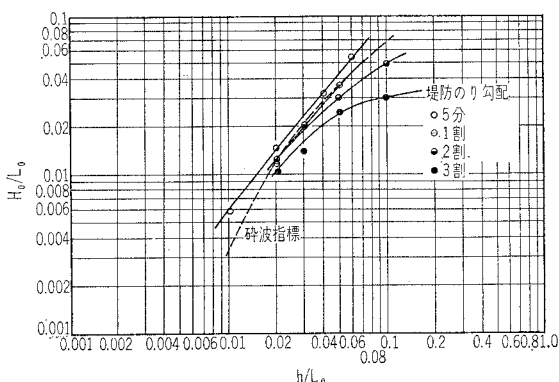
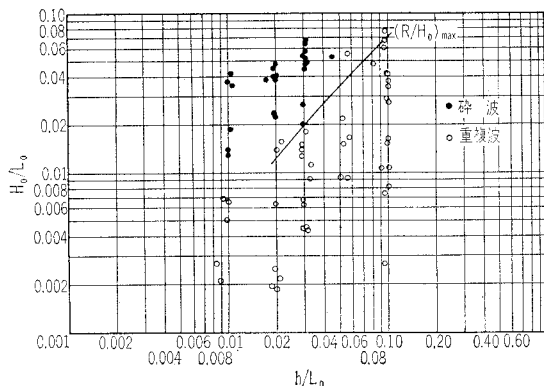
図-18 R/H_0 の最大を生ずる条件

図-19 堤防のり勾配1割



ない。しかし $h/L_0=0\sim0.01$ などでは H_0/L_0 が大きくなるにしたがって R/H_0 は一定値に近づいている。これは砕波後の平均水面の上昇が影響していると考えられるがさらに検討する必要があると思われる。

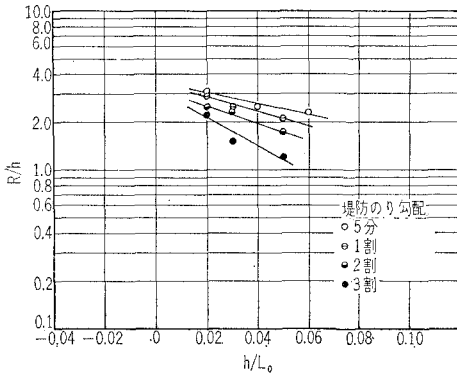
R/H_0 が最大となる条件は堤防前面での砕波と関係していると考えられるのでききに勾配 1/30 での砕波条件と R/H_0 に最大を生ずる H_0/L_0 と h/L_0 の関係を示すと図-18 のように表わされる。これによると R/H_0 の最大を生ずるのは堤防の近くで砕波する場合である。堤防を設置した場合でも堤防より沖で砕波する波については砕波の条件があまり変わらないと考えると R/H_0 に最大を生ずるのは堤防のり勾配が5分のよきにきつい場合には堤防前面で砕波するときである。堤防のり勾配がゆるくなるにしたがって H_0/L_0 の小さい場合には前面で砕波するときに R/H_0 は最大となるが H_0/L_0 が大きくなるとり面上で砕波する場合に R/H_0 は最大となる。これは堤防のり勾配がゆるい場合には H_0/L_0 が大きいほど砕波しやすいことと関係があると思われる。

この条件をさらにたしかめるために堤防前面での波の状態を観察し1割の堤防について砕波と重複波の状態を示すと図-19 のようになる。これによると R/H_0 の最大を生ずるのは堤防前面の波が砕波するか、または重複

波になるかの限界と対応している。

波が堤防前面で破波する場合には堤防が直立であれば bore として取り扱ってもよいといわれている²⁾。さきに 1/30 勾配上で得られた砕波後の波峰と谷の関係の図-6 を用いて反射する bore の高さを Stoker¹⁴⁾ の方法によって求めてみると水深 h と高さ R_b の比は $R_b/h=2.7$ となる。それぞれのり勾配をもった堤防について R/h の値は波が堤防の前面で砕波する場合にはほぼ一定値となることが図-10~17 によって示される。 H_0/L_0 が R/H_0 に最大を生ずるときの H_0/L_0 より大きい場合には R/H_0 は 45° の勾配をもっており、これより h/L_0 ごとに R/h の値を求めると図-20 のように表わされる。これによると R/h は 1~3 の間にあり堤防のり勾配によってそれぞれ異なっている。この値は堤防のり勾配が直立に近いほど大きく、ゆるくなるにしたがって小さくなっている。直立堤の場合に bore として計算した値は $R/h=2.7$ であり、これは 5 分堤防の場合とほぼ等しいが小さい値となっている。堤防のり勾配がゆるくなるにしたがって h/L_0 の影響が大きく表われ、3 割がもっともいちじらしい。砕波後の波のうちあげ高を bore と考えて推定するにはのり勾配が 5 分程度まではよいが、さらに大きくなると異なってくる。 h/L_0 は大きくなるにしたがっ

図-20 砕波後の波のうち上げ高



て流速が深さの方向に一樣でなくなること、相対的に周期が短くなるため入射波と反射波の重なり合いでエネルギーの損失が増加することなどによると考えられる。

5. あとがき

1/30 の海底勾配上に設けられた堤防のうちはげ高さについて模型実験を行ない、図-10~17 の関係を得た。

堤防ののり勾配や、設置水深によって異なるが、一般に、 R/H_0 の最大値は堤防前面の波の状態が進行波型砕波から重複波型の砕波にかわる付近であられることがわかった。

また、 H_0/L_0 が大きくなると、波うちはげ高は h/L_0 と、堤防勾配とからほとんど決定され、Stoker の bore としての計算値からのズレの形で、 h/L_0 、堤防勾配の影響をあらわしうることを示唆している。

参考文献

- 1) 石原藤次郎・岩垣雄一・鈴木雄太：海岸堤防の設計，特にその有効高について，第2回海岸工学講演会講演集，pp. 57~70，(1955)。
- 2) 佐藤清一・岸 力：海岸堤防に関する研究（1）——海岸堤防に衝突する波の高さについて——，土木研究所報告，第 88 号，pp. 69~101，昭 29.9.
- 3) 佐藤清一・岸 力：海岸堤防の形状特性並びに陸岸への週上，第3回海岸工学講演会講演集，pp. 127~137，昭 31.
- 4) Iversen, H.W.: The transformation of waves in shoaling water, Proc. 3rd Conf. on Coastal Eng., 1952.
- 5) Mason, M.A.: The transformation of waves in shallow water, Proc. 1st Conf. on Coastal Eng., 1951.
- 6) 水理公式集，昭和 38 年増補改訂版，土木学会，昭和 38 年 8 月，pp. 480~483.
- 7) 浜田徳一：Breakers and beach erosion, Report of transportation technical Research Institute, Report No. 1, 昭 26.
- 8) 岸 力：海岸堤防に関する研究（4）——進行波の砕波限界——，土木研究所報告，第 91 号，昭 29.
- 9) 首藤伸夫：有限振幅波について——高次級数解による進行波の砕波限界——，土木研究所報告，第 111 号，昭 37.9.
- 10) Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart: Radiation stress and mass transport in gravity waves with application to surf beats, Jour. Fluid Mechanics 13, pp. 481~504.
- 11) Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart: A note on wave set-up, Jour. Marine Research, 1963.
- 12) Saville, T. Jr.: Experimental determination of wave set-up, Proc. Second Tech. Conf. on Hurricanes, U.S. Dept. of Commerce, Nat. Hurricane Res. Proj., Rep. 50, pp. 242~252.
- 13) Saville, T. Jr.: Wave run-up on shore structures, Proc. A.S.C.E., Vol. 82, 1956.
- 14) Stoker, J.J.: Water Waves, 1957.