

碎波後の波の遡上に関する研究

湯 麟 武*

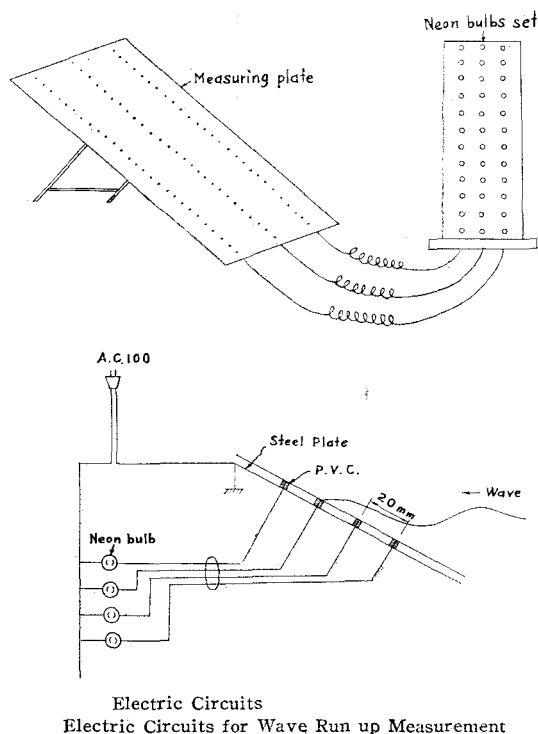
1. ま え が き

波の遡上に関しては、従来多くの研究結果が発表されているが¹⁾、大部分は波が砕けない場合または堤面において初めて砕ける場合が多い。筆者は台湾で長年港湾工事や干拓地開墾工事に関係してきたが、潮差の大きい遠浅海岸に干拓堤防を築造する場合の天端高を決定するときに、従来の碎波しない実験の結果から求めた遡上高を根拠とすると、天端高が過大になり不経済なことが多い。このような遠浅海岸では、波が堤脚に到達する以前に、すでに砕けてしまう。このような場合の遡上現象を研究するために、新竹海埔地開墾工事事務所の委託により、台湾省立成功大学²⁾ 水工試験室において、1961年より1962年まで実験的研究を行なった。ここにその概略を報告するものである。

2. 実験施設および装置

実験は長さ72 m、高さ1.2 m、幅1 mの片面ガラス張りのコンクリート造波水路によって行なった。図-1に示すように水路底面は1/65の一樣勾配をコンクリート面で作成し、その海岸側に可変勾配の堤体面を鉄板で作成し、この堤体面に対する遡上高 R を測定した。このために図-2に示すような堤体面上に細いrodを3列に埋め、ネオン管に連結している。碎波前の波高 H および碎波波高 H_b はペンオシロに記録して測定した(この H は水深および周期によって沖波波高 H_0 に換算する)。実験の場合の水深は水路の平坦部分において75 cm、堤体前面で8.4 cmとしている。実験には第6番目の波から第15番目の波まで(10波)測定することとし、同じ波で3回くり返して測定を行ない、これら30回の記

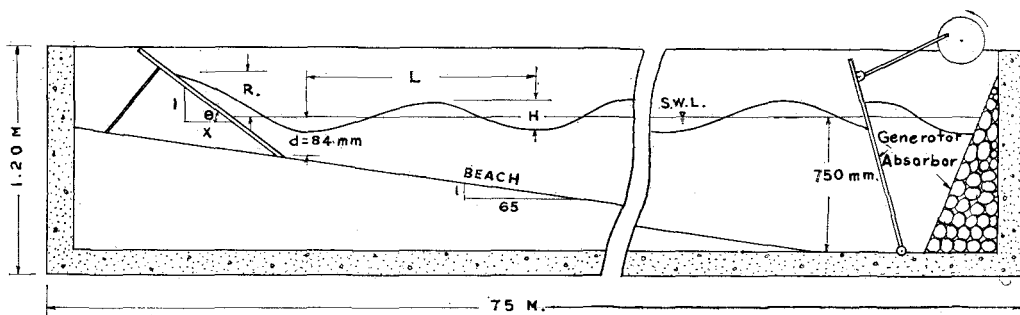
図-2



録値の平均をもって、遡上高および波高とした。

堤防面の勾配は1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6とし、平滑な鉄板について実験を行ない(smooth surface)、また後に粒径1 cmの石張りの堤体面についても行なった(rough surface)。実験に使用した波は波高3~25 cm、周期1.2~2.2 secで、組合わせて約60個の steepness

図-1



* 正員 中華民國台湾成功大学水利工程系教授

の波について実験を行なった。写真は実験状況を示す。

3. 実験結果

おのおのの測定値に対して smooth surface の場合、
 廻上高 R , 沖波の波高 H_0 , 波長 L_0 , 堤体前面水深 d を用
 いて R/H_0 と H_0/L_0 の関係を d/L_0 をパラメーターとし
 て, おのおのの勾配について実験値をプロットすると, 図
 3~5 のようになる。また R/H_0 と d/H_0 の関係を d/L_0
 をパラメーターとして示すと, 図6~8 のようであり,
 同様に勾配 $\cot \theta$ と R/H_0 との関係を示すと図9の
 ようである。rough surface についての例を示すと, 図
 10 および 11 のようになる。

写真-1

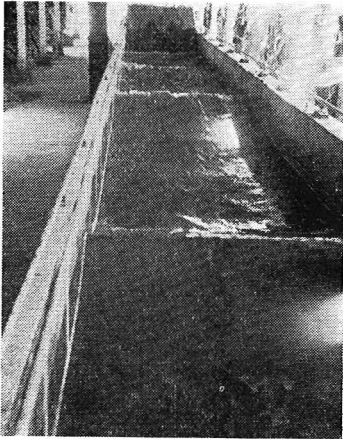


図-3

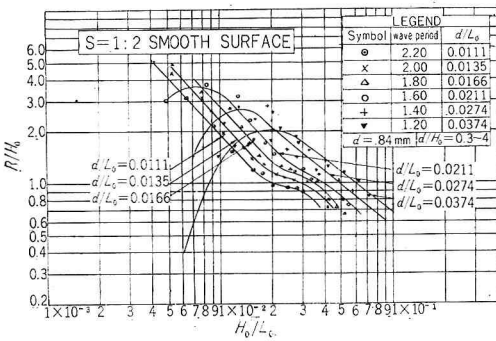


図-4

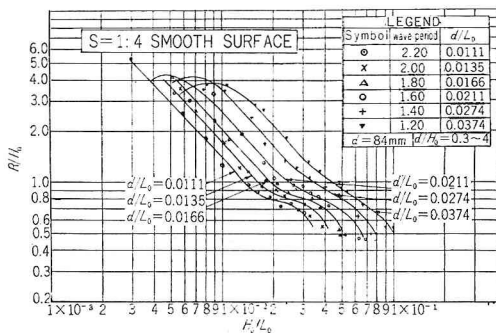


図-5

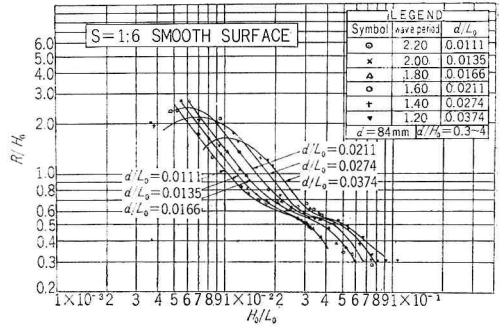


図-6

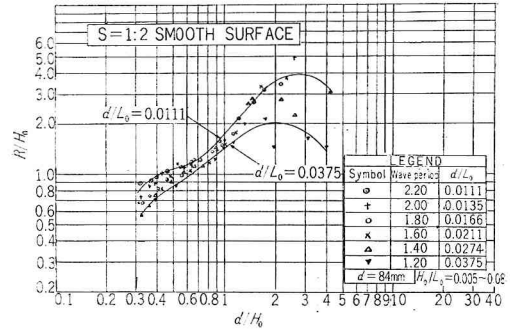


図-7

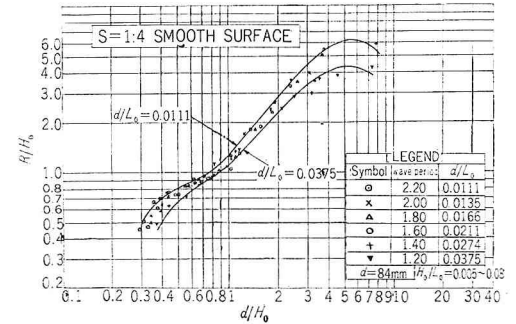


図-8

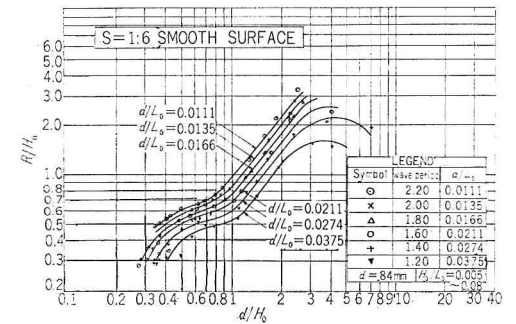
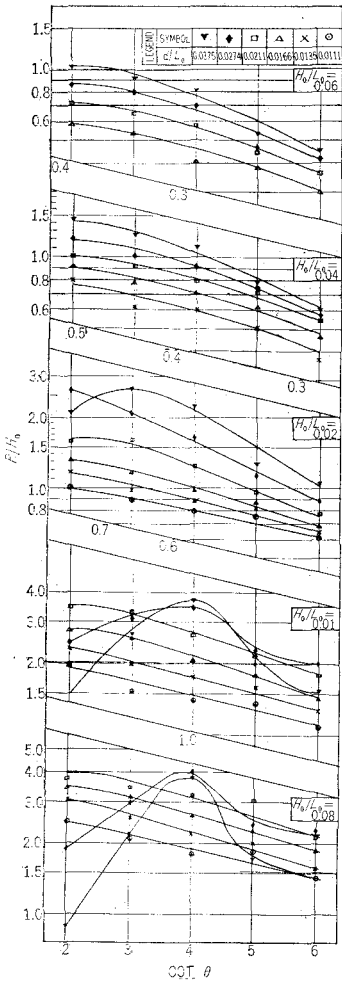


図-9



このような結果からつぎのことがわかる。

a) R/H_0 は H_0/L_0 の増加とともに減少する。

b) R/H_0 は d/H_0 とともに増加する。すなわち堤脚水深が増加すると遡上高は増加する。実際には台風による異常高潮がある場合、堤防の高さは相対的に減少し、遡上は大きくなるので、小さい波でも越流する可能性がある。

c) R/H_0 は大体において、 $\cot \theta$ の増加とともに減少する。ただし steepness が 0.01 より小さく、 d/L_0 が 0.03 以上ならば、 $\cot \theta = 3 \sim 4$ のところで R/H_0 の maximum が現われる。

る。

このように緩勾配の海岸で碎波した後の波の遡上現象は大体において碎波しない波の遡上と定性的に類似している。Saville³⁾ (1956) の実験値にくらべると、もちろん定量的な相違はある。例えば彼の実験結果では $0.3 < d/H_0 < 0.6$ の場合に遡上高が最大となるが、この実験では $d/H_0 > 2$ において始めて遡上高の最大値が現われる。

4. 次元解析による考察および実験値の再整理

碎波後の波の遡上は深海波の性質よりも碎波点における波の性質に強く左右される傾向も考えられるので、遡上高 R を波の周期 T 、碎波高 H_b 、碎波時の波速 c (この場合 $c = \sqrt{gd_b}$ とし、 d_b は碎波水深である) および堤面の傾斜角 θ の関数であると仮定する。すなわち

$$R = f(H_b, T, c, \theta) \dots\dots\dots(1)$$

とすると π 定理により

図-10

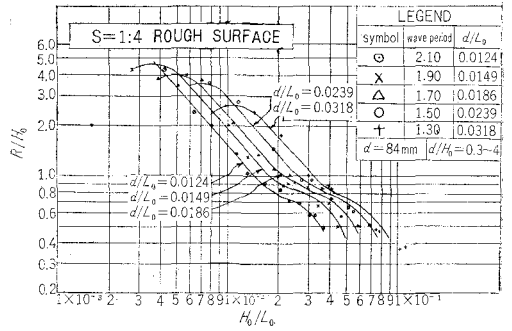


図-11

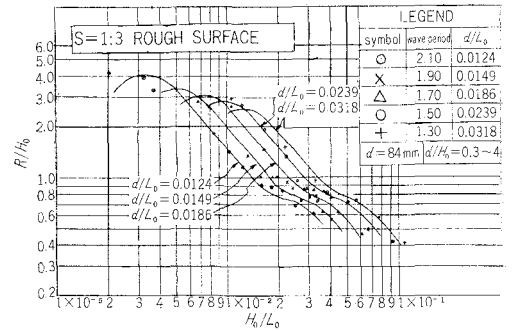


図-12

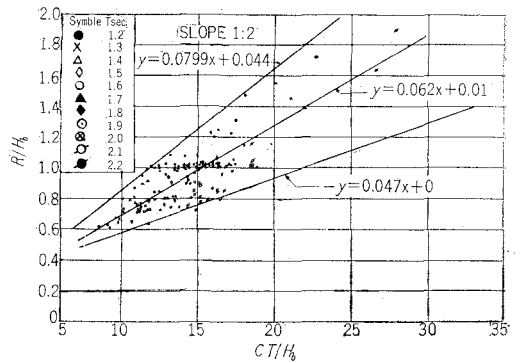


図-13

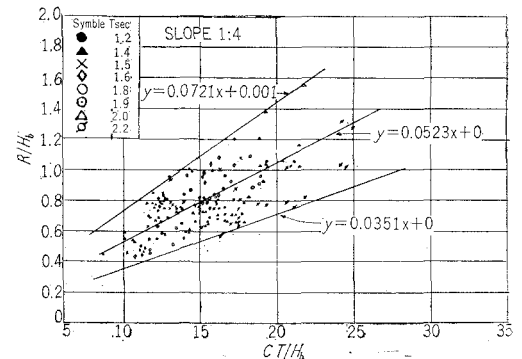
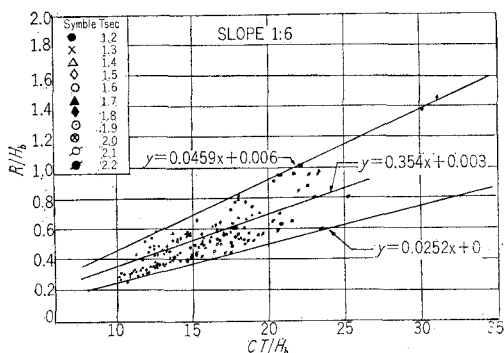


図-14



$$R/H_b = f\left(\frac{cT}{H_b}, \theta\right) \dots\dots\dots (2)$$

なる関係がある。ここで cT は碎波時の波長に相当するもので cT/H_b は碎波の steepness の逆数である。いま、おのおのの θ について R/H_b と cT/H_b の関係をプロットすると、smooth surface について、図-12~14 のようになり、両者はほぼ直線的な関係にあって、 cT/H_b が大きくなると散乱の幅が大きくなる傾向があり、また直線の勾配は明らかに $\cot \theta$ と逆比例して減少する。rough surface の場合も同様の傾向があり、直線の勾配は smooth surface よりも小さい。

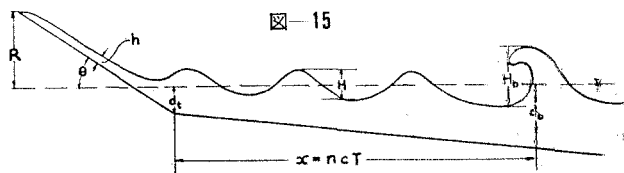
5. エネルギー関係式による考察

堤体に入射し、遡上する波のエネルギーの変化を考えると、碎波点において碎波により消散した残りのエネルギーは、さらに進行とともに海底摩擦によって消費し、堤体まで到達したのちは、堤体面で摩擦により損失を受けつつ、重力に抵抗して遡上し、最後にポテンシャルエネルギーのみとなる。この過程はきわめて複雑であるため、理論的な取り扱いには困難であるが、簡単につきのように考えてみた。堤体面による反射は碎波後の波についてはあまり重要でないとして省略し、また一般に海底物質の粒径はきわめて小さいから浸透によるエネルギー損失も考えないものとする。

碎波後の一波長の波のもつ全エネルギーは、静水面からの高さを η 、水の密度を ρ とすると、つぎのようである。

$$E = E_p + E_k = \frac{\rho g}{2} \int_0^L \eta^2 dx + \frac{\rho g}{2} \int_0^L \eta^2 dx \dots\dots (3)$$

図-15 のように、碎波後の平均波高を H とすると式(3)は大体において



$$E = \frac{\rho g}{16} H^2 L + \frac{\rho g}{16} H^2 L$$

これをつぎのように書き換える。

$$E = \frac{\rho g}{16} \alpha H_b^2 L + \frac{\rho g}{16} \alpha^2 H_b \left(\frac{H_b}{cT}\right) cT L \dots\dots (4)$$

$$[\alpha = H/H_b]$$

これがそれぞれ波の群速度 $c_g = \sqrt{gd}$ 、 $\left(d = \frac{d_b + d_t}{2}\right)$

で進行するとすれば、碎波後進行するエネルギーは単位時間について、

$$\frac{\rho g}{16} \alpha H_b^2 c_g + \frac{\rho g}{16} \alpha^2 H_b \left(\frac{H_b}{cT}\right) cT c_g \dots\dots (5)$$

である。碎波点から堤脚までの距離 x の間で海底摩擦によるエネルギー損失は単位時間について、

$$\left(\frac{x}{L} \int_0^L \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f \rho u^3 dt dx\right) c_g \dots\dots (6)$$

である。

碎波後の波を長波と考えると $u = \sqrt{\frac{g}{d}} \eta$ であり、また

$x = n c T$ とすると式(6)は

$$-\frac{f \rho g}{2\pi^2} \left(\frac{H}{d}\right)^2 H n c T c_g \dots\dots (7)$$

ここで f は海底摩擦係数である。

波が堤面を遡上する場合のエネルギー損失の時間的平均値は

$$\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \int_0^R c_D \cos^2 \theta \frac{\rho v^3}{2} ds dt \dots\dots (8)$$

ここで c_D は drag coefficient で v は遡上流速である。 v_m をその平均値とすると、これは近似的に堤脚部での長波の水分子の最大水平速度 $\sqrt{g/d} \cdot \frac{H}{2}$ に比例するものと考え、 $v_m = m \sqrt{\frac{g}{d}} \frac{H}{2}$ とおいて上式に代入すると

$$\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \int_0^R c_D \frac{\rho v^3}{2} ds dt = \frac{1}{16} c_D \cdot K_e m^3 \frac{\rho g}{dt} H^2 \sqrt{\frac{g}{d}} \cdot R \cos^2 \theta \dots\dots (9)$$

K_e は波高の平均三乗と三乗平均の比である。水粒子が重力に抗してなす仕事の率は

$$\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \int_0^R \int_0^R \cos^2 \theta \rho g \sin \theta \cdot v ds dh dt = \rho g v_m h_m R \dots\dots (10)$$

となる。ここで h_m は斜面上の遡上による水の平均水深とする。

したがってエネルギー平衡の式から式(5)、(9)および式(10)を用いて

$$\frac{\rho g}{16} d^2 H_b^2 c_g + \frac{\rho g}{16} \alpha^2 H_b \left(\frac{H_b}{cT}\right) cT c_g - \frac{f \rho g}{3\pi^2} \left(\frac{H}{d}\right)^2 H n c T c_g \dots\dots$$

$$= \frac{1}{16} c_D K_c m^3 \frac{\rho g}{d} H^3 \sqrt{\frac{g}{d}} R \operatorname{cosec} \theta + \rho g V_m h_m R \dots\dots\dots (11)$$

両辺を $\rho g V_m h_m$ でわると

$$k_1 H_0 + k_2 cT - k_3 n cT = k_4 R \operatorname{cosec} \theta + R \dots\dots\dots (12)$$

ここで

$$k_1 = \frac{\alpha^2 H_b}{16 h_m} \frac{c g}{v_m} \quad k_2 = \frac{\alpha^2 H_b}{16 h_m} \left(\frac{H_b}{cT} \right) \frac{c g}{v_m} \dots\dots\dots (13)$$

$$k_3 = \frac{f}{3\pi^2} \left(\frac{H}{d} \right)^2 \frac{H}{h_m} \frac{c g}{v_m}$$

$$k_4 = \frac{1}{16} c_D K_c m^2 \frac{H^2}{d h_m} \sqrt{\frac{g}{d}} \cdot \frac{H}{v_m}$$

また
$$\frac{R}{H_b} = \frac{k_2 - k_3 n}{k_4 \operatorname{cosec} \theta + 1} \frac{cT}{H_b} + \frac{k_1}{k_4 \operatorname{cosec} \theta + 1} \dots\dots\dots (14)$$

である。これは碎波後の遡上を計算する公式の取るべき形式で、もし、すべての係数が一定であれば R/H_b と cT/H_b の関係は直線的となると思われる。

6. 実験公式の決定

式(14)は実験結果および次元解析の結果と一致する傾向を与えるが、式中の係数は未知であるため、実験結果からこの概略値を推定してみる。

まず実験結果の 図-12~14 などから smooth surface に対しては $k_4 \approx 0.26$ と考えられる。また k_2 においては、 $f \approx 0.02$ として $H/d \approx 0.6^{(5)}$ $H/h_m \approx 4$ と仮定すると、

$$k_3 = \frac{f}{3\pi^2} \left(\frac{H}{d} \right)^2 \left(\frac{H}{h_m} \right) \sqrt{\frac{g(d_b + d_t)}{2}} / m \sqrt{\frac{g}{d_t}} \cdot \frac{H}{2}$$

で、 v は $\sqrt{\frac{g}{d_t} H}$ から 0 まで変化するため $m \approx \frac{1}{2}$ と考

えると、 $k_2 \approx 0.005 \sqrt{\frac{d_b}{d_t} + 1}$ となる。実験値から k_1 、

k_3 を計算すると k_1 は主として $\cot \theta$ の関数となり、

図-16 のようである。 k_2 は cT/H_b によって変化し、

図-17 のようである。したがって碎波高 H_b 、碎波水深 d_b と海底勾配角 α がわかれば、 $n = (d_b - d_t) \cot \alpha / cT$ として R/H_b を求めることができる。ゆえに式(14)はつ

図-16

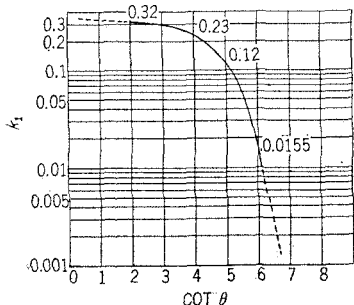
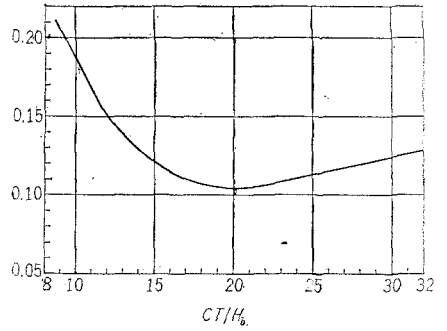


図-17



ぎの形となる。

$$\frac{R}{H_b} = \frac{k_2 - 0.005 \sqrt{\frac{d_b}{d_t} + 1} \cdot n}{0.26 \operatorname{cosec} \theta + 1} \frac{cT}{H_b} + \frac{k_1}{0.26 \operatorname{cosec} \theta + 1} \dots\dots\dots (15)$$

rough surface の堤体面については k_4 、すなわち 0.26 を調整することにより用いられる。 H_b および d_b は Iversen の実験値や孤立波の理論式を用いて求めることができるが、この場合のように海底勾配が 1/50 より flat な海岸では、この実験水路で求めた結果⁶⁾を用いるほうが有効であると思う。

上記の式は碎波および遡上にもなるエネルギーの変化および損失についてきわめて独断的な仮定によっており、また諸係数の決定ももっぱら実験結果と合致せしめるように決められてあって、詳細な検討が行なわれていない。目下これらの点を逐次明らかにするために、碎波後の波の変形、堤面での水面形状や流速および堤面勾配の増大にもなる反射波の影響なども再検討中であり、逐次明確にされるにもなって、上式を改良するつもりである。

7. むすび

1. 碎波後の波の遡上は、実験結果によると、
 - a) R/H_b は H_0/L_0 の増加とともに減少する。
 - b) R/H_b は d/H_0 とともに増加する (ただし $d/H_0 < 2 \sim 6$)
 - c) R/H_b は $\cot \theta = 2 \sim 6$ の範囲内では大体 $\cot \theta$ の増加とともに減少する
2. 次元解析とエネルギー関係式から R/H_b は式(14)のように表わされる。
3. 海底勾配が 1/50 よりも flat な海岸での $\cot \theta > 2$ のなめらかな堤面では R/H_b は式(15)で表わされる k_1 および k_2 は 図-16, 17 に示されている。

台湾西海岸で最近干拓工事が各所で計画実施されており、海岸の実状に応じて堤防の合理的な設計が必要であり、その要請に応えるため、特に遠浅での碎波後の波の

遡上現象を究明し、天端高を決定する必要に迫られている。この研究はそのための第一歩として行なったのである。不備の点が多いが、あえて日本の海岸技術に従事する人々の参考に供し、ご批判を賜りたいと思う。

この研究は日本国運輸省港湾技術研究所 井島武士博士、国立台湾大学農業工程系金城教授、成功大学土木系主任教授 倪超博士にご指導を受け、また実験に際しては成功大学土木系講師 郭金棟、同水利系助教授 曾明德の両君の協力を受けた。ここに誌して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 例えば 篠原謹爾・佐藤清一, Saville, Hunt, Wassing 諸氏の研究
- 2) 元台南高工より昇格
- 3) Shore Protection Planning and Design 1961. 年版.
- 4) J. W. Johnson: The Dissipation of Wave Energy by Bottom Friction, Trans. A. G. U. Vol. 30, No. 1.
- 5) 現在行なわれている実験資料より
- 6) 郭金棟, 碎波之研究, 成功大学土木工程研究所研究報告第7号