

砕波後の波の打ち上げ高について

郭 金 棟*・李 永 寿**

1. 緒 言

海岸堤防のり面への波の打ち上げ高については過去にかなり数多く研究が行なわれてきたが、これらの研究は堤防の設置位置が砕波点以深、またはそれより陸側におかれているかを問わず、主に沖波条件に基づいて解析を行なっているため、的確に把握することができなかった。堤防のり面勾配、堤脚水深、沖浪波形勾配および海底勾配によって反射が著しく変わるため、波の打ち上げ高も顕著な変化を見せる。波が砕波せずに Surging Wave でのり面に打ち上げる際、相対打ち上げ高は堤防のり面勾配と波形勾配によって決定できる。また波形勾配とのり面勾配の関係が Miche の最大波形勾配に達した時、波はのり面でもっとも高く打ち上げられるが、もし波が砕波してから堤防に到達した場合、波高の減衰によって打ち上げ高も急減する。したがって砕波後の打ち上げ高は直接砕波の機構、砕波点と堤脚との相対距離に帰因するものであり、沖波波形勾配は砕波機構と砕波点を支配する要素であるために、砕波後の打ち上げ高に関しては間接的な要素であろう。

一般の海岸堤防や護岸は砕波点よりも陸側に設けられているため、他の場合よりは打ち上げ高が低めになることが考えられるが、砕波条件や砕波点と堤防の相対的な位置関係がいかに影響するかは必ずしも明瞭ではない。これを解明することによって、より経済的かつ合理的な堤防の天端高がきめられる。

この報告は主に台湾西海岸干拓工事に関連した防波堤についての研究であるために、海底勾配は水平とし、また堤防のり面勾配は現地における施工材料の制約により緩勾配堤防となっているので、その条件のみについて取り扱った。また過去海底勾配 1/65 の場合について行なった実験結果も合せて解析を試みた。

2. 実験装置および方法

造波水路は図-1 に示すように、長さ 72.0 m、幅 1.0 m、高さ 1.2 m の片面ガラス張り水槽であり、一端に

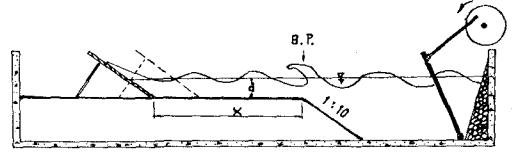


図-1 Test Arrangement.

Flap-type 造波機を設置してある。造波機の先端約 30 m の所に長さ 4.0 m、勾配 1/10 の傾斜面を設け、それより岸側では水平底をセメント・モルタルによって滑らかにし、その上に堤防のり面を設けた。造波機によって起こされた波は 1/10 勾配の斜面で強制砕波され、数波長へてから堤防に到達する。したがって堤防のり面の位置を移動することにより、砕波点から堤脚までの距離の打ち上げ高におよぼす影響も把握できる。

波高は造波機先端約 10 m、砕波点 および 堤脚前方約 0.5 m の 3 か所に抵抗線式波高計を設置し、ペンオシロを用いて記録する。沖における波高は反射が戻る前に測定し、砕波点と堤脚における波高は反射が発生した後に測定し、すべて約 20 波の平均値によって波高を計算した。打ち上げはのり面に 10 mm ごとに白線をきざみ、周期の長い場合は目測で、短い場合は 8 mm 撮影機にて水槽中心より左右 30 cm の 2 つの断面における打ち上げを連続 30 個読みとって平均を求めた（なおこれ以外にも抵抗線を使って測定したが、のり面勾配がゆるいため、打ち上げた波の上層は薄い水膜となり、その部分は計器によって検出することができず、実際の打ち上げ高よりもきわめて小さめにでることがわかった）。

実験条件は表-1 のごとく、以下の組合せで実験を行なった。

表-1 実験条件

波 浪 条 件			堤 脚 水 深 (cm)	堤 面 勾 配 (cot θ)
周 期 (sec)	波 高 (cm)			
2.0, 1.6	1.5 ~ 18		14.4	5, 6, 7
1.2, 0.8	約 10 種		18.0	〃

- 水深、周期、堤防のり面勾配を固定して波高を変えて行なう。
- 周期を変えて (i) をくり返す。
- 水深を変えて (i), (ii) をくり返す。
- 堤防のり面勾配を調整して (i) ~ (iii) をくり返す。

* 正会員 工修 副教授 台湾成功大学水利系 (在外研究員 東京大学工学部土木工学科)

** 大学院生 同 上

す。

(v) 堤防のり面を約 1m ごとに移動して (i), (ii) をくり返す。

現地の条件によって換算すると、模型縮尺は 1/30 である。

3. 実験結果とその解析

(1) 堤防が砕波点から 3.5 波長よりも陸側におかれた場合

Freeman-Méhauté¹⁾ は特性曲線法により dry bed 上での打ち上げ高を議論し、波の先端流速 U と波速 C の関係を

$$C \sqrt{\cos \theta} = aU \quad \dots\dots\dots (1)$$

として打ち上げ高

$$\frac{R}{d} = \frac{(1+a)(1+2a)}{1+f/(a^2 \sin \theta)} \cdot \frac{U^2}{2gd} \quad \dots\dots\dots (2)$$

を求めた。式 (2) を波速によって表わすと、

$$\frac{R}{d} = K \frac{C^2}{2gd} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$$K = \frac{(1+a)(1+2a) \cos \theta \cdot \sin \theta}{a^2 \sin \theta + f} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 R : 打ち上げ高

d : 堤脚水深

f : 摩擦係数

θ : のり面が水平線となす角度

a : 定数

である。砕波が砕波点より数波長 (約 3~4 波) 前進すると気泡は完全に逸出し、波は波形を取り戻す。このときの波形は Cnoid 波に近い波形で伝播する。ここでは近似的に Skjelbrija の Stokes 波第 3 次近似解によって波速を表示することができると仮定して式 (5) によって表わす。

$$\frac{C}{\sqrt{gd}} = \left\{ \frac{L_a}{2\pi d} \tanh \frac{2\pi d}{L_a} \right\}^{1/2} \left\{ \phi \left(\frac{d}{L_a}, \frac{H}{d} \right) \right\}^{1/2} \quad \dots\dots (5)$$

ただし、

$$\phi \left(\frac{d}{L_a}, \frac{H}{d} \right) = 1 + \pi^2 \left(\frac{d}{L_a} \right) \left(\frac{2a}{d} \right)^2 \frac{8 \left(\cosh \frac{2\pi d}{L_a} \right)^4 - 8 \left(\cosh \frac{2\pi d}{L_a} \right)^2 + 9}{8 \left(\sinh \frac{2\pi d}{L_a} \right)^8} = \frac{L_S}{L_a} \quad \dots\dots (6)$$

a : 波の振幅

H : 堤脚における波高

L_a : Airy 波の波長

L_S : Stokes 波の波長

式 (5) と式 (3) より

$$\frac{R}{d} = \frac{K}{2} \left\{ \frac{L_a}{2\pi d} \tanh \frac{2\pi d}{L_a} \right\} \cdot \phi \left(\frac{d}{L_a}, \frac{H}{d} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。 $2\pi d/L_a$ は d/L_0 の関数であるから、 a, f が同じ場合、打ち上げ高は

$$\frac{R}{d} = f \left(\frac{d}{L_0}, \frac{H}{d}, \theta \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

という無次元関数式によって表わされる。

水深、堤防の位置が一定で波高と周期を変えて砕波後の波の打ち上げ高を測定し、これを用いて式 (8) の無次元関係について解析し、それをプロットしたのが図-2 (a), (b), (c) であり、おのおの堤防のり面勾配 $\cot \theta = 5, 6, 7$ についての実験結果である (図-2(c) では $d/L_0 = 0.0231, 0.0288$ で R/d が広くちらばっているが、それは堤防の位置を移動した場合、砕波点に近づくにつれて遡上高が大きくなる。その説明は次節 (2) 参照)。図上の実線は $K=1.0, H/d=0.33$ とした場合の式 (7) の関係を表示したものである。これらの比較によると実験はほぼ理論曲線と同じ傾向を持っていることがわかる。図上の点線は実験値をもっともよく代表できる理論曲線であり、これらの K の値を求めてみると、

$\cot \theta = 5$ では $K=1.44$

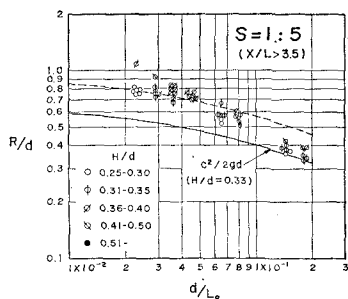


図-2 (a) Relation of R/d with d/L_0 for Broken Waves. ($S=1:5$)

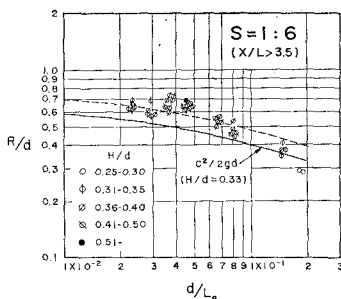


図-2 (b) Relation of R/d with d/L_0 for Broken Waves. ($S=1:6$)

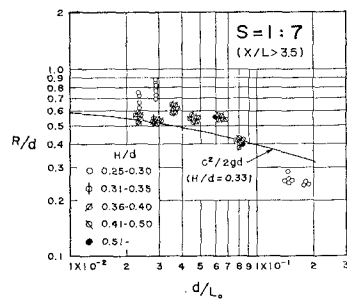


図-2 (c) Relation of R/d with d/L_0 for Broken Waves. ($S=1:7$)

$$\begin{aligned}\cot \theta = 6 & \quad K = 1.27 \\ \cot \theta = 7 & \quad K = 1.15\end{aligned}$$

のり面勾配が小さいほど K は小さくなり、打ち上げ高は低減する。これより求められた摩擦係数は $f=0.878$ 、また流速と波速の比例定数 $a=1.48$ となり、式(3)は次のようにかき表わされる。

$$\frac{R}{d} = \frac{4.49 \sin 2\theta}{\sin \theta + 0.878} \frac{C^2}{gd} \dots\dots\dots (9)$$

式(9)の $\cot \theta < 5$ の場合における適用性については今後さらに実験によって確かめる必要がある。なお近似的な計算を行なうためには、微小振幅波より波速を求めてもよいであろう。とくに d/L_0 が小さい場合には計算結果は安全側にある。

上にあげた摩擦係数 f や定数 a はいずれも過大な恐れがある。とくに a は岩垣ら²⁾が求めた結果 ($a \div 0.26$) と比較するとかなり大きい。通常 $a \ll 1/2$ といわれているが、この場合先端流速は波速の2倍以上の大きさになり、実際には発生し得ないのではなからうか。本実験ではのり面勾配 $\cot \theta \geq 5$ で $\sqrt{\cos \theta} \div 1$ と見なし、 $C \div 1.48 U$ となり、流速は波速よりも遅くなる。式(4)の係数は式(9)からも知るようには $\tan \theta$ に比例し、Hunt³⁾ の提案と一致する。

また、

$$\begin{aligned}\frac{C}{\sqrt{gd}} &= \frac{L_S}{d} T \sqrt{g/d} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{-1/2} \tanh \frac{2\pi d}{L_a} \cdot \phi \dots\dots (10)\end{aligned}$$

であるから、したがって

$$\begin{aligned}\frac{R}{H_0} &= \frac{R}{d} \cdot \frac{d}{H_0} \\ &= \frac{K}{4\pi} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{-1} \left(\frac{L_S}{L_0} \right)^2 \left(\frac{d}{H_0} \right) \\ &= \frac{K}{4\pi} \left(\frac{d}{H_0} \right) \left(\frac{d}{L_S} \right)^{-2} \left(\frac{d}{L_0} \right) \\ &= f' \left(\frac{d}{H_0}, \frac{d}{L_0}, \frac{d}{H} \right) \dots\dots\dots (11)\end{aligned}$$

H_0 は沖波波高。または、

$$\begin{aligned}\frac{R}{H_0} &= \frac{K}{4\pi} \left(\frac{L_0}{H_0} \right) \left(\frac{L_S}{L_0} \right)^2 \\ &= f'' \left(\frac{H_0}{L_0}, \frac{d}{L_0}, \frac{H}{d} \right) \dots\dots\dots (12)\end{aligned}$$

として表わすことができる。式(11)の関係を表示した一例として図-3があげられる。 R/H_0 はいわゆる相対打ち上げ高であり、打ち上げ高の無次元表示として良く使われていた。 R/H_0 と d/H_0 の関係は $d/L_0 = \text{const}$ の場合、砕波後の場合については R/H_0 は d/H_0 の一乗にやや比例する。また d/H_0 が一定の場合 R/H_0 はほぼ d/L_0 の一乗に比例する。すなわち沖波波高と堤脚水深が同じ場合のり面の打ち上げ高は沖波の波長に反比例、または周期の2乗に反比例している。式(12)の無

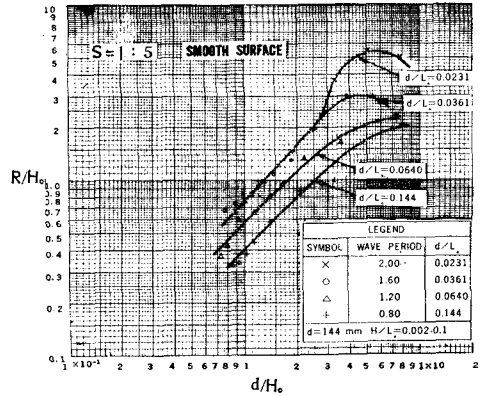


図-3 Relation of R/H_0 versus d/H_0 .

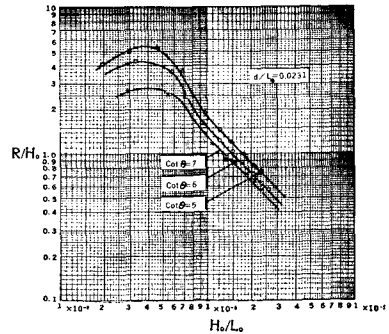
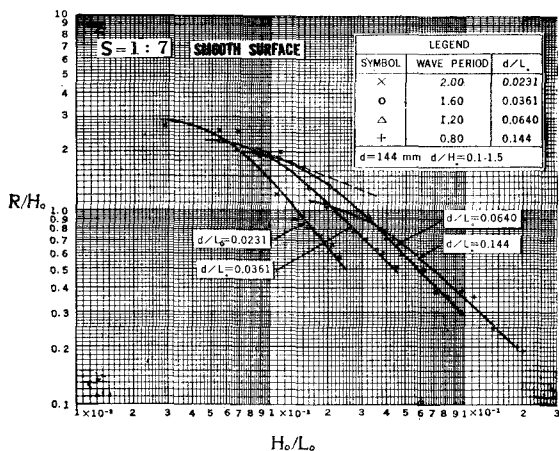


図-4 Relation of R/H_0 versus H_0/L_0 for Const. d/L_0 .

次元関係もしばしば打ち上げ高の表示法として使われてきた。式(12)からもわかるように砕波後3~4波長より陸側に海岸堤防を設置した場合、もし非線型による波速への影響を無視しうる場合には、相対打ち上げ高は沖波波形勾配 $(H_0/L_0)^{-1}$ に比例するであろう。海底勾配が水平である場合の一例としてあげたのが図-4である。同図からもわかるように、いずれののり面勾配の場合も $(H_0/L_0)^{-1}$ に比例し、またその他豊島ら⁴⁾や著者ら⁵⁾の過去の実験結果も同様な傾向を示している。これらはいずれも海底勾配が1/20よりもゆるやかな場合における実験結果である。しかし B. E. B. で行なわれた実験結果では R/H_0 は $(H_0/L_0)^{-1/2}$ に比例し、Hunt³⁾ もこれを提案している。Saville⁶⁾ の B. E. B. における実験は海底勾配が1/10よりも急な状態におかれたものであるから、砕波点が汀線と非常に近づき、波は Bore かまたは Shock Wave に似かよった波形で堤防に到達するから、ここで議論されている状態とは現象が異なり、したがって結果も違うのが当然であると考えられる。図-5の点線は $(H_0/L_0)^{-1/2}$ を示したものであり、堤脚が砕波点の付近に位置する場合にのみ $R/H_0 \sim (H_0/L_0)^{-1/2}$ という関係が成りたつと判断される。同じく式(12)と図-5からもわかるように沖波波形勾配が同じ場合に、 R/H_0

図-5 Effect of H_0/L_0 and d/L_0 on R/H_0 .

は $\left(\tanh \frac{2\pi d}{L_0}\right)^2$ に比例する, すなわち同じ波では堤防が砕波帯内に位置する限り, 堤脚水深が深いほど打ち上げ高も高くなり, 砕波点で最高となる。

(2) 堤防が砕波点より 3.5 波長以内におかれた場合
砕波直後の波と砕波後数波長進行した後の波とはかなり異なった性質を持っている。砕波直後の波は気泡が大量に混入し, 波よりもむしろ流れに近い状態で打ち寄せる。波高水深比 H/d もとくに大きく, 波の先端は鉛直に近く Bore 状で伝播する。それより 3~4 波長すぎると波は波形を取り戻す。したがって砕波帯におかれた堤防への打ち上げについて, 砕波点に隣接した場合と, 数波長離れた場合とでは定量的にも異なるであろう。

砕波点より数波長以内の波の波速は式(5)を満足することができず, ここでは著者の一人の実験⁷⁾によって得た結果,

$$\frac{C}{\sqrt{gd}} = \sqrt{1 + \frac{3H}{4d}} \quad (13)$$

によって近似的に表示する。また同じ報告で水平床における砕波後の波高減衰は

$$H = H_b \exp\left(\frac{-0.275x}{T\sqrt{gd}}\right) \quad (14)$$

ここに,

H : 砕波点より x 距離陸側での波高

H_b : 砕波波高

T : 波の周期

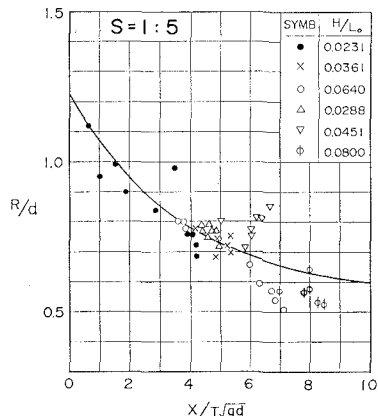
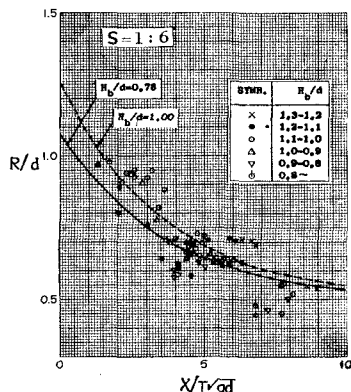
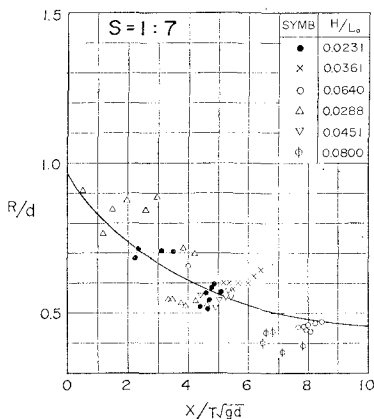
で表わされることがわかっている, この関係を用いれば打ち上げ高は,

$$\frac{R}{d} = K \frac{C^2}{2gd} = \frac{K}{2} \left[1 + \frac{3H_b}{4d} \exp\left(\frac{-0.275x}{T\sqrt{gd}}\right) \right] \quad (15)$$

となる。

同じ波浪条件で堤防のり面を移動させ, 砕波点と堤脚との距離がいかに打ち上げ高に影響するかを考察した

のが図-6(a), (b), (c) である。これらの結果からも知るように, 距離 x が長くなるほど打ち上げ高は低くなり, 砕波点に近づくとき高くなる。とくに砕波点に接近すると著しく打ち上げ高は高くなる。図上の実線は式(15)の理論値を表示したものであり, $H_b/d=0.78$, K は(1)節の結果にしたがって計算した。図-6(b)

図-6(a) Relation of R/d versus $X/T\sqrt{gd}$. (for $S=1:5$ with Horizontal Bottom)図-6(b) Relation of R/d versus $X/T\sqrt{gd}$. (for $S=1:6$ with Horizontal Bottom)図-6(c) Relation of R/d versus $X/T\sqrt{gd}$. (for $S=1:7$ with Horizontal Bottom)

の点線は同じく $H_b/d=1.00$ とした場合の理論値である。この解析結果からも見られるように、 $X/T\sqrt{gd}$ が大きくなると波高の減衰はわずかになり、 $X/T\sqrt{gd}$ に多少変化があっても打ち上げ高はほとんどかわりなく一定値をたもつ。場合によっては反射波の腹部に堤防が位置したとき打ち上げは逆に若干増大する。

(3) 海底勾配 1/65 の場合

著者の一人がかって 1/65 の海底勾配について行なった実験データ³⁾をもとにして、砕波距離が打ち上げ高におよぼす影響を検討した結果、図-7 (a), (b), (c) のようにかなりまとまった結果をうることができた。縦軸は打ち上げ高 R と砕波水深 d_b の比であり、横軸は砕

波点からの距離 X と砕波波長 $T\sqrt{gd_b}$ の比である。

(4) 粗面による影響

以上の実験結果はいずれも平滑なり面でのケースであるために現地のもの(石張り堤)よりも大きい打ち上げ高を与えることになりうる。したがって現地のり面の表面状態によって修正する必要がある。ここでは粒径約 $1.0\text{ cm}\phi$ の砂利をのり面上にはりつけて石張り堤を代表し、その実験結果を平滑面の場合と比較してみた。図-8 での R_s は平滑面、 R_r は粗面における打ち上げ高、この比 R_r/R_s を沖波波形勾配 H_0/L_0 によって表わすと、のり面勾配がゆるいほど、また沖波波形勾配が大きいほど粗面の効果が著しいことを示している。また図-9 は R_r/R_s を堤脚水深 d と沖波波高 H_0 の比 d/H_0 をパラメーターとして表示した。同じ堤脚水深において沖波波高が高いほど、粗面効果は顕著にあらわれる。

4. 結 論

砕波後の波の打ち上げ高を考える場合、砕波点と堤脚位置、すなわち堤脚水深との関係が非常に重要な役割をはたすことがわかる。とくに堤防を砕波点付近に設置した場合、砕波波高が高いために打ち上げ高もとくに高く、砕波点でもっとも大きくなる。この場合波高、水深と砕波点との距離を吟味すれば合理的な打ち上げ高が求められる。もし堤防の位置が砕波点から数波長離れている場合には、砕波点と堤脚との相対距離、または相対水深をとって考えれば打ち上げ高は定まる。

海底勾配が急な場合、砕波帯は非常に短いから、波は Bore 状になり、打ち上げ高は Hunt の提案した式

$$\frac{R}{H_0} = \frac{\tan \theta}{2.0(H_0/L_0)^{1/2}} \quad \dots\dots(16)$$

によって見積ればよい。ただし海底勾配が $1/20$ よりも緩

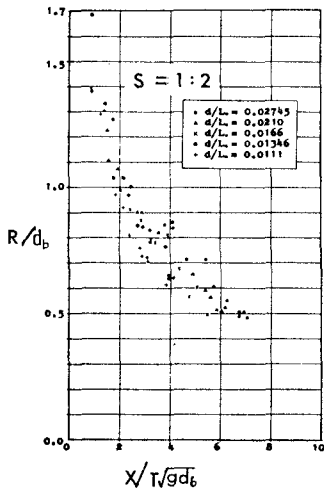


図-7 (a) Relation of R/d_b versus $X/T\sqrt{gd_b}$, (for $S=1:2$ with a Bottom Slope of $1/65$)

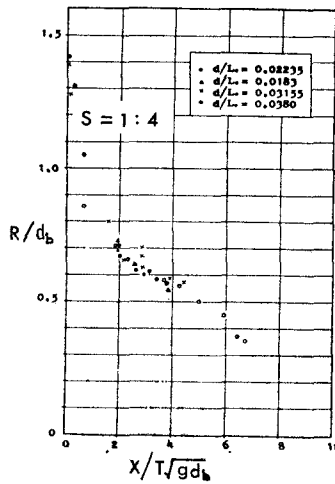


図-7 (b) Relation of R/d_b versus $X/T\sqrt{gd_b}$, (for $S=1:4$ with a Bottom Slope of $1/65$)

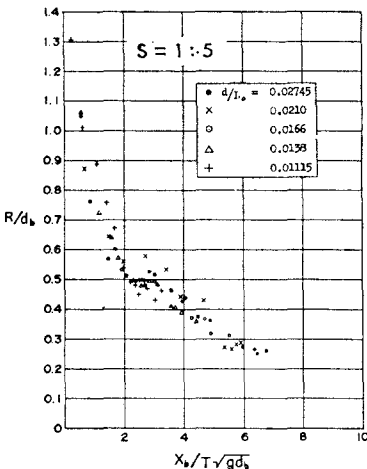


図-7 (c) Relation of R/d_b versus $X/T\sqrt{gd_b}$, (for $S=1:5$ with a Bottom Slope of $1/65$)

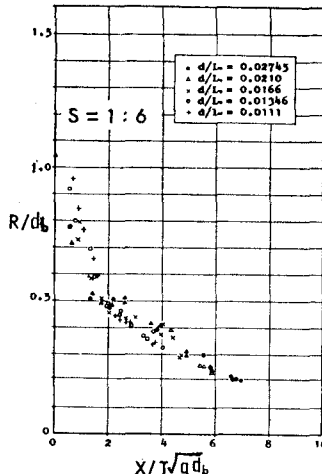
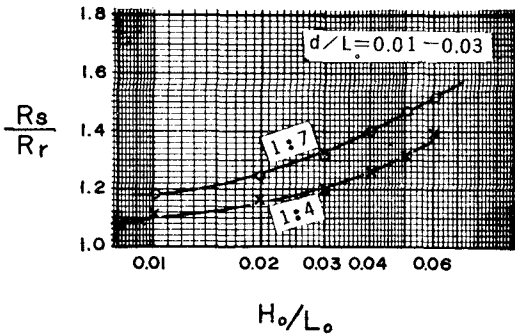


図-7 (d) Relation of R/d_b versus $X/T\sqrt{gd_b}$, (for $S=1:6$ with a Bottom Slope of $1/65$)



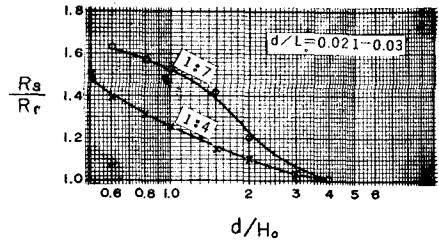
図—8 Effect of Roughness on Run-up. R_s/R_r versus H_0/L_0 .

やかな海岸に設置される場合には、本論文にのべた方法で推定した方が良いであろう。

堤防法線を定める際にできれば砕波点をさけ、砕波後3, 4波長より陸側に設置した方が望ましい。これにより打ち上げ高はかなり低減し、また波圧も著しく減少する。打ち上げ高がもっとも大きくなる水深は大体砕波水深と一致し、

$$d_b/L_0 = 0.465(H_0/L_0)^{2/3} \dots\dots\dots (17)$$

によって求められる。なお本論文の方法を用いるには、いずれも砕波条件をまず求める必要がある。これらは従来の実験結果によれば良いであろう。



図—9 Effect of Roughness on Run-up. R_s/R_r versus d/H_0 .

参考文献

- 1) Freeman, J. C and B. L. Méhaut : Wave Breakers on Beach and Surges on a Dry Bed, Proc. ASCE, Vol. 90, No. HY 2, 1964.
- 2) 岩垣雄一・井上雅夫・大堀晃一：のり面上の波の遡上機構に関する実験的研究，第13回海岸工学講演会講演集，1966.
- 3) Hunt, I. A. : Design of Seawall and Breakwaters, Trans. ASCE, Vol. 126, Part 4, 1961.
- 4) 豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏：海岸堤防への波のうちあげ高，第12回海岸工学講演会講演集，1965.
- 5) 湯鱗武・郭金棟：新竹海地防潮堤断面模型実験報告，台南水工試験室，1963.
- 6) Saville, T. Jr., : Laboratory Data an Wave Run-up and Overtopping on Shore Structures, Tech. Mech. Memo. No. 64, B.E.B. 1955.
- 7) Horikawa, K. and C. T. Kuo : A Study on Wave Transformation Inside Surf Zone, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng. 1967.