

非一樣緩斜面上への規則波のうちあげについて

小 川 由 信*・首 藤 伸 夫**

1. はじめに

自然海岸への波の遡上現象を解明することは、海岸変形の予測上重要な課題である。従来の規則波の遡上に関する実験は、比較的急勾配斜面 (1/10 以上) に関するものが多く、通常、自然海岸に見られる緩勾配斜面、さらには、前浜地形、バー、ステップなどを含む非一樣勾配斜面に関する研究例は少ない。また、海岸変形を見積るためには、うちあげ高さのみを知るのでは不十分と考えられる。

本研究では、非一樣緩斜面上への規則波の二次元的な遡上現象を、非砕波領域 (重複波的) の場合と砕波領域 (進行波的) の場合に分けて論ずる。特に砕波領域に関しては、砕波後の波の変形特性を考慮した検討を行なう。

2. 非砕波領域のうちあげ

Shuto¹⁾によると、一樣水深に接続する一樣勾配斜面上での Lagrange 形式の線形長波 (重複波) のうちあげ高さ R は次式で与えられる。

$$\frac{R}{H_i} = \left[J_0^2 \left(4\pi \frac{l}{L} \right) + J_1^2 \left(4\pi \frac{l}{L} \right) \right]^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 H_i : 一樣水深部での入射波高、 l : 静水汀線とのり先の水平距離、 L : 一樣水深部での波長、 J_0, J_1 : 0 次、1 次のベッセル関数、である。いま、 $l \rightarrow \infty$ の極限を考えると、式 (1) は、

$$\frac{R}{H_i} = \sqrt{\frac{\pi \sigma}{s} \left(\frac{h_1}{g} \right)^{1/4}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、 σ : 角周波数、 s : 斜面勾配、 h_1 : 一樣水深部の水深、である。斜面のり先よりもさらに沖の深海波とみなせる領域の入射波高 H_0 を用いて H_i を表わすために、入射波のみに着目したエネルギー保存則を式 (2) に代入すると、Miche²⁾ と同様な次式が導かれる。

$$\frac{R}{H_0} = \sqrt{\frac{\pi}{2s}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

同様な操作により、Shuto の求めた砕波条件から Miche³⁾ と類似な重複波の砕波限界波形勾配 $(H_0/L_0)_{cr.}$ が以下の

ように求まる。

$$\left(\frac{H_0}{L_0} \right)_{cr.} = \sqrt{\frac{2s}{\pi}} \cdot \frac{s^2}{\pi} \quad \dots\dots\dots (4)$$

次に、以上の考えを非一樣な縦断地形に拡張する。そのためには、勾配の変化する位置 $x_0=l$ での水平変位 $x(l, y_0; t)$ と鉛直変位 $y(l, 0; t)$ の接続を行なったのち、上述の操作を行なえばよい。ここで、 x, y はともに初期位置の座標 x_0, y_0 および時間 t の関数であり、静水汀線より冲向き、上向きを正とする。

複合斜面 (2本の直線から成る斜面)、ステップ型斜面、バー型斜面についての算定式を図-1に示す。結果はかなり複雑な式となるので、沖側斜面勾配 $s=0.03$ 、前浜勾配 $m=0.1$ の場合について計算した結果を図-2に示す。図中の破線は、 $s=m=0.1$ とした一樣勾配斜面に対する式 (3)、(4) の値を示している。算定式中に沖側斜面勾配 s を含むにもかかわらず、 R/H_0 および $(H_0/L_0)_{cr.}$ はほぼ前浜勾配により決まることがわかる。逆に考えると、非一樣勾配斜面における重複波の遡上、砕波限界、反射といった問題を近似的に取扱おうとする場合、勾配として平均勾配ではなく前浜勾配を用いなければならない。

3. 砕波領域のうちあげ

進行波の場合の砕波点以浅の波の変形は、i) 運動エネルギーと位置エネルギーがともに砕波により逸散する過程、と ii) 運動エネルギーと位置エネルギーの変換が交互に生じるドライベッド上の swash 過程に分類できる。以下では、これら2つの過程において波高を接続することにより、うちあげ高さ、波打帯の幅を算定する。図-3に、以下で用いる記号の定義を示す。

(1) 砕波変形による波高減衰

一樣勾配斜面での砕波変形に関しては、佐々木・佐伯⁴⁾が平均的な波高減衰曲線を与えている。これによると、波高減衰は波形勾配によりあまり変化しない。また、 h/h_0 が 0.3 以下の範囲では、 H/H_0 が h/h_0 とともに直線的に変化し、その変化率 β は斜面勾配によらず 0.6 程度である。以上から、ドライベッド開始点まで砕波変形曲線が外挿できると仮定すると、うちあげ開始

* 正会員 工修 東北大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

$$\frac{R}{H_0} = \frac{1}{Z} \sqrt{\frac{\pi}{2s}}$$

$$\left(\frac{H_0}{L_0}\right)_{cr} = Z \sqrt{\frac{2s}{\pi}} \frac{m^2}{\pi}$$

J_0, J_1, N_0, N_1 : 0 次, 1 次のベッセル関数, ノイマン関数

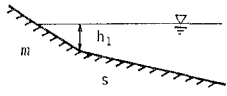
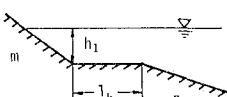
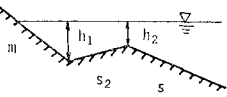
Profile	Value of coefficients
	$Z = \sqrt{\left(\frac{J_0(d)N_1(e) - J_1(d)N_0(e)}{J_0(e)N_1(e) - J_1(e)N_0(e)}\right)^2 + \left(\frac{J_0(d)J_1(e) - J_1(d)J_0(e)}{N_0(e)J_1(e) - N_1(e)J_0(e)}\right)^2}$ $d = \frac{2\sqrt{2\pi}}{m} \left(\frac{h_1}{L_0}\right)^{0.5} \quad e = \frac{2\sqrt{2\pi}}{s} \left(\frac{h_1}{L_0}\right)^{0.5} \quad L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2$
	$Z = \sqrt{\left(\frac{u N_1(e) - v N_0(e)}{J_0(e)N_1(e) - J_1(e)N_0(e)}\right)^2 + \left(\frac{u J_1(e) - v J_0(e)}{N_0(e)J_1(e) - N_1(e)J_0(e)}\right)^2}$ $u = J_0(d) \cos k l_b - J_1(d) \sin k l_b \quad d = \frac{2\sqrt{2\pi}}{m} \left(\frac{h_1}{L_0}\right)^{0.5} \quad e = \frac{2\sqrt{2\pi}}{s} \left(\frac{h_1}{L_0}\right)^{0.5}$ $v = J_1(d) \cos k l_b + J_0(d) \sin k l_b$
	$Z = \sqrt{\left(\frac{u N_1(q) - v N_0(q)}{J_0(q)N_1(q) - J_1(q)N_0(q)}\right)^2 + \left(\frac{u J_1(q) - v J_0(q)}{N_0(q)J_1(q) - N_1(q)J_0(q)}\right)^2}$ $u = J_0(p) \frac{J_0(d)N_1(e) - J_1(d)N_0(e)}{J_0(e)N_1(e) - J_1(e)N_0(e)} + N_0(p) \frac{J_0(d)J_1(e) - J_1(d)J_0(e)}{N_0(e)J_1(e) - N_1(e)J_0(e)}$ $v = J_1(p) \frac{J_0(d)N_1(e) - J_1(d)N_0(e)}{J_0(e)N_1(e) - J_1(e)N_0(e)} + N_1(p) \frac{J_0(d)J_1(e) - J_1(d)J_0(e)}{N_0(e)J_1(e) - N_1(e)J_0(e)}$ $d = \frac{2\sqrt{2\pi}}{m} \left(\frac{h_1}{L_0}\right)^{0.5} \quad e = \frac{2\sqrt{2\pi}}{s_2} \left(\frac{h_1}{L_0}\right)^{0.5} \quad p = \frac{2\sqrt{2\pi}}{s_2} \left(\frac{h_2}{L_0}\right)^{0.5} \quad q = \frac{2\sqrt{2\pi}}{s} \left(\frac{h_2}{L_0}\right)^{0.5}$

図-1 非一様勾配斜面上の碎波限界のうちあげ高さ (非碎波)

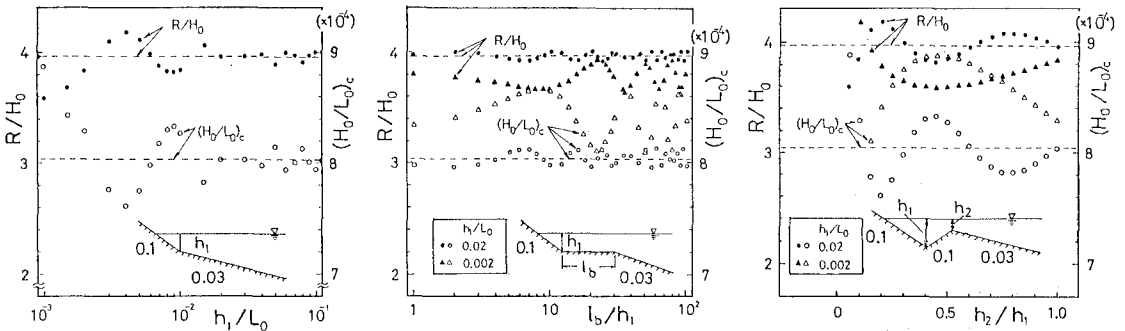


図-2 碎波限界のうちあげ高さ (非碎波) の計算例

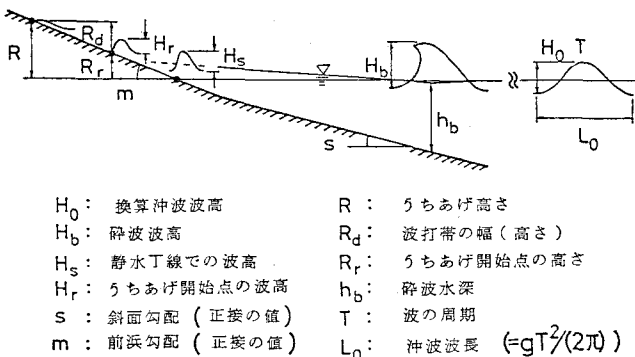


図-3 用いる記号の定義

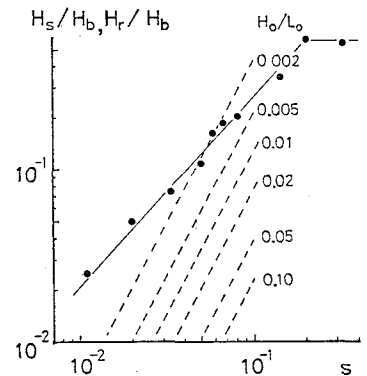


図-4 静水汀線の波高 H_s

点の静水面からの高さ R_r は次式で表わされる。

$$\frac{R_r}{h_b} = \frac{1}{\beta} \left(\frac{H_s}{H_b} - \frac{H_r}{H_b} \right) \quad (5)$$

佐々木・佐伯の結果および Roos・Battjes⁵⁾ の実験値によると、静水汀線の波高 H_s は 図-4 の黒丸印のように

表わされ、回帰式として次式を得る。

$$\frac{H_s}{H_b} = \begin{cases} 3.04s^{1.07} & \text{ただし } 0.01 < s < 0.2 \\ 0.55 & 0.2 < s \end{cases} \quad (6)$$

以上から、碎波点での波高 H_b と水深 h_b がわかれば、

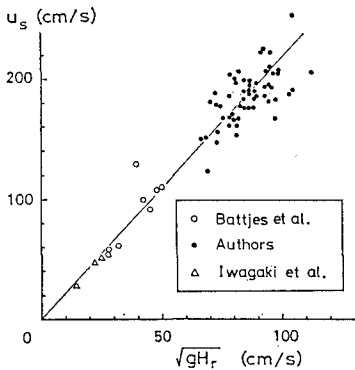


図-5 遡上開始点の流速と波高の関係

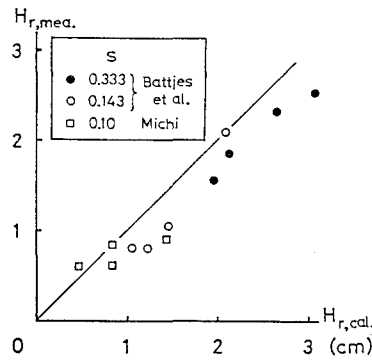


図-6 遡上開始点の波高

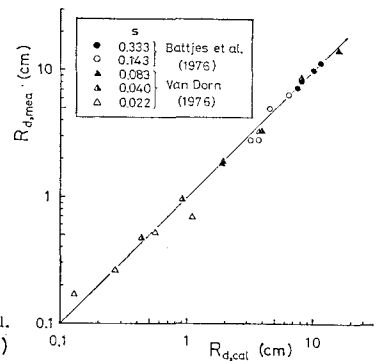


図-7 波打帯の幅

R_r が遡上開始点の波高 H_r の関数として表わされる。

非一様勾配斜面の碎波変形に関しては、現在のところ式(5)、(6)のような簡便な表示はなく、Mizuguchi⁶⁾の方法などにより数値計算を行なう必要がある。

(2) 波のうちあげ過程

遡上時の波先端軌跡 $x_f(t)$ は、Freeman・LeMéhauté⁷⁾によれば、次式で表わされる。

$$x_f(t) = u_s t - \frac{1}{2} g A m t^2 \quad (7)$$

$$A = \frac{1 + f/(a^2 \cdot m)}{(1 + 2a)(1 + a)} \quad (8)$$

ここで、 t : ドライベッド遡上開始時からの時間、 u_s : 汀線での稀薄波の流速、 a : 波先端での $c = \sqrt{g(h + \eta)}$ と水粒子速度 u の比 ($c = a \cdot u$)、 f : 摩擦係数 ($\tau_0 = \rho f u^2$)、である。岩垣ら⁸⁾の実験によると、 $m < 1/10$ の場合、 $a \approx 0.26$ 、 $f = 0.005 \sim 0.01$ (滑面) である。

次に、遡下時の波先端軌跡は Brandtzaeg⁹⁾ の解を式(7)に接続するように表わすと、

$$x_f(t) = \frac{u_s^2}{2gAm} - \frac{z}{f'} \ln \left\{ \cosh \sqrt{\frac{f'g(m - \tan \gamma)}{z}} \right. \\ \left. \times (t - \zeta T) \right\} \quad (f' \neq 0) \quad (9)$$

$$x_f(t) = \frac{u_s^2}{2gAm} - \frac{1}{2} g(m - \tan \gamma)(t - \zeta T)^2 \\ (f' = 0) \quad (10)$$

となる。ここで、 ζT : 最大遡上点に達する時間、 z : 遡下波の水の厚さ、 f' : 摩擦係数 ($\tau_0 = \rho f' u^2$)、 γ : 遡下波の水面と底面のなす角、である。 $f = f' = 0$ ($A = 1.0$) で、汀線での水面変動が直線的に減少するものと仮定すると、 $\zeta = 0.46$ となる。

u_s は、遡上開始点の波高 H_r により次のように表わされるものと仮定する。

$$u_s = F \sqrt{g \cdot H_r} \quad (F: \text{比例係数}) \quad (11)$$

図-5 は、著者の一人¹⁰⁾が以前に行なった単一の段波性の波の実験値 ($m = 1/20$)、岩垣らの孤立波の実験値 (m

$> 1/10$)、Roos・Battjes の規則波の実験値 ($m = 1/3$, $1/7$) から u_s と H_r の関係を調べたものである。ただし、規則波の場合 $\zeta = 0.46$ と仮定した。図によると比例係数 F は単一波、規則波いずれの場合も 2.2 程度となり、岩崎・富樫¹¹⁾の波先端条件とほぼ等しい。

式(7)、(11)から H_r 、 R_a は次のように表わされる。

$$H_r = g m^2 T^2 A^2 \zeta^2 / F^2 \quad (12)$$

$$R_a = g m^2 T^2 A \zeta^2 / 2 \quad (13)$$

図-6、7 は、式(8)、(12)、(13)による H_r 、 R_a の計算値と Roos・Battjes、道¹²⁾の実験値を比較したものである。ただし、 $F = 2.2$ 、 $f = 0.005$ 、 $\zeta = 0.46$ とした。また、 a は岩垣らによれば 0.26 程度であるが、これを用いると緩斜面上では計算値が過大となるため、便宜上以下のように表わした。

$$a = \begin{cases} 0.26 & 0.1 < m \\ 0.13 m^{-0.3} & 0.01 < m < 0.1 \end{cases} \quad (14)$$

図-7 と同様の議論は、Van Dorn¹³⁾が行なっているが、その場合、斜面勾配が急になると計算値が実験値の 2 倍程度となっている。また、式(12)、(13)は、 H_r と R_a が前浜勾配 m と周期 T により決まることを示している。 H_s との比較のため、後述の式(16)を用いて H_r/H_0 を求めた結果を図-4中に破線で示した。

(3) 一様勾配緩斜面上のうちあげ高さ

うちあげ高さ R は、上で求めた R_r と R_a の和として以下のように表わされる。

$$\frac{R}{H_0} = \frac{0.46}{\beta} s^{-0.12} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.2} \left\{ 3.04 s^{1.07} \right. \\ \left. - \frac{2.94 \pi \zeta^2 A^2}{F^2} m^{-0.15} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.75} \right\} \\ + \pi A \zeta^2 m^2 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1} \quad 0.01 < s < 0.1 \quad (15)$$

上式の右辺第一項は R_r/H_0 (set-up に相当) を、第二項は R_a/H_0 (波打帯の幅に相当) を表わしている。また、碎波水深、碎波波高と沖波諸量の関係は、合田¹⁴⁾と同じで

ータをもとに求めた次式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} \frac{H_b}{H_0} &= 0.68s^{0.09} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.25} \\ \frac{h_b}{H_0} &= 0.46s^{-0.12} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.20} \\ 0.01 &< s < 0.1 \\ 0.003 &< H_0/L_0 < 0.07 \end{aligned} \right\} \dots\dots(16)$$

一様勾配斜面 ($s=m$) について, $\beta=0.6$, $F=2.2$, $f=0.005$ および式 (14) の a を用いて算定される R/H_0 と, 道, Van Dorn, 榎木・岩田¹⁵⁾, Savage¹⁶⁾ の実験データおよび Hunt の式¹⁷⁾ を比較したのが 図-8 である。計算値は, Hunt の式に比べ, 緩斜面の場合 ($s<1/10$) の実験値を良く表わしている。

次に, R_r と R_d の割合を見るために, $s=1/10$, $1/30$, $1/90$ について各々の計算値を示したのが 図-9 である。斜面勾配が小さくなるに従い, あるいは波形勾配が大きくなるに従い R_r すなわち set-up の効果が增加するこ

とがわかる。

(4) 非一様勾配斜面へのうちあげ高さ

例として, 静水汀線で勾配の変化する場合のうちあげ高さを考える。 $R_r>0$ の場合は (15) 式を用いればよい。 $R_r<0$ の場合は次式により求まる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{R}{H_0} &= \frac{F^2}{2A_2} \cdot \left(\frac{H_r}{H_0} \right) - \frac{A_1}{A_2} s \cdot \left(\frac{x_1}{H_0} \right) \\ \frac{x_1}{H_0} &= -\frac{0.676}{\beta} s^{-1.21} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.05} \\ &\quad \times \left\{ 2.07s^{1.16} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.25} - \frac{H_r}{H_0} \right\} \\ 2\zeta \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/2} &= \frac{F}{A_{1s}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{H_r}{H_0} \right)^{1/2} \\ &\quad + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{A_1s - A_2m}{A_1A_2sm} \\ &\quad \times \sqrt{F^2 \left(\frac{H_r}{H_0} \right) - 2A_1s \left(\frac{x_1}{H_0} \right)} \end{aligned} \right\} \dots\dots(17)$$

ここで, $A_1, A_2: s, m$ に対して (8), (14) 式より求める A の値, x_1 : ドライブッド開始点と勾配変化点の水平距離 (>0) である。ただし, 式の誘導に際しては, 勾配変化点での波先端速度の連続性を仮定している。

上式の妥当性を調べるために, 豊島ら¹⁸⁾, Saville¹⁹⁾ の実験結果と比較したのが 図-10 である。図中の実線は (14), (17) 式による計算値, 破線は Saville の仮想勾配法による計算値である。いずれのケースも, 仮想勾配法による計算値は過小評価となる。これに対し, 本計算法では, 前浜勾配の変化に伴う砕波変形の変化を考慮していないにもかかわらず, 実験値と良く一致する。

4. おわりに

現実の自然海浜に見られる, 非一様でしかも緩勾配な斜面上での規則波の遡上を, 非砕波・砕波のそれぞれの場合について“波の変形を考慮する”という立場で論じ 図-1, 式 (15), (17) の算定式を得た。

部分重複波的な波の取扱ひ, 粗度の効果も含めたうちあげ過程の再検討, については残された課題である。

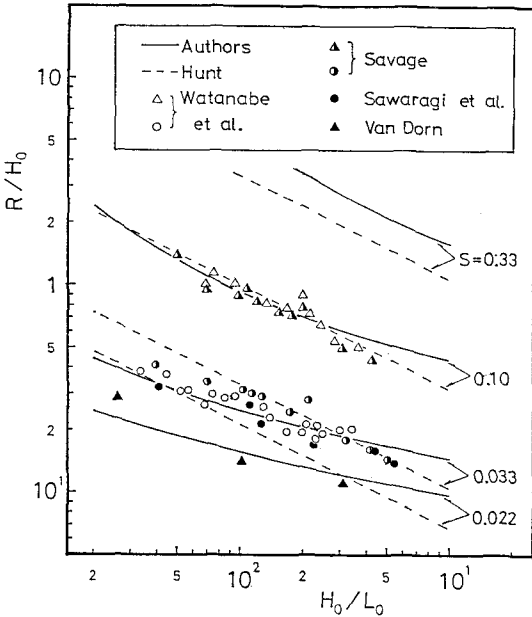


図-8 緩斜面上のうちあげ算定式と実験値の比較

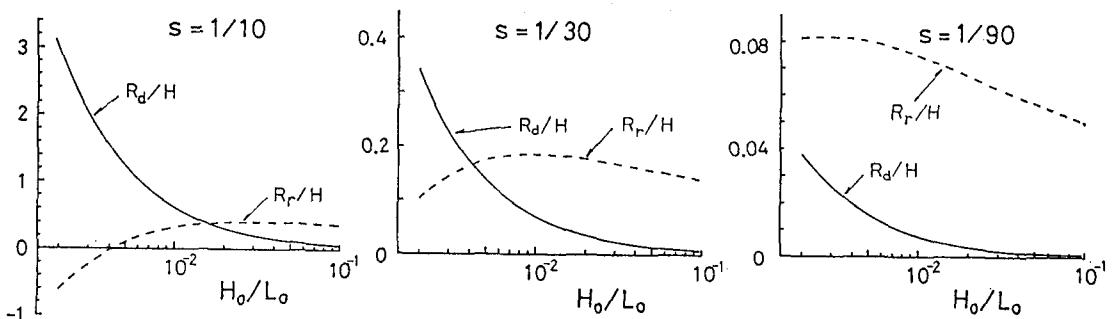


図-9 R_r/H_0 (set-up に相当) と R_d/H_0 (波打帯の幅) の比較

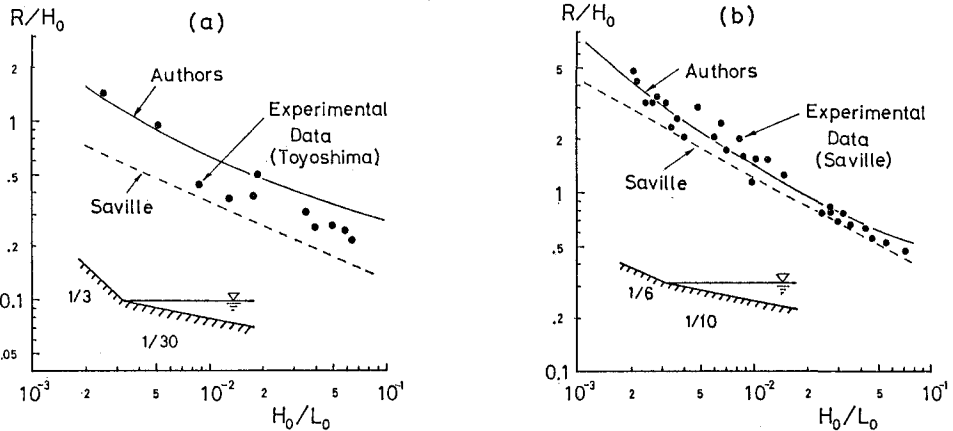


図-10 非一様勾配(複合)斜面のうちあげ算定式と実験値の比較

参考文献

- Shuto, N.: Standing waves in front of a sloping dike, Coastal Eng. in Japan, Vol. 15, pp. 13~23, 1972.
- Miche, R.: Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante, Annales des Ponts et Chaussées, 114e Année, 1944.
- Miche, R.: Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes exposés à l'action de la houle, Annales des Ponts et Chaussées, 121e Année, 1951.
- 佐々木幹夫・佐伯 浩: 砕波後の波の変形に関する研究, 第21回海講, pp. 39~44, 1974.
- Roos, A. and J. A. Battjes: Characteristic of flow in run-up of periodic waves, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., pp. 781~795, 1976.
- Mizuguchi, M.: An heuristic model of wave height distribution in surf zone, Proc. 17th Coastal Eng. Conf., pp. 278~289, 1980.
- Freemann, J. C. and B. LeMéhauté: Wave breakers on a beach and surges on a dry bed, Proc. A.S.C.E., Vol. 90, HY2, pp. 187~216, 1964.
- 岩垣雄一・井上雅夫・大堀晃一: のり面上の遡上機構に関する実験的研究, 第13回海講, pp. 198~205, 1966.
- Brandtzaeg, A.: A simple mathematical model of wave motion on a rubble mound breakwater slope, Proc. 8th Coastal Eng. Conf., pp. 444~467, 1964.
- 室井進次・首藤伸夫: 斜面上の波先端の軌跡, 昭和56年度東北支部発表会, pp. 103~104, 1982.
- 岩崎敏夫・富樫宏由: 遡上津波先端の条件と計算法, 第16回海講, pp. 359~364, 1969.
- 道 正典: Swash Zone の水理特性に関する研究, 東京大学工学部土木工学科修士論文, 1982.3.
- Van Dorn, W. G.: Set-up and run-up in shoring breakers, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., pp. 738~751, 1976.
- 合田良実: 砕波指標の整理について, 土木学会論文集, 第18号, pp. 39~49, 1970.
- 樺木 亨・岩田好一郎・森野彰夫: 緩斜面上への波の遡上特性について, 第23回海講, pp. 164~169, 1976.
- Savage, R. P.: Wave run-up on roughened and permeable slopes, Proc. A.S.C.E., Vol. 84, WW3, pp. 1640-1~1640-8, 1958.
- Hunt, I. A.: Design of seawalls and breakwaters, Proc. A.S.C.E., Vol. 85, WW3, pp. 123~152, 1959.
- 豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏: 海岸堤防への波のうちあげ高—海底勾配 1/30—, 第11回海講, pp. 260~265, 1964.
- Saville, T. Jr.: Wave run-up on composite slopes, Proc. 6th Coastal Eng. Conf., pp. 691~699, 1958.