

複雑な海浜断面に対する碎波後の 波の打ち上げ高について

備アイ. エヌ. エー新土木研究所 正会員 山本 吉道

1. まえがき

近年、海洋性レクリエーションが注目され、人工リーフ、人工海浜などが、各地で設置されるようになってきたが、これらの構造物を計画する際に、海岸堤防への波の打ち上げ高の把握が必要となる場合が多々在る。しかし、複雑になる海浜断面に対して、碎波後の波の打ち上げ高を合理的に精度良く求められる、一般的な算定式はほとんど無く、この算定を少しでも可能とするための研究を行った。

2. 既往研究

一様勾配断面への波の打ち上げ高についての研究は以前から数多く在り、Stokerや Freeman・Mehaute¹⁾ の理論的研究、Hunt²⁾、豊島・首藤・橋本³⁾、高田⁴⁾ の実験的研究がよく知られており、波の不規則性を考慮した研究も進んでいるが、複雑な海浜断面への打ち上げ高、特に、碎波後については数少なく、よく用いられているものは Saville⁵⁾ や中村・佐々木・山田⁶⁾ による複合断面に対する実験的研究程度である。

Freeman・Mehaute¹⁾ は、孤立波が碎波した後、段波となって斜面を遡上する現象を、特性曲線法で解き、打ち上げ高 (R) が次式で表されることを示した。

$$R = \frac{(1+a)(1+2a)}{1+(f/\tan\alpha)a^2} \cdot \frac{Us^2}{2g} \quad (1)$$

ここに、Us ; 汀線上の水粒子速度、a ; $\sqrt{g\eta s} \cos \alpha / Us$ で定義される係数、 ηs ; 汀線位置での平均水位上昇量、g ; 重力加速度、f ; 海底摩擦係数、 α ; 海底勾配の角度である。

上記に代表される理論的研究では、碎波を段波として取り扱うことに疑問があり、また、前に遡上した波の影響が無視されている。これに対して、Hunt²⁾ や豊島・首藤・橋本³⁾ や高田⁴⁾ による実験式が在る。

しかし、これらはどれも一様勾配断面に対するものであり、碎波後の複合断面に対しては、(2) 式で定義された仮想海底勾配と波形勾配で実験データを整理した、Saville⁵⁾ の打ち上げ高算定図か、(3) 式で定義された改良仮想海底勾配と波形勾配で整理した、中村・佐々木・山田⁶⁾ の算定図を用いる方が良い。

$$\tan \alpha = (R + hb) / L_{rb} \quad (2)$$

ここに、hb ; 碎波水深、 L_{rb} ; 遡上波先端位置から碎波位置までの水平距離である。

$$\tan \alpha = (R + hb)^2 / 2A \quad (3)$$

ここに、A ; 遡上波先端位置から碎波位置までの海底地盤において、碎波水深より上の部分の断面積である。ただし、Saville⁵⁾ や中村・佐々木・山田⁶⁾ の算定方法では、(2)、(3) 式で仮定した打ち上げ高と算定図から求まる打ち上げ高が一致するまで、繰り返し計算しなければならない。また、Saville⁵⁾ の方法には次のような特徴がある。

- ① 遡上波先端位置から碎波位置までの海底断面の中間の凸凹の違いが考慮出来ない。
- ② 仮想海底勾配が緩い場合、打ち上げ高が実際より低めに算出される。

3. 研究内容

3. 1 中村等の算定図の定式化

波の場の電算プログラムと結び付けて、高速処理化するために、中村等⁶⁾ の算定図から実験式を求め、かつ、自然海岸と緩傾斜堤への適応性を調べる。

波の打ち上げ高は、エネルギー保存則から、次のように表せる。

$$R = (1-k) \cdot \frac{Us^2}{2g} \quad (4)$$

ここに、k ; 海底摩擦等による損失係数である。

岩垣等⁷⁾ や小川等⁸⁾ の研究を参考に、上式の Us に対して (5) 式を仮定すれば、(6) 式を得る。

$$Us = C \sqrt{g\eta s} \cos \alpha \quad (5)$$

$$R = 0.5(1-k) C^2 \eta s (\cos \alpha)^2 \quad (6)$$

ここに、C ; 係数である。

次に、(7) 式で表される浅い海域での水平方向の運動量方程式に、(8) 式で定義した波高水深比 (r) を

代入して、 η_s と碎波諸元の関係を求めれば、(9) 式を得る。

$$\frac{3}{8} H \frac{dH}{dx} = - (h + \eta) \frac{d\eta}{dx} \quad (7)$$

$$r = H / (h + \eta) \quad (8)$$

ここに、 H ; 波高、 h ; 水深、 η ; 平均水位上昇量である。

$$\eta_s = \frac{\frac{3}{8} r_b + \frac{1}{r_b}}{\frac{3}{8} r_s + \frac{1}{r_s}} \eta_b + \frac{\frac{3}{8} r_b}{\frac{3}{8} r_s + \frac{1}{r_s}} h_b \quad (9)$$

ここに、 r_b および r_s ; 碎波位置および汀線位置での r 、 η_b および h_b ; 碎波位置での η および h である。また、Longuet-Higgins・Stewart⁹⁾ によると、浅い海域では (10) 式が近似的に成り立つ。

$$\eta_b \approx - r_b H_b / 16 \quad (10)$$

ここに、 H_b ; 碎波波高である。

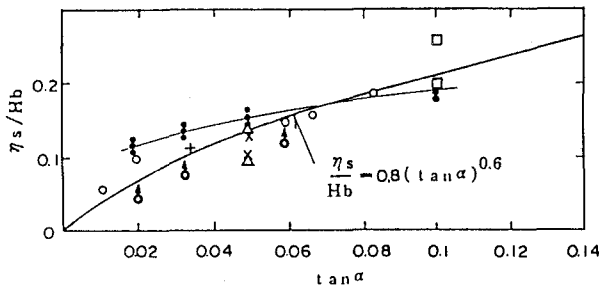
(8) ~ (10) 式より、 η_s は (11) 式のような関係を有する。

$$\eta_s = f(r_s, r_b) \cdot H_b \quad (11)$$

そして、 $f(r_s, r_b)$ は、 η および H の差分を $\Delta \eta$ および ΔH で表したときに、(7) 式から得られる関係 $r = (8/3) \cdot (\Delta \eta / \Delta H)$ より、ほぼ地形変化によって決定される値であると考えられる。

今、既往論文で公表されている実験および現地観測データを用いて、 η_s / H_b を $\tan \alpha$ で整理すれば、図-1 のようになり、(12) 式を得る。なお、実験および現地観測データを用いたことによって、前に入射した波の影響と汀線より海側の海底摩擦の影響が、(12) 式の中に含まれたと考えられる。

$$\eta_s = 0.8 (\tan \alpha)^{0.6} H_b \quad (12)$$



- ; 改訂海岸保全施設築造基準解説の理論値
- ; 佐々木等の実験値 (固定床)
- × ; 丸山等の実験値 (大型移動床)
- +
- ; 堀田等の現地観測値
- ; 水口等の実験値 (固定床)
- △ ; 佐藤等の実験値 (固定床)
- ⊙ ; 堺等の実験値 (固定床、ただし、汀線上でなく、汀線近くの値であるから、真値は多少大きいと考えられる)

図-1 η_s / H_b と $\tan \alpha$ の関係

この (12) 式を (6) 式へ代入すれば、(13) 式が得られる。

$$R = 0.4 (1 - k) C^2 (\cos \alpha)^2 (\tan \alpha)^{0.6} H_b \quad (13)$$

ここに、 $\tan \alpha$; 中村等の改良仮想海底勾配である。

さらに、砂村等¹⁰⁾ が求め、水口等が現地海岸に適用した H_b と H_o の関係 (14) 式を用いて、(13) 式と中村等の算定図を対比させた結果、(15) 式を得た。

$$H_b = (\tan \alpha)^{0.2} (H_o / L_o)^{-1/4} H_o \quad (14)$$

$$\frac{R}{H_o} = K (\cos \alpha)^2 (\tan \alpha)^{0.8} \frac{H_o}{L_o}^{-1/4} \quad (15)$$

$$K = 0.4 (1 - k) C^2 = 1.25 / (\tan \alpha)^{0.2} \quad (16)$$

($1/3 \leq \tan \alpha \leq 1/50$)

(15) 式と中村等の算定図との相関を図-2 に示す。

また、宇多等¹¹⁾ の自然海岸に対する実験データとの比較を図-3 に、豊島¹²⁾ の緩傾斜堤海岸に対する実験データとの比較を図-4 に示す。何れの相関係数も低くなく、実用に耐えうると判断される。

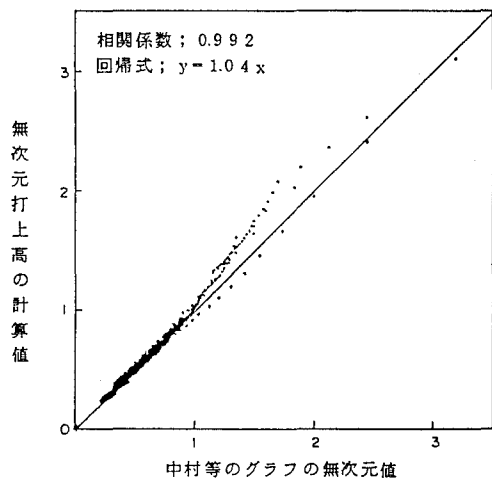


図-2 実験式と中村等の算定図との相関

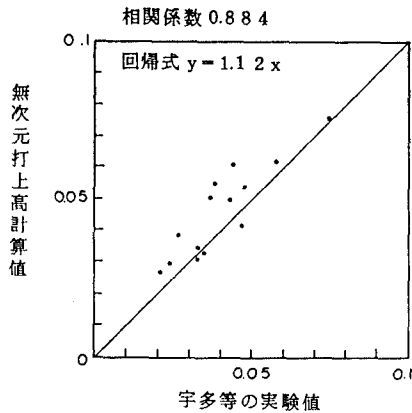


図-3 実験式と自然海岸に対する実験値との相関

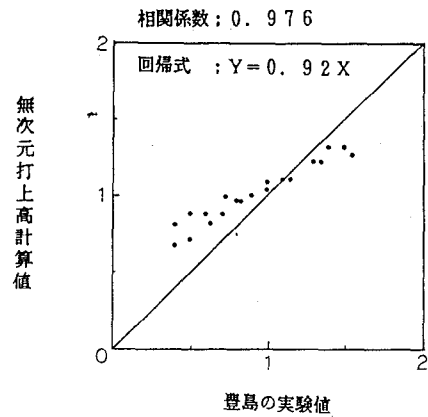


図-4 実験式と緩傾斜堤に対する実験値との相関

なお、既往論文で公表されている実験および現地観測データを用いて、 H_s を H_b で整理すれば、図-5 のようになり、 H_s は近似的に (17) 式で表される。

$$H_s = 1.9(\tan \alpha)^{0.9} H_b \quad (17)$$

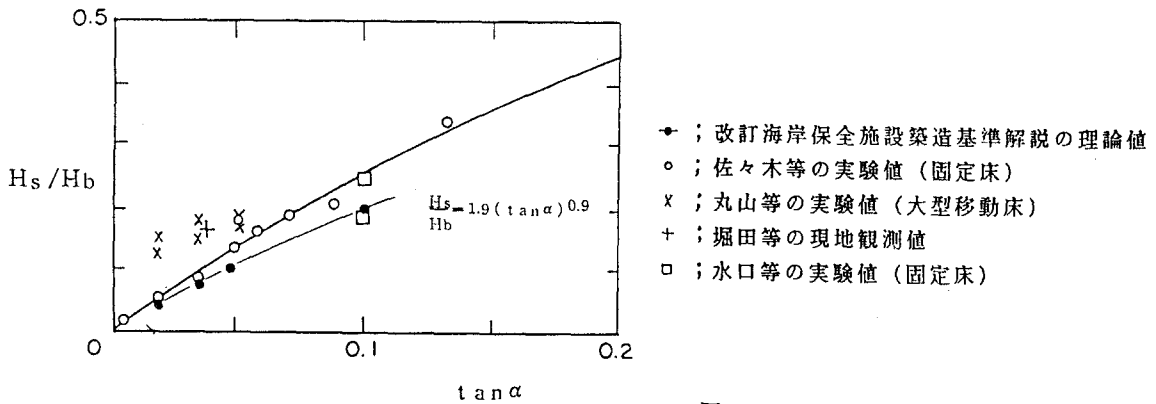


図-5 H_s / H_b と $\tan \alpha$ の関係

そして、汀線位置での波高水深比は、(12)、(17) 式から、(18) 式で表される。

$$r_s = 2.4(\tan \alpha)^{0.3} \quad (18)$$

これは、合田¹³⁾ の砕波限界波高の実験データから得られる (19) 式と比較して、妥当な式と判断される。

$$r_b = 1.9(\tan \alpha)^{0.3} / (h_b / L_o)^{0.05} \quad (0.001 \leq h_b / L_o \leq 0.05) \quad (19)$$

ここに、 L_o ; 沖波波長である。

3. 2 沖合構造物の在る海岸への適用

消波構造物設置による波高減衰が、汀線上の平均水位の減少に必ずしも結びつかないので、打ち上げ高への影響を単純には論じられない（周期も一般に短く成るが、前記の2つの変数に比べて影響小と考え無視する）。

(1) 砕波位置より沖に構造物がある場合

構造物通過後の波浪諸元を、添え字 (r) を付けて表す。今、構造物の無い場合と在る場合の砕波波高を近似的に (20)、(21) 式のように表すと、(22) 式の関係を得る。

$$H_b \approx r_b h_b \approx (h_o / h_b)^{1/4} H_o \quad (20)$$

$$H_{rb} \approx r_{rb} h_{rb} \approx (h_o / h_{rb})^{1/4} k_r H_o \quad (21)$$

ここに、 h_o ; 沖波の水深、 k_r ; 構造物背後への波高伝達係数（透過率と回折係数の合成係数）である。

$$H_{rb} \approx (h_b / h_{rb})^{1/4} k_r H_b \quad (22)$$

また、(20)、(21) 式および (19) 式から、近似的に (23) 式が得られる。

$$(h_b / h_{tb}) \approx (\tan \alpha_T / \tan \alpha)^{6/25} (1/k_T)^{4/5} \quad (23)$$

(22) 式へ (23) 式を代入すれば、(24) 式が得られる。

$$H_{tb} \approx (\tan \alpha_T / \tan \alpha)^{3/50} (k_T)^{4/5} H_b \approx k_T H_b \quad (24)$$

$\tan \alpha_T / \tan \alpha$ が 2 程度以下の場合は、(25) 式が近似的に成り立ち、その場合には、(26) 式、さらには、(27) 式が得られる。

$$h_{tb} \approx k_T h_b \quad (25)$$

$$\eta_{tb} \approx k_T \eta_b \quad (26)$$

$$\gamma_{tb} \approx \gamma_b \text{ さらに } \gamma_{Ts} \approx \gamma_s \quad (27)$$

(9) 式に (25) ~ (27) 式を代入すれば、(28) 式が得られる。

$$\eta_{Ts} \approx k_T \eta_s \quad (28)$$

(6) 式において、上記の関係と、 k および C は沖の構造物によってほとんど変化しないことを考え合わせるならば、砕波位置より沖に構造物がある場合の打ち上げ高 (R_T) は (29) 式から求められることになる。

$$R_T / H_o \approx k_T R / H_o \quad (29)$$

建設省土木研究所での離岸堤に対する実験データ¹⁴⁾ との比較を図-6 に示す。

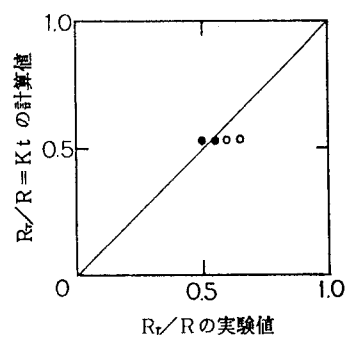


図-6 砕波位置より沖に構造物がある場合の実験式と実験値との比較

(2) 砕波位置より岸に構造物がある場合

この場合は、(9) 式の γ_s か、(6) 式の C あるいは k が変化すると考えられる。

特に、人工リーフの場合は、改良仮想勾配 ($\tan \alpha$) が小さくなり、(18) 式と (9) 式を用いた若干の試算から、 γ_s の通常の範囲 (1.6 以下) 内では、 η_s も小さくなることが判る。今、人工リーフも海底地形の一部と見なして打ち上げ高 (R) を求め、人工リーフと砂層との粗度の違いによる影響を k_T で評価できると考えて、宇多等¹¹⁾ の実験データを用いて補正すれば、(30) 式を得る。

$$R_T / H_o \approx 1.16 k_T^{3/4} R / H_o \quad (30)$$

ここに、 k_T ; 波高の通過率である。

宇多等¹¹⁾ の実験データとの比較を図-7 に示す。

ただし、 k_T が粗度の違いによる影響を表すパラメータであると考えられるのは、人工リーフの天端水深に対して、入射波高が同程度か小さい場合である。入射波高が大きくなると、強制砕波による要素が強くなるので、人工リーフの影響は、(15) 式に対して、 H_o の代わりに $k_T H_o$ を用いることによって求められる、と考えた方が合理的であろう。また、 k_T は、天端幅や天端水深が同じであっても、表のり勾配や材料の大きさによっても、大きく違ってくるので、注意を要する。

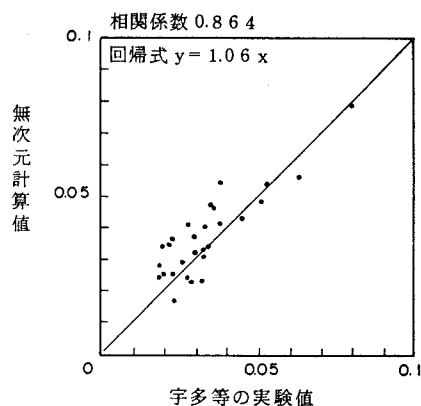


図-7 人工リーフ設置時の実験式と実験値との相関

4. むすび

(6)、(9) 式を基礎として得られた (15)、(29) および (30) 式を用いることによって、複雑な海浜断面に対する砕波後の波の打ち上げ高の算定が、ある程度合理的に行えることが判った。そして、富永¹⁵⁾ の越波量算定式 (越波量を打ち上げ高と天端高の差の関数と見なしている) と組み合わせることによって、越波量を求めることも可能となる。ただし、この算定式による越波量を天端高の検討に用いる場合は、実験データのバラ付きおよび波の不規則性を考慮して、数倍程度大きくするのが望ましい (二・三の実験結果や高山等¹⁶⁾ の越波流量算定式による幾つかの海浜断面に対する検討では 4 倍程度が適当であった)。

今後は、越波量の算定、波の不規則性の考慮へと研究を進めていく予定である。

最後に、この研究に対して惜しめない理解と援助を賜った前部長代理桜本弘氏、現部長宮崎洋三氏に謝意を表するとともに、実験データの使用を許可していただいた建設省土木研究所海岸研究室長宇多高明氏、研究員小俣篤氏および東海大学教授豊島修先生に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) Freeman, J.C. and Le-Mehaute, B. ; Wave Breakers on a Beach and Surges on a Dry Bed, Proc. ASCE, Vol. 90, No. HY2, pp. 187~216, 1964.
- 2) Hunt, I. A ; Design of Seawalls and Breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 85, No. WW3, pp. 123~152, 1959.
- 3) 豊島修・首藤伸夫・橋本宏；海岸堤防への波のうちあげ高，土木学会第11回海岸工学講演会講演集，pp. 260~265, 1964. および第12回海岸工学講演会講演集，pp. 180~185, 1965.
- 4) 高田彰；規則波の打上げ高および越波量の定式化について，土木学会第22回海岸工学講演会論文集，pp. 378~386, 1975.
- 5) Saville, T. Jr ; Wave Run-up on Composite Slopes, Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., 1958.
- 6) 中村充・佐々木泰雄・山田譲二；複合断面における波の打上げに関する研究，土木学会第19回海岸工学講演会論文集，pp. 309~312, 1972.
- 7) 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，土木学会第13回海岸工学講演会講演集，pp. 198~205, 1966.
- 8) 小川由信・首藤伸夫；非一様緩斜面上への規則波のうちあげについて，土木学会第31回海岸工学講演会論文集，pp. 88~92, 1984.
- 9) Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart ; Radiation Stress and Mass Transport in Gravity Waves, with Application to Surf Beats, J. Fluid Mech., Vol. 13, pp. 481~504, 1962.
- 10) Sunamura, T. and Horikawa, K. ; Two-Dimensional Beach Transformation due to Waves, Proc. 14th ICCE, p. 920~938, 1974.
- 11) 宇多高明・田中茂信・筒井保博；人工リーフによる波浪と漂砂の制御，土木学会第31回海岸工学講演会論文集，pp. 340~344, 1984.
- 12) 豊島修；緩傾斜護岸工法，土木学会第34回海岸工学講演会論文集，pp. 447~451, 1987.
- 13) 合田良実；砕波指標の整理について，土木学会論文報告集，第180号，pp. 39~49, 1970.
- 14) 青森海岸離岸堤消波効果検討実験，建設省土木研究所資料第2219号.
- 15) 富永正照；海岸堤防の水理に関する研究，建設省土木研究所資料第766号, 1972.
- 16) 高山知司・永井紀彦・西田一彦；各種消波工による越波流量の減少効果，運輸省港湾技術研究所報告第21巻第2号，pp. 151~205, 1982.