

越波計算における波の波群性の重要性和その工学的な評価法

山本吉道*・山路功祐**・浅野 剛***

1. 研究の目的

波の打ち上げ高を公的な基準書の類に従って算定すると、統計処理した結果でも実測値と一致しない場合がしばしば有る。その原因には、風の影響を無視したこと、高波時の海岸断面形状を測定できなかったことなどもあり得るが、波の波群性を考慮していないことも考えられる。公的な基準書に紹介されている打ち上げ高の算定法はほとんど全て規則波によるものである。また、不規則性を考慮する場合でも、個々の波による打ち上げ高を求めて、波の確率分布関数に従って合成するだけの場合が多い。しかし、実際には、岩田(1982)や山本・谷本(1994)などが指摘しているように、海底勾配が緩くなるほど波の長周期化が進み、個々の波の打ち上げ高の算定だけでは対応できなくなる。本研究は、その機構を解明し、工学的な対処法を提案するために行われた。

2. 既往の波の打ち上げ高算定法

a) 主な既往算定法の特徴

複断面堤防や養浜工などによって、複雑になっている海岸断面への打ち上げ高の算定法としては、浅海長波方程式を用いた数値モデルの適用が考えられるが、労力の割に精度が良くないことから、「改訂海岸保全施設築造基準解説」(海岸保全施設築造基準連絡協議会, 1987)などで紹介されている、サビールの仮想勾配法や中村等の改良仮想勾配法が良く用いられている。しかし、サビールの仮想勾配法では100%, 中村等の改良仮想勾配法はかなりの割合で、その算定図作成の際に規則波実験値が用いられている。すなわち、これらの算定法も波の不規則性が考慮されていないと言える。

b) 長周期波の遡上モデル

海底勾配が緩い場合は、長周期化した遡上波になることが、岩田(1982)や山本・谷本(1994)などによって指摘されており、この場合に対する遡上モデルとして、以下にYamamotoら(1994)の数値モデルを紹介する。

波群に対応して変化する radiation stress を外力として、浅海長波の運動方程式に組み込んだ次式を、基本式として採用している。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{q^2}{h + \xi} \right] + g(h + \xi) \frac{\partial \xi}{\partial x} &= \dots\dots\dots (1) \\ + \frac{1}{\rho} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{f}{(h + \xi)^2} q |q| &= 0 \end{aligned} \right\}$$

ここに、 ξ は静水面からの水位、 q は線流量〔=平均水平流速 $\times(h + \xi)$ 〕、 h は静水面からの水深、 t は時間、 x は岸沖方向の座標、 S_{xx} は radiation stress、 g は重力加速度、 f は海底摩擦係数である。

式(1)を leap-frog 法により差分化するが、運動方程式の水位 ξ に関しても非線形であり、これによる計算の不安定性を極力弱めるために、C.F.L.条件以外に、格子間隔 Δx = (水深1m位置での長周期波波長 $\div 30$)とし、さらに後藤(1983)の人為数値拡散項を連続の式の右辺に加えている。

また、海底摩擦係数の算定には山本・谷本ら(1994)による細砂海岸を対象とした次式を用いている。ただし、次式の適用範囲は平均海底勾配 $\leq 1/30$ である。

$$\left. \begin{aligned} f &= \left\{ \frac{(1 + C_u)(1 + 2C_u)}{(1 - K)} - 1 \right\} i C_u^2 \\ C_u &\doteq 24.2 \, i^{19/30} (H_{om}/L_{om})^{1/4} \\ 1 - K &\doteq 2221 \, i^{22/15} (H_{om}/L_{om})^{1/4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

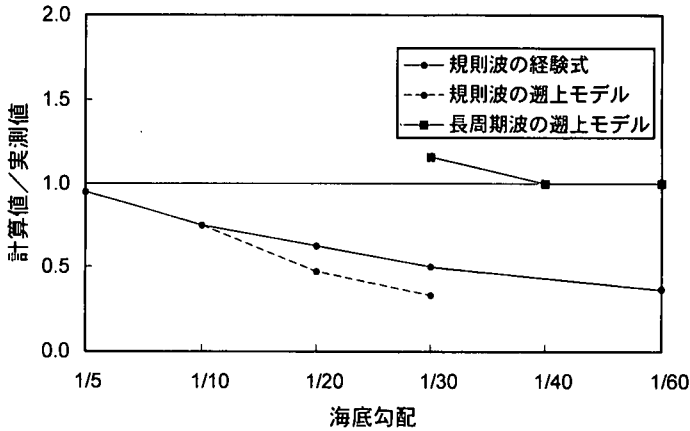
ここに、 C_u は汀線位置での波速と最大流速との比、 K は係数、 i は碎波位置から遡上先端間の平均海底勾配、 H_{om} と L_{om} は沖波の平均波高と平均波長である。

そして、沖境界条件には日野・仲座(1988)の条件式を用い、radiation stress の計算には間瀬・松本ら(1986)のモデルを応用し、これによる算定値の60%の値を用い、波群の入射には、正弦関数で近似した山本・谷本ら(1994)による次式を用いた。

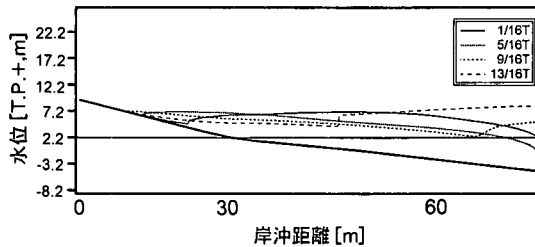
$$H_o = H_{om} - a_H \sin(2\pi t/T_L) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 H_o は沖波波高、 a_H は波高の変動振幅(長周期波の平均波高に対応する a_H は $0.50H_{om}$)、 T_L は長周期波の

* 正会員 工博 (株)アイ・エヌ・エー 海岸環境部
 ** 正会員 工修 同上
 *** 同上



図一1 波の打ち上げ高の実測値と各計算値の比較



図一2 海底勾配 1/11 から 1/4 の緩傾斜堤になる海岸での遡上計算例

周期で山本・谷本 (1994) による経験式を用いれば良い。

3. 算定法の改良

a) 既往の算定法による実測値との比較

間瀬・土居ら (1983) は不規則波による実験を行っており、加藤 (1990) は砕波帯の平均海底勾配 1/60 の海岸で現地測定を行っている。これらの実測データを用いて、既往の算定法による計算値との比較を行う。ただし、加藤は次に示す最大遡上高 R_{max} の関係式のみを求めており、変形して得られる式 (5) による値を実測値と見なして用いた。

$$R_{max} \cong 0.96 H_{LS1/3} + 0.13 H_{01/3} \\ + (\text{通常波の遡上高}) \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに、 $H_{LS1/3}$ は surf beat の汀線での有義波高、 $H_{01/3}$ は通常波の有義波高である。

ここで、山本・谷本 (1994) による経験式を式 (4) に代入し、次に、加藤 (1990) の実測データによると、通常波の遡上高は $H_{01/3} \cong 3$ m に対して 0.31 m であるから、これを代表的に用いれば、打ち上げ高の有義値 ($R_{1/3}$) と平均値 (R_m) に対して次式を得る。

$$R_{1/3}/H_{01/3} \cong 1.5 R_m/H_{01/3} \\ \cong 0.020 (H_{01/3}/L_0)^{-1/2} + 0.181 \quad \cdots \cdots (5)$$

上記の実測値と計算値との比較結果を図一1 に示す。図一1の規則波による経験式は中村らの改良仮想勾配法による結果であり、規則波による遡上モデルは、式 (1) で radiation stress を除き、海底摩擦係数に柿沼・伊福 (1985) の式を用い、沖境界から砕波後の水位変動 ($= H_0/\sin(2\pi/T) + H_0/6$; H_0 は砕波後の波高で砕波位置から砕波帯幅の 30% の位置の波高、 T は周期) を入力させて計算した結果 (平均波高 2 m, 平均周期 10 s) であり、長周期波による遡上モデルは、式 (1) ~ (3) による数値モデルを用いた波群性を有する波 (平均波高 2 m, 平均周期 10 s, 長周期波周期 100 s) の結果である。

本図から、規則波による算定法は、海底勾配が緩くなるほど実測値と合わなくなり、海底勾配が 1/30 より緩やかになれば、波群性を考慮した方が良いことが認められる。図一2 は規則波による遡上モデルを用いた計算例であり、参考までに載せておく。

さて、何故、海底勾配が緩やかになると、このように合わなくなるのか考察してみる。

海底が緩くなるほど、個々の波は沖合で消波して、岸に到達する波は小さくなるが、長周期波は減衰することなく岸に到達する。そして、実際の海の波は不規則性を有しており、海底勾配が緩くなると、遡上波が長周期化

表一 各種波による越波実験結果 (海底勾配 1/30)

Wave type & No.	H_{om} (cm)	T_{om} (s)	Q_1 (cm ³ /cm/sec)	Q_2 (cm ³ /cm/a long wave)	Q_2/Q_1
Regular wave 1	5.48	1.31	0.049	—	—
Regular wave 2	6.57	2.07	0.081	—	—
Regular wave 3	6.77	1.34	0.055	—	—
Irregular wave 1	4.18	1.12	0.799	5.49	6.9
Irregular wave 2	4.02	1.46	0.695	11.94	7.0
Irregular wave 3	4.48	1.09	1.053	8.71	8.3
Beat wave 1	4.11	1.28	0.312	3.95	12.7
Beat wave 2	4.85	1.12	0.760	5.37	7.1
Beat wave 3	4.35	1.97	2.470	74.11	30.0
Beat wave 4	4.58	1.30	2.169	20.02	9.2
Beat wave 5	4.48	1.21	1.859	12.75	6.9
Beat wave 6	4.28	1.24	1.426	10.07	7.1
Beat wave 7	4.84	1.11	0.972	6.66	6.9
Beat wave 8	4.68	1.33	0.564	9.66	17.1
Beat wave 9	4.27	1.92	2.460	73.79	30.0
Beat wave 10	6.04	1.34	0.027	0.43	15.9
Beat wave 11	7.20	1.33	0.067	1.15	17.2
Beat wave 12*	7.20	1.33	0.567	8.01	14.1

* : 水深を 1 cm 上げている。

することが報告されている (例えば, 山本・谷本, 1994)。さらに, 海の波を良く観測すると, 前後の波に相関がまったく認められないわけではなく, 大きな波がある程度規則的に来襲するという波群性を有している。この波群性に起因した長周期波 (数十秒～数分の波で surf beat あるいは infragravity waves と呼ばれる) は砕波帯内で顕在化し, ほとんど砕波することなく汀線付近で最大となる。一方, 通常周期の波は, 海底勾配が緩くなるほど, 沖合で砕波して減衰し, 汀線付近で相当に小さくなるため, この長周期波が波の遡上に及ぼす影響は相対的に大きくなる。特に, 砕波帯内の平均海底勾配が 1/20 程度より緩い場合の遡上波は長周期波成分の卓越したものとなり, 通常周期の波に注目した従来の算定法では打ち上げ高が過少評価されると考えられる。それゆえ, 平均海底勾配が 1/30 程度より緩い場合には, 長周期波に対する遡上モデルの方が良く合うようになる。

また, 仲座・津嘉山ら (1991) は, リーフ海岸では長周期波の影響が強く, 従来の越波量算定法では, 値を過小評価することを指摘しているが, 類似の問題は一般の緩勾配海岸でも生じる。海底勾配 1/30 のモデル海底に対して波群性を有する波の越波量を水理模型実験から求めると, 表一に示すようになった。ここで, 数十分間の平均値 Q_1 は, 合田・岸良ら (1975) の算定図から求める値と大差ないが, 長周期波 1 波当たりの越波量 Q_2 は, Q_1 の

30 倍になる場合もあり, これだけの越波量が長周期波の水位が高くなっている期間に集中的に生じることを考えるならば, 海底勾配が緩い海岸での許容越波量による護岸天端高の決定の際には十分な注意が必要である。

b) 実用的な算定法

波群性を有する波の打ち上げ高は, radiation stress を考慮した数値モデルか, 高次の長波方程式を解く数値モデルによれば良いと考えられるが, ここでは簡便で実用的な取扱として, 長周期波の汀線位置での波高の半分を水位に考慮して, 従来の規則波による算定法を用いることを提案する。すなわち, 長周期波の水位変動の上位 1/3 の平均値と長周期波による set up 量の和ほど, 水位が高くなっていると仮定した。

Surf beat の有義波高 $H_{L1/3}$ は, 山本・谷本 (1994) によると次式で表される。

$$\frac{H_{L1/3}}{H_{01/3}} = \frac{0.066(\tan \beta)^{1/6}}{[(H_{01/3}/L_0) \times (1 + h/H_{01/3})]^{1/2}} \dots \dots (6)$$

$$(1/10 \geq \tan \beta \geq 1/70)$$

式 (6) において, 水深 h を 0 として求められた surf beat の有義波高の半分を, 水面上昇量に等しいと考えて潮位に加えて, 中村らの改良仮想勾配法を用いて打ち上げ高の有義値を求めるものとする。この方法による算定値と前出の間瀬・土居ら (1983) の海底勾配 1/30, および加藤 (1990) の海底勾配 1/60 のデータとの比較を図一3に

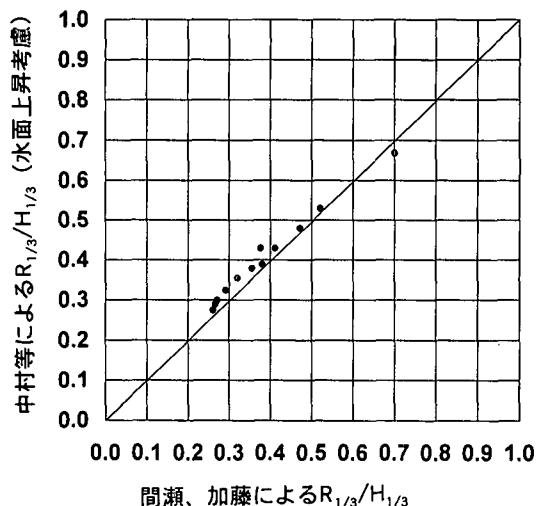


図-3 簡便法による計算値と実測値の比較

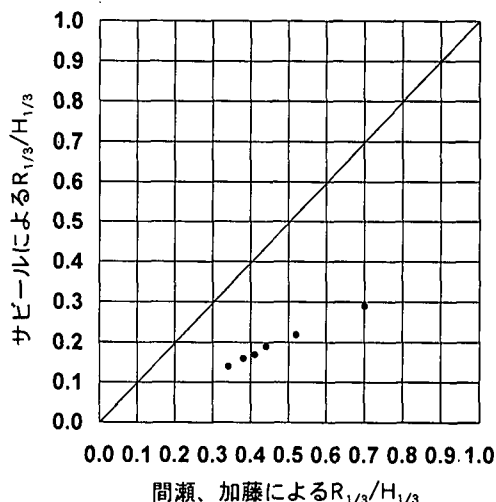


図-5 サビールの算定法による計算値と実測値の比較

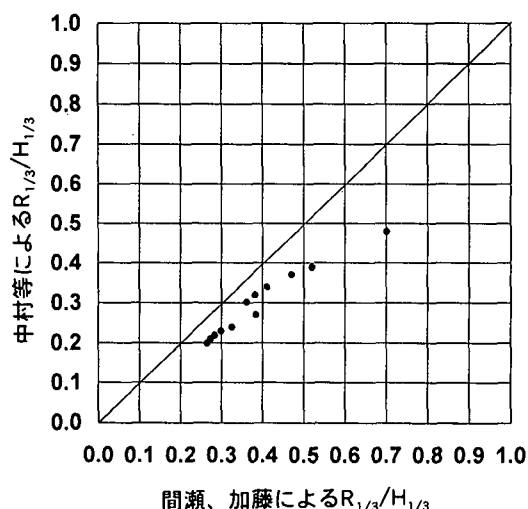


図-4 中村らの算定法による計算値と実測値の比較

示す。また、中村らの改良仮想勾配法のみによる比較を図-4に、サビールの仮想勾配法のみによる比較を図-5に示す。これらの図の比較から、この簡便法により計算値が相当に改良されたことがわかる。

4. 主要なまとめ

- i) 海底勾配が1/10より緩やかになると、規則波による算定法では打ち上げ高を過小評価するようになるので、波群性を考慮した算定法を用いるべきである。
- ii) 打ち上げ高の有義値は、長周期波の汀線位置での波

高の1/2を水位に考慮して、規則波による算定法を用いる簡易な手法でも、十分に良い精度で評価できる。

参考文献

- 岩田(1982): 斜面上への不規則波のそ上, 水工学シリーズ 82-B-3.
- 海岸保全施設築造基準連絡協議会(1987): 「改訂海岸保全施設築造基準解説」.
- 柿沼・伊福(1985): 現地海岸における海底摩擦係数, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 234-237.
- 加藤(1990): 漂砂と海浜地形変化に及ぼす長周期波の影響に関する研究, 東京工業大学博士学位論文, pp. 85-110.
- 合田・岸良・神山(1975): 不規則波による防波護岸の越流流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告第14巻4号, pp. 3-44.
- 後藤(1983): 津波による被害の予測に関する水理学的研究, 東北大学博士学位論文.
- 仲座・津嘉山・日野・田場(1991): リーフ上の護岸越波特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 511-515.
- 日野・仲座(1988): 数値波動解析における新しい無反射境界スキームの平面二次元問題への適用, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 262-266.
- 間瀬・土居・岩垣(1983): 不規則波の遡上特性に及ぼす Wave Grouping の影響に関する実験的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 114-118.
- 間瀬・松本・岩垣(1986): 不規則波の浅水・砕波変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集 No. 375/II-6, pp. 221-230.
- 山本・谷本(1994): 波群性に起因する長周期波と海岸への遡上に関する研究, 土木学会論文集 No. 503/II-29, pp. 109-118.
- Yamamoto・Tanimoto・Harshinie(1994): 24th ICCE, ASCE, pp. 689-703.
- 山本・谷本・中村(1994): 波群性に起因する長周期波の海岸への遡上, 土木学会第49回年次学術講演会, 第2部B, pp. 644-645.