

複合断面地形の波の遡上に対する VOF 法の適用性と 不規則波モデルへの拡張

藤原隆一*・山崎智弘**・橘川正男***・早瀬松一****

波の遡上現象を数値シミュレーションによって予測する手法として、VOF 法に基づいて自由表面の処理を行う数値波動水路 CADMAS-SURF が用いられた。規則波を対象として複合断面地形に対する打上げ高が計算され、水理模型実験結果との比較がなされた。その結果、CADMAS-SURF は、海浜断面形状がかなり複雑な場合でも妥当な計算結果を与えることが確認された。また、不規則波の造波方法として造波ソースとエネルギー減衰帯を組み合わせる手法を用いる場合、安定した不規則波を造波する簡便な手法として、各成分波の水平水粒子速度から質量輸送速度を差し引いた流速を線形に重ね合わせる方法が提案され、その妥当性が確認された。

1. はじめに

四方を海に囲まれた我が国における海浜部は、従来我々の生活にとって重要な場所であり、高密度に利用されてきた。既存の海岸・港湾構造物の多くは砕波帯以浅に築造されており、波の遡上を含めた浅水・砕波変形を高精度で予測することが、防災面から重要であることは、現在も変わらない。現在、海浜部の重要性は防災面のみならず環境面からも再評価されている。砂浜および干潟は様々な生物の生息場所であり（例えば、千田・木下編, 1998）、そこでの地形変化が生物に与える影響は大きい。このように海浜変形を精度よく推定するには、波の遡上域での底質移動、また遡上する波の運動を正確に予測する必要がある。

波の遡上現象に関しては、波の打上げ高が海岸堤防等の天端高を決定するために重要な要素であった。このため、数多くの打上げ高に関する研究が、主に規則波を対象として行われてきた（例えば、土木学会編, 2000）。一般に不規則波の打上げ高は波群の影響や長周期波の発生などにより大きくなり、砕波帯と波打ち帯(Swash-Zone)における波相互の非線形干渉を正確に予測することが重要である（岩田, 1982）。

本研究では、最近様々な海域施設の耐波設計に適用され、その有用性が報告されている数値波動水路 CADMAS-SURF（磯部ら, 1999）を用いて、複雑な海底地形に対する波の遡上を数値シミュレーションし、その適用性を水理模型実験によって検証した。また、数値波動水路を不規則波に適用する場合の不規則波の造波方法について検討した結果を示す。

2. 波の遡上に対する数値計算法

Saville (1956) を始めとする従来用いられてきた波の打上げ高の推算手法は、沖波が与えられると途中の波の変形計算を経ることなく直ちに打上げ高が算定でき、工学的には便利である。一方、海浜変形を推定するには、波の遡上域における波の運動を把握する必要がある。そのためには、適切なモデル化のもとで作成された流体の基礎方程式を数値的に解く CFD の手法が有力な手法となる。そこで、本研究では、非線形性の強い現象にも適用性が高く、かつ自由表面の処理法として実用的な VOF 法に基づく計算手法である CADMAS-SURF を用いることとした。

今のところ、CADMAS-SURF を用いて打上げ高を検討した例は松村ら（2000）のみである。この検討では、不規則波に対する水理模型実験の打上げ高との比較となったことから、定性的な評価となっている。

3. 複合断面地形の波の遡上に対する検討

3.1 水理模型実験の方法

(1) 実験断面

水理模型実験は、中部電力株式会社の電力技術研究所が有する 2 次元造波水路を用いて行われた。実験時の水路内の模型配置状況を図-1 に示す。図中には波高計の設置地点が併せて示されている。造波板前面には一様水深部の区間を 15.692 m 設け、海底面は仮設床で作成した。また、実験時の水深は造波板前面の一様水深部で

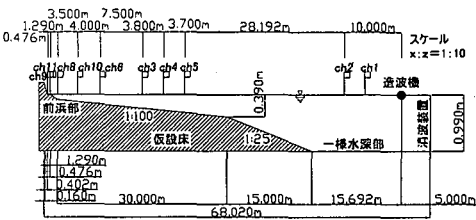


図-1 実験断面

* 正会員 博(工) 東洋建設株式会社土木設計課課長
** 正会員 修(工) 東洋建設株式会社土木部
*** 正会員 修(工) 中部電力株式会社電力技術研究所
**** 正会員 (株)シーテック土木建築本部技術コンサルタント部

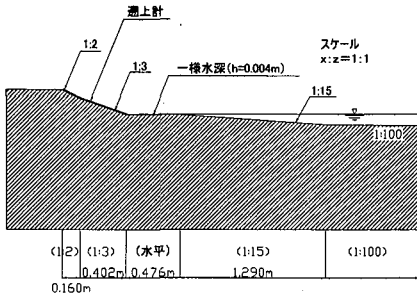


図-2 前浜部の拡大図

0.99 mとした。仮設床の断面は波の進行方向に向けて上り勾配または水平となるようにし、沖側より1:25, 1:100, 1:15と変化した後、一旦水平床とし、その後1:3, 1:2と変化するように作成した。なお、実験時の静水面は1:3勾配斜面部と交わり、その沖側の水平床部における水深は0.004 mであった。汀線付近の断面形状を拡大した状況を図-2に示す。

(2) 実験条件

水理模型実験では、表-1に示す諸元を持つ規則波を作用させた。

表-1 波浪条件

	$H'_0(\text{cm})$	$T(\text{s})$	H'_0/L_0
Case 1	15.17	1.61	0.038
Case 2	12.71	2.00	0.020
Case 3	16.95	1.24	0.071

(3) 計測および打上げ高の定義

実験時の計測は、10台の波高計および遡上高計(1:3および1:2の斜面勾配部)により行った。波の遡上に伴い、遡上域付近の平均水位は波の作用時間に応じて増加するが、造波後120 s後以降では、各ケースともにほぼ定常と見なせたことから、データの取得は、造波後120秒後から0.5 s間隔で8192個とした。打上げ高は、取得したデータから以下のようにして求めた。

- 1) 測定時間内の平均水位を算術平均によって求める。
- 2) 算出した平均水位を基準に、ゼロアップクロス法により遡上波を定義する。
- 3) 定義された遡上波の中の最大値を遡上距離とする。このときの遡上距離は、静水面からの斜距離となっている。
- 4) 打上げ高 R は、遡上距離を鉛直高さに換算し、さらに平均水位を加えて静水面からの高さに換算する。
- 5) 打上げ高を統計処理して、 $R_{\max}$ および $R_{1/10}$, $R_{1/3}$, R_{ave} を求める。

3.2 数値計算の方法

(1) 検討断面

水理模型実験における検討断面を再現した。ただし、造波板前面の一樣水深部は、計算上の波浪安定化領域として必要と考えられる長さに短縮した。造波方法には造波ソースを用い、造波ソースから沖側の領域では、4.0 m (0.8~1.7 波長) の波浪安定化領域の沖側に7.0 m (1.3~2.9 波長) のエネルギー減衰帯を設けた。計算モデル断面を図-3に示す。

(2) 計算条件

空間格子間隔は、波浪条件に応じて図-4および図-5に示すよう設定した。このように設定したときの水平方向の格子間隔は波長の1/80程度、また鉛直方向の格子間隔は沖波波高の1/5~1/15程度となる。また、時間刻み幅はCFL条件および粘性項の安定条件を満足するように自動計算とした。また、計算に用いる波浪条件は表-1に示す値を目標とした。

また、移流項の差分スキームはDONOR-0.5(1次風上差分と2次中心差分の重みを共に0.5として重ね合わせ)とした。

なお、計算では便宜上長さの縮尺を50倍とした計算を行った。

(3) 解析対象時間および打上げ高の定義

波を作用させて遡上域で平均水位が上昇し、ほぼ定常となってからを打上げ高の解析対象時間とした。それぞれ

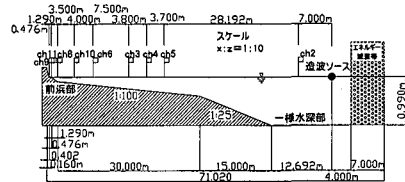


図-3 計算モデル

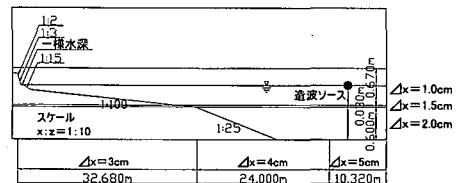


図-4 空間格子間隔 (Case 1, Case 2)

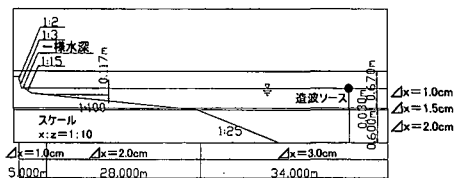


図-5 空間格子間隔 (Case 3)

れの波浪条件に対する解析時間は表-2に示すように、造波開始後約20~50周期後からを測定対象とした。

表-2 解析対象時間

	解析時間 t/T
Case 1	31.5~39.4
Case 2	22.9~31.0
Case 3	53.5~67.6

なお、打上げ高は水理模型実験の場合と同様に定義し、VOF関数の出力結果を用いて、斜面上に沿ったセルの内、最も岸側に存在する表面セルまでの静水面からの高さとした。

3.3 打上げ高に対する検証結果

(1) 水位変動

実験時の水位変動の例として、Case 1における代表的な測点の時系列を図-6に示す。それぞれの図は、計測地点の水深の大きい方から順に並べてある。沖側の一様水深部 ($h=99.0\text{ cm}$) における水位変動は安定しており、波形が滑らかである。1/100勾配斜面の中央付近の ch 3 ($h=24.0\text{ cm}$) になると、波形が非線形を帯びてきていることがうかがえる。さらに水深が浅くなり1/100勾配斜面の岸側端部 ch 8 ($h=9.0\text{ cm}$) になると、砕波によって波高が減少していることが分かる。最も水深が浅くなる前浜部の一様水深部 ch 11 ($h=0.4\text{ cm}$) では、さらに波高減衰が進むが、波形が切り立ち、段波状に変形している。

図-7は、同条件での計算結果を示したものである。沖側の一様水深部 ch 2 ($h=99.0\text{ cm}$) の波形は滑らかであり、かつ安定しており、計算中の波作用状況が安定していたことが分かる。1/100勾配斜面の中央付近の ch 3 ($h=24.0\text{ cm}$) では波形が非線形になる様子がよく再現されている。さらに水深が浅くなる ch 8 ($h=9.0\text{ cm}$)

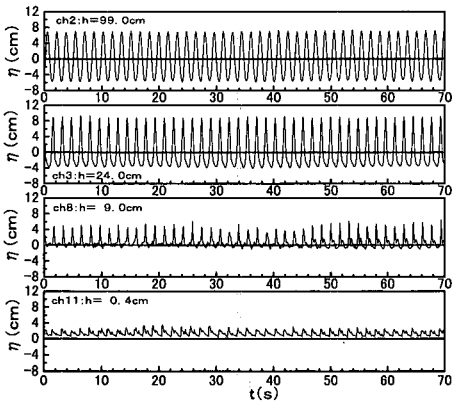


図-6 実験時の水位変動 (Case 1)

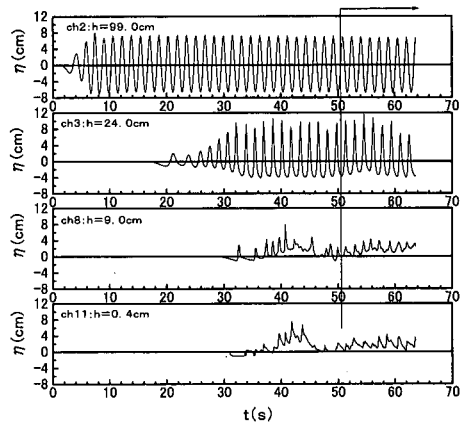


図-7 水位変動の計算結果 (Case 1)

および ch 11 ($h=0.4\text{ cm}$) では、平均水位の上昇が常々と見せる領域 (図中の矢印の範囲) において波形の切り立つ様子や波高の減少がよく再現されている。

(2) 波の変形

図-8は各測点における波高変化を比較した結果を示したものであり、横軸の水深および縦軸の波高は、沖波波高で無次元化している。各ケース共に波高が最大となる付近を中心に実験値と計算値の差が大きくなっている。これには、砕波自体に起因するばらつきに加えて、実験時と計算時の入射波高が全く同じではないことも影響していると思われる。しかし、 h/H_0 が0.6より小さくなるような領域では、実験値と計算値の違いは小さくなっている。

(3) 打上げ高

打上げ高について実験値と計算値を比較した結果を表-3に示す。打上げ高比の平均値 R_{ave} は0.97~1.07であり、計算値は実験値をよく表している。入射波の波形勾配が大きい場合に実験値と計算値の差が大きくなるようであるが、波高変化の予測精度が反映されている。遡上波は、砕波帯と波打ち帯における波相互の非線形干渉を受けるため、規則波を作用させた場合であっても1

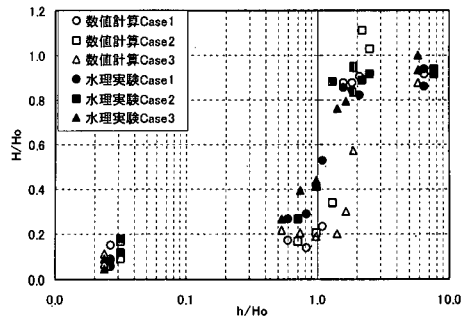


図-8 波高変化の比較

波ごとの変動が大きく、打上げ高の最大値については計算値と実験値で差違が大きくなっている。

以上より、CADMAS-SURFは、かなり複雑な海底地形に対しても波の打上げ高を精度よく算出することが可能であることが確認された。

表-3 打上げ高比（実験値／計算値）

$H_0(\text{cm})$	$T(\text{s})$	H_0/L_0	R'_{max}	R'_{ave}
15.2	1.61	0.038	1.67	1.03
12.7	2.00	0.020	1.28	1.00
17.0	1.24	0.071	1.09	0.93

4. 不規則波への適用に対する検討

4.1 造波方法

不規則波を対象とした検討には、少なくとも100～200波を作用させる必要があり、構造物または境界端部からの反射波が造波境界において再反射させない無反射造波を行う必要がある。このため、不規則波を造波する方法としては、造波ソースとエネルギー減衰帯を組み合わせる方法が実用的であると考えられる（Brosen・Larsen, 1987；川崎, 1998）。

一般に造波地点における波の非線形性が問題となるような場合を除くと、成分波の線形重ね合わせによって不規則波を与えればよいと考えられる。しかし、線形理論では長期的に見てマスフラックスがゼロではないため、シミュレーション時間が進むにつれて解析対象領域内のVOF関数（ F 値×セル面積）が増加する現象が確認されている（（財）沿岸開発技術研究センター, 2001）。

この水位増加を低減させる簡便な方法として、成分波の水平水粒子速度から予め質量輸送速度を差し引くことが有効と考えた。本検討では、ストークス波による質量輸送速度を用いた。不規則波の波運動量をデジタル方式で作成する方法については既に多くの手法が報告されている（例えば、合田, 1991）のでここでは詳述しない。造波ソースにおいては、ある1地点における表面波形 η 、水粒子速度 u, w の時間的な変動が必要となる。それらは次式のように表すことができる。

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \dots\dots\dots (1)$$

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\cosh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} \cdot a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \dots\dots\dots (2)$$

$$w(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\sinh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} \cdot a_m \sin(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ε_m はランダムな位相角、 f_m は周波数、 a_m は振幅および $k_m(=2\pi/L)$ 、 L は波長は波数である。ただし、鉛

直座標 z は静水面から上方を正にとるものとする。式(2)において、水平水粒子速度を算出する際に、各成分波ごとにその成分波に応じた質量輸送速度を減じる。すなわち、マスフラックスを軽減する水平水粒子速度 U は次式のようにして算出した。

$$U(z, t) = \sum \left\{ 2\pi f_m \frac{\cosh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} \cdot a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) - \bar{U} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここでストークス波の質量輸送速度は次式のように表される。

深海波の場合、

$$\bar{U} = \frac{\pi}{H} \frac{\pi H}{H} \exp\left(\frac{\pi \bar{z}}{L}\right) \dots\dots\dots (5)$$

また、浅海波の場合には

$$\bar{U} = \frac{1}{2} \frac{\pi H}{T} \frac{\pi H}{L} \frac{\cosh 4\pi(h+\bar{z})/L}{\sinh^2(2\pi h/L)} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\bar{z}$ は水粒子の平均位置を表す。

4.2 一様水深断面での検討

(1) 検討条件

上述の方法に基づいた造波方法の妥当性を確かめるため、一様水深断面における検討を行った。検討条件は表-4のようであり、沖波波形勾配を一定として波高周期の異なる組み合わせを3ケース想定した。

また、計算の空間格子間隔は、表-5のように設定した。

水平方向の空間格子間隔 Δx は、不規則波のエネルギー累加量が80%程度となる周波数範囲を精度よく数値シミュレーションすることを考えてピーク周波数の1.5倍に相当する成分波の波長の1/80程度を想定した。また、 Δz は入射波高の1/5程度を目標に、 Δx との比や流速の鉛直分布を考慮して定めた。また、その他の条件は、遡上計算を行ったときと同じ設定とした。

表-4 一様水深断面の検討条件

ケース	$h(\text{m})$	$T_{1/3}(\text{s})$	$H_{1/3}(\text{m})$	H_0/L_0	$H_{1/3}L_{1/3}^2/h^3$
A	30.0	8.0	1.83	0.02	1.8
B		12.0	4.22		12.2
C		16.0	8.15		45.9

表-5 計算条件

ケース	計算領域 $X(\text{m})$	エネルギー 減衰帯幅 (m)	$\Delta x(\text{m})$	$\Delta z(\text{m})$	備考
A	-400～500	200	0.5	0.25～0.50	等比級数的に変化
B	-600～700	300	1	0.4	
C	-800～900	300	1.5	0.75	

・) $X=0$ に造波ソースを設置

