

## CADMAS-SURF の合理的なメッシュ構築方法

藤原 隆一\*・高橋 武志\*\*・鈴木 樹\*\*\*・下迫 健一郎\*\*\*\*・津田 宗男\*

\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 調査役

\*\* パシフィックコンサルタンツ (株) 国土基盤事業本部港湾部港湾海岸室

\*\*\* (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 依頼研修員

\*\*\*\* (一財) 沿岸技術研究センター 審議役

波と構造物の相互作用の問題を取り扱う数値波動水路はN-S方程式を数値的に解く数値モデルであるが、モデルの設定には相応の知識・経験を持つ技術者の判断を必要とし、労力もかかる。計算精度が保証された標準的なメッシュを構築することができれば、数値波動水路の活用が大きく進展することが期待できる。ここでは、数値波動水路として広く認知されているCADMAS-SURFを用いる場合の合理的なメッシュ作成方法を提案し、その妥当性を評価した。メッシュ幅は従来の推奨値を参考に波の非線形性を二段階の水深で考慮し、メッシュのひずみ度を  $\Delta X/\Delta Z=1.0$  とすることで計算時間の短縮と計算の安定性を図った。その結果、本メッシュを用いた数値計算の結果は、水理模型実験の代替手法として十分な精度を持つことを示した。

キーワード：CADMAS-SURF, 数値波動水路, 標準メッシュ, 設計, 砕波, 波高伝達率, 反射率

## 1. はじめに

CFD(Computational Fluid Dynamics)は流体の挙動を数値的に解析するための手法であり、N-S方程式を直接解いて流体の速度、圧力などの挙動を解析することができる。数値波動水路(Numerical wave tank)は、海岸や港湾における波と構造物の相互干渉を取り扱うことを目的とした数値シミュレーションの手法である。その手法の一つであるCADMAS-SURFは、VOF法を用いて表面の取り扱いを可能にした数値モデルである<sup>1), 2)</sup>。計算に用いるメッシュ幅や計算で用いるパラメタの推奨値も示されているが、実務では水深変化を考慮したメッシュの作成が必要になることが多く、その場合の取り扱いに定まった方法はない。このこともあってメッシュの作成には多大な労力を費やし、高度な技術者による判断が必要となる場合も多い。

従来、波と構造物に関する検討は強い非線形性を有するため、水理模型実験を主体に実施されることが多い。一方、若年層の労働者の減少や豊富な知識・経験を持つ技術者の高齢化に伴う後継者不足が深刻化している。このような環境も相まって、国土交通省では2018年の港湾局監修・港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>3)</sup>において数値波動水路の活用が記載され、2024年4月には積算基準でCADMAS-SURFが採用されるようになった。

そこで、CADMAS-SURFを用いる場合の合理的なメッシュの作成方法を提案し、水理模型実験の再現計算や理論的な検討によりその妥当性を評価した。対象断面としては基本となる2次元断面を対象とした。

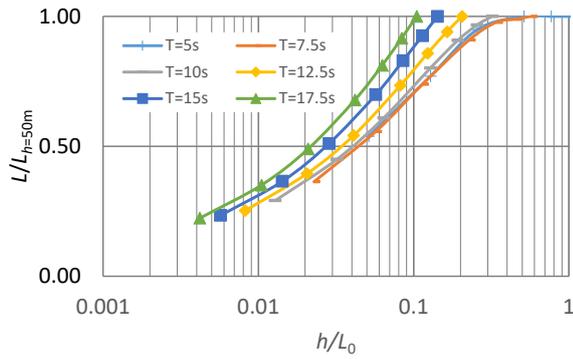
## 2. メッシュの構築方法

## 2.1 メッシュ幅

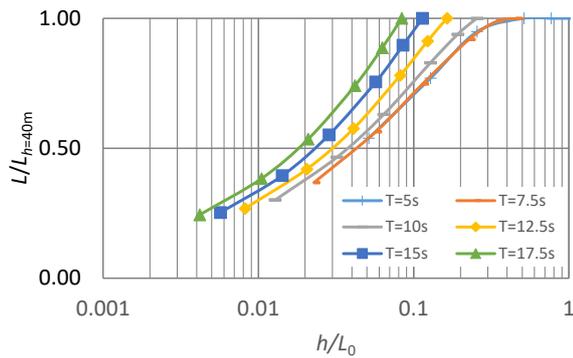
メッシュ幅は、従来の知見に示されるように波長および波高の変化による波の非線形性を取り込む必要がある。CADMAS-SURFで従来示されたメッシュ幅の推奨値は表-1のようであり、 $\Delta X$ ,  $\Delta Z$ および $L$ はそれぞれメッシュの水平幅、鉛直幅および波長である。最初に波長の変化に着目する。図-1は、 $5s \leq T \leq 17.5s$ の周期の波の造波水深における微小振幅波理論による波長が $1/2$ となる相対水深を検討した結果である。造波水深が50m, 40m, 30mおよび20mに対して、 $h/L_0$  ( $L_0$ : 沖波波長)がそれぞれ0.04, 0.04, 0.04および0.05以下の領域で $5s \leq T \leq 17.5s$ の波浪条件に対して波長が $1/2$ 以下になる。そこで、メッシュ幅を $1/2$ とする水深を $h/L_0 \leq 0.05$ とすればよいと考えた。一方、波高 $H$ も非線形性に関係する。砕波帯内の波高変化を表す算定図を参考にすると、 $h/H' = 2 \sim 3$ 程度の範囲で有義波高が極大となるので、ここでは $h/H \leq 3.5$ でメッシュ幅を $1/2$ と

表-1 CADMAS-SURFにおけるメッシュ幅の推奨値

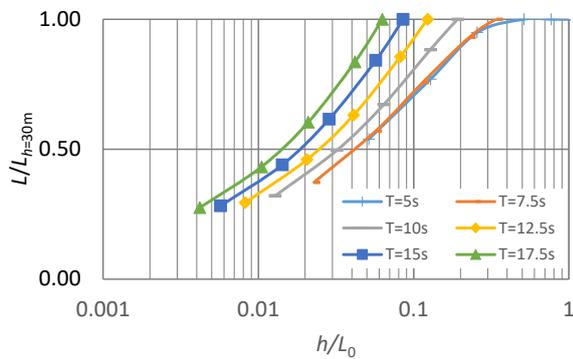
	推奨値	波の非線形性が弱い場合
$\Delta X/L$	1/80~1/100	1/40
$H/\Delta Z$	10以上	5以上
$\Delta X/\Delta Z$	5以下	10未満



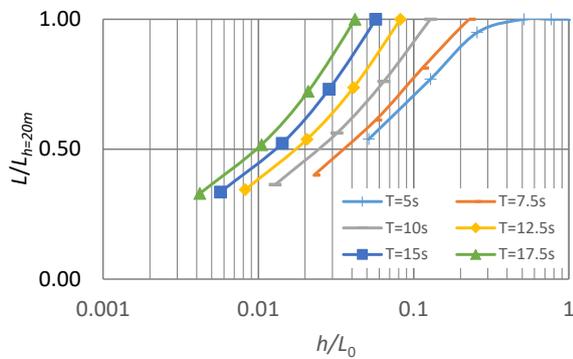
(a) 造波水深 50m



(b) 造波水深 40m



(c) 造波水深 30m



(d) 造波水深 20m

図-1 造波水深での波長が 1/2 となる相対水深

表-2 推奨値を用いた場合の基本幅  $\Delta X$

(a) 造波位置の水深  $h$  が 25m 未満の場合

$T$ (s)	$h < 12.5$		$12.5 \leq h < 17.5$		$17.5 \leq h < 25.0$		
	$\Delta X$ (m)	$B$ (m)	$\Delta X$ (m)	$B$ (m)	$\Delta X$ (m)	$B$ (m)	
$T < 4.5$	0.20	100	0.20	100	0.20	100	
$4.5 \leq T < 6.5$	0.40	200	0.40	200	0.40	200	
$6.5 \leq T < 7.5$	0.50		0.50		300		0.50
$7.5 \leq T < 8.5$		1.00	400	1.00		400	
$8.5 \leq T < 9.5$							1.50
$9.5 \leq T < 10.5$	2.00	600	2.00	700			
$10.5 \leq T < 11.5$					2.00	700	2.00
$11.5 \leq T < 12.5$	1.50	500	1.50	500			
$12.5 \leq T < 13.5$					1.00	400	1.00
$13.5 \leq T < 15.5$	0.50	300	0.50	300			
$15.5 \leq T < 17.5$					0.20	100	0.20
$17.5 \leq T < 19.5$	0.20	100	0.20	100			
$19.5 \leq T$					0.20	100	0.20

(b) 造波位置の水深  $h$  が 25m 以上の場合

$T$ (s)	$25.0 \leq h < 35.0$		$35.0 \leq h < 45.0$		$45.0 \leq h$				
	$\Delta X$ (m)	$B$ (m)	$\Delta X$ (m)	$B$ (m)	$\Delta X$ (m)	$B$ (m)			
$T < 4.5$	0.20	100	0.20	100	0.20	100			
$4.5 \leq T < 6.5$	0.40	200	0.40	200	0.40	200			
$6.5 \leq T < 7.5$	0.50	300	0.50	300	0.50	300			
$7.5 \leq T < 8.5$	1.00		400		1.00		400	400	
$8.5 \leq T < 9.5$		1.50		500		1.50			500
$9.5 \leq T < 10.5$									
$10.5 \leq T < 11.5$	2.00	700	2.00	700					
$11.5 \leq T < 12.5$					1.50	500	1.50	500	
$12.5 \leq T < 13.5$	1.00	400	1.00	400					
$13.5 \leq T < 15.5$					0.50	300	0.50	300	
$15.5 \leq T < 17.5$	0.20	100	0.20	100					
$17.5 \leq T < 19.5$					0.20	100	0.20	100	
$19.5 \leq T$	0.20	100	0.20	100					0.20

することとした。なお、実際の計算では、両者を用いて算出される水深の大きいほうをメッシュ幅を 1/2 とする水深とする。Munk によると、孤立波理論に基づいた碎波条件は  $h_0/H=1.28$  となる<sup>4)</sup>。そこで、その 1.5 倍程度の大きさとなる  $h/H=2.0$  以下でメッシュ幅を 1/4 とすることで碎波付近の影響を考慮することとした。不規則波の場合は、有義波の諸元を対応させて考えればよい。また予備的な計算を行ったところ水平幅と鉛直幅は同じ大きさとするここと、計算効率が高く計算も安定した。上記を整理すると下記ようになる。

- 造波位置におけるメッシュ幅  $\Delta X$  を基準値とし、浅水変形によるメッシュ幅の変更条件は波の非線形性を表す無次元量の  $h/L_0$  および  $h/H$  を用いて以下のように設定する ( $h$ : 造波水深,  $L_0$ : 沖波波長,  $H$ : 波高)
  - ✓  $h/L_0 \leq 0.05$  または  $h/H \leq 3.5$ :  $\Delta X/2$
  - ✓  $h/H \leq 2.0$ :  $\Delta X/4$
- メッシュ形状は正方形 ( $\Delta X/\Delta Z=1.0$ ) とする

造波位置におけるメッシュ幅としては、表-1 を参考に造波水深および入射波の周期をクラス分けして整理した。表-2 には推奨値を基本幅とした場合の結果を表しているが、波の非線形性が弱い条件ではこの表の値を 2 倍した値を用いなければならない。以下の計算では非線形性が弱い条件に対する基本幅を用いた。

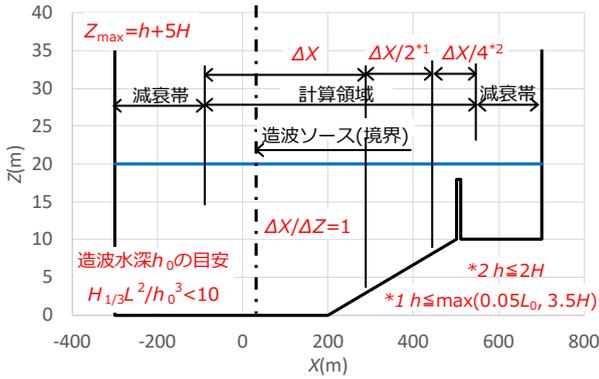


図-2 標準的な計算メッシュの配置

実際の計算では、境界端部に波エネルギーの減衰帯を設置することも必要となる。図-2には造波ソースを用いた場合の標準的な計算メッシュの配置を模式的に示す。図中には、計算時に用いる造波水深や鉛直座標の最大値の目安も合わせて示した。なお、周期が長い場合、 $\Delta X$ に応じて鉛直方向の解像度が低くなるため、 $\Delta X$ の最大は2mと制限している。また、造波水深については、造波した波の安定性の観点から、入射波が完全反射した場合でも砕波しないようにするのがよい。その場合に必要な水深は、規則波および不規則波に対する $h/H$ および $h/H_{1/3}$ をそれぞれ3および5程度とすればよいと考えられる。なお、造波境界の場合は、それより沖側のメッシュは不要になる。

## 2.2 不規則波計算時の断面設定方法

CADMAS-SURFで装備されている不規則波信号は線形波の重ね合わせによって作成されており、水平流速を補正することで計算中の水位変化を抑制している。ただし、対象とする計算時間は150~200波程度であり、対象波数が多くなるほど、また入射波の非線形性が強くなるほど水位変化量は増加する。

ここでは、藤原<sup>5)</sup>に示されるエネルギー減衰帯幅を大きくすることで相対的に水位変化を抑制する方法の妥当性を検討した。造波位置から沖側2~3波長の領域ではメッシュ幅は基本幅 $\Delta X$ とし、それより沖側では式(1)を用い、メッシュ数の低減を図る。

$$W = \sum_{i=1}^N \Delta X \cdot r^i \quad (1)$$

ここで、 $W$ および $r$ はそれぞれ造波ソースより沖側の幅および公比である。公比は $r=1.02$ 程度に設定すればよい。 $W$ を大きくするほど水深の上昇量は相対的に減少するが、対象波数が600波程度となっても水位変化を0.1%程度に抑制するには総水路長を $200L$ 程度にするのがよいと考えられた。図-3は水位変化量を検討した計算ケースを表している。計算断面は構造物がある場合を想定し、完全反射となるような断面を対象とした。エネルギー

表-3 不規則波計算時の水位変化量の検討条件

ケース	$h$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	$H_0/L_0$	$H_0/h$	$W/L$	$X_{max}/L$	$Ur$
1	10	4.9	0.97	0.028	0.10	208.9	2.9	1.2
2	10	6.5	0.98	0.016	0.11	177.3	3.7	2.9
3	10	7.5	1.19	0.015	0.13	181.4	3.1	5.0
4	20	8.0	1.69	0.019	0.09	201.8	3.4	1.6
5	20	10.7	2.39	0.015	0.13	181.4	3.0	5.2
6	20	11.9	2.09	0.010	0.11	200.0	3.3	5.9
7	30	13.7	3.83	0.013	0.13	168.6	3.4	4.5
8	30	15.0	10.00	0.030	0.35	194.6	3.4	20.3
9	30	15.0	12.00	0.036	0.42	194.6	3.4	24.3
10	30	15.5	4.10	0.012	0.14	206.9	3.3	8.9
11	30	16.5	6.60	0.016	0.23	197.9	3.2	15.6
12	30	16.2	7.00	0.018	0.24	195.8	3.2	16.5
13	50	15.1	2.02	0.006	0.04	195.1	3.2	1.3
14	50	15.8	6.30	0.018	0.14	184.1	3.3	4.6
15	50	17.4	10.50	0.024	0.23	191.7	3.2	9.8



表-4 計算に用いた CADMAS-SURF のパラメータ

項目	値	備考
時刻間隔	自動	安全率0.2かつ $\Delta t \leq 0.05s$
VP-DONOR	0.2	一次風上差分；二次中心差分
SOLV M-ILLUBCGSTAB	0.95	連立一次方程式の解法(デフォルト値)
OPTION S-CELL-UW	D2U=0	表面セルの流速を外挿で求める
OPTION T-DOOR BUB	0.2	気泡上昇速度：0.2m/s
OPTION-T-DOOR BDRDP	FREE-RUNOWN	水滴落下速度：自由落下+斜面処理

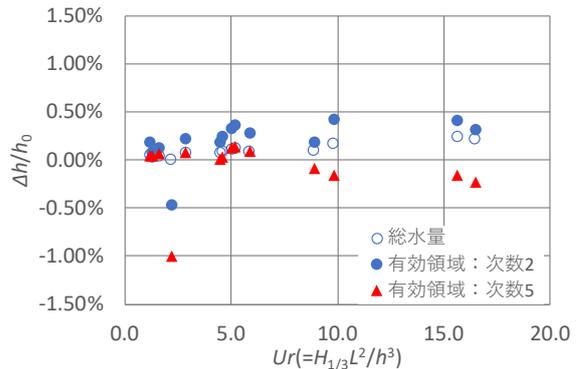


図-3 水位変化量とアーセル数の関係

減衰帯は造波位置から1波長程度沖から沖側の境界端まで設定した。なお、計算で用いた主なパラメータを表-4に示す。

図-3は $t/T_{1/3}=400\sim 500$ 程度作用後における総水量および造波ソースより岸側の有効領域での水位の変化量と入射波のアーセル数の関係を示す。図中には、消波構造物を設置した場合の計算結果も含めて示した。 $Ur < 10$ では総水量の変化は概ね0.1%以下であるが、有効領域では水位上昇に起因する長周期の水位変動が発生し、水位変化量が大きくなっている。水位変化量が特に大きいケースは消波構造物を設置したケースとなった。これは、発生した長周期の水位変動が沖側のエネルギー減衰帯内で再反射することによるものであり<sup>6)</sup>、有効領域で入射波と再反射波との重ね合わせが形成されたことを反映していると推察される。長周期成分のエネルギーはエネルギー

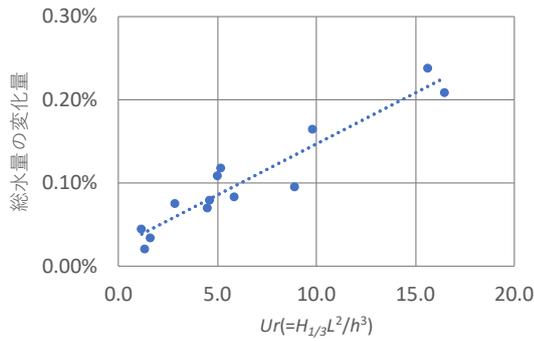


図-4 造波位置での水位変動と信号値の差の分散

ギー減衰帯のエネルギー減衰項を大きくすることで減殺が期待できるので、エネルギー減衰項の次数を5（標準値2）とした計算結果も図中に合わせて示したが、減衰効果が得られる場合と得られない場合があった。以上より、水路内で長周期の水位変動が発生すると、総水量の変化が造波水深の0.1%程度でも有効領域では数%まで大きくなる場合があることが分かった。長周期波を制御することは難しく、有効領域における水位変化量に留意して計算結果を取り扱う必要がある。

図-4 は造波位置における水位変動と入力信号の差の分散をアーセル数との関係で示したものであるが、分散はアーセル数に比例して大きくなり、入力信号からの差異が大きくなっている。これは非線形性が強くなり線形理論から外れるためと考えられる。なお、非線形性が強いケース8およびケース9では線形理論による造波が困難になり計算は発散した。

ところで、造波水深が大きくなると水位変化量の絶対値が大きくなることにも留意する必要がある。このことも踏まえ、不規則波を用いた計算を行う場合の造波水深は、総水量の変化が造波水深の0.2%程度になるようにすればよく表-5に目安の造波水深を示す。

表-5 不規則波計算時の目安となる造波水深

$T_{1/3}(s)$	$H_{1/3}(m)$	$h(m)$	$Ur$	$\Delta h$	$\Delta h/h$	$H/L$	$h/H$	
5	1	10	1.4	0.004	0.04%	0.027	10.0	
	2	10	2.7	0.006	0.06%	0.054	5.0	
	3	10	4.1	0.007	0.07%	0.081	3.3	
	4	10	5.5	0.009	0.09%	0.108	2.5	
6	1	10	2.9	0.006	0.06%	0.019	10.0	
	2	10	5.8	0.010	0.10%	0.037	5.0	
	3	15	3.2	0.009	0.06%	0.050	5.0	
	4	15	4.3	0.011	0.08%	0.067	3.8	
	5	15	5.3	0.013	0.09%	0.083	3.0	
8	1	15	2.7	0.009	0.06%	0.010	15.0	
	2	15	5.5	0.014	0.09%	0.021	7.5	
	3	20	3.5	0.013	0.07%	0.031	6.7	
	4	20	4.7	0.016	0.08%	0.041	5.0	
	5	20	5.9	0.019	0.10%	0.052	4.0	
	6	20	7.1	0.022	0.11%	0.062	3.3	
10	1	20	2.3	0.010	0.05%	0.007	20.0	
	2	20	4.6	0.016	0.08%	0.015	10.0	
	3	20	6.9	0.022	0.11%	0.022	6.7	
	4	25	4.9	0.021	0.08%	0.029	6.3	
	5	25	6.2	0.025	0.10%	0.036	5.0	
	6	25	7.4	0.029	0.12%	0.043	4.2	
	7	25	8.7	0.033	0.13%	0.050	3.6	
	8	25	9.9	0.036	0.15%	0.058	3.1	
12	1	20	3.5	0.013	0.07%	0.006	20.0	
	2	20	7.0	0.022	0.11%	0.012	10.0	
	3	25	5.8	0.024	0.10%	0.017	8.3	
	4	25	7.8	0.030	0.12%	0.023	6.3	
	6	30	7.7	0.036	0.12%	0.032	5.0	
	8	35	7.2	0.040	0.11%	0.041	4.4	
	9	35	8.1	0.044	0.12%	0.046	3.9	
	10	35	9.1	0.047	0.14%	0.051	3.5	
	12	35	10.9	0.055	0.16%	0.061	2.9	
	14	2	30	3.8	0.021	0.07%	0.009	15.0
		3	30	5.6	0.028	0.09%	0.013	10.0
		4	30	7.5	0.035	0.12%	0.018	7.5
6		35	7.9	0.043	0.12%	0.025	5.8	
8		35	10.6	0.054	0.15%	0.034	4.4	
9		40	8.8	0.053	0.13%	0.036	4.4	
10		40	9.8	0.058	0.14%	0.040	4.0	
12		45	9.0	0.061	0.13%	0.046	3.8	
14		45	10.5	0.069	0.15%	0.054	3.2	
16		2	40	2.7	0.023	0.06%	0.007	20.0
	3	40	4.1	0.030	0.07%	0.010	13.3	
	4	40	5.4	0.036	0.09%	0.014	10.0	
	6	40	8.1	0.050	0.12%	0.020	6.7	
	8	45	8.3	0.057	0.13%	0.026	5.6	
	9	45	9.4	0.063	0.14%	0.029	5.0	
	10	50	8.2	0.062	0.12%	0.031	5.0	
	12	50	9.8	0.073	0.15%	0.038	4.2	
	14	50	11.5	0.083	0.17%	0.044	3.6	

表-6 検討ケース

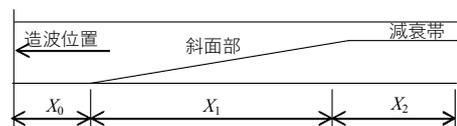
$i(=\tan\theta)$	$h(m)$	$T(s)$	$H_0'(m)$	$H_0'/L_0$	$X_0(m)$	$X_1(m)$	$X_2(m)$
1/10	10	8.0	1.1	0.011	100	90	50
	30	15.0	6.8	0.019	250	290	50
	30	12.0	9.9	0.044	250	290	50
	30	10.0	8.6	0.055	150	290	50
1/50	10	8.0	1.1	0.011	50	450	50
	30	15.0	7.4	0.021	50	600	150
	30	12.0	9.7	0.043	50	500	150
	30	10.0	8.6	0.055	50	500	150
1/100	10	8.0	1.1	0.011	50	850	50
	30	15.0	7.4	0.022	50	1100	150
	30	12.0	9.8	0.046	50	950	150
	30	10.0	8.5	0.056	50	1100	150

### 3. 検証

#### 3.1 一様勾配斜面上の波高変化

##### (1) 規則波

検証に用いた計算ケースは表-6 に示すように、海底勾配を3ケース ( $i=1/10, 1/50$  および  $1/100$ ) とし波浪条件は  $H_0'/L_0=0.011\sim 0.056$  に幅広く分布するように設定した。なお、一様勾配斜面は海底から水深2mまでとし、それ以後は一定水深とし、波エネルギー減衰帯を設けた。表中の  $X_0$  は造波位置から斜面の開始点までの距離、 $X_1$  は斜面長を表している。波浪条件は水深ごとに同一となるように設定したので、周期が長いほど水深が大きくなる。なお、CADMAS-SURF の計算に用いた主なパラメタは表-4 と同じであり、造波ソースを用いた。



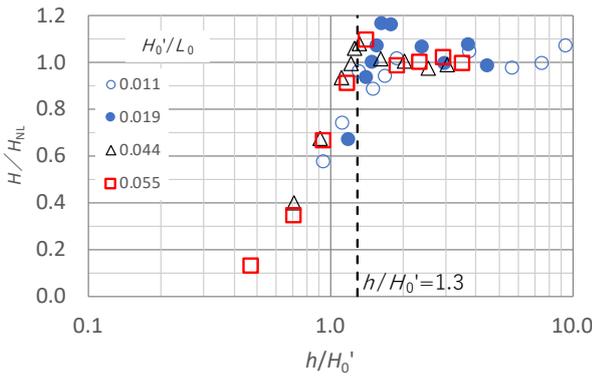


図-5 斜面上の波高変化： $i=1/10$

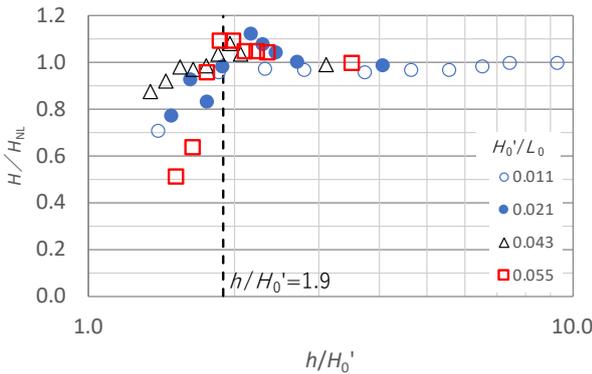


図-6 斜面上の波高変化： $i=1/50$

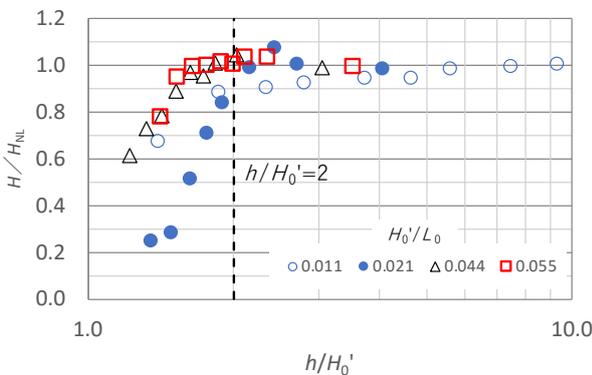


図-7 斜面上の波高変化： $i=1/100$

図-5は海底勾配が  $i=1/10$  となる斜面上の波高変化を表すが、波高は合田が岩垣ほか<sup>7)</sup>の浅水係数を補正した有限振幅波理論の近似計算式<sup>8)</sup>による波高  $H_L$ 、また砕波後は砕波限界波高<sup>9)</sup>で無次元化した。4 ケースの極大となる相対波高は  $h/H_0' = 1.2 \sim 1.8$  程度となっている。 $h/H_0' > 1.3$  における有限振幅波理論による波高変化との差異は±10%程度であるが、 $h/H_0' < 1.3$  では砕波限界波高より過少となる。図-6は海底勾配が  $i=1/50$  に対する結果であるが、波高が極大となる比水深は  $h/H_0' = 2.0$  程度となり、 $i=1/10$  のときより深い位置で砕波が生じている。 $h/H_0' > 1.9$  における有限振幅波理論による波高変化との差異は±10%程度であり、砕波後に砕波限界波高より過少となる状況は同じである。さらに  $i=1/100$  に

表-7 砕波波高と砕波限界波高との差

$i = \tan\theta$	$H_0'$ (m)	$T$ (s)	$H_0'/L_0$	$\zeta_0^{**}$	$h_b/L_0$	$H_b/h_b$		$H_{b\_cal}/H_b$
						砕波指標	計算	
1/10	1.06	8.00	0.011	0.71	0.016	1.20	1.24	1.03
	6.76	15.00	0.019	0.57	0.027	1.14	1.14	1.00
	9.90	12.00	0.044	0.43	0.056	0.99	0.97	0.98
	8.55	10.00	0.055	0.44	0.077	0.98	0.84	0.85
1/50	1.08	8.00	0.011	0.17	0.025	0.76	0.55	0.73
	7.41	15.00	0.021	0.07	0.046	0.73	0.58	0.79
	9.70	12.00	0.043	0.09	0.067	0.71	0.66	0.93
	8.56	10.00	0.055	0.08	0.103	0.67	0.55	0.83
1/100	1.07	8.00	0.011	0.09	0.025	0.76	0.51	0.68
	7.41	15.00	0.021	0.06	0.051	0.73	0.48	0.66
	9.70	11.95	0.044	0.05	0.072	0.70	0.61	0.87
	8.56	10.00	0.055	0.04	0.090	0.68	0.59	0.87

※)  $\zeta_0 = \tan\theta / (H_b/L_0)^{1/2}$

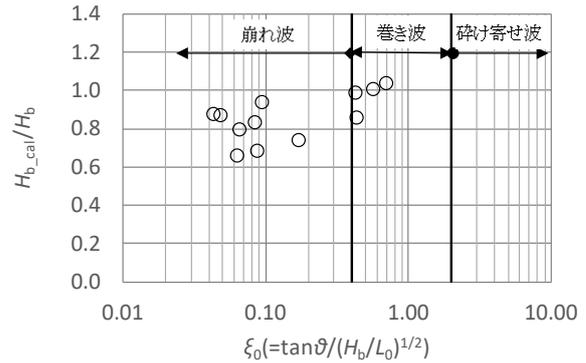


図-8 砕波限界波高と砕波形態

なると、図-7に示すように、波高が極大となる比水深は  $h/H_0' = 2.0 \sim 2.3$  程度とさらに深い位置で砕波が生じるようになる。 $h/H_0' > 2$  では有限振幅波理論との差は±10%程度である。砕波後の計算値が過少となるのは、砕波限界波高はその水深において発生する最大波高を表す指標であるためと推察される。

次に、砕波波高について検討した結果を表-7に示す。砕波波高の計算値は、砕波限界波高の0.68～1.03倍になっている。砕波限界波高は多数の実験結果の平均であり、個々のデータは±10%以上の変動を示すことから、計算値は概ね妥当と言える。今回の条件における差を考察するため、サーフシミュリティパラメタ  $\zeta_0$  による砕波形式の分類<sup>10)</sup>に基づいて検討した結果、崩れ波の領域で差が大きくなっていた(図-8参照)。海底勾配が緩く崩れ波が卓越するようになると、砕波の開始位置が不安定になりやすく、実験に比べて砕波が早く始まることが考えられる。海底勾配が大きくなると、沖合から入射した波が急激に立ち上がり巻き波の形式になるが、計算ではこのような波形変化を精度よく再現できたと考えられる。

### (2) 不規則波

不規則波における検討ケースは表-7に示すように、海底勾配を1/10および1/100の2ケースとし、 $H_0'/L_0$ の範囲が0.008～0.035に分布するように波浪条件を与えた。換算沖波波高は斜面が開始する一様水深部の  $H_{1/3}$  および  $T_{1/3}$  の計算値から算出した。なお、 $i=1/100$ の場合、水理模型実験でもよく行うように斜面長が不必要に

表-8 検討ケース

$i(\tan\theta)$	$h$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	$H_0$ (m)	$H_0/L_0$	$Ur'$	$X_0$ (m)	$X_1$ (m)	$X_2$ (m)
1/10	20	8.2	0.85	0.93	0.009	0.9	100	190	60
	30	10.3	1.20	1.31	0.008	0.9	150	280	70
	60	15.1	3.62	3.96	0.011	1.5	250	580	130
	10	5.1	0.66	0.71	0.017	1.0	50	90	60
	40	9.9	2.90	3.10	0.020	0.9	150	380	100
	70	15.2	5.92	6.46	0.018	1.7	100	680	130
	30	8.4	2.70	2.87	0.026	1.1	100	290	60
	50	10.3	3.91	4.12	0.025	0.8	100	480	110
	70	12.1	6.37	6.74	0.030	0.9	100	680	120
	15	5.2	1.36	1.41	0.033	0.7	50	140	60
1/100	40	8.4	3.42	3.53	0.032	0.6	100	380	90
	60	9.8	4.78	4.90	0.033	0.5	100	580	90
	20	8.3	0.86	0.94	0.009	0.9	100	100+900	100
	30	10.1	1.22	1.33	0.008	0.9	100	200+900	100
	60	15.2	3.53	3.87	0.011	1.5	100	400+1800	200
	10	5.1	0.66	0.71	0.017	1.0	50	90	50
	40	10.1	2.92	3.13	0.020	1.0	100	240+1400	110
	70	15.5	6.12	6.69	0.018	1.9	100	400+1800	150
	30	8.3	2.69	2.86	0.027	1.0	100	200+900	100
	50	10.4	4.02	4.24	0.025	0.8	100	320+1600	130
70	12.3	5.68	6.08	0.026	0.8	100	400+1600	160	
15	5.2	1.41	1.46	0.035	0.7	50	60+800	90	
40	8.3	3.49	3.60	0.033	0.6	100	220+1600	130	
60	9.7	4.79	4.90	0.033	0.5	100	400+1800	100	

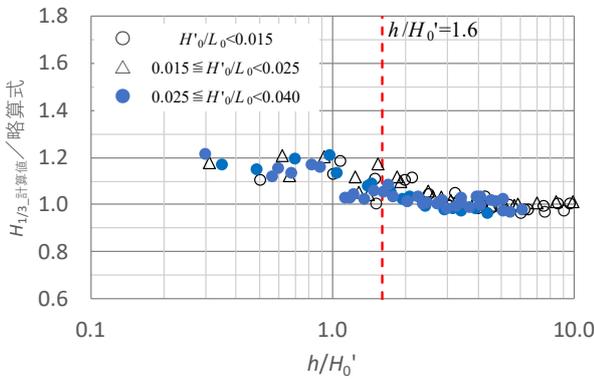
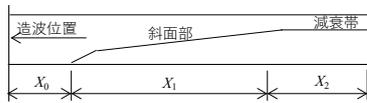


図-9 有義波高に対する略算式との比較： $i=1/10$

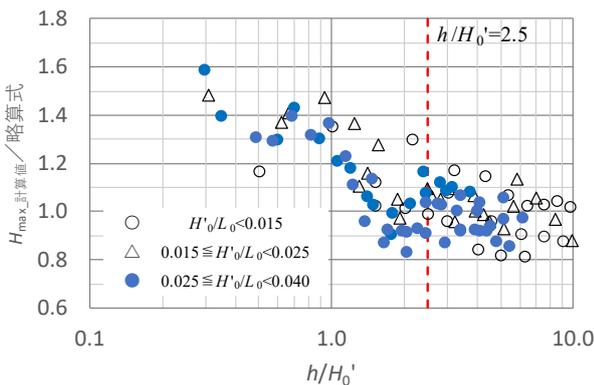


図-10 最高波高に対する略算式との比較： $i=1/10$

長くなるのを避けるため  $i=1/10$  の斜面を設けたが、 $X_1$  の表記で前者の項目がこの部分の長さに相当している。計算に用いた CADMAS-SURF の主なパラメタは規則波の場合と同じとした。海底勾配が  $i=1/10$  に対する有義波高の計算値と略算式<sup>10)</sup>を比較した結果を図-9 に示す。有義波高の場合、 $h/H_0' > 1.6$  では計算値と略算式の差は  $\pm 10\%$  以内となった。砕波帯内における波高の算定図<sup>11)</sup>

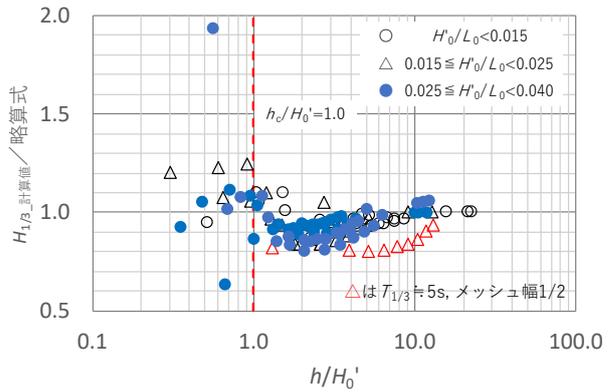


図-11 有義波高に対する略算式との比較： $i=1/100$

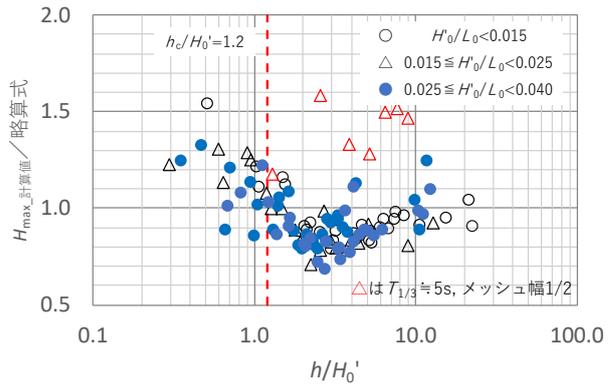


図-12 最高波高に対する略算式との比較： $i=1/100$

によると  $h/H_0' = 2 \sim 3$  程度の範囲で有義波高が極大を示すことから、 $h/H_0' < 1.6$  は砕波が卓越する領域と考えられるが、計算値は略算式よりも最大で約 20% 大きくなった。最高波高について同様に整理した結果が図-10 となる。有義波高に比べてばらつきの度合いが若干大きくなり、 $h/H_0' > 2.5$  で計算値と略算式の差が  $\pm 20\%$  以内となった。砕波が卓越すると考えられる  $h/H_0' < 2.5$  で計算値が略算式より大きくなる傾向は有義波高と同じであった。

次に、海底勾配が  $i=1/100$  の場合に同様に整理した結果を図-11 および図-12 に示す。 $i=1/10$  に比べて略算式との差が大きく過小な場合が多くなっている。 $T_{1/3}=5s$  のケースではメッシュ幅を当初の 1/2 (強い非線形性に対する基準幅) としたが、それでも 1/100 勾配の場合には浅水変形を十分に再現することができなかった。有義波高の場合、 $h/H_0' > 1.0$  で計算値と略算式の差は最大で 20% 程度となった。最高波高についても  $h/H_0' > 1.2$  で過小な場合が多く略算式との差は最大で約 30% となった。

ここで検討した計算値と略算式との差は、合田<sup>11)</sup>が砕波帯内の波高変化を検討したときの実験値と算定図の差と同程度であった。また有義波高および最高波高の計算値が  $h/H_0' < 1.0$  では略算値より大きく、特に海底勾配が緩い  $i=1/50$  のときにこの傾向が強くなることとも一致している。このように、提案したメッシュを用いた場合の一樣斜面上における波高変化は、規則

波および不規則波ともに妥当と言える。

### 3.2 直立堤および混成堤の伝達波

Goda et. al.<sup>13)</sup>の実施した直立堤および混成堤の伝達波に対する実験時の断面を再現した計算断面および混成堤の断面形状を図-13 および図-14 に示す。計算では

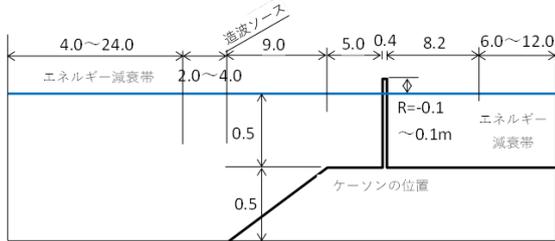


図-13 Goda et al. の実験断面の再現状況(直立堤)

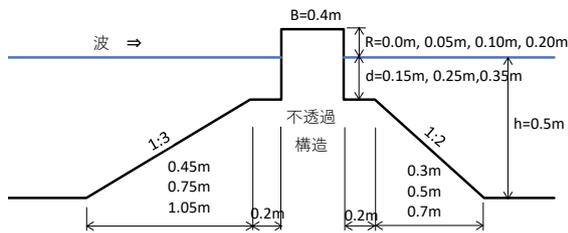


図-14 混成堤の断面形状

代表的な実験ケースを選び、直立堤に対して  $T=1.05s, 1.5s, 1.8s$  および  $2.8s$  で  $H=3\sim 20cm$  の 47 ケース、また混成堤に対しては  $T=1.8s$  で  $H=5\sim 20cm$  の 64 ケース (マウンド高 3 種類) に対し、規則波による計算を実施した。なお、混成堤の実験では、マウンド内部を透過する波を実験スケールでは再現できないことから不透過構造としており、計算もそれにならった。堤体背後の伝達波は分裂や平均水位の変化を引き起こすことがあったので、その場合は平均水位の補正を行いゼロアップクロス法による計算を実施した。そのような処理を実施しても短周期となる場合には、規則波であることから 1 周期の長さで 1 波を定義し、その中における最低水位と最高水位の差を波高と定義した。なお、伝達率は通過波高を入射波高として上述から算出された伝達波高との比で求めた。反射率は入・反射波分離推定法によって算出した<sup>13)</sup>。CADMAS-SURF の計算で用いた主なパラメータは先述の表-4 と同じである。

直立堤に対する伝達率および反射率の計算結果をそれぞれ図-15 および図-16 示す。伝達率および反射率は、入射波の有限振幅性の影響を修正した結果 (Goda<sup>14)</sup>) を示している。図-15 および図-16 の図中に示す曲線は、それぞれ実験値の上限および下限を示す算定式および実験値の平均的な大きさを表す曲線である。伝達率の計算値は実験値の範囲に分布しており妥当である。また、反射率もばらつきはあるものの実験値の平均的な傾向をよく表しており、反射率のばらつきは伝達率のそれより大きかったとの記載が論文にあることから計算結果

は妥当と考えられる。

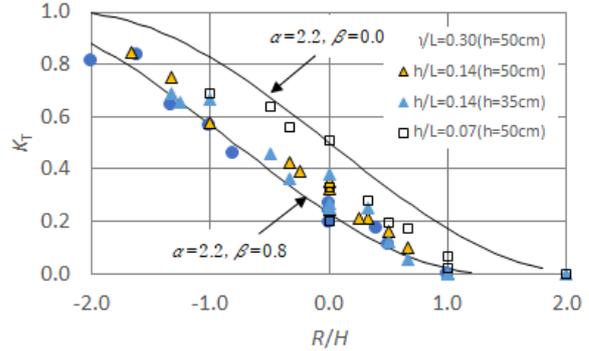


図-15 直立堤の伝達率の計算結果 (全データ)

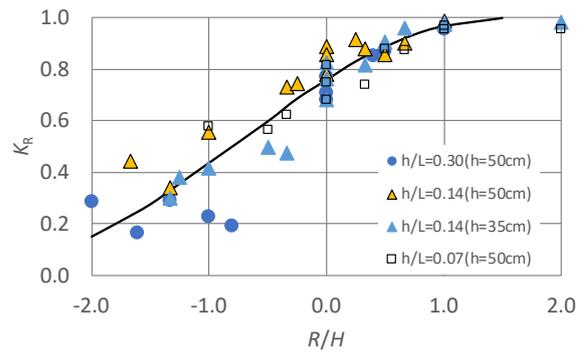


図-16 直立堤の反射率の計算結果 (全データ)

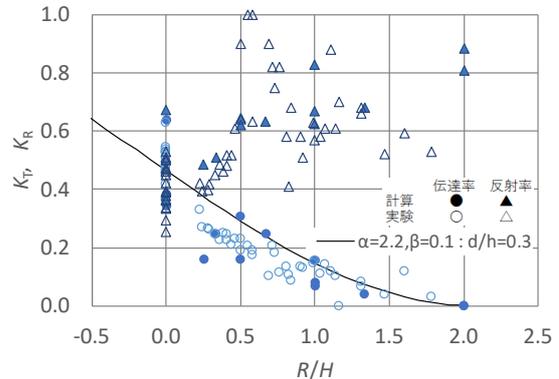


図-17 混成堤の伝達率と反射率  $h/L=0.14, d/h=0.3$

次に、混成堤の場合の伝達率および反射率に対する計算値と実験値を図-17～図-19 に示す。こちらの実験値も直立堤と同じく入射波の有限振幅性の影響を修正した結果を示している。図中の曲線は伝達率に対する実験値の上限を表す算定式であるが、高マウンドから低マウンドの条件まで、いずれのマウンド高に対しても、伝達率の計算値は実験値をよく表している。反射率は、マウンド高が最も低い  $d/h=0.7$  では直立堤の場合と同じく  $R/H \geq 0.0$  で  $0.7\sim 1.0$  となっており、直立堤の場合と同じである。マウンド高が高くなるのに応じて、 $R/H \geq 0.3$  では反射率のばらつきが大きくなるが、全体的にはマウンド高が高くなるほど反射率は小さくなる傾向にある。実験による反射率に関して、最もマウンド高が高い

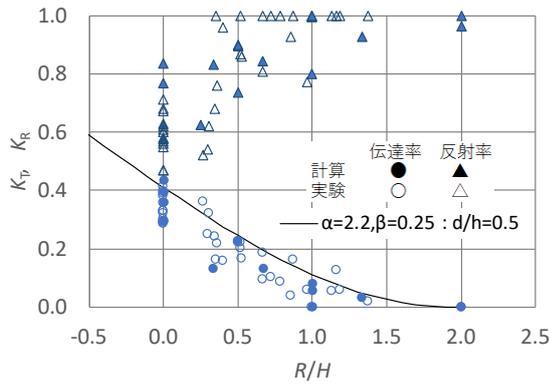


図-18 混成堤の伝達率と反射率  $h/L=0.14$ ,  $d/h=0.5$

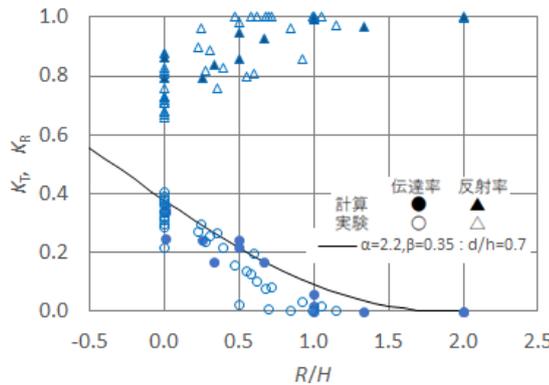


図-19 混成堤の伝達率と反射率  $h/L=0.14$ ,  $d/h=0.7$

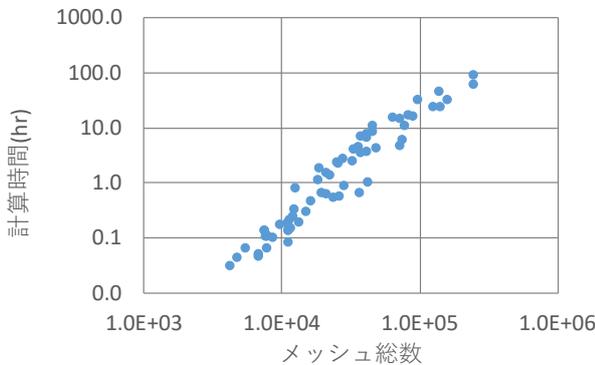


図-20 計算時間

$d/h=0.3$  の場合 (図-17 参照),  $0.5 < R/H < 0.7$  付近で反射率が 0.8 以上となるケースが見られるが計算結果と比較しても若干大きすぎるのではないかと考えられる。これは有限振幅性の修正の限界に起因しているのではないかと推察される。これらの点を勘案すれば反射率の計算値も実験値をよく表していると考えられる。

### 3.3 計算時間

今回実施した計算の中で、水位上昇量について検討した不規則波に対する計算時間を図-20 に示す。計算条件としては作用波数を 600 波程度とし、総水路長を 10~200 波長程度とした場合の計算時間となっている。波浪

条件としては碎波および非碎波の両方を含み、造波位置におけるアーセル数の範囲を 20 未満となっている。計算時間は総メッシュ数にほぼ線形に比例して大きくなっている。ちなみに、計算断面が同じ場合の約 200L に対する格子数は約 10L のその 1.51 倍となり、計算時

表-9 計算機の仕様

計算機の仕様	
プロセッサ	3th Gen Intel(R) Core(TM) i9-13900KF 3.00 GHz
実装RAM	128 GB (128 GB 使用可能)

間の増加は 1.53 倍であった。このように、沖側の波エネルギー減衰帯内のメッシュ幅を等比級数的に増大させることで、メッシュ数を抑制することが計算時間の短縮につながる事が分かる。なお、計算に用いた計算機の仕様は表-9 に示すとおりである。

## 4. まとめ

今回提案したメッシュおよびその構築方法について明らかになった点を以下に列挙する。

- CADMAS-SURF を対象として、合理的なメッシュ幅の構築方法を提案し、その妥当性を理論値や水理模型実験との比較によって確かめた
- メッシュ幅の作成は、造波位置におけるメッシュ幅を基本幅とし、対象波の波高および周期と水深の関係からメッシュ幅を 2 段階で変化させる方式で碎波までの波高変化を精度よく計算できることを確かめた。
- 不規則波計算では、600 波程度作用させた場合でも水位上昇量を 0.2%程度に抑制する方法として、総水路長を 200 波長程度とし、沖側のエネルギー減衰帯の領域を等比級数的に大きくすれば計算負荷は小さいことを確認した。
- メッシュの基本幅および不規則波計算時の推奨値(造波水深, 波高, 周期)を表形式で整理した。
- 不規則波計算の計算時には、構造水路内で発生する長周期波の影響を勘案し、対象とする領域の平均的な水深に留意する必要がある。これらを勘案した造波水深の目安を示した。
- 本メッシュを使用することで一定の精度を持つ計算結果が得られるようになる

上述の知見を反映したメッシュ作成が簡便にできるように、FORTRAN によるデータ作成ソフトを作成し、港湾空港技術研究所で開発した海底地形および透過構造物の作成支援ソフトと合わせて利用することで、メッシュの作成時間を大幅に短縮できるようにした。なお、構造物付近のメッシュについては、構造形式や消波工

の形状などを考慮する必要性が高く、ここでは取り扱わなかったことを付記する。

## 5. 今後の課題

- CADMAS-SURF の標準的な計算方法を明らかにし、マニュアル等を作成して普及の向上を図る
- 一様斜面上の波高変化において、規則波を対象とする意場合の水平メッシュの標準値をもう少し小さくすることが有効ではないかと考えられた。より最適と考えられるメッシュ幅の考え方も合わせて考える余地がある
- 今回の報告では、越波や波力に関する検証結果を掲載することができなかった。越波に関しては、水平メッシュ幅の基本幅を推奨値として、鉛直メッシュ幅を水平メッシュ幅の 1/2 に設定した場合の結果が藤原ら<sup>15)</sup>に示されている。また、「CS3D 設計実務研究会」での検討を通して上記の課題を検討中であり、成果がまとまった時点で報告したい。

## 謝辞

本研究は、令和 3 年度から（国研）港湾空港技術研究所・鈴木領域長（当時）をリーダーとして、民間企業 12 社（いであ、エコー、日本公営、日本港湾コンサルタント、ニュージェック、パシフィックコンサルタンツ、復建調査設計、五洋建設、大成建設、東亜建設工業、東洋建設、不動テトラ）および（一財）沿岸技術研究センターで実施している「CS3D 設計実務研究会」での活動の中で実施されたものであることを付記し、関係各位に深甚の謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 磯部雅彦・高橋重雄・余錫平・榊山勉・藤間功司・蔣謹・秋山実・大山洋志(1999)：数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF 法基本プログラムの作成—, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp. 321-326
- 2) 一般財団法人 沿岸技術研究センター(2010)：数値波動水路の研究・開発, 沿岸技術ライブラリー, No. 39, 235p.
- 3) 公益社団法人日本港湾協会(2018)：国土交通省港湾局監修 港湾の施設の技術上の基準・同解説(2018), 2218p.
- 4) Munk, W. H. (1949)：The solitary wave theory and its application to surf problems, Annals New York Acad. Sciences, Vol. 51, pp. 376-424
- 5) 藤原隆一(2008)：線形理論を用いた不規則波信号作成における流速の補正方法, 海洋開発論文集, Vol. 24, pp. 873-878.
- 6) 関本恒浩(2013)：数値波動水路を用いた津波解析における減衰・透過境界部での問題とその対策, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, I\_706-I\_711
- 7) 岩垣雄一・塩田啓介・土居宏行(1981)：有限振幅波の浅水変形と屈折係数, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 99-103
- 8) 合田良實(1991)：増補改訂 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 333p.
- 9) 合田良實(1970)：砕波資料の整理について, 土木学会論文報告集, No. 180, pp. 39-49
- 10) Battjes, J.A. (1974)：Surf Similarity, Proc. Of 14<sup>th</sup> Conf. on Coastal Eng., pp. 466-480
- 11) 合田良實(1975)：浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp. 59-106
- 12) Goda Y., H. Takeda and Y. Moriya(1967)：Laboratory Investigation on Wave Transmission over Breakwaters, Report of the Port and Harbour Research Institute, No. 13, pp. 1-38
- 13) 合田良實・鈴木康正・岸良安治・菊池 治(1976)：不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技術研究所資料, No. 248, 24p.
- 14) Goda Y. (1969)：Re-analysis of Laboratory Data on Wave Transmission over Breakwaters, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 8, No. 3, pp. 3-18
- 15) 藤原隆一・高橋武志・鈴木 樹(2024)：土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 80 (印刷中)

