

規則波・不規則波作用下における直立堤の 越波伝達波に対する数値波動水路の適用性

APPLICABILITY OF NUMERICAL WAVE FLUME FOR TRANSMITTED WAVE BY OVERTOPPING ON UPRIGHT BREAKWATER UNDER REGULAR / IRREGULAR WAVE ACTIONS

長谷川 巖¹・稲垣 茂樹²・川崎 浩司³

Iwao HASEGAWA, Shigeki INAGAKI and Koji KAWASAKI

¹正会員 株式会社エコー 防災・水工部 (〒110-0014 東京都台東区北上野二丁目6-4)

²正会員 工修 株式会社エコー 防災・水工部 (〒110-0014 東京都台東区北上野二丁目6-4)

³正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

The consideration of transmitted waves by overtopping on coastal breakwaters as well as progressive waves from harbor entrances is of importance to examine in detail and estimate harbor tranquility at high waves. However, the conventional models of wave transformations, such as energy balance equation, wave ray method and so on, cannot compute the influence of the transmitted waves appropriately. The present study is, therefore, aimed at discussing the applicability of a two-dimensional numerical wave flume "CADMAS-SURF" based on the VOF method for transmitted wave phenomena behind an upright breakwater by comparing with hydraulic model experiments under regular and irregular wave actions. As a result, the CADMAS-SURF is found to be capable of reproducing well the experimental results regarding the wave height and frequency spectra of the transmitted waves.

Key Words : Transmitted waves, wave overtopping, numerical wave flume, CADMAS-SURF

1. はじめに

高波浪時の港内静穏度を検討する際には、港口からの進入波に加えて、防波堤等を越波して港内に伝達する越波伝達波（以下、伝達波とする）を考慮する必要がある。しかし、従来法の波浪変形計算や港内静穏度計算では伝達波を考慮することができない。平山ら¹⁾はブシネスクモデルによる波浪変形計算で伝達波の再現を試み、比較的高い精度で伝達波を計算することに成功している。しかし、防波堤で打ち上がった水塊が背後に飛び込む現象を計算できないため、計算結果が模型実験結果と一致しない場合があることが指摘されている。水塊が構造物背後に飛び込む現象を考慮するためには、越波・越流現象を精度よく数値解析する必要がある。

そこで、本研究では、複雑な水面挙動を高精度に解析可能な断面 2 次元数値波動水路 CADMAS-SURF²⁾を用いて、規則波・不規則波作用下における直立堤背後の伝達波計算を行い、水理模型実験との比較から、数値波動水路の妥当性・適用性を検討した。具体的には、まず規則波による越波伝達波の計算を行って水面波形や伝達波高を実験結果と比較し、数値波動水路の妥当性を定量的に検証した後、不規則

波計算を実施して周波数スペクトル特性を模型実験と比較した。なお、これまで海岸護岸の越波流量に対する数値波動水路の適用性について数多く検討されているが（例えば、有光ら³⁾）、本研究は越波による伝達波に着目している点で既往の研究と異なる。

2. 越波伝達波の水理模型実験の概要

実験水槽は長さ 35m、高さ 1.3m の二次元造波水路で、反射波吸収機能付きの不規則波造波装置が設置されている。以下に水理模型実験の概要を示す。なお、模型実験データは平山ら¹⁾の成果（論文に示されていないケースを含む）を引用している。

(1) 規則波実験の概要

造波板中立位置から 2087.5cm 位置に高さ 20cm で勾配 1:30 の斜面を設置し、斜面の上端に幅が 3cm の直立壁を設置した。直立壁の背後は高さ 20cm の水平床である。造波板前面の水深は 49.5cm で、直立壁の天端高は初期水面から 13cm である。海底勾配斜面や直立壁と水路壁の隙間は止水処理を行ったので、越波が生じると直立壁背後の水位が上昇する。

水路の終端には水路壁からの反射波を抑制するために、消波材としてヘチマロンを 200cm の幅で設置した。模型実験では図-1 に ch.2 から ch.18 で示す位置に容量式波高計を設置して水位計測を行った。ch.13 は直立壁の沖側 2cm, ch.16 と ch.18 は直立壁の背後 75cm と 175cm である。波浪条件は ch.2 と ch.3 で入・反射波分離を行った入射波が $H=20.5\text{cm}$, $T=1.58\text{s}$ で、水深 $h=49.5\text{cm}$ における波長 L は 302cm である。図-1 には表示していないが、ch.3 は ch.2 と ch.4 の中間点にある。

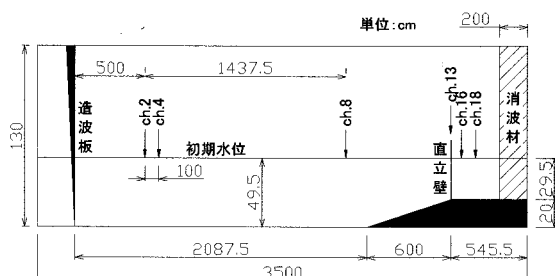


図-1 実験水槽と直立壁実験模型

(2) 消波材の反射率検定実験の概要

図-2 に示すように、直立堤背後の伝達波高に及ぼす消波材からの反射波の影響を把握するため、静水深が 74.3cm と一定の条件下で波を入射させたときの消波材の反射率検定実験を実施した。波浪条件は $H=13.2\text{cm}$, $T=1.46\text{s}$ の規則波で、 $h=74.3\text{cm}$ における波長 L は 304cm である。消波材の 1 波長程度沖側に約 1/8 波長間隔で設置した 2 本の波高計の水位データを用いて合田ら⁴⁾の入・反射分離推定法で解析した結果、反射率は 0.143 であった。

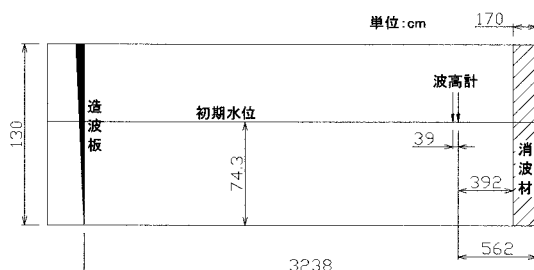


図-2 実験水槽と消波材検定実験模型

(3) 不規則波実験の概要

不規則波実験は規則波実験とほぼ同じ内容で実施した。実験条件の違いは造波板前面の水深を 50cm としたこと、初期水面からの直立壁の天端高 h_c を 12.5cm に変更したことである。不規則波実験の波浪条件は、ch.2 と ch.4 のデータで入・反射波分離を行った入射波が $H_{1/3}=12.1\text{cm}$, $T_{1/3}=1.96\text{s}$ で、水深 50cm における波長 L が 396cm である。

3. 数値波動水路による計算の概要

(1) 消波材の反射率検定計算の概要

数値波動水路による計算では、模型実験で使用した消波材をポーラスセルとして取り扱うものとし、まず、その反射率検定を実施した。計算条件は図-3 および表-1 のとおりである。ポーラスセルの空隙率は模型実験で使用した消波材（ヘチマロン）と同じ 0.9 とした。慣性力係数 C_M は 1.0 として、抵抗係数 C_D を変更することで模型実験と反射率が一致する抵抗係数を求めた。計算領域は模型実験と同じになるようにしたが、格子サイズと合わせるために模型実験とは寸法がわずかに異なる箇所がある。計算時間は 350s であるが、計算領域内で水面波形が十分に安定していない最初の 180s のデータを除外して、残りの 170s を解析対象とした。長時間の計算を行うため、造波地点で反射波の影響を受けない造波ソースを造波モデルとして採用した。また、造波ソースの左側に約 2 波長の長さの減衰領域を設定して、水路終端の反射波を抑制すると共に、左端を開境界とした。計算に使用したプログラムは CADMAS-SURF V4.0 である。

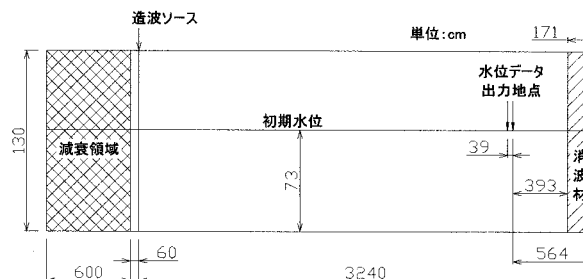


図-3 消波材の反射率検定計算の計算領域図

表-1 消波材の反射率検定計算の計算条件

条件項目	条件設定
波高, 周期, 水深	$H=8\text{cm}$, $T=1.46\text{s}$, $h=73\text{cm}$
格子幅	$dx=3\text{cm}$, $dz=1\text{cm}$
造波モデル	造波ソース
計算時間, 時間刻み幅	350s, 0.01s (一定)
ポーラス下限値	0.00001
VP-DONOR	0.5
VOF関数境界条件	フリー
流速・圧力境界条件	スリップ
消波材空隙率, 慣性力係数	空隙率0.9, $C_M=1.0$

(2) 規則波計算の概要

規則波計算では、水理模型実験の水面波形と比較しながら、伝達波の波形と波高に対する数値波動水路の適用性について詳細に検討した。計算領域は図-4 に示すとおりである。水平・鉛直方向の格子間隔 dx , dz は 2.5cm (L/dx が約 120), 1cm (H/dz が約 20) である。構造物の形状を格子間隔と一致させるために、直立壁の幅は 2 格子分の 5cm とした。直立壁の天端高を格子間隔に合わせるために、模型実験では 49.5cm であった初期水位を数値波動水路では 49cm とし、初期水位からの天端高 h_c を模型実験と同じ 13cm とした。造波モデルと減衰領域に関しては、消波材の反射率検定計算と同様に設定した。計算に使用したプログラムは CADMAS-SURF V4.0

である。造波信号は、ch.2 における波高と周期が模型実験と一致するように入力波高と入力周期を調整した。規則波計算では、移流計算ハイブリッドスキームの1次風上差分と2次中央差分の割合を示すVP-DONOR と格子間隔の変更を行い、伝達波高が模型実験と一致する最適条件を検討した。VP-DONOR の条件は表-2 に、格子間隔の条件は表-3 に示すとおりである。水路終端の消波材はポーラスセルとし、抵抗係数 C_D は反射率検定計算の結果を適用した。

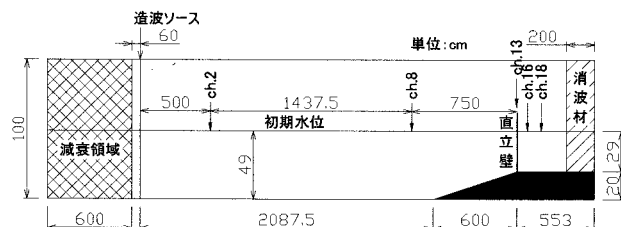


図-4 規則波計算の計算領域図

表-2 規則波計算の計算条件

条件項目	条件設定
波高, 周期, 水深	$H=11\text{cm}$, $T=1.58\text{s}$, $h=49\text{cm}$
格子間隔	$dx=2.5\text{cm}$, $dz=1\text{cm}$ (VP-DONOR変更時) 格子間隔変更時は別表参照
造波モデル	造波ソース
計算時間, 時間刻み幅	160s, 自動(安全率0.1)
ポーラス下限値	0.0001 (VP-DONOR変更時) 0.01 (格子間隔変更時)
VP-DONOR	0.1, 0.2, 0.5 (VP-DONOR変更時) 0.2 (格子間隔変更時)
VOF関数境界条件	フリー
流速・圧力境界条件	スリップ
消波材空隙率, C_M , C_D	空隙率0.9, $C_M=1.0$, $C_D=4.7$

表-3 格子間隔変更ケースの格子幅設定

	水平方向 dx		鉛直方向 dz		
	左端～直立壁	直立壁～右端	高さ 0～40cm	高さ 40～65cm	高さ 65～100cm
粗格子	2.5cm		1cm		
中格子	2.5cm	1cm	1cm	0.5cm	1cm
細格子	2.5cm	1cm	1cm	0.2cm	1cm

(3) 不規則波計算の概要

不規則波計算では、伝達波の周波数スペクトルに着目して数値波動水路の適用性を検討した。なお、実験と計算では造波信号が若干異なることから、ここでは水面の実験波形との比較を行わないこととした。計算領域は図-5、計算条件は表-4 に示すとおりである。計算時間短縮のため、造波ソースから直立壁までの距離を波長の約3倍の13.5mとした。

不規則波計算には CADMAS-SURF V5.1 を使用した。

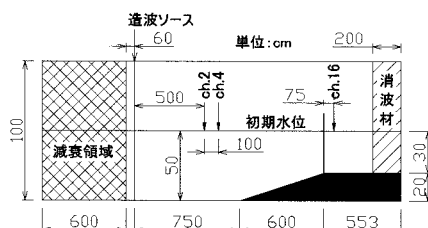


図-5 不規則波計算の計算領域図

表-4 不規則波計算の計算条件

条件項目	条件設定
波高, 周期, 水深	$H_{1/3}=14.4\text{cm}$, $T_{1/3}=1.93\text{s}$, $h=50\text{cm}$
格子間隔	規則波計算の中格子と同じ
造波モデル, 造波関数	造波ソース, マトリックス
計算時間, 時間刻み幅	245s, 自動(安全率0.4)
ポーラス下限値	0.1
VP-DONOR	0.2
VOF関数境界条件	フリー
流速・圧力境界条件	スリップ
消波材空隙率, C_M , C_D	空隙率0.9, $C_M=1.0$, $C_D=4.7$

造波信号は入射波高が模型実験と一致するように入力波高と入力周期の調整を行うと共に、入射波の周波数スペクトルが模型実験と一致するようにスペクトル補正を行った。計算時間は245sとし、計算領域内で水面波形が不安定である最初の100sのデータを除外して、残りの145sを解析対象とした。

4. 規則波による検討結果

(1) 消波材の反射率

抵抗係数 C_D を2, 3, 5, 7, 9の5段階に変更した計算結果に対して、合田ら⁴⁾の方法で求めた反射率は図-6のとおりである。 C_D が2～5の範囲では C_D の増大に伴い反射率が大きく低下したが、 C_D が5を超えると反射率が若干増加した。一般に、 C_D の増大に伴い、消波材内で波エネルギーが逸散されるため、反射率が低下する。一方、 C_D がある閾値を超えると、消波材自体の抵抗が大きくなり、逆に反射率が増加することが予想される。図-6からも、上記の傾向が示されていることがわかる。したがって、模型実験の反射率0.143を得るためには、 $C_D=2\sim5$ の範囲で抵抗係数を設定すればよい。そこで、この範囲で近似式を求め、反射率0.143に対する C_D を算定すると4.7であった。よって、以降の計算では消波材の C_D を4.7とした。一般的に石材層や消波ブロック層の C_D は1.0程度が用いられることが多いので、これらと比べて消波材(ヘチマロン)の抵抗係数はかなり大きくする必要があることが分かる。

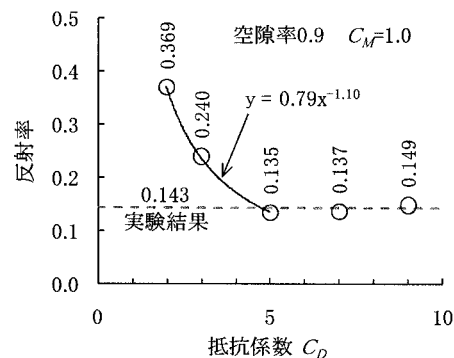


図-6 不規則波計算の計算領域図

(2) 水面波形

VP-DONORが0.1、格子間隔が粗格子の条件で実施した水位の計算波形を実験波形と重ねて示すと図-7

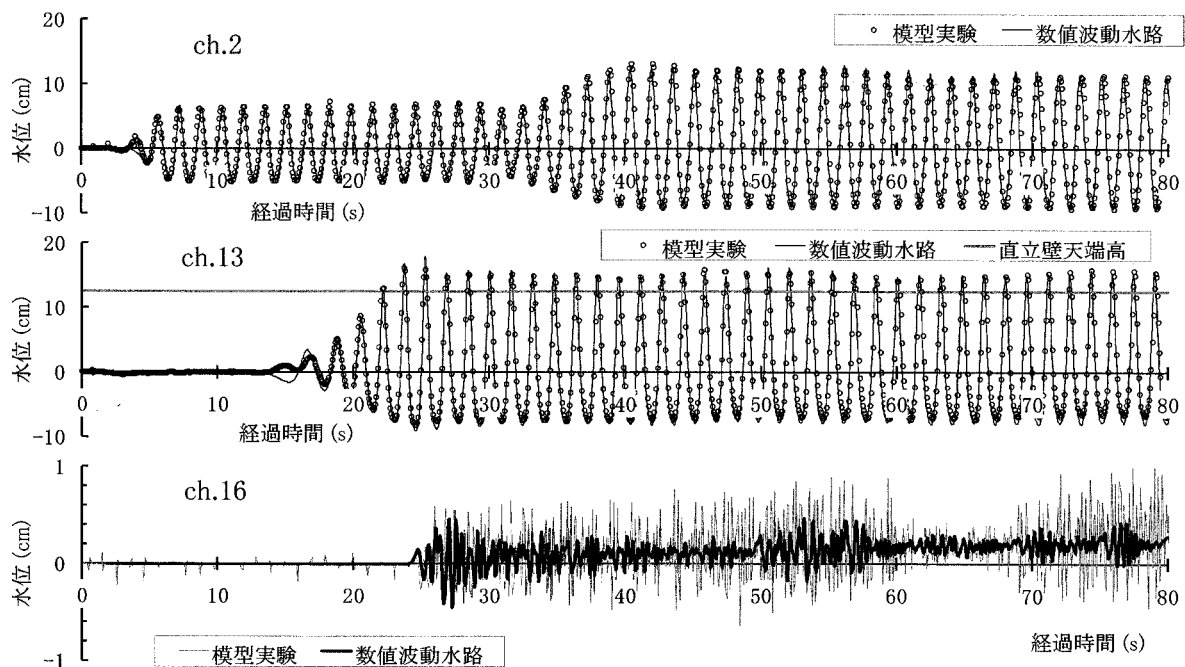


図-7 規則波計算と規則波実験の水面波形の比較

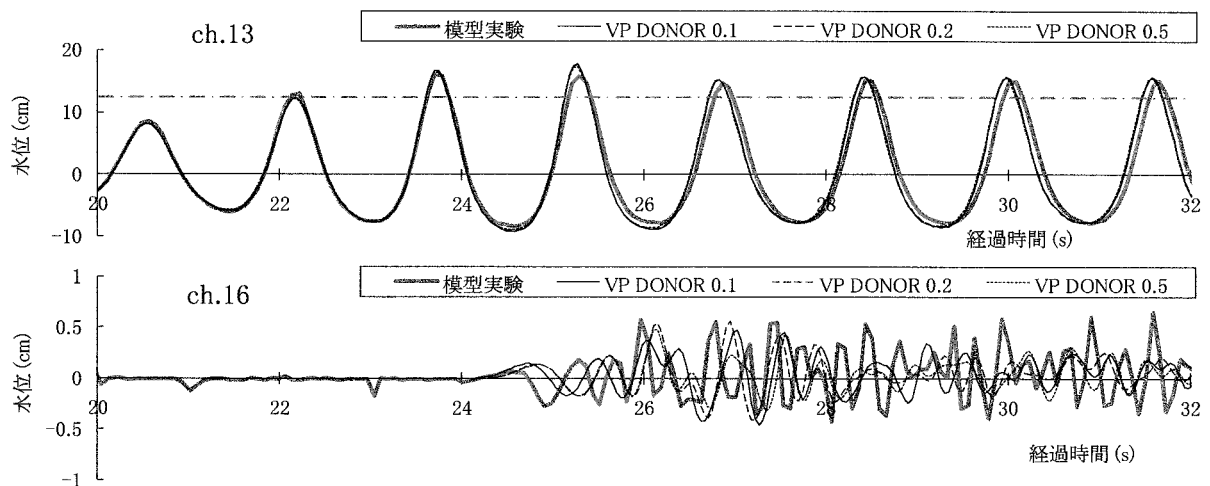


図-8 VP-DONOR を変更した規則波計算と規則波実験の水面波形の比較

のとおりである。ch.2 の波高と周期が模型実験と一致するように数値波動水路の造波信号を調整してあるので、ch.2 の経過時間 30s までの波形が模型実験と数値波動水路で一致しているのは当然である。ch.2 において 30s 以降に水位変動の振幅が変化しているのは、直立壁からの反射波の影響である。反射波の影響が現れ始める時刻と、それ以降の水面波形がほぼ完全に一致していることから、入射波のみならず反射波についても数値波動水路で精度よく計算されていることが分かる。

さらに、直立壁の沖側 2cm の位置である ch.13 の水面波形も、模型実験と数値波動水路でほぼ完全に一致していることから、重複波の現象も数値波動水路で精度よく計算されていると言える。

直立壁より背後側の ch.16 では、伝達波が到達する時刻が一致している。伝達波到達直後の数波は水位の振幅が模型実験と数値波動水路で概ね同じであ

るが、その後は模型実験の水位振幅が数値波動水路より大きい。しかし、越波による ch.16 の水位上昇は模型実験と数値波動水路でほぼ一致している。そこで、直立壁背後の水位上昇量は空間的に一定であると仮定して、ch.16 の 70s から 75s の 5 秒間の平均水位に直立壁背後の長さを乗じて越波量を求めると、模型実験で $120\text{cm}^3/\text{cm}$ 、数値波動水路で $110\text{cm}^3/\text{cm}$ となった。模型実験より数値波動水路の越波量が若干少ないが、その差は 8%程度であった。

(3) VP-DONOR の影響

格子間隔は粗格子で、差分スキーム VP-DONOR の値を 0.1, 0.2, 0.5 の 3 種類に変更したケースの水面波形を模型実験の結果と共に図-8 に示す。直立壁直前 (ch.13) の水位変動は VP-DONOR の変更による違いが認められず、どのケースも模型実験の水位変動と一致している。直立壁背後 (ch.16) の水位

変動は VP-DONOR の変更により若干違いが認められる。ch.16 の 160s までの平均波高は模型実験が 0.71cm, 数値波動水路は VP-DONOR が 0.1, 0.2, 0.5 の順に 0.19cm, 0.16cm, 0.21cm であり, 数値波動水路の波高は模型実験より小さい。ただし, 水面波形を見ると, 伝達波が ch.16 に到達した直後の 24s~28s までは模型実験と数値波動水路の波高は同程度である。ch.16 の 160s までの平均周期は模型実験が 0.40s, 数値波動水路は VP-DONOR の小さい順に 0.45s, 0.46s, 0.51s であり, VP-DONOR が小さいほど周期が短く, 実験結果に近い値を示す。使用した計算機は CPU が Intel Pentium4 3.8GHz, メモリが 1GB のデスクトップ PC で, 計算にかかった時間は VP-DONOR が小さい順に 52 時間, 42 時間, 39 時間である。VP-DONOR を変更することで伝達波の時間波形を模型実験と一致させることはできなかったが, 周期の再現性と計算時間を考慮すると VP-DONOR は 0.2 が良いと言える。

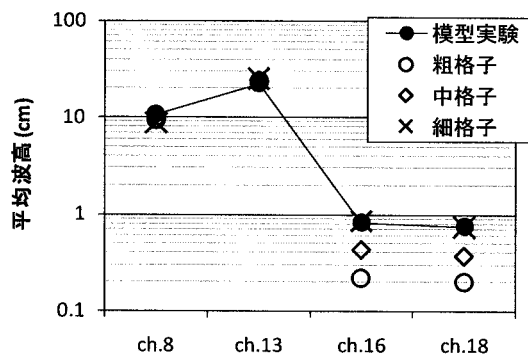
(4) 格子間隔の影響

格子間隔を $dx=2.5\text{cm}$, $dz=1\text{cm}$ で一定としたこれまでの計算結果を見ると, 直立壁より沖側では模型実験と数値波動水路の波高や水面波形の一致度が高く, 直立壁背後では計算精度が若干低下している。直立壁より沖側は波高が大きく周期が長いので, 波高や波長に対する格子分割数が十分であったが, 伝達波は波高と波長が小さいので相対的に格子が粗く, これが模型実験との結果の違いの原因になったと考えられる。

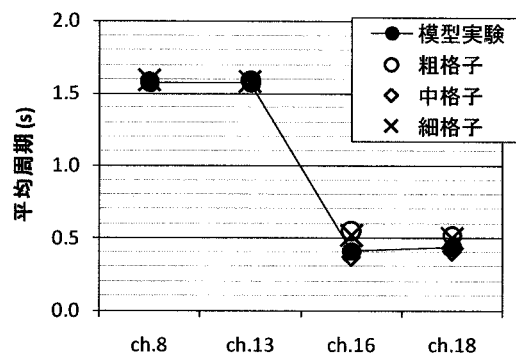
そこで, 前出の表-3 に示すように, 直立壁より背後側の格子間隔を変更した計算を実施した。模型実験による伝達波高は 0.71cm であるので, 十分な格子分割数を確保するためには dz を 0.1cm 程度にしなければならないが, 計算格子数が多くなりすぎて膨大な計算時間を要する。ここでは, $z=40\text{cm}$ (初期水位-9cm) ~ 65cm (直立壁天端+3cm) の範囲の鉛直方向格子間隔 dz を 0.5cm, 0.2cm とした計算を実施した。伝達波の波長を特定することは難しいが, 模型実験の観察ではかなり短かった。その波長に対して十分な格子分割数を確保する場合, 数多くの格子数が必要となるため, 中・細格子を用いた計算では直立壁背後の水平方向格子間隔を 1cm とした。

格子間隔を変更した計算による波高と周期を, 格子間隔変更前及び模型実験の波高や周期と比較すると図-9 のとおりである。なお, 直立壁前後の波高に 10 倍以上の違いがあるので, 平均波高の図の縦軸は対数表示とした。また, 規則波の計算は 160s まで実施したが, 細格子の場合, 計算開始後 38.8s で計算が破綻した。そのため, 波高と周期の解析は格子間隔に依らない 24~38.8s を対象とした。細格子計算が止まった原因として, 水平方向と鉛直方向の格子間隔の比率が最大で 12.5 となったためと推察される。図-9 を見ると, 格子間隔を小さくすることにより直立壁背後の ch.16 と ch.18 の波高が大きくなり, dz を 0.2cm とした細格子では模型実験

と波高がほぼ完全に一致している。細格子では直立壁直前の ch.13 の波高も模型実験よりやや大きくなっている。このことも伝達波高が大きくなった要因の一つであると言える。格子間隔を変更した計算は同じ入力波高と入力周期を適用している。格子間隔の変更が直立壁より沖側の波高にも影響しているといえる。平均周期に関しては, 直立壁より沖側で実験結果と計算結果が一致している。直立壁背後では粗格子と細格子は模型実験より周期がやや長い。このことから, 格子を細かくすることで伝達波の周期の再現精度が高くなるとは限らないといえる。



(a) 平均波高 (解析区間 24~38.8s)

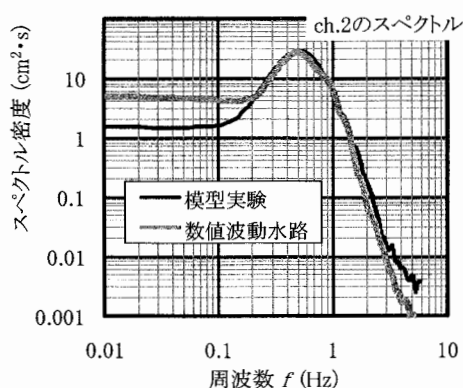


(b) 平均周期 (解析区間 24~38.8s)

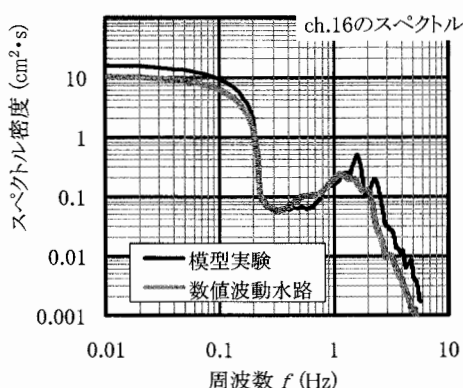
図-9 格子幅変更計算と規則波実験の波高・周期の比較

5. 不規則波による検討結果

不規則波計算で抽出した ch.2 と ch.16 の水位データを用いて周波数スペクトル解析を行った結果を模型実験と比較すると図-10 のとおりである。周波数 f が 0.2Hz 以下のスペクトル密度は模型実験より数値波動水路が大きく, f が 3Hz 以上のスペクトル密度は模型実験より数値波動水路が小さいという違いはあるものの, スペクトル密度がピークとなる周波数を含む $f=0.2\sim 3\text{Hz}$ の範囲において, ch.2 の周波数スペクトルは模型実験と数値波動水路で一致している。水路内で発生する長周期波が水路内での共振が原因であるとすると, 低周波数のスペクトル密度の違いが現れた要因として, 数値波動水路と模型実験の水路の長さの違いが考えられる。ただし, 解析対象と



(a) ch. 2のスペクトル解析結果



(b) ch. 16のスペクトル解析結果

図-10 不規則波計算と模型実験のスペクトル解析結果

した時間長が145sであるので、周波数が 10^{-2} のオーダーについては十分な情報量があるとは言えない。高周波数成分に違いが現れた要因として、高周波数成分は波長が短く、波長に対して格子間隔が相対的に粗くなるので、計算精度が低下した可能性が考えられる。ただし、高周波数成分はスペクトル密度が小さいので、高周波数成分を重視する特別の理由がない場合には、高周波数帯においてスペクトル密度が若干小さくなることの影響は小さいと言える。ch. 16の伝達波のスペクトル解析結果を見ると、造波ソース前面のch. 2のスペクトル密度が一致していた $f=0.2\sim 3\text{Hz}$ のスペクトル密度はch. 16においてもほぼ一致している。ch. 16の $f=1\sim 1.5\text{Hz}$ におけるスペクトル密度のピークはch. 2のピークの2倍周波数に相当する。ch. 16の伝達波の周波数スペクトルが高周波数成分側で模型実験より数値波動水路が小さい理由としては、直立壁より沖側のスペクトルも高周波数帯で数値波動水路が小さいこと、波長に対する格子間隔が粗くなることが考えられる。伝達波の波長を計算前に特定することが困難なため、格子分割数の最適値を正確に評価することは難しい。なお、模型実験における伝達波の有義波高は2.7cmなので、 $z=40\text{cm}\sim 65\text{cm}$ の $dz=0.5\text{cm}$ は有義波高に対する格子分割数が約5である。

以上をまとめると、計算精度に及ぼす格子間隔の影響はあるものの、不規則波動場に対しては、構造物背後に有義波高の1/5程度の格子間隔を適用した

場合においても、数値波動水路CADMAS-SURFは水理模型実験の越波伝達波を良好に再現できると言える。なお、規則波における模型実験と数値波動水路のch. 16の波高の一致度に比べて、不規則波のch. 16のスペクトルの一致度が高い要因は、不規則波の越波流量が規則波より約4倍大きいという検討条件の違いによると考えられる。

6. おわりに

本研究の成果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 計算結果と実験結果の比較から、数値波動水路CADMAS-SURFは、規則波動場のみならず不規則波動場に対しても、十分な精度で直立堤の越波伝達波を再現可能であると言える。
- 2) 模型実験で使用する消波材（ヘチマロン）の反射率を数値波動水路で再現するには C_u を1.0、 C_d を4.7と設定するとよい。ただし、今回設定した波高や波長と大きく異なる場合には、条件に合わせた検討が必要である。
- 3) 構造物より沖側の波高や周期に合わせた格子間隔を構造物の背後に適用しても、越波量の計算値は実験値とほぼ合致した。しかし、伝達波の水面波形や波高を実験結果と一致させるためには、格子幅など計算条件の再調整が必要である。
- 4) VP-DONOR値を変更した計算結果より、伝達波高に明確な違いが認められなかったものの、伝達波の周期に対する計算精度が向上した。計算精度と計算時間の面から判断して、本研究で検討した範囲においては、VP-DONORは0.2が最適であると言える。
- 5) 構造物背後の水平格子間隔と、水面から構造物天端付近の鉛直格子間隔を細かくすることにより、越波伝達波の計算精度が向上することを確認した。

謝辞：本研究は「数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会（委員長：東京大学大学院・磯部雅彦教授）」の活動の一環として実施したものであることを付記し、関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 平山克也，長谷川準三，長谷川巖，平石哲也：現地観測と模型実験に基づく越波伝達波の推定とその再現計算の試み，海岸工学論文集，第54巻，pp.76-80，2007。
- 2) 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会：数値波動水路の研究開発，（財）沿岸開発技術研究センター，296p，2001。
- 3) 有光 剛，安岡恒人，川崎浩司：越波排水路を有する低天端護岸における越波現象に対する数値波動水路の適用性，海岸工学論文集，第54巻，pp.726-730，2007。
- 4) 合田良実，鈴木康正，岸良安治・菊地 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No. 248，運輸省港湾技術研究所，24p，1976。