

数値波動水路(CADMAS-SURF)の適用性

Applicability of Numerical Wave Flume (CADMAS-SURF)

榊山 勉

Tsutomu SAKAKIYAMA

1. はじめに

海域構造物の耐波設計は、港湾の施設の技術上の基準¹⁾、海岸施設設計便覧²⁾などの設計指針や公式集に基づいて行うか、水理模型実験を行いその結果に基づいて行っている。防波堤に作用する波力や護岸の越波など海域施設の耐波安定性や防波機能に関する問題では、様々な構造形状や波浪条件を対象とするために、実験では多大なケースに及ぶことが多い。このために膨大な費用を要することがある。これに対して、地震を外力とする場合には実験の相似則が不確定なこともあり、耐震設計は主として数値解析コードを用いて行われている。地震による構造物や地盤の動的解析では実務に使われる数値解析コードが開発されている。

流体運動を対象とする機械工学、原子力工学などの分野では数値計算は、数値流体力学(CFD)の一分野を構築し、その数値計算技術と計算機的能力はともに発展している。海岸工学の分野においては、水波の波動運動がポテンシャル理論で近似できることや広域な平面領域での波浪変形を対象とすることが多いために、Navier-Stokes 方程式を鉛直積分した波動方程式の誘導と解法に研究者の関心がおかれていた³⁾。このために Navier-Stokes 方程式を解く計算手法は後発的な研究であった経緯がある。この種の計算手法は、同じ非線形運動を扱うポテンシャル理論に基づく強非線形モデルに比べ適用範囲が広く、実用的な観点からも波動運動の予測に有力な手段となり得るが、その開発は一部の研究に限られていた^{4)~9)}。設計公式は実務上非常に有用であるが、適用条件が限定されることもあり、重要な構造物に対しては水理模型実験により確認する場合も多い。近年、数値計算モデルへの関心が高まり、波力や越波量ならびにこれに係わる諸量を評価するために数値計算モデルが新たな有効な手段として利用可能になってきた。現在、数値解析コードだけで海岸構造物の耐波設計が可能な段階には達してはならず水理実験による最終的な確認が必要であるが、予備検討や実験終了後の追加検討に利用できる有力な手段であり、極近い将来に耐波設計への適用が期待される。

そこで、本稿では耐波設計への適用を目的に共同研究会により開発され、実務者や研究者に無償配布されている数値解析コード CADMAS-SURF¹⁰⁾の代表的な適用例と、その他の数値波動水路と呼べる最近の数値解析コードを用いた計算例を紹介し、これらの適用性について述べる。

2. 耐波設計への適用

耐波設計の観点から二次元造波水路で行ってきたこれまでの水理模型実験の内容を表-1に示す¹⁰⁾。適用において、図-1に示すように、直接計算できる対象と計算結果を間接的に利用する方法、さらに流体運動だけではなく、波による海底地盤や構造物の運動を求めるなどの目的に応じて、他のプログラムを追加し、それらと組み合わせるものがある。図-1で示す数値波動水路とよんでいる数値解析コードは、プリミティブな変数である流速、圧力を解くものを示す。これら物理量の空間的、時間的なデータが得られ、これまで水理模型実験で測定していたデータ量に比べ膨大な量の情報を得ることができる。もちろん、解析コードの特性が明らかになっており、精度が期待できる程度まで保証されている必要がある。使用者は、数値解析コードを使用するにあたっての注意点を把握しておくことが必要であるし、計算結果を鵜呑みにせずその妥当性を判断することが要求される。

表-1に示す実験内容に数値波動水路を適用するに際し、まず対象とする構造物地点の設計波の通過波の検

定を予め行う必要がある。浅水変形の計算例に示されるように、数値計算結果の浅水変形による波高には数値粘性の影響などにより 1 割程度の誤差が含まれることが示されている¹⁰⁾。入射境界で与える造波波高と設計対象地点の通過波高との関係について、あらかじめ進行波の変形計算を行って設定条件を定めておく必要がある。水理模型実験に比べて数値計算で得られるデータは膨大であり、データを有効に処理することにより得られる情報も拡大する。

表-1 数値波動水路と水理模型実験¹⁰⁾

実 験 名	内 容
入射波（波の伝播実験・通過波検定）	浅水変形，碎波の程度，波の峯高さ，リーフでの変形，遡上高
構造物の機能に関する実験	反射率・越波量・伝達波，透過波，海水交換
壁体状構造物の安定性に関する実験	波圧・揚圧力（滑動，転倒，滑り，変形量等）
傾斜堤の安定性に関する実験	流速・圧力・加速度（散乱・動揺・吸い出し・液状化等）
地盤の安定性に関する実験	流速・圧力・加速度（液状化，洗掘，吸い出し等）
海洋構造物の安定性に関する実験	流速・圧力・加速度（波力・係留力・動揺等）
その他 津波の遡上と津波力など	

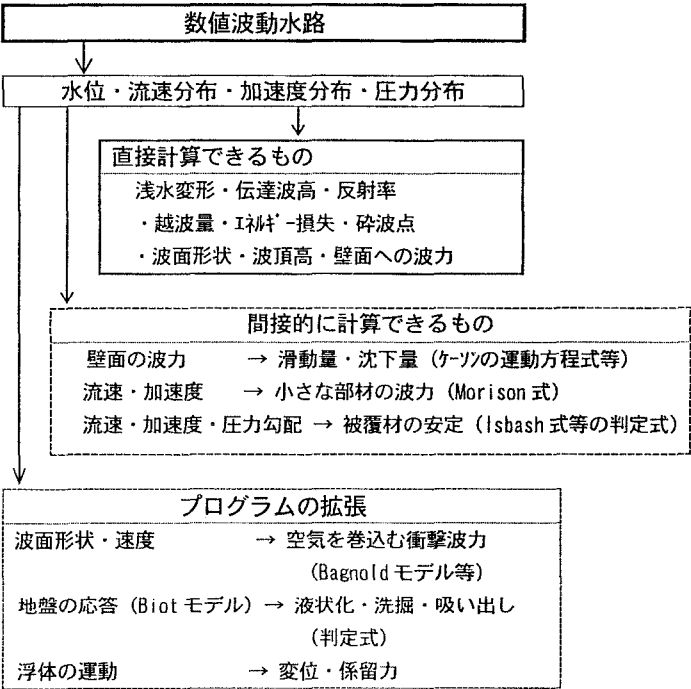


図-1 数値波動水路の適用¹⁰⁾

3. CADMAS-SURF の適用例 ¹⁰⁾

3.1 直立壁の波力 ¹⁰⁾

防波堤に作用する波力の評価は、耐波設計の最も基礎的かつ重要な課題である。設計のための波力算定には通常合田の波圧算定式が使われている。そこで、合田式が提案された時の基礎データとなった合田・福森の実験 ¹¹⁾ に CADMAS-SURF を適用し、その結果から得られた精度、特性、問題点等を紹介する。

図-2 に合田・福森 ¹¹⁾ の実験の断面図を示す。ただし、実験では衝撃砕波を制御するために、平面水槽内に水路幅を 0.8m から 0.5m に漸縮した 2 次元水路を作成している。そのため、水路長が比較的短いにも関わらず大規模な波力実験が可能となっている。図-2 の実験水路に対応する数値計算の解析対象領域を図-3 に示す。水路長に関しては、水路内で共振を起こすケースがあったため実験水路より長くしている。水路長すなわち計算領域は短い方が計算時間が短縮されるが、実際の水路と同様入射波の波高と周期によって規定される。今回の解析では、水路長を 30m あるいは 50m での計算結果を比較して最適な水路形状を定めた。衝撃砕波が発生する実験条件では、水路幅の漸縮効果が効いており、数値計算では合田・福森の実験を再現できない。実験には図-4 に示す高天端と低天端の直立堤と混成堤を用いた。

図-5 は、各防波堤に作用する最大前面波圧分布の一例を示したもので、合田式、理論解、実験値および数値計算結果を比較した。波圧分布の比較では、実験結果が各計測点での波圧の最大値で示されているので、計算結果も各格子点での最大波圧が示されている。これらは全て平均値であり、実験結果と数値計算結果の各記号についている横線は、標準偏差を意味している。また、理論解は、合田・柿崎 ¹²⁾ の一様水深の有限振幅完全重複波の摂動解で、斜面上にある直立堤や混成堤に適用しているものである。混成堤の場合にはマウンド上の水深を使っているという適用上の差異がある。これらの結果について、以下の事項が指摘されている ¹⁰⁾。

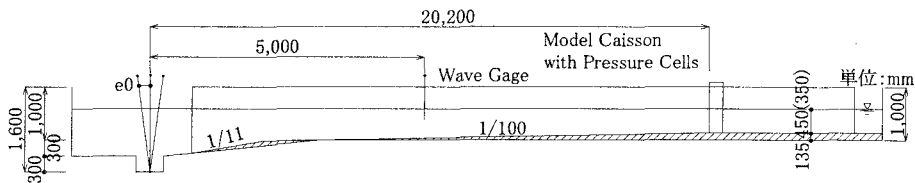


図-2 実験水路 ¹¹⁾

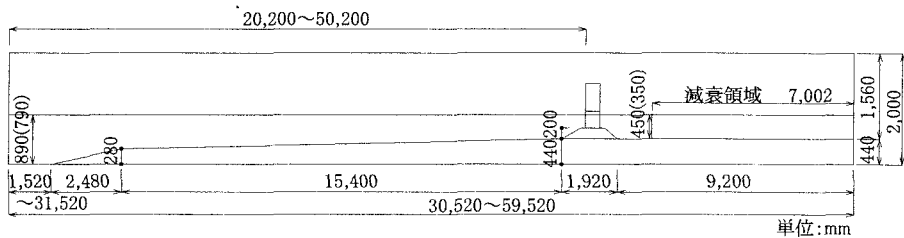


図-3 数値実験水路 ¹⁰⁾

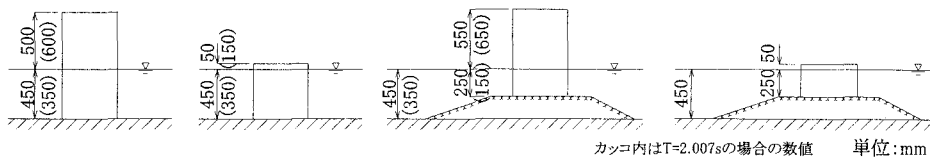


図-4 実験堤体 ¹⁰⁾

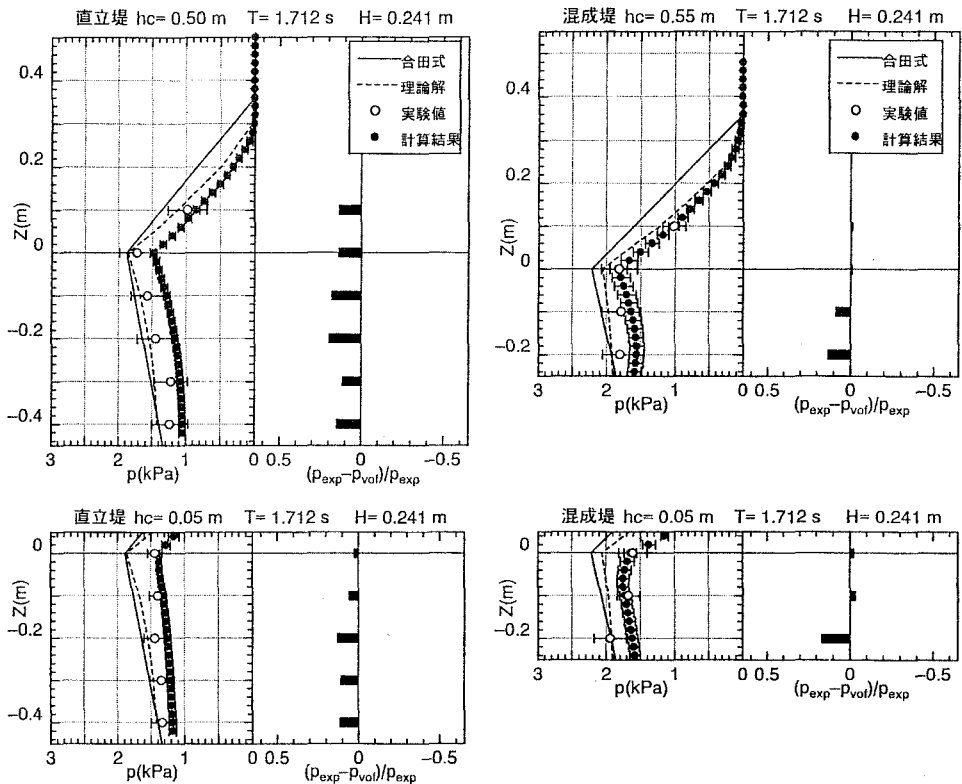


図-5 前面波圧分布の比較¹⁰⁾

- ・ 実験値および計算結果の波圧分布は、合田式および理論解よりも低くなる傾向がある。
- ・ 実験値と計算結果の比較では、実験値が若干大きく、底面に行くにしたがってその傾向は強くなる。
- ・ 実験値よりも、計算結果の波圧分布は静水面から底面方向への変化が大きい。
- ・ 静水面から上方向では、数値計算結果と実験値との一致度は高い。
- ・ 計算結果は、実験値に比較してデータのばらつきが少ない。
- ・ 低天端の混成堤の実験値および計算結果は、波圧強度の最大値が静水面位置からずれている。
- ・ 計算結果から、データのばらつきは混成堤で大きくなる。これは、直立堤の低天端時のばらつきが大きくないことから、マウンドの影響と思われる。

以上の指摘事項に対して気づいた点を以下に述べる。合田式は種々の実験の波力を包絡するように定式化されているので実験結果より大きくなる場合がある。全体的に実験結果より数値計算結果が小さいのは危険側の評価になるので、結果の適用に当たっては注意を要することになる。しかし、実験は漸縮した2次元水路を使用し、一方計算は完全な2次元現象を対象としている。実験条計算で条件が厳密に一致していないことが両者の差の原因と考えられる。使用した数値解析コードは異なるが、榊山ら⁴⁾、柴山ら¹³⁾によると計算結果と摂動解とは良く一致している。CADMAS-SURFは同程度以上の精度を有する解析コードであるから、図-5の計算結果と理論解との差は一樣水深の解を水深変化のある場に適用したことによるものと思われる。

3.2 直立消波ケーソン堤の反射率^{10),14)}

防波堤や護岸の反射率は港湾、海岸構造物の防波機能を代表するパラメタである。この反射率を対象にした小竹ら^{10),14)}の直立消波ケーソンの計算例を紹介する。直立消波ケーソンの基本的な概念を図-6に示す。前部に透過壁と遊水室を有し、これによって消波効果を発揮するケーソンで、透過壁には、縦スリット、横

スリット、曲面スリットなどが設けられる。小竹ら¹⁴⁾は、横スリットの直立消波ケーソンの反射率に関して、CADMAS-SURF による計算結果と既往の実験値とを比較し、CADMAS-SURF の適用性を検討した。

図-7 に開口率 0.25 の場合のスリット壁の格子分割例を示す。横スリットの間隔に合わせて計算格子網を作成した。スリット間のメッシュ数は縦方向に 2 個、水平方向に 3 個である。

図-8 は計算領域の概念図である。水路内に構造物を設置するために、構造物からの反射波が問題となるため、造波ソースを用い、かつエネルギー減衰帯で消波することとした。造波ソースから沖側に 1 波長の波浪伝播領域を設け、更にその外側に 2 波長分のエネルギー減衰帯を設けている。造波ソースから岸側に 2 波長の位置を反射率の検査断面とし、そこから 1 波長岸側を構造物設置位置としている。構造物なしの通過波検定时には 2 波長分のエネルギー減衰帯を設けたが、この検討では越波を対象としないため、反射率の検討計算では構造物の岸側には計算領域を設ける必要はない。

基本的な格子分割は、通常の波浪伝播領域では、水平方向の格子サイズを波長の約 $1/80$ とし、堤体位置ではスリット壁の厚さを 3 メッシュで表すことを標準とした。ただし、エネルギー減衰領域では波浪変形の精度は問題としないことから、格子サイズをできるだけ粗く取り、格子サイズの異なる領域の接続部では、格子サイズの変化が計算精度に与える影響を低減させることを目的として、一定の遷移部を設けるものとした。一方、鉛直方向の格子サイズは、横スリット壁の孔を 2 メッシュで表すことを標準とした。1 メッシュの計算では極端に反射率が低下したと報告されている。

図-9 に計算結果の流速ベクトルと水面波形を示す。スリット壁前面と遊水室内で水位差が生じ、スリット孔に早い流速が発生しスリット壁付近を中心として大きな乱れが発生している状況が確認できる。反射率は、 $B/L=0.5$ のとき 0.6 程度、 $B/L=0.1$ のとき 0.2 程度であった。

開口率による反射率の違いを図-10 に示す。既往の実験結果と数値計算結果から算出した反射率を、開口率 0.25 の場合と 0.4 の場合について比較している。図の横軸は相対遊水室幅である。これらの図より、 B/L による反射率の変化の傾向は、ほぼ実験値と計算値で同じであるが、開口率に関しては計算値と実験値に傾向的な違いが認められる。すなわち、 $\varepsilon=0.4$ の実験結果は $\varepsilon=0.25$ の計算結果に近く、 $\varepsilon=0.25$ の実験結果は $\varepsilon=0.15$ の計算結果に近い。この理由として、実際にはスリット空隙部で縮流により見かけ上の空隙が

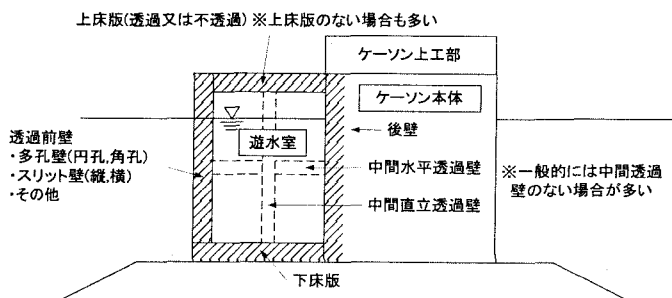


図-6 直立消波ケーソン概念図⁷⁾

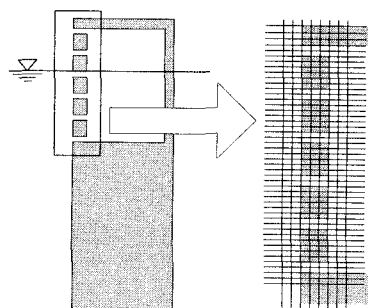


図-7 スリット壁の格子分割例
(開口率 0.25)¹⁰⁾

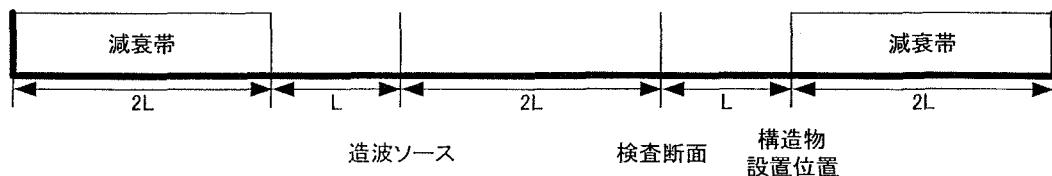


図-8 計算領域¹⁰⁾

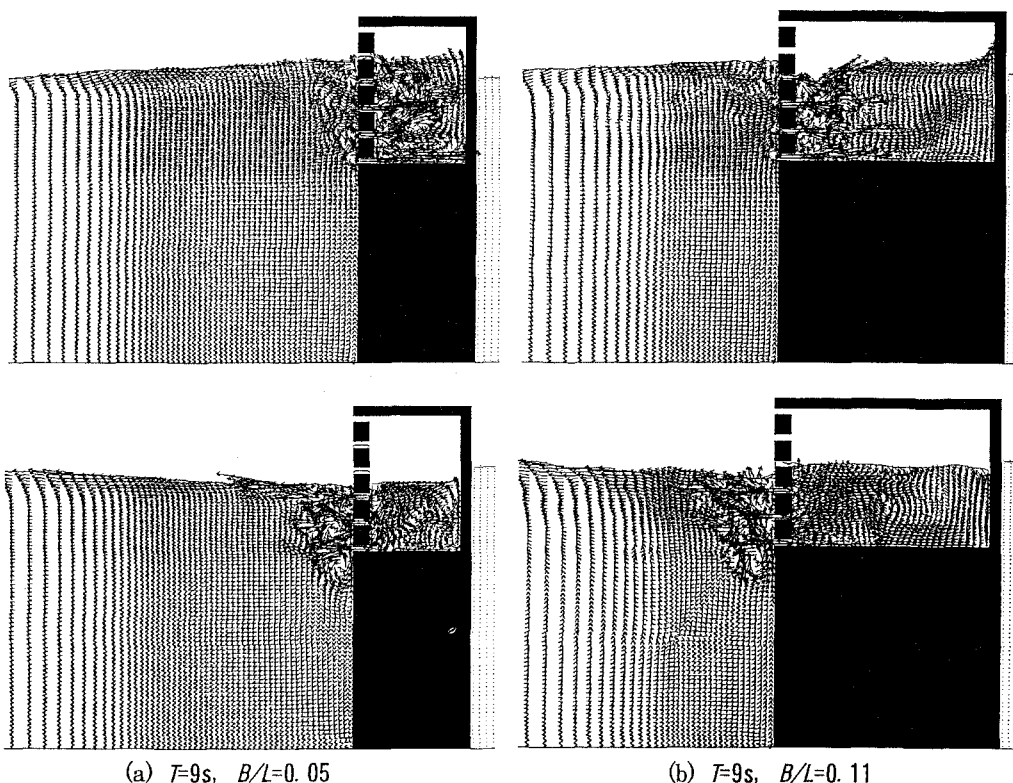


図-9 計算結果可視化の例（開口率 0.25）（小竹ら¹⁴⁾の図-5 の 1 部分を表示）

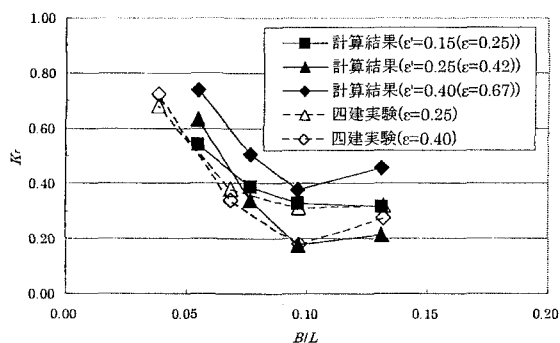


図-10 開口率による反射率¹⁰⁾

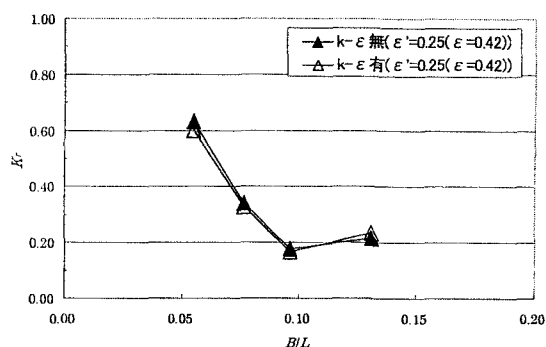


図-11 $k-\epsilon$ 乱流モデルの効果¹⁰⁾

小さくなるのに対して、数値計算では空隙を鉛直 2 メッシュで表現しているために、縮流を考慮できないためと考察されている。図中の計算結果の ϵ' は実質開口率を表し、 $\epsilon' = C_c \epsilon$ で定義される。係数の値の最適値の検討には至っていないが、 $C_c = 0.6$ 程度とすると数値計算結果は実験結果や解析結果を比較的精度良く再現している。

図-11 は $k-\epsilon$ 乱流モデルの有無による反射率の計算結果を比較したものである。この結果では反射率に対して乱流モデルの効果は表れていない。しかし、乱流モデルの物理的な効果を考えれば、エネルギー減衰による反射率の変化が期待できる。数値粘性の効果やスリット間の噴流を再現するための空間スケールと波動運動の空間スケールは異なるのでメッシュのスケールや数が充分でないためと考えられる。

3.3 護岸の越波

護岸の防波機能は越波の抑制にあるので、設計の観点からは越波量の予測、評価が課題となる。越波現象に関する初めての数値計算は、VOF 法を使った榊山・今井¹⁵⁾や榊山・香山¹⁶⁾により行われた(解析コード PS-WAVE)。前者では一様水深の直立護岸と消波護岸の越波を対象に数値解析コードの検証を行った。これらの結果では、護岸の越波流量の計算結果は実験結果の数倍であった。越波は変動の大きい現象であり、越波流量のオーダの推定ができたことで留まった。消波護岸の場合には数値計算モデルに含まれる抗力係数など影響がある。しかし、直立護岸の越波が実験と計算で一致しないのは問題が残った。榊山・香山¹⁶⁾では斜面上で碎波を伴う消波護岸の越波を対象とした。越波流量の誤差は 10%から 20%の範囲であった。以下に CADMAS-SURF を用いて榊山¹⁷⁾と同じ条件で再現計算を行い、解析コードの検証を行った結果を紹介する。紙面の制約上、内容を紹介できないが、中野ら^{18),19)}は CADMAS-SURF の護岸・防波堤の越波・伝達波を規則波、不規則波を用いて計算しており今後の参考になるものと思われる。

3.3.1 一様水深上の護岸の越波¹⁰⁾

図-12 は一様水深に設置された直立護岸の越波測定実験に用いた実験装置を示す。越波は背後の越波マス内に貯まった水の重量を 4 個のロードセルで測定した。図-13 は直立護岸の前面に消波ブロックを設置した消波護岸の模型を示す。

図-14 に直立護岸、図-15 に消波護岸の越波の計算結果の水面波形と流速ベクトルを示す。波浪条件はともに波高 $H=10\text{cm}$ 、周期 $T=1.4\text{s}$ である。図-14 の直立護岸の越波では、重複波的運動をするが、堤体前面で波が打ち上がることなく、堤体の港外側から港内側へ越流する様子や護岸沖側から越波し、天端上を越流して、引波時に加速して流れる様子などは榊山・今井¹⁵⁾の実験観察結果および計算結果とほぼ一致している。図-15 の消波護岸では、法面を遡上する波と消波工内部を流下する波が干渉して複雑な流速ベクトルを形成し、下降していた消波工内部の水位が遡上波より応答が遅れて上昇する様子や、越波した波が天端上を流れ始める様子は、榊山・今井¹⁵⁾の計算結果とほぼ一致する。

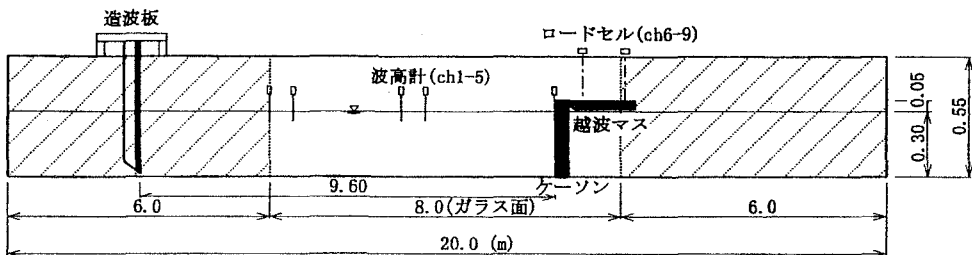


図-12 実験装置¹⁷⁾

図-16 に直立護岸の平均越波流量の計算結果と実験結果との比較を示す。ただし、数値計算結果の DONOR-0.1 と DONOR-1.0 は、移流項に適用した DONOR スキームの 1 次風上差分と 2 次精度の中心差分の割合を示すもので以下の関係にある。

DONOR スキーム = $D \times 1$ 次精度風上差分 + $(1-D) \times 2$ 次精度中心差分

DONOR スキームを用いて、そのパラメタ D を 0.1 として計算した場合の計算条件を DONOR-0.1 と略記することとする。係数の値

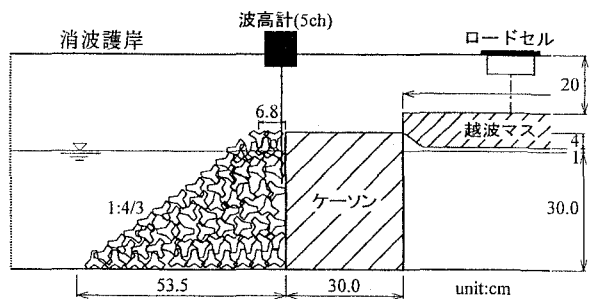


図-13 護岸模型¹⁷⁾

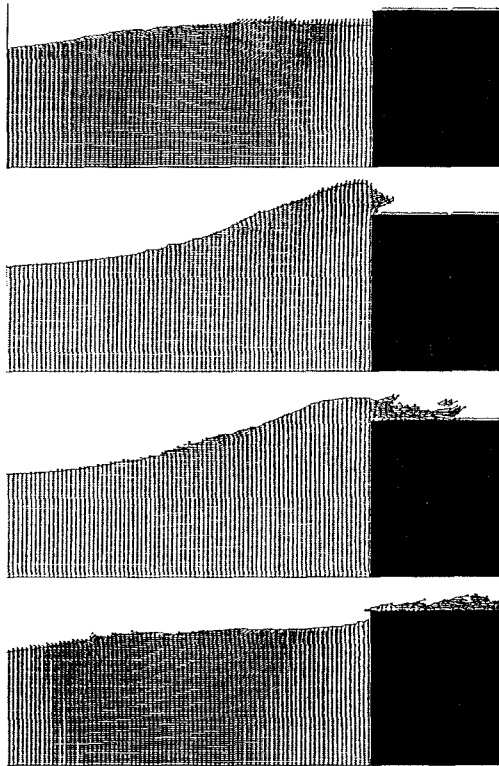


図-14 直立護岸の越波¹⁰⁾

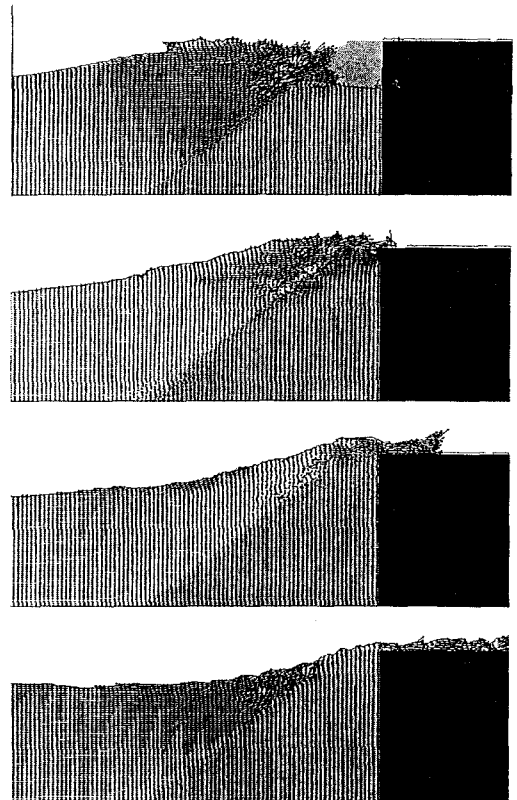


図-15 消波護岸の越波¹⁰⁾

D による越波流量の変化も調べている。越波流量は、例えばケーソンの前面に検査面を設定しこの検査面の流速を鉛直方向に積分して算出する。同図の左側は $T=1.4s$ で一定とした場合の波高による越波流量の相違を、右側は $H=10cm$ で一定とした場合の周期による相違を比較した。実験値、計算値とも各波毎の周期に対する平均越波流量が安定した部分の平均値を用いた。実験値と計算値(DONOR-0.1)において波高および周期の増加とともに越波流量が大きくなる傾向は一致している。計算値では DONOR スキームの係数 D が小さいほど実験値と一致している。今回の計算において DONOR-0.1 では、越波流量が少ない $H=8cm$ 、 $T=1.4s$ では計算値が実験値よりも 1.3 倍程度大きい、その他では計算/実験=1.1 と良好な一致を示しており、上記の影響は顕著には現れていない。1 波毎の越波流量は実験と計算とも変動することも確認されている。

図-17 に消波護岸の平均越波流量の実験値¹⁵⁾と計算値の比較を示す。左側は $T=1.4s$ 一定とした場合の波高の相違を、右側は $H=10cm$ 一定とした場合の周期の相違を比較した。また右図には比較のため消波工を除いた直立護岸での計算値も併せて示した。周期が短い $T=1.0s$ ではやや計算値が実験値より小さいが、計算/実験=0.87~1.15 で計算値と実験値は良く一致している。また右図の $H=10cm$ において周期が短い $T=1.0s$ では消波工のエネルギー減衰効果により消波護岸が直立護岸より越波流量が小さいが、 $T=1.4, 1.6s$ では波の遡上効果が消波工のエネルギー減衰効果よりも相対的に卓越するため、消波護岸の方が直立護岸より越波流量が大きくなる現象は、榊山・今井¹⁵⁾の考察と一致する。以上、CADMAS-SURF による一様水深上の護岸の越波流量の計算結果は、榊山・今井¹⁵⁾より精度よく実験結果を再現できることが確認された。

3.3.2 砕波を伴う消波護岸の越波¹⁰⁾

図-18 に実験水路、図-19 に消波護岸の模型を示す。この計算例はより実際に近い条件として、海底斜面を設け(勾配 1/20)、護岸を設置した。護岸模型の設置水深は $h=13cm$ で、周期 $T=1.4s$ の条件の下では、波高 $H=10.5cm$ のときに実験で最大越波流量になることが確認されている。

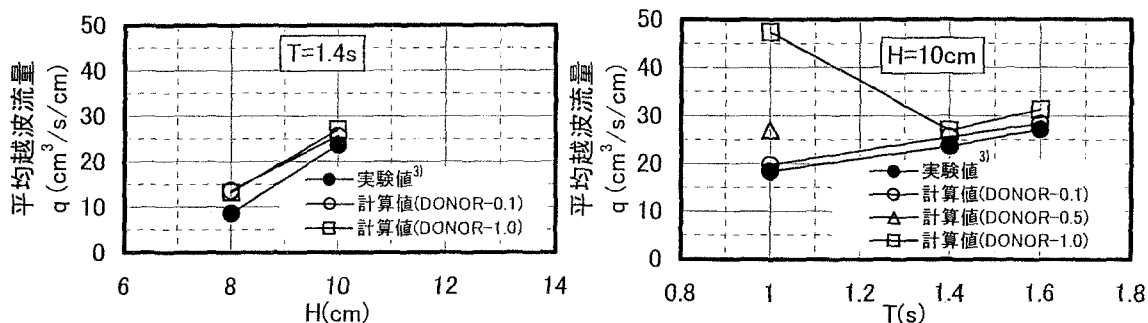


図-16 直立護岸の平均越波流量の比較⁷⁾

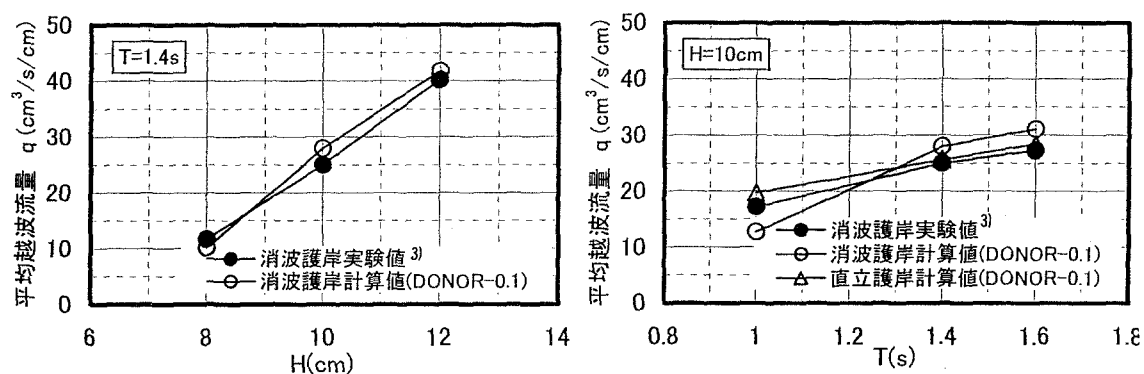


図-17 消波護岸の平均越波流量の比較¹⁰⁾

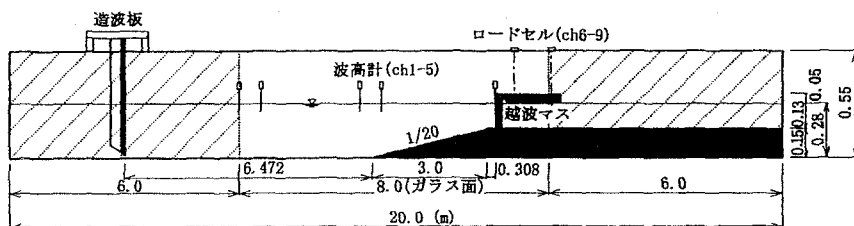


図-18 実験装置¹⁷⁾

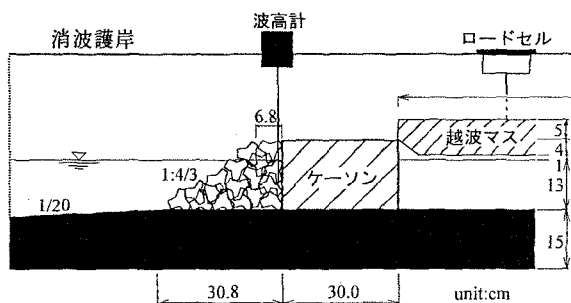


図-19 護岸模型¹⁷⁾

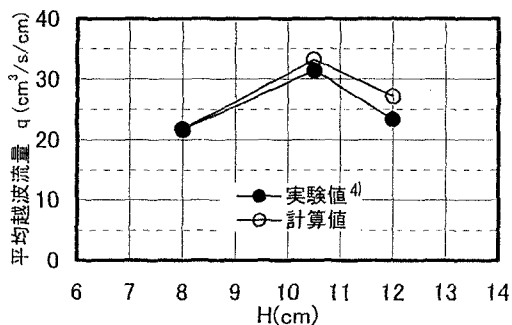


図-20 越波流量の比較¹⁰⁾

図-20 に造波波高 H と平均越波流量 q の関係を実験値¹²⁾および計算値について示す。碎波する $H \geq 10.5\text{cm}$ の 1 波毎の越波流量は変動するが、平均越波流量は実験値と計算値で良く一致しており、計算/実験=1.01 ~ 1.16 程度である。また碎波しはじめる $H=10.5\text{cm}$ で越波流量がピークとなり、 $H=12\text{cm}$ において小さくなる傾向も実験値と計算値で一致する。碎波する $H \geq 10.5\text{cm}$ においてやや計算値が実験値より大きい、榊山・香山¹⁶⁾と同様に数値計算には碎波によるエネルギー減衰が考慮されていないことなどが挙げられる。以上より碎波条件下において越波流量の計算値は実験値を良く再現していることが確認された。

図-21 に消波護岸前面で碎波してから越波する計算結果の水面波形と等圧線を示す。水面近傍で圧力のコンターが集中する箇所がみられる。この計算は CADMAS-SURF V3.2 で計算されたものであり、配布される CADMAS-SURF V4.0 ではスパイクノイズの発生に対する処理がされている¹⁰⁾。水面を追跡計算する方法である VOF 法で誤解されやすい現象に、図-21 中にもみられる、水中に生成される空洞がある。1 流体を扱っているので、気体の運動は解いていない。水中に生じる空間は単に空洞であることを注意する必要がある。

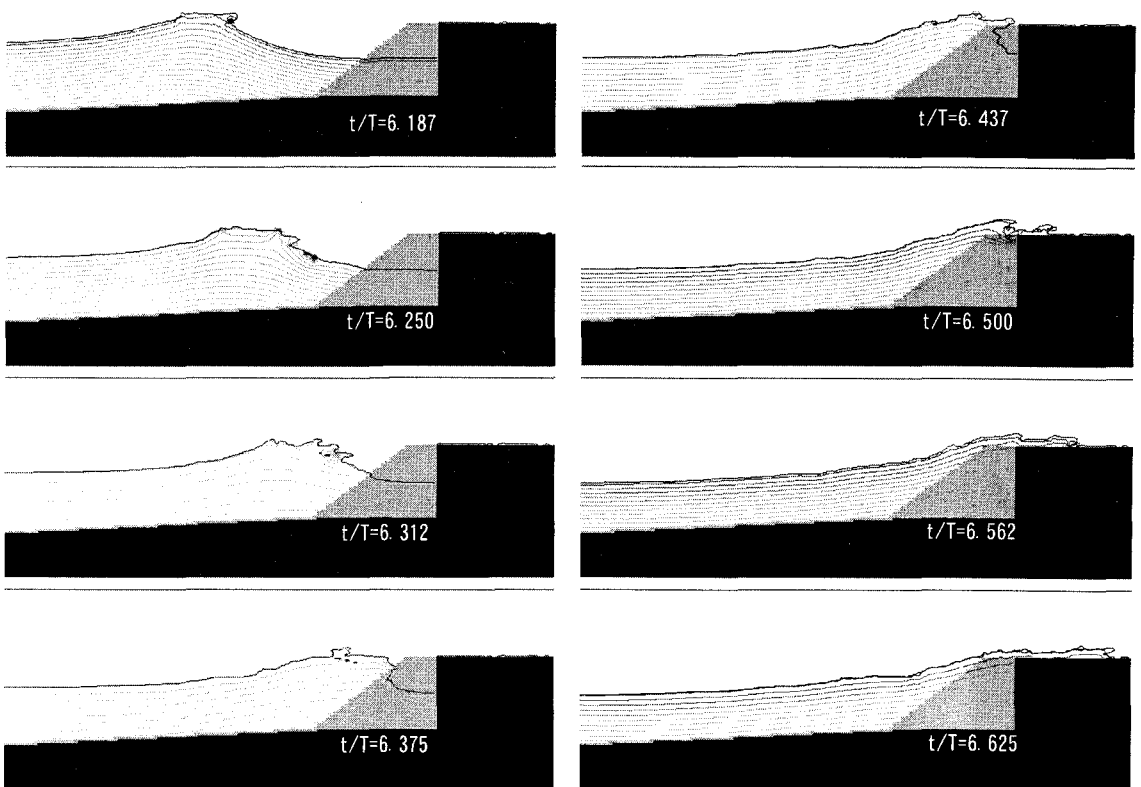


図-21 水面波形および等圧線の計算結果 (0.5T, T/16 分割)¹⁰⁾

3.4 潜堤の捨石挙動への適用^{20)~22)}

流体運動の計算結果の流速などを用いて流体以外の物体の外力を算出し、物体の運動の計算に応用できる。重松²³⁾は固液混相流の解析モデルを構築し、粒子群の分散挙動と堆積形状を解析した。さらに重松ら²⁴⁾は三次元の現象に拡張して適用している。数値波動水路の耐波設計への適用において、数値波動水路と個別要素法 (DEM) を組み合わせた捨石潜堤の変形に関する伊藤らの研究^{20)~22)}を紹介する。同様な研究は荒木²³⁾や荒木ら

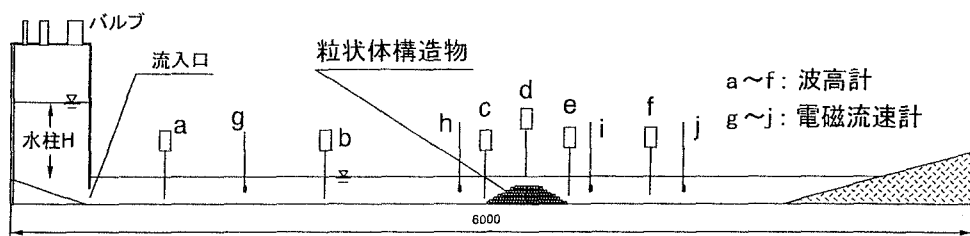


図-22 実験装置の概要図²⁰⁾

24)より行われている。これらは捨石構造物の性能設計に適用できる1つツールになるものと考えられる。

図-22は伊藤²⁰⁾の実験装置の概要図である。本装置は、装置内の空気を吸引し水柱 H を発生させ、バルブを開放することにより水槽内に砕波を伴う強い流れを発生させるものである。水槽の左端には吸引式造波機を設置した。これにより、水深程度の波高を有する孤立波的な波が発生し、砕波により段波が発生する。水槽中央にはガラス球を8層積み上げ粒状体構造物を配置した。ただし最下層の球を固定した。水理模型実験は直径17ミリ、比重2.45のガラス球を用いて捨石潜堤を単一粒径の球でモデル化した粒状体構造物の変形実験を実施した。また、容量式波高計、電磁流速計を用いて水位、流速を測定している。

図-23に計算の手順を示す。まず、粒状体構造物を多孔質体として流体解析を実施し、粒状体構造物内の流速を用いて流体力を算出する。次に、流体力・重力・浮力等を外力として粒子の運動を個別要素法を用いて計算する。各粒状体の変形に合わせて多孔質の諸量を変化させて次の時刻の流体解析を行う。個別要素法の計算方法については紙面の制約上省略する。

粒状体に作用する流体力は次式のモリソン式により算出する。

$$F_d = \frac{1}{2} \rho A C_D' U_D |U_D| \quad (1)$$

$$F_i = \rho V C_M' \dot{U}_D \quad (2)$$

$$F_l = \frac{1}{2} \rho A C_L' U_D^2 \quad (3)$$

ここで、 F_d は抗力、 F_i は慣性力、 F_l は揚力、 ρ_p は粒子の密度、 ρ

は流体の密度、 A は投影面積、 C_D は抗力係数、 U_D は粒子と流体の相対速度ベクトル、 V は粒子の体積、 C_M は慣性力係数、 $\dot{U}_D$ は加速度ベクトル、 C_L は揚力係数である。本解析では加速度ベクトルを流体の加速度ベクトルを用いた。

本手法はバネ定数と減衰定数が粒子の運動を支配するため、その選定が重要である。また、陽解法で解くため計算時間間隔 Δt も充分小さくする必要がある。DEMパラメタについては、法線方向のバネ定数はガラスの物性値から $K=3.5 \times 10^7 \text{ N/m}$ とし、ガラス粒子を自由落下させガラス面で反発させる実験²⁰⁾により、実験結果を再現できる減衰定数 $C=1.5 \times 10^2 \text{ Ns/m}$ を決めた。また、 Δt は一自由度のバネ・ダッシュポット系の固有周期以下 ($\Delta t=1 \times 10^{-6} \text{ s}$) とした。また、粒状体間の摩擦係数については $\mu=0.05$ とし、 μ が非常に小さいことから便宜的に静止摩擦係数、動摩擦係数および転がり摩擦係数は区別することなく計算を行った。

図-24はガラス球の潜堤の変形計算の一例である。沖側法肩部の球の初期移動や段波が通過し岸側法肩部の球が転がり落ちていく様子を精度良く再現している。さらに詳細な比較を行うと実験と計算で次のような差異が認められた。同図の計算結果の $t=2.6 \text{ s}$ では岸側法肩部から転落した球は着定していないが、実験では

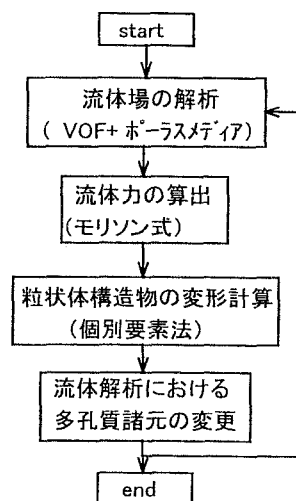


図-23 計算手順の概要¹⁰⁾

着定していることが認められた。これは段波が潜堤を通過した後に潜堤背後の水面に小規模の跳水が発生することを今回の計算での格子サイズでは再現できなかったためであるものと考えられる。

伊藤ら²²⁾はさらに適用範囲を広げ、複断面傾斜護岸の被覆ブロックの不規則波による断面変形を対象に計算を行っている。対象とした実験断面図を図-25に示す。不規則波(有義波高 $H_{1/3}=0.2\text{m}$, 有義波周期 $T_{1/3}=2.0\text{s}$)による被覆石の移動の計算結果を図-26に示す。DEMによる被覆石の運動の計算では、被覆石を直径 2.25cm の円形要素と与えている。流体力の算出にあたっては、抵抗係数、慣性力係数、揚力係数、摩擦係数をランダムに組み合わせて与える方法をとっている。実際の被覆石は重量を限定しているが粒径、形状がそろっているわけではないのでこうした係数を確定的に与えるのではなく、ランダムに与えるのはこれまでとは異なる考え方である。このような場合、これに応じた結果の解釈が必要となろう。すなわち、結果の移動量、変形形状もある幅を持った範囲で判定する必要があるものと考えられる。

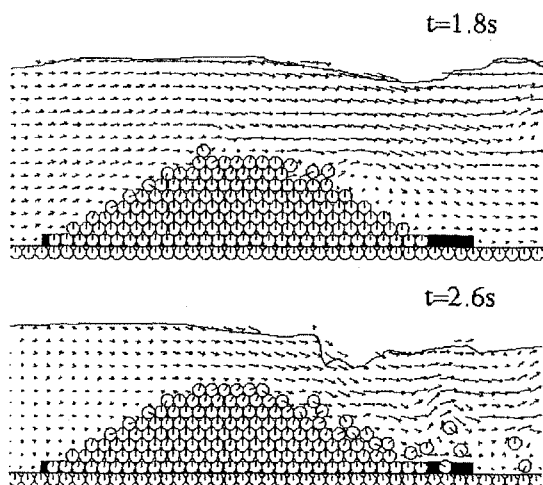


図-24 ガラス球の潜堤の変形計算 ($\phi=60\text{cm}$)²¹⁾

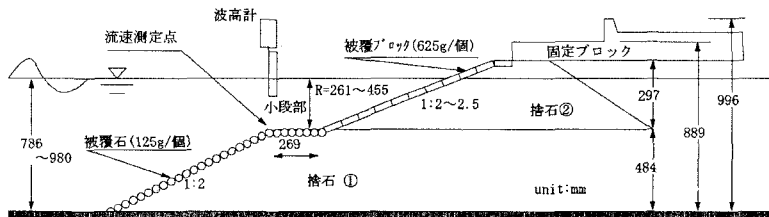


図-25 実験対象断面

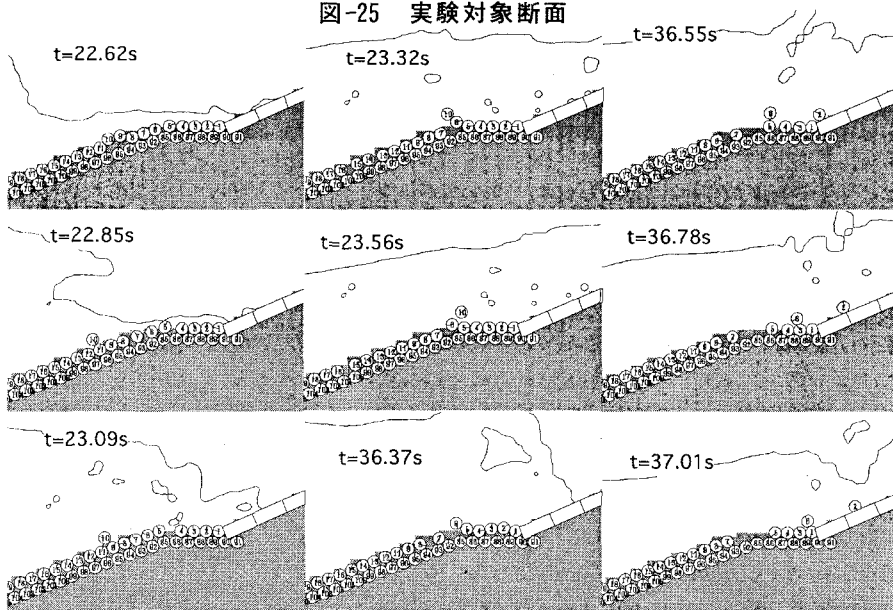


図-26 被覆石の移動に関する計算結果 (伊藤ら²²⁾より一部修正して引用)

4.1 波と流れの共存場の計算

incident wave
 $H=4.9\text{m}$, $T=16\text{s}$
 0.016m/s

捨石マウンド内の放水口直前の P2 と P9 の位置での圧力波形の計算結果と実験結果との比較を図-30 に示す。波形に位相差が生じたのは、計算では完全な断面 2 次元の現象を扱っているのに対して、実験では放水ケーソンの放水口を円管で模擬した。管内の放水流速を一致させたために波と流れ共存場での波速と放水流速比が異なり位相差が生じたものである。計算結果では、マウンド内の流速が 1m/s を越える領域が確認さ

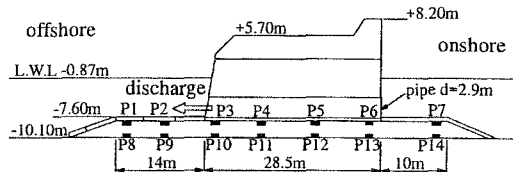


図-27 放水口ケーソンと圧力計の位置²⁷⁾

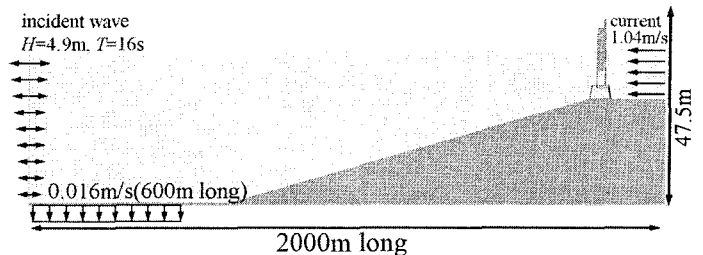


図-28 計算領域と境界条件の設置

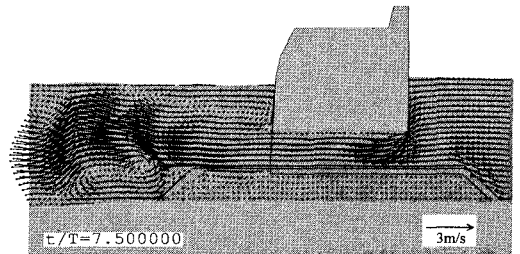


図-29 放水流の計算結果²⁷⁾

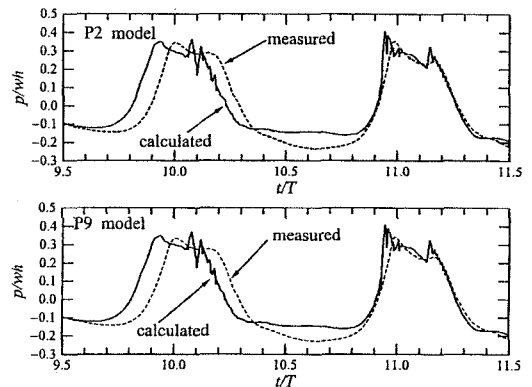


図-30 捨石マウンド内の圧力の比較²⁷⁾

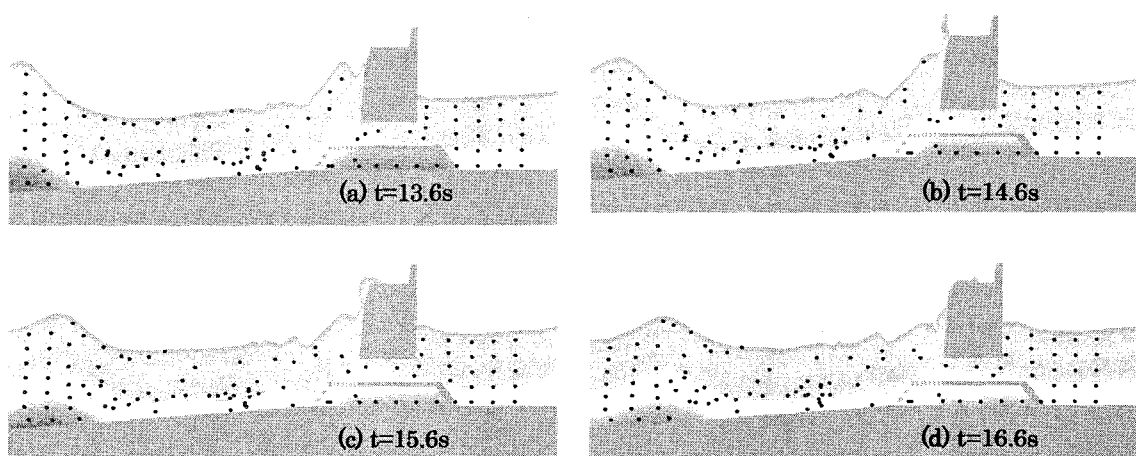


図-31 波と流れ共存場の計算例：水粒子の移動追跡²⁷⁾

れた。これより砂の吸い出しの可能性が高いものと判断した。

図-31 に波と放水流の共存場の計算結果を示す。図では放水ケーソンの放水口から冲向きの流れがある。この流れにのる水粒子の移動を追跡した結果も表示してある。同時に圧力の分布を示した。ケーソン直下と岸側の捨石マウンド上端は不透過になっている。このため、図-31(a), (b)ではマウンド内の圧力が高くなることがわかる。この結果は実験結果と一致した。

この他に水谷ら²⁸⁾の波と流れ共存場の計算例では、造波ソースによる無反射造波システムを任意の流速に拡張し、河川の一方向流の境界条件に適用している。解析対象領域に付加減衰領域を接続し、沖に造波ソース、岸に河川流のためのソースを設定するとともに、岸・沖側で開境界としてすべての物理量の水平勾配を0として設定している。

4.2 3次元モデルの適用例

既に市販の汎用的な流体解析コードが存在するものの、耐波設計のための波動運動に特化した数値計算モデルの3次元化は、次の発展課題の1つである。川崎・岩田^{29),30)}や川崎³¹⁾は3次元波動場に設置された潜堤によるspilling 碎波に対して数値解析を行った。碎波を伴う潜堤周辺の波変形およびその内部機構の解明と、計算手法の妥当性を水理実験により検証することを目的としている。このほか、造船分野でPakら³²⁾研究例がある。これらは基礎的な研究を目的に3次元の計算を行っている。しかし実務を対象とする場合にはより広範囲な領域を対象とすることが要求されるようになる。現地現象の再現性を対象とした3次元計算例を以下に紹介する。

米山・松山³³⁾、米山ら³⁴⁾は、1993年に発生した北海道南西沖地震津波により奥尻島藻内地区で観測された津波の最大痕跡高さ31.7mの原因を解明するために、津波再現実験の結果を基に3次元の計算を行った。使用したのは電力中央研究所で開発した

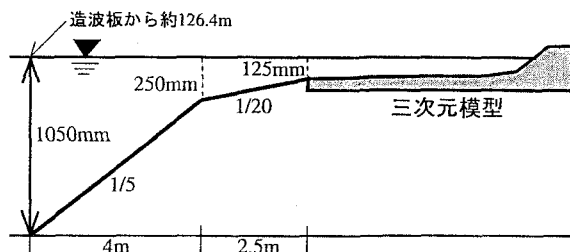


図-32 実験地形縦断面図³³⁾

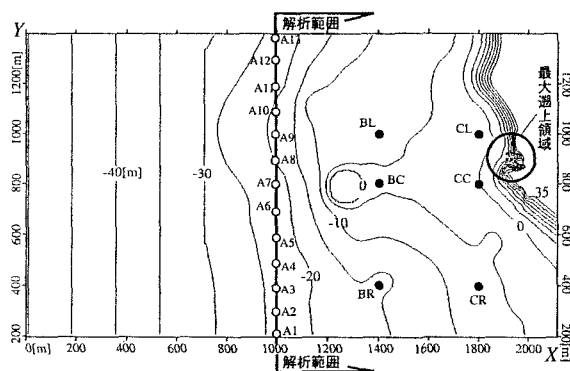


図-33 次元模型平面図³³⁾

3次元自由液面解析コード FRESH である。

造波水路内に作成した実験模型の縦断面を図-32 に、平面図を図-33 に示す。造波水路は長さ 205m、幅 3.4m で模型縮尺 1/400 の無歪みの津波再現実験を行った。図-33 中の A1 から A13 が波高計でこれらで測定された時間波形の平均値を入力波形として与え(図-34)、津波遡上の3次元の再現計算を行った。計算メッシュ数は 2,161,250(x 方向 250×y 方向 247×z 方向 35)で、時間ステップは 0.05s、計算時間は約 6 時間である。

図-35 に 3 次元の計算結果を示す。津波はポケットビーチ北側に達し(530s)、ポケットビーチに沿って南側に移動し(540s-550s)、その波が最大遡上した谷の入り口に収れんし遡上する様子(560s)が再現された。

図-36 に計算結果の遡上曲線と現地で観測された痕跡高さを示す。遡上曲線は各時間の遡上高さを y-z 平面に投影したものである。同図には計算経過時間 541 秒から 566 秒までの 5 秒おきの遡上曲線と 541 秒から 569 秒間の 1 秒おきの遡上曲線の包絡線を最大遡上曲線として表示されている。同図から南の谷奥の最大遡上高さ 31.7m や他の地点の遡上高さを定量的に精度良く再現している。

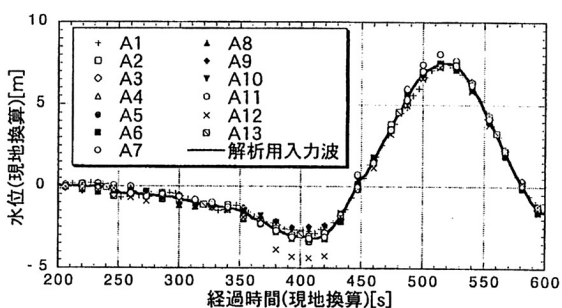
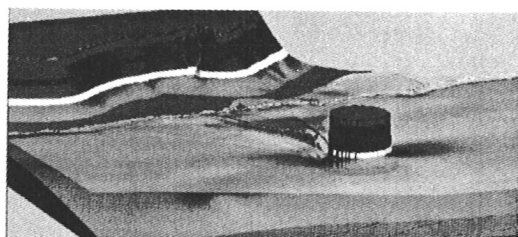
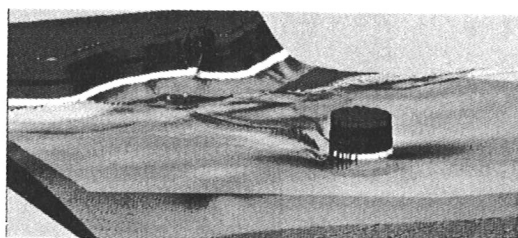


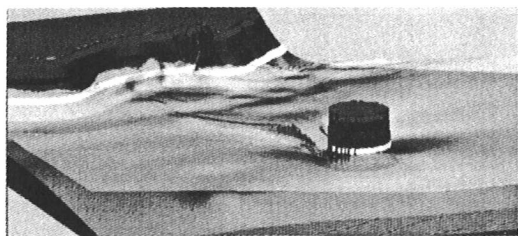
図-34 x=1000m での水位時間波形と解析入力波形³³⁾



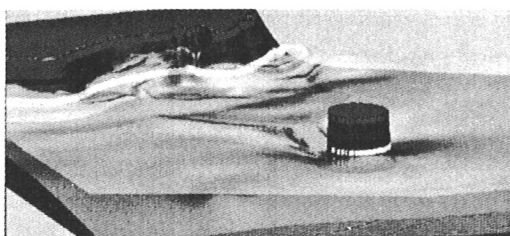
520秒



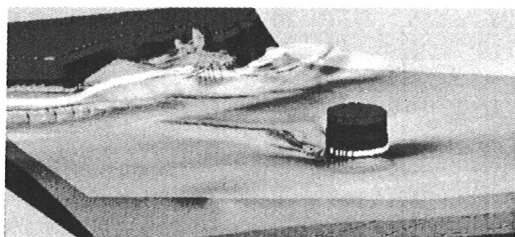
530秒



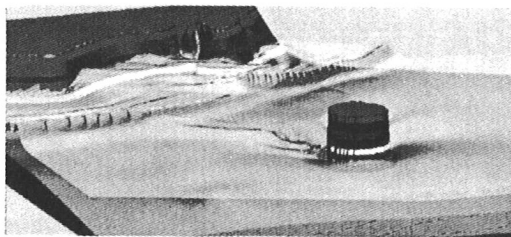
540秒



550秒



560秒



570秒

図-35 津波計算結果³³⁾

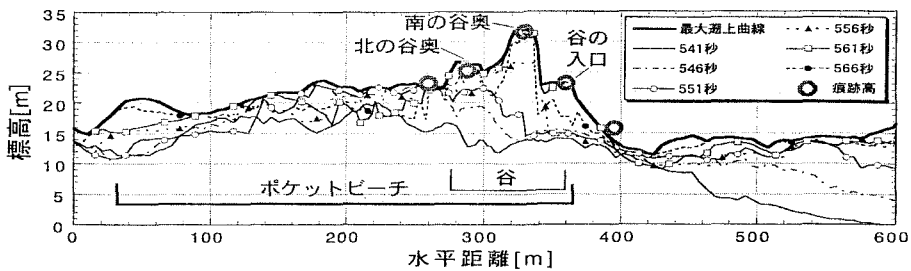


図-36 遡上曲線および現地痕跡高³³⁾

4.3 不透過構造物の移動境界の問題

表-1 と図-1 に示した実験内容や数値造波水路の適用項目のなかで、ケーソンの滑動量・沈下量や海洋構造物の動揺、浮体の運動といった項目がある。実際、CADMAS-SURF により直立堤に作用する波力を算出し、個別要素法と組み合わせることでケーソンの滑動量を算定している研究例がある。この場合、ケーソンの滑動は流体運動の計算には反映されていないことに注意する必要がある。ケーソンの並進、回転運動が小さい範囲で便宜上計算で得られる波力、モーメントを使ってケーソンの変位を算出している。さらに浮体の運動を評価するには、基本的には現在の CADMAS-SURF とは異なり移動境界を扱うことのできる数値解析コードを適用する必要がある。

榊山・田中³⁵⁾や榊山³⁶⁾は、波と構造物の連成運動を対象として、構造物の移動境界を扱うために境界適合座標系を適用した支配方程式に基づく数値解析コードを構築した。前者の榊山・田中³⁵⁾では、海底面に回転の中心をもつ1自由度の回転運動をする没水型浮体構造物の波との連成運動を扱った。

図-37 は計算格子、流速ベクトル、圧力分布の計算例を示したものである。計算の手順は、原理的には図-27 の流体運動と個別要素法を組み合わせる方法と同じであるが、この場合には、流体運動と構造物の運動を同じ時間ステップで収束計算を行っている点で数値計算の精度は高い。

さらに、榊山³⁶⁾は波とかたもちばりの振動に関する連成運動を扱った。図-38 に計算結果の一例を示す。図-38 の左上の図の状態を初期状態とした。かたもちばりには波圧成分のみを仮想的な荷重として作用させ、波とかたもちばりの振動の連成運動に関する数値計算を行い、かたもちばりの2次以上の振動モードが重なって生じることを再現した。

前野・藤田³⁷⁾や高橋ら³⁸⁾に波による地盤挙動の解析においては、流体運動と地盤内の圧力との連続性を満たしているが、地盤の変位、速度、加速度等が波の場に及ぼす影響が無視できる範囲で適用されている。

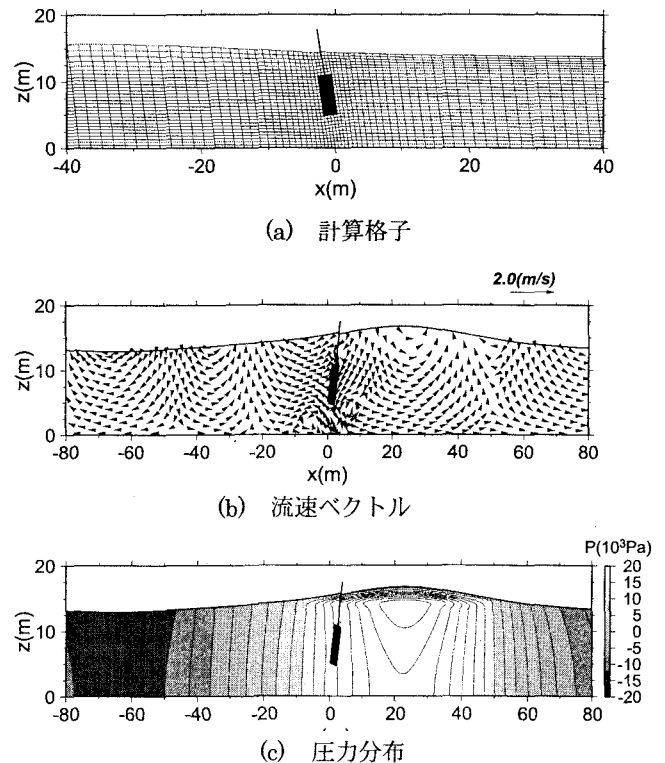


図-37 波と1自由度の回転運動をする構造物との連成運動計算例³⁵⁾

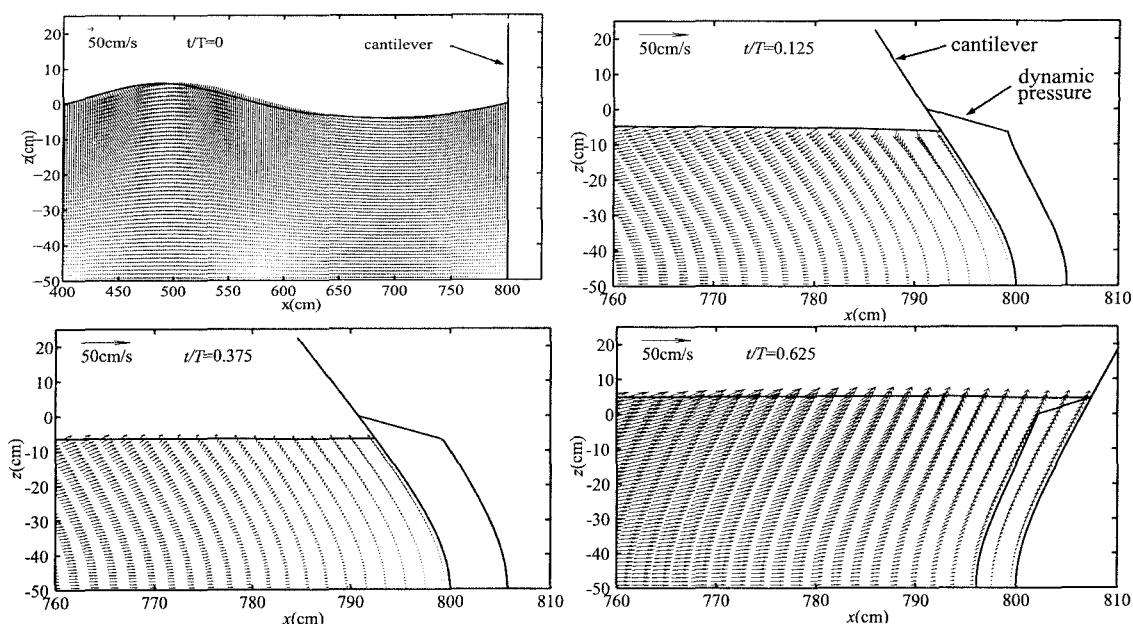


図-38 波とかたもちばりの連成運動の数値計算例³⁶⁾

5. 今後の課題と展望

以上、本稿に示した適用例は数例に過ぎず、CADMAS-SURF に関しては文献 10) に多くの適用例と結果に関する評価、課題がまとめられている。今後の課題の一部は既に 4 章の他の解析コードによる適用例で示した。流れに関する境界条件の設定や 3 次元化の問題、移動境界の問題に対する改良・拡張が挙げられよう。

さらに、現状の 2 次元の問題において残されている課題として、乱流モデルの適用性の検討が挙げられる。アメリカとヨーロッパで使われている Cornell 大学の解析コード COBRAS(Cornell Breaking-waves and Structures)は、Lin and Liu³⁹⁾により砕波後の波高変形の予測に乱流モデルを適用し、Liu ら⁴⁰⁾により消波ブロック被覆堤の前面の波高変化、流速、越波量などを、さらに、消波ブロック被覆層により発生する乱流場(Sakakiyama and Liu⁴¹⁾)の数値計算モデルによる検証が Hsu ら⁴²⁾により行われている。

渡部⁴³⁾、二瓶⁴⁴⁾、睦田⁴⁵⁾など乱流モデルを含む気液混流に関する数値解析コードは基礎的な現象の解明のために開発された。このような観点から砕波や砕波による気泡を含む圧力場をより厳密に推定するために適用されていくことが耐波設計のための数値解析コードの高度化につながるものと考えられる。

数値解析モデルの 3 次元化は当面は水路モデルとして進める予定であり、実用化の 3 次元モデルとするためには並列計算による高速化を図る必要がある。

謝 辞

本稿をまとめるに当たり引用させていただいた著者の方々から資料の提供と助言を賜りました。また、本稿をまとめるに当たり電力中央研究所 田中伸和研究参事より貴重な助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局監修(1999)：港湾の施設の技術上の基準・同解説，社団法人日本港湾協会。
- 2) 土木学会（編）(2000)：海岸施設設計便覧，582p。

- 3)土木学会 (編) (1994): 海岸波動, 一波・構造物・地盤の相互作用の解析法一, 520p.
- 4)榊山 勉・阿部宣行・鹿島遼一(1990): ポーラスボディモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動場解析, 海岸工学論文集, 第37巻, pp.554-558.
- 5)榊山 勉・鹿島遼一(1991):ポーラスボディモデルによる透過性防波堤周辺の波動解析手法の開発, 電力中央研究所報告, 研究報告, U91048, 48p.
- 6)Sakakiyama, T. and R. Kajima(1992): Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwaters, Proc. 23rd ICCE, Vol.2, pp.1517-1530.
- 7)榊山 勉・鹿島遼一(1994): 透過性防波堤周辺の波動場解析へのポーラスボディモデルの適用, 電力中央研究所報告, 研究報告, U93052, 45p.
- 8)Wu, N.T., Oumeraci, H. and Partenscky, H.W.(1994): Numerical modelling of breaking wave impacts, Proc. 24th ICCE, Vol.2, pp.1672-1686.
- 9)Van Gent, M.R.A., P.Tonjes, H.A.H. Peit and van den Bosch(1994): Wave action on and in permeable structures, Proc. 24th ICCE, Vol.2, pp.1739-1753.
- 10)沿岸開発技術研究センター(2001): CADMAS-SURF 数値波動水路の研究・開発, 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究報告書, 沿岸開発技術ライブラリーNo.12, 296p.
- 11)田田良実・福森利夫(1972): 直立壁および混成堤直立部に働く波圧に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 第2号, pp.3-45.
- 12)田田良実・柿崎秀作(1966): 有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港研報告, 第5巻, 10号, 57p.
- 13)柴山知也・The Duy Nguyen・岡安章夫(1995): 乱流方程式を用いた砕波帯内流速場・圧力場の計算法の検証, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.21-25.
- 14)小竹康夫・松村章子・藤原隆一・高橋重雄・磯部雅彦(2001): 直立消波ケーソン堤の反射率算定に対するVOF法の適用性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1016-1020.
- 15)榊山 勉・今井澄雄(1996): 消波護岸の越波に関する数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.696-700.
- 16)榊山 勉・香山真祐(1997): 海底斜面上で砕波を伴う消波護岸への越波の数値計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.741-745.
- 17)榊山 勉(1998): 消波護岸の越波に関する数値計算モデルの開発と検証, 電力中央研究所報告, 研究報告, U97103, 27p.
- 18)中野修・興野俊也・藤井直樹・榊山勉・大熊義夫(2001): 数値波動水路による護岸・防波堤の越波・伝達波の数値計算, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.731-735.
- 19)中野修・興野俊也・安田勝則・藤井直樹(2002): 規則波・不規則波による傾斜堤の波力・越波伝達波への数値波動水路の適用性について, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.726-730.
- 20)伊藤一教・東江隆夫・勝井秀博(2000): DEM法とVOF法を用いた粒状体構造物の破壊シミュレーション, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.746-750.
- 21)伊藤一教・樋口雄一・東江隆夫・勝井秀博(2001): 個別要素法に基づく捨石のランダム性を考慮した潜堤の変形予測手法, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.806-810.
- 22)伊藤一教・織田幸伸・東江隆夫(2002): 複断面傾斜護岸の断面変形に関する研究, 海洋開発論文集, 第18巻, pp.245-250.
- 23)重松孝昌(1998): 個別要素法を用いた固液混相流の解析モデルの開発とその適用性に関する研究, 大阪市立大学学位論文, 108p.
- 24)重松孝昌・廣瀬真由・錦織陽一・小田一紀(2001): DEM法とVOF法を併用した三次元固液混相流解析モデルの開発とその適用例, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.6-10.
- 25)荒木進歩(2000): 断面変形に伴う水理機能変化と動的応答を考慮した捨石構造物の設計に関する研究, 大阪大学学位論文, 122p.
- 26)荒木進歩・小竹康夫・金澤剛・松村章子・出口一郎(2001): VOF法と個別要素法の連成解析による傾斜捨石護岸の変形予測, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.931-935.
- 27)榊山 勉・鈴木一広(1998): 数値波動水路による放水口ケーソンマウンド内の底質の吸い出し評価, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.566-570.

- 28)水谷法美・後藤敏明・William G. McDougal(1995): 潜水透水性構造物による波変形と内部流速場のハイブリッド数値解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.776-780.
- 29)川崎浩司・岩田好一郎(1996): 3次元波動場に設置された潜堤による Spilling 型碎波の変形過程に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.96-100.
- 30)川崎浩司,岩田好一郎(1997): 潜堤による平面2次元波の碎波変形の数値解析, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.81-85.
- 31)川崎浩司(1998): 潜水構造物による碎波変形と再生過程に関する基礎的研究, 名古屋大学学位論文, 186p.
- 32)Park, J.C., Y.Uno, H. Matsuo, T. Sato, H. Miyata(2001): Reproduction of Fully-Nonlinear multi-Directional Waves by a 3 D Viscous Numerical Wave Tank, Proceedings of ISOP.
- 33)米山 望・松山昌史(2001): 1993 年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析, 電力中央研究所報告, 研究報告, U01002, 17p.
- 34)米山 望・松山昌史・田中寛好(2002): 1993 年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析, 土木学会論文集, No.705/II-59, pp.139-150.
- 35)榊山 勉・田中伸和(2001): 没水型浮体式構造物と波との連成運動に関する数値解析, 電力中央研究所報告, 研究報告, U00075, 25p.
- 36)榊山 勉(2002): 波と弾性はりとの連成運動に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.696-700.
- 37)前野詩朗・藤田修司(2001): VOF-FEM モデルによる波浪場における護岸周辺地盤の動的挙動の検討, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.971-975.
- 38)高橋重雄・鈴木高二朗・村西佳美・磯部雅彦波(2002): 地盤・構造物の相互作用に関する U- π 形式 VOF-FEM(CADMAS GEO-SURF)の開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.881-885.
- 39)Lin, P. and P.L.-F., Liu(1998): A numerical study of breaking waves in the surf zone, J. Fluid Mech., 359, pp.239-264.
- 40)Liu, P.L.-F. Lin, P. Chang, K.A and Sakakiyama, T.(1999): Numerical modeling of wave interaction with porous structures," J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg., ASCE, 125, pp.322-330.
- 41)Sakakiyama, T. and Liu, P. L.-F.(2001): Laboratory experiments for wave motions and turbulence flows in front of a breakwater, Coastal Engineering, Vol.121, pp.117-139.
- 42)Hsu, T.-J., T. Sakakiyama and Liu, P. L.-F.(2002): A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater, Coastal Engineering, Vol.46, pp.25-50.
- 43)渡部靖憲(1996): 種々の波浪条件における流体運動機構に関する研究, 北海道大学学位論文, 157p.
- 44)二瓶康雄(1999): 新しい計算手法に基づく混相乱流 LES の開発と複雑混相乱流への応用, 東京工業大学学位論文, 185p.
- 45)陸田秀実(2000): 大規模碎波による気液混相流体場における高精度数値計算手法の開発, 岐阜大学学位論文, 198p.
- 46)Sha W.T., H. M. Domanus, R.C. Schmitt, J.J. Oras, and E. I. H. Lin(1978): COMMIX-1:A three dimensional transient single-phase component computer program for thermal-hydraulic analysis, Argonne National Laboratory, NUREG/CR-0785, ANL-77-96.
- 47)van Gent, M.R.A.(1994): Permeability measurements for the modelling of wave action on and in porous structures, Proc. of Coastal Dynamics '94, pp.671-685.
- 48)水谷法美・許東秀・前田祐介(2002): 港内の波と流れの非線形相互作用の数値解析に関する研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.51-55.

補足 抗力項の導出について⁷⁾

ポーラスボディの支配方程式中⁷⁾の抗力項 R_x は固体を含む微小要素 $\Delta x \Delta z$ に均等分布する等価抵抗とみなし, 次式で定義される(Sha ら⁴⁶⁾).

$$R_x \Delta x \Delta z = \iint (\tau_{xx} dA_x + \tau_{xz} dA_z) \quad (A1)$$

ここに, dA_x, dA_z はそれぞれせん断力 τ_{xx}, τ_{xz} が作用する微小面積で, τ_{xx}, τ_{xz} は素 $\Delta x \Delta z$ 内で一定とみなす.

$$\iint dA_x \propto (1-\gamma_x)\Delta z, \quad \iint dA_z \propto (1-\gamma_z)\Delta x \quad (A2)$$

と近似できるから、 R_x は次式で表わされる。

$$R_x = \frac{\tau_{xx}(1-\gamma_x)}{\Delta x} + \frac{\tau_{xz}(1-\gamma_z)}{\Delta z} \quad (A3)$$

さらに、 τ_{xz} に比べ τ_{xx} が支配的とみなす。また、層流的な抵抗に比べ乱流的抵抗が支配的であるのでせん断応力を、抗力係数 C_D を導入して、次のように流速の 2 乗に比例する形で表わすと、 R_x は次式で表わされる。

$$\tau_{xx} = \frac{1}{2} \rho C_D u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (A4)$$

$$R_x = \frac{1}{2\Delta x} \rho C_D (1-\gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (A5)$$

抗力項 R_x が $(1-\gamma_x)/\Delta x$ に比例する形で表されるのは、以上の誘導過程にみられたように抵抗が有限要素に占める固体に作用するせん断応力に比例すること、抵抗が有限要素に均一に分布する等価抵抗をモデル化しているためである。同様に z -成分については次式で与えられる。

$$R_z = \frac{1}{2\Delta z} \rho C_D (1-\gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (A6)$$

しかし、 R_x と R_z で分母が異なるため合成された抗力と成分との関係に矛盾が生じる。このため、分母のメッシュのサイズを代表するのにメッシュの対角線の長さ $\Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}$ を取ることにする(樺山ら⁶⁾。抗力項のメッシュ依存性が残るが、抗力係数とメッシュサイズの比を一定に保てば同じ計算結果が得られる。

$$R_x = \frac{1}{2\Delta s} \rho C_D (1-\gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2}, \quad R_z = \frac{1}{2\Delta s} \rho C_D (1-\gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (A7)$$

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}$$

以上の考え方は抗力項を要素に均等に分布させるというポーラスモデルの概念(Sha ら)から導出されたものである。一方、純粋に抵抗則の構成方程式を直接導入する方法として、van Gent⁴⁾は以下の導出を行っている。擬似定常状態の動水勾配 I を次式で仮定する。また、式中の係数は U-字管内に設置した透過性材料の振動流による圧力損失の測定実験を行って定めた。これらの式中の係数は波高、周期の関数になっている。

$$I = au + bu|u| + c \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{with} \quad (A8)$$

$$a = \alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{\nu}{gD_{n50}^2} \quad (A9)$$

$$b = \beta_c \left(1 + \frac{7.5}{KC}\right) \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{gD_{n50}} \quad \text{where } KC = \frac{UT}{nD_{n50}} \quad (A10)$$

$$c = \frac{1 - \frac{1-n}{n} (0.85 - \frac{0.015}{A_c})}{ng} \quad \text{with } A_c = \frac{U}{ngT} > \frac{0.015}{\frac{n}{1-n} + 0.85} \quad (A11)$$

Lin ら⁴⁸⁾は係数を若干修正して van Gent の式を採用している。水谷ら⁴⁸⁾は有限要素法による透過潜堤を対象にした数値計算モデルの開発において、透過性構造物の抵抗則として一方向流の McCoquodale/Hannoura(1978)を用いている。この場合、層流抵抗と乱流抵抗を含むが、係数は空隙率のみの関数で、波高、周期は含まれていない。抗力係数 C_D 、や慣性力係数 C_M については感度解析的に定め計算を行っているが、今後数値計算モデルによる予測といった段階に達したので、より普遍的な抵抗則を式に導入する必要がある。