

消波護岸の越波に関する数値シミュレーション

榊 山 勉*・今 井 澄 雄**

1. 緒 言

海岸工学の分野においても Navier-Stokes 方程式を有限差分法で直接解いて、波動運動を数値解析する研究が増えてきた。

当初は、藤間ら (1984) が VOF 法 (Nichols, 1980) をソリトン分裂に適用した研究や SMAC 法による酒井ら (1987) の斜面上の砕波変形の数値計算が行われた。滝川ら (1991) は同じく SMAC 法で、砕波によるエネルギー逸散項をモデル化し砕波変形計算を進展させた。

近年、種々の現象に VOF 法が適用されている。斜面上の砕波 (van der Meer ら, 1992)、地滑りによる波の発生 (Heinrich, 1992)、透過性構造物上での砕波変形 (van Gent, 1994)、さらには衝撃砕波圧の計算 (Wu ら, 1994) を目的に研究が行われている。岩田ら (1994) は水中構造物による砕波変形を計算した。しかし、砕波によるエネルギー減衰のモデル化が重要な課題として残されている。このように VOF 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である。

著者の 1 人は消波構造物の存在を取り込んで波動運動を数値計算できるポーラスボディモデル (PBM) を開発した (榊山・鹿島, 1990; Sakakiyama and Kajima, 1992)。また、著者らは人工島式立地発電所の防波護岸の越波量を評価するために研究を進めている (鹿島ら, 1993; 榊山ら, 1994; 榊山ら, 1996)。合田ら (1975) の越波流量算定図やこれを定式化した高山ら (1982) の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、さらに、今後は平均越波流量の他に短時間越波流量 (関本ら, 1992) を考慮した護岸の設計に発展することが考えられる。このような状況のもとで、水理実験のみならず数値計算モデルにより越波量ならびにこれに係わる諸量を評価することは有効な手段と考えられる。PBM を用いて透過性構造物への越波を計算した例はこれまでにない。そこで、本研究では PBM を拡張して消波護岸な

らびに直立護岸の越波の数値解析を行い、水理模型実験により数値計算モデルの妥当性を検証する。

2. 計算方法

非圧縮粘性流体を対象とし、透過性構造物の幾何学的・物理的效果を Navier-Stokes 方程式に取り込んだ 2 次元の PBM の支配方程式を以下に示す。

連続方程式

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

運動量方程式

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \lambda_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda_z w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -\gamma_v \frac{\partial \phi}{\partial x} - R_x + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial(\gamma_x \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z \tau_{xz})}{\partial z} \right\} \dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \lambda_x u \frac{\partial w}{\partial x} + \lambda_z w \frac{\partial w}{\partial z} \\ = -\gamma_v \frac{\partial \phi}{\partial z} - \gamma_v g - R_z \\ + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial(\gamma_x \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z \tau_{zz})}{\partial z} \right\}, \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \lambda_v &= \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_D \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_v) C_D \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_v) C_D \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

である。抗力項 R_x, R_z は抗力係数 C_D と流速の 2 乗に比例する形でモデル化した。

従来の PBM では、水表面での運動学的条件である高さ関数を用いて水位変動を計算していた。VOF 法では式 (5) に示す計算セル内に占める流体の体積率 F の移流方程式を用いて自由表面を計算する。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(uF)}{\partial x} + \frac{\partial(wF)}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

体積率 F の値により、 $F=1$ は流体セル、 $F=0$ は気体セル、 $0 < F < 1$ が表面セルを区別する。また、表面セルの向きを判定し、各セルにフラグを定義し自由表面の挙動を計算する。ここでは、SOLA-VOL 法のアルゴリズムを

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部

** 正会員 (株)東京電力 原子力建設部

PBMの支配方程式を基に数値計算モデルに導入した。圧力の収束方法を改良し、質量保存則の精度を向上させ、VOF関数 F の移流計算の安定性を確保した。これにより越波や碎波等の現象が消波工が存在する場でも計算可能になる。

造波境界は波浪条件に応じて、磯部ら(1978)のストークス波第5次近似解とクノイド波第3次近似解を適用する。流出境界は、波の伝播を対象とする場合にはSommerfeldのradiation conditionを適用する。越波を対象としケーソン天端上の陸側端部を流出境界に設定する場合には次式を適用する。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 ϕ は、流速(u, w)、水位 η などの変数を示す。

3. 実験方法

数値計算モデルの妥当性を検証するために水理実験を行った。実験には、長さ20 m、幅0.30 m、深さ0.55 mの反射波吸収式2次元造波水路を用いた。水深30 cmの一樣水深部に天端高さ5 cm、幅(岸沖方向)30 cmのケーソン模型を設置し、消波工あり(消波護岸)と消波工なし(直立護岸)の2種類について越波実験を行った。図-1に実験に用いた消波護岸の場合の測定装置を示す。消波工は重さ $W=60$ gのテトラポッドで、天端幅2個並び、法面勾配3/4で作製した。測定項目は越波流量、ケーソン壁面での水位変動、反射率である。越波測定では、ロードセル4台で越波升内への越波の流入重量の経時変化を測定し、1波毎の越波流量を算出した。安定した時間での平均値を求めてその波浪条件での越波流量とした。越波升の容積は約15000 cm³である。

数値計算モデルの検証に当たっては、波高計による局所的な水位変動の他に空間的な水面波形の比較を行った。このため家庭用ビデオカメラを用いて越波の空間波形を撮影した。30コマ/秒の録画画像には、1/60秒ずれた2つの画像が記録されている。ビデオ画像をPCでデジタルデータに変換し、これを処理して越波の空間波形の時間的な変化を求めた。

実験では、周期 $T=1.0, 1.2, 1.4, 1.6$ sの4種類、各周期で波高 $H=6, 8, 10, 12$ cmの規則波を用いた。同一条件

の下で越波量測定とビデオ撮影の2回の実験を行った。

4. 計算結果

4.1 進行波の摂動解との比較

本計算モデルをチェックするために、まず一樣水深部を伝播する進行波の時間波形について有限振幅波の摂動解と計算結果との比較を行った。計算条件は水深 $h=30$ cm、波高 $H=5$ cm、周期 $T=1.4$ sで、ストークス波の第5次近似解を適用した。図-2に時間波形を示す。両者は良く一致し、VOF関数 F の移流計算による自由表面の計算方法の妥当性が確認できた。

4.2 越波の数値計算

越波の数値計算は水理実験条件に合わせて行った。計算領域は、水平方向に990 cm、鉛直方向に45 cmとし、計算は周期 $T=1.4$ sの波高 $H=8$ cmと10 cmについて、直立護岸と消波護岸の両者を対象に行った。水平、鉛直セル間隔を $\Delta x/L \approx 1/220$ 、 $\Delta z/h = 1/60$ (ここに、 L は波長、 h は水深)、時間間隔を $\Delta t/T = 1/800$ とした。計算にはEWS(DEC 3000-700 AXP)を用いた。

消波護岸の越波の数値計算に当たっては、慣性力係数 C_M と抗力係数 C_D を設定する必要がある。これらについては既往の計算結果(桝山ら, 1990)を参考にして、 $C_M=1.5$ 、 $C_D=0.9$ とした。消波工の空隙率は実験での設定値である0.5を与えた。越波流量はケーソンの天端上の任意点での水平流速を鉛直積分して算出した。

4.3 越波の計算結果

図-3に直立護岸の越波の計算結果を $T/16$ 間隔で示した。水理実験での観察によると、越波の状況は高橋ら(1992)の分類の“基本型”より波高の小さい場合に属するものと思われる。すなわち、重複的な波動運動をするが、堤体前面で波が打ち上がることはなく、堤体の港外側から港内側へ流れとなって越流する。実験では越流時にケーソン天端上に空気をわずかに取り込む様子が観察された。計算結果は、空気を取り込むことは再現していない。しかし、護岸の沖側から越波し、天端上を越流し引き波時に加速して流れる様子が良好に再現できている。

図-4に消波護岸の越波の計算結果を $T/8$ 間隔で示した。図-4(a)から(c)にかけては、消波工内部で波の

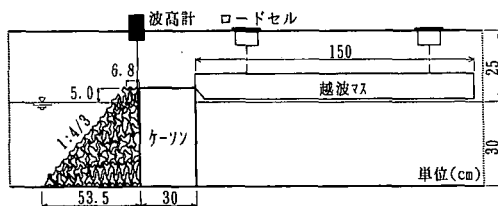


図-1 実験装置

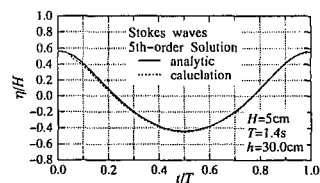


図-2 摂動解と計算結果の比較

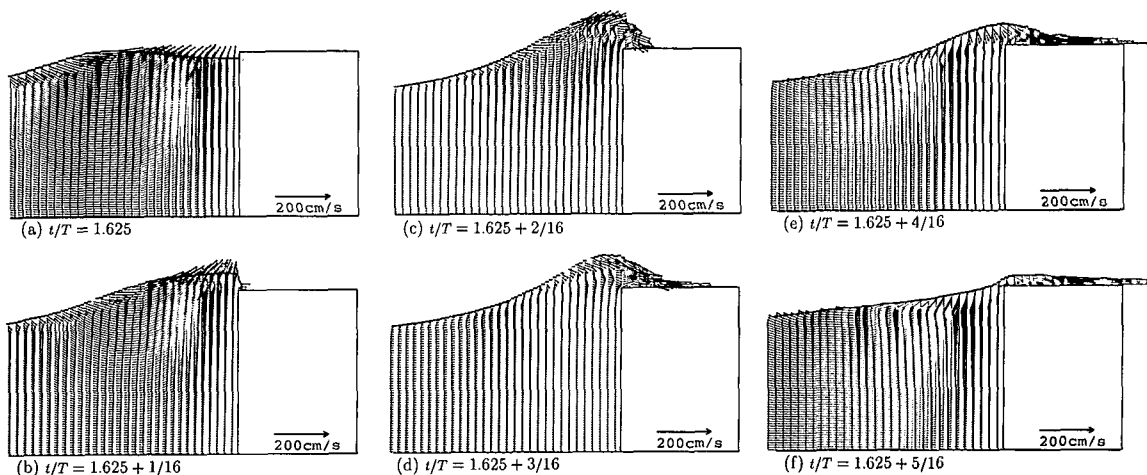


図-3 直立護岸の越波の流速ベクトル

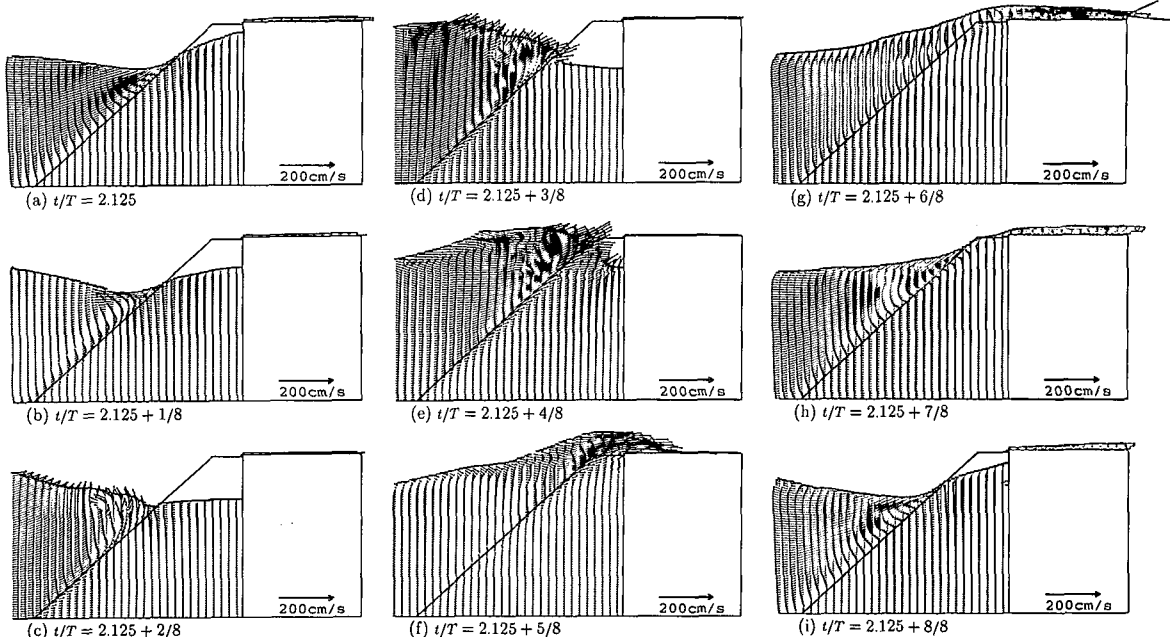


図-4 消波護岸の越波の流速ベクトル

流下する状況と沖からの波が伝播する様子を表している。消波工法面上の波のトラフ近傍では遡上波と流下した流れとの干渉による複雑な流速ベクトルの変化がみられる。図-4(d)では、斜面上を遡上しながら波形が前傾する様子や消波工内部の流れが上向きに転じてはいるが、消波工法面上の遡上波より遅れている様子がみてとれる。(e)では(d)の状況がさらに顕著になる。(f)で波が越波しケーソン上を流れ始める。(e)から(f)の段階で、実験結果では消波工斜面上の遡上波と消波工内部からの上向きの流れが消波工の天端上でぶつかり合い飛沫を生じた。(g)で波は引き始め、(h)ではケーソン天端上で越波水が加速されて流れる状況を示している。以

上のように消波護岸の越波の状況が計算により再現できた。

図-5に水面波形の計算結果とビデオ画像から得た実験結果との比較を示す。比較に当たっては、両者でほぼ一致する1組の遡上波形を抽出し、位相の基準を定めた。図-5(a)がこの位相での波形を、また、図-5(b)以降に $T/8$ 毎の波形の比較を示した。実験結果にみられる不連続な点は、飛沫が水面境界と判定されて図示されたものである。また、実験結果は消波工内での水位は識別できなかった。全体を通して計算結果と実験結果の空間波形は良く一致しているが、以下の点で実験と計算結果で異なる点が挙げられる。越流時は計算結果の方がわずか

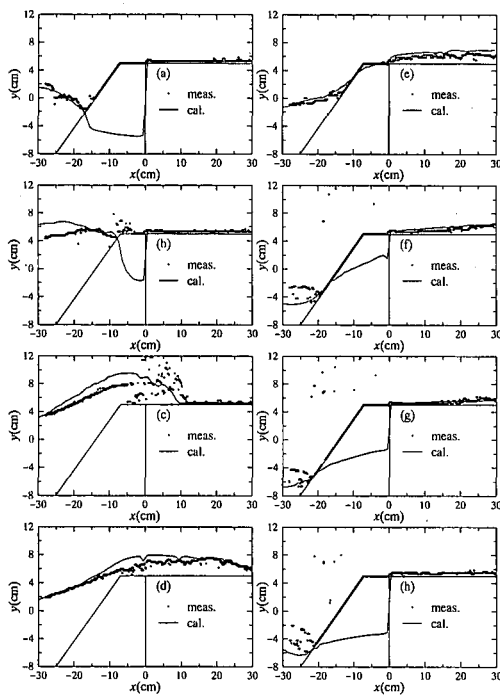


図-5 越波時の水面波形の比較

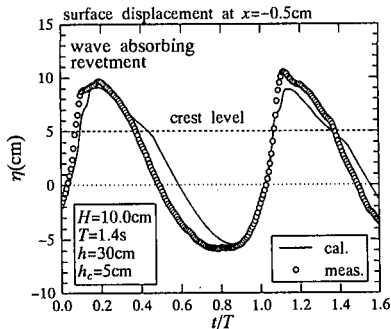


図-6 越波水位の比較

に大きく、また図-5(f) から (h) の流下時に差が大きくなった。図-5(c) の実験結果のケーソン天端上 $x=0$ cm から 10 cm 当たりの不連続な点が飛沫を表しており、このような飛沫は計算セルより小さいために計算では再現できない。また、実験では波高、周期の条件によりケーソン天端上の越流水域中に気泡を混入することがあるが、計算では越流水の波形から判断して空気塊を含むような波形にはなっていない。

図-6 は消波護岸のケーソン前面の越波水位変動について実験結果と計算結果とを比較したものである。比較に当たっては水位のゼロアップクロスする位相を一致させた。クレストからトラフにかけて波形はよく一致しているが、計算結果のほうが最大水位が若干小さく、流下

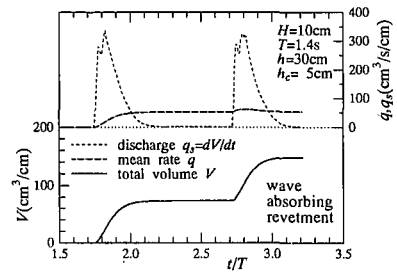


図-7 越波流量の時間変化

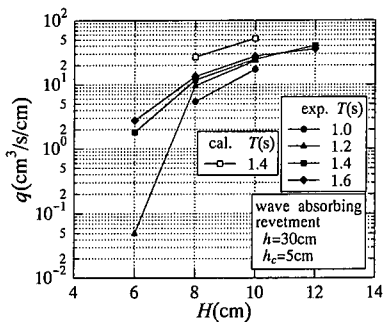
時の波形は計算結果の方が太っている。

図-7 に計算により得られた越波量 V 、瞬間的な越波流量 $q_s = dV/dt$ ならびに 1 周期当たりの平均越波流量 q の経時変化を示した。越波量 V は階段状に増加する。瞬間的な越波流量 q_s の変化から、越波する時間は今回の条件では約 1/4 周期間であることがわかる。 q_s の最大値は $300 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ 以上に達した。1 周期当たりの平均越波流量はほぼ一定であり、平均越波流量として $q = 50 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ を得た。瞬間的な越波流量 q_s は平均越波流量 q の約 6 倍である。

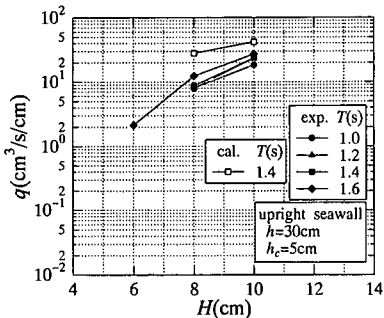
図-8 に平均越波流量 q の結果を示した。実験結果より越波流量は波高、周期の増加にしたがって大きくなる。直立護岸では反射率が大きいために安定な造波が進行波高 $H=10$ cm までに限られた。消波護岸の場合には、 $H=12$ cm まで測定できた。波高 6 cm で消波護岸には周期 1.2 s 以上で越波したのに対して、直立護岸では同じ波高で周期 1.6 s のみ越波した。周期 $T=1.0$ s では直立護岸の越波流量が消波護岸より大きくなったが、周期 1.2 s 以上ではこの関係が逆転し、消波護岸の越波流量の方が大きくなった。

消波構造物は波動運動に対して相反する 2 つの効果をもつ。1 つは幾何学的効果で、空間を固体で占有することに起因する。ここでは、斜面を作ったことにより波が遡上しやすくなった。他の 1 つは物理的效果であり、波のエネルギーを消滅させる。本実験条件では、周期 1.0 s ではエネルギー消滅効果が卓越するが、周期 1.2 s 以上になるとエネルギー減衰よりも幾何学的な効果が卓越し直立護岸より消波護岸の越波流量が大きくなったものと考えられる。

次に、越波流量を実験結果と計算結果を比較する。計算は周期 $T=1.4$ s について行った。消波護岸、直立護岸ともに計算結果のほうが大きく、実験結果の約 2 倍の越波流量となった。計算結果でも消波護岸の越波流量が大きくなり、実験結果と一致した。支配方程式に減衰項を含む消波護岸の越波流量より小さくなったことは、計算においても消波工の幾何学的効果と物理的效果の影響の強さを適切に再現できたものと考えられる。



(a) 消波護岸



(b) 直立護岸

図-8 平均越波流量の比較

5. 結 論

本研究では、ボラスボディモデルの支配方程式をもとに VOF 法を適用し、数値計算モデルを開発した。消波護岸と直立護岸の越波を対象に数値計算を行い、水理実験を用いてモデルの妥当性を検証した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

1. 護岸前面における重複波の水位変動や消波護岸の消波工内の水位上昇の位相が遅れる様子、ケーソン天端上を越波水塊が伝播する状況等の計算結果は実験結果を良好に再現できた。
2. 越波時の空間波形を比較し、計算結果は実験結果と良く一致した。
3. 越波流量の実験結果は周期が大きくなると消波護岸のほうが直立護岸より大きくなった。この傾向は計算結果でも一致した。これは、消波工による減衰効果に比べ斜面による遡上効果が大きくなるためである。
4. 平均越波流量の計算結果は実験結果より約 2 倍大きくなった。

本研究の一部は、電力 9 社と日本原子力発電 (株) による電力共通研究として実施したものである。数値計算には (株) 開発計算センター 香山真裕氏、実験には (株) 土木技術開発 関根 満氏の協力を得ました。ここに記

して謝意を表します。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・西村仁嗣・堀川清司 (1978): 保存波の擬動解の波高による表示, 第 33 回年講概要集, II, pp. 760-761.
- 岩田好一郎・川崎浩司・金 度三 (1994): 水中構造物による碎波の数値計算, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 781-785.
- 鹿島遼一・榊山 勉・清水琢三・関本恒浩・京谷 修 (1993): 安定限界を越える不規則波に対する人工島防波護岸の耐波安定性と越波特性, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 686-690.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻第 4 号, pp. 3-44.
- 酒井哲郎・水谷太作・田中秀明・多田幸夫 (1987): 斜面上の巻き波型碎波の碎波後の運動機構の数値計算, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 71-75.
- 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囲の非線形波動場解析, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 554-558.
- 榊山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩 (1994): 人工島式立地発電所への越波量評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 661-665.
- 榊山 勉・鹿島遼一・今井澄雄・清水琢三・片山裕之 (1996): 消波護岸への越波に関する現地観測, 海洋開発論文集 (印刷中).
- 関本恒浩・国栖広志・清水琢三・京谷 修・鹿島遼一 (1992): 人工島防波護岸の短時間越波流量について, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 581-585.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室智一郎 (1992): 混成防波堤上の越波水の運動と波力に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第 31 巻, 第 1 号, pp. 3-50.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982): 各種消波工による越波流量の減少効果, 港研報告, 第 21 巻, 第 2 号, pp. 151-205.
- 滝川 清・山田文彦・有元光久・田淵幹修 (1991): 斜面上の碎波変形過程の内部特性とその数値計算, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 61-65.
- 藤間功司・後藤智明・首藤伸夫 (1984): 非線形分散波理論の数値的な検討, 第 31 回海岸講演会論文集, pp. 93-97.
- Heinrich, P. (1992): Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 118, No. 3, pp. 249-266.
- Nichols, B. D., Hirt, C. W., Hotchkiss, R. S. (1980): SOLA-VOF: A solution algorithm for transient fluid with multiple free boundaries, Report LA-8355, Los Alamos Scientific Laboratory, University of California.
- Sakakiyama, T. and R. Kajima (1992): Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwaters, Proc. 23rd ICCE, Vol. 2, pp. 1517-1530.
- van der Meer, J. W., H. A. H. Petit, P. van den Bosch, G. Klopman and R. D. Broekens (1992): Numerical simulation of wave motion on and in coastal structures, Proc. 23rd ICCE, Vol. 2, pp. 1772-1784.
- 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.
- Wu, N. T., Oumeraci, H. and Partenscky, H. W. (1994): Numerical modelling of breaking wave impacts, Proc. 24th ICCE, Vol. 2, pp. 1672-1686.