

スリットを有する複雑な ケーソン防波堤への三次元数値波動水槽の適用

APPLICABILITY OF 3D NUMERICAL WAVE TANK TO WAVE DEFORMATION DUE TO A SLIT-TYPE CAISSON BREAKWATER WITH COMPLEX GEOMETRY

李 光浩¹・水谷法美²・姜 閔求³

Kwang-Ho LEE, Norimi MIZUTANI and Yoon-Koo KANG

¹正会員 博(工) 名古屋大学大学院助教 大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋千種区不老町1)

²正会員 工博 名古屋大学大学院教授 大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋千種区不老町1)

³工博 (株)三星物産建設部門土木事業部 首席研究員 (〒137-070 韓国ソウル市瑞草区瑞草洞)

This study presents numerical simulations of quasi-3D wave fields around the horizontal slit-type and beehive-type caisson breakwaters applied in the construction of Ulsan port, South Korea. The numerical simulation is performed by the new numerical wave tank model based on the one-filed model for immiscible multi fluids. In particular, new improvements of the numerical model include the MCIP method for the discretizations of the governing equations and THINC/WLIC methods for tracking interface between two different fluids. The numerical model applied in this study is validated by comparing with the available experimental data. It is shown based on the numerical simulations that the present numerical model is an efficient method for simulating the nonlinear interactions between waves and slit-type caisson breakwaters and can be used in engineering applications to assist in determining the optimal geometry of the caisson breakwaters.

Key Words : *Horizontal slit-type caisson breakwater, Beehive-type caisson breakwater, Numerical wave tank, MCIP method, THINC/WLIC method*

1. はじめに

近年, 計算機の性能向上と相まって多様な高精度の数値計算手法が開発されており, 海岸工学分野においても様々な工学的問題を解明するために数値シミュレーション手法が活発に利用されている. その代表的な数値解析手法は数値波動水槽 (Numerical Wave Tank) の概念に基づく計算手法である. NWT は様々な水理現象に対して水理模型実験とほぼ同様な条件での数値シミュレーションが可能であり, 水理模型実験では困難だった諸々の問題に対して詳細なデータを提供しうるものとして, 海岸工学上の一つの重要な分野として定着し, 経済的に事業評価が検討できる有用なツールとして認識されている. 一方, 最近の海岸構造物は環境面・景観面や高機能性などの観点から, より複雑な形状が要求されている. 本研究では, 韓国のウルサン新港の北防波堤の築造工事の第1工区および第2工区に各々適用される横スリットケーソンおよび蜂の巣型スリットケーソンに対して数値波動水槽による3次元数値解析を実施し, その有用性を検討することを目的とした.

2. ウルサン港の北防波堤の築造工事概要

韓国の戦略拠点港の一つであるウルサン港は韓国の東南端に位置し, 背後には自動車や重工業を始め, 大規模な工業団地を保有している (図-1参照). 2005年の資料¹⁾によると韓国の原油輸入の56%, 自動車輸出の38%, 船舶輸出の38%がウルサン港を利用している. ウルサン親港の北防波堤は, 図-2に示すように従来のウルサン港を東北アジアの液体物流拠点港湾および韓国の南部地方の物流拠点港湾とし



図-1 ウルサン港の位置

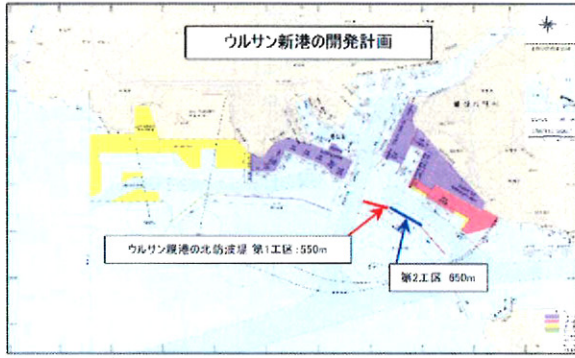


図-2 ウルサン新港の開発計画

て開発することを目的としたプロジェクトの一環として、ウルサン親港の北側地域の静穏度を向上するための外郭施設の築造工事である。防波堤の総延長は2,050mであり、その中で第1工区は550m、第2工区は650m、第3工区は850mとして計画されており、2015年までに開発することを目標としている。

本論文では、ウルサン親港の北防波堤の築造工事の第1工区および第2工区に各々適用される横スリットケーソンおよび蜂の巣型ケーソンを対象とし、構造物周辺の波浪場特性を調べた。

3. 3次元数値計算の概要

本研究では、著者らによって提案された3次元数値波動モデル^{2), 3)}を混相流モデルに拡張した一流体モデルを採用し、数値計算を行った。更に、自由表面の追跡には、界面の勾配を考慮できるTHINC/WLIC法⁴⁾を採用した。以下に、その概要を示す。

(1) 基礎方程式

混合しない液相と気相の非圧縮性ニュートン流体を考慮し、それぞれの流体は違う相の流体と明確な界面で区別できるものと仮定すると、各相の境界面形状が追跡できれば、非混合流に対して以下に示すような一流体モデル (one-filed model for immiscible multi fluids) が適用できる⁵⁾。

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \tilde{q} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{\nabla p}{\hat{\rho}} + \nabla \cdot (2\hat{\nu} \mathbf{E} - \boldsymbol{\tau}) - \frac{2}{3} \nabla \{ \hat{\nu} (\nabla \cdot \mathbf{V}) \} + \mathbf{F}_b - \gamma \mathbf{V} \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}$ は速度ベクトル、 p は圧力、 $\tilde{q} = q/\Delta x_s$ は造波ソース、 q は造波ソース位置 $x = x_s$ におけるわき出し強さ、 Δx_s は $x = x_s$ での x 方向の格子長、 t は時間、 γ は付加減衰領域で正の値を持つ減衰係数、 $\mathbf{F}_b$ は重力や表面張力などの影響による任意の体積力、 $\mathbf{E}$ はひずみ速度テンソルである。また、 $\hat{\rho}$ と $\hat{\nu}$ は、それぞれ計算格子上的での平均密度と平均動粘性係数であり、局所質量の線形和

として各相を代表する流体率を用いて以下のように求められる。

$$\hat{\rho} = C_f \rho_w + C_g \rho_g \quad (3)$$

$$\hat{\nu} = C_f \nu_w + C_g \nu_g \quad (4)$$

ここで、 C は $0 \leq C \leq 1$ の範囲にある流体率関数であり、下付きの文字は各相を示す。各相に対する流体率は、前述したように、本モデルでは非混合流体を考えているため、液相の流体率関数を追跡できれば $C_f + C_g = 1$ の関係から気相の流体率は容易に求められる。一方、各相の境界面形状を追跡するため、液相に対する流体率関数 (VOF 関数) の時間発展は次式の移流方程式により求められる。

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} + \nabla \cdot C_f \mathbf{V} = C_f (\nabla \cdot \mathbf{V}) \quad (5)$$

(2) MCIP法による計算方法

本研究で用いた基礎方程式をデカルト座標のスタッガード格子に基づいて離散化する。これらの差分近似式に対して、移流計算には MCIP 法を、それ以外には中央差分を、時間発展には前進差分を用いて解いた。MCIP 法は Nakamura and Yabe⁶⁾ によって提案された計算方法であり、双曲線方程式の数値解析において数値拡散が少ない安定的なアルゴリズムである。本モデルでは、運動方程式を移流段階と非移流段階に分割し、移流段階を MCIP 法により解いた後、非移流段階を計算することにした。

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = 0 \quad (6a)$$

$$\frac{\mathbf{V}^{n+1} - \mathbf{V}^n}{\Delta t} = -\frac{\nabla(\delta p)^{n+1}}{\hat{\rho}} + H \quad (6b)$$

ここで、 Δt は時間発展間隔であり、上付き n は現在の時刻 t での時間ステップを、 $n+1$ は次の時間ステップ、 H は運動方程式の非移流項の成分である。

MCIP 法による式 (6a) の詳細な計算方法を x 方向の計算に対して説明する。式 (6a) に方向分離法を適用すると次式に書き換える。

$$u_i^{s1} + u(u_x)^n = 0 \quad (7a)$$

$$u_i^{s2} + v(u_y)^{s1} = 0 \quad (7b)$$

$$u_i^{s3} + w(u_z)^{s2} = 0 \quad (7c)$$

ここで、下付き文字は微分演算 ($u_i = \partial u / \partial t$)、上付き $s1 \sim s3$ は各方向に対応する。更に、式 (7a) を用いて空間勾配に対する移流方程式が得られる。

$$(u_x)_i^{s1} + u(u_x)_x^n = -u_x(u_x)^n \quad (8)$$

従って、上式を用いてそれぞれの方向に 1 次元の CIP 法⁷⁾を使うことができる。

(3) THINC/WLIC 法による自由界面の追跡

自由表面を含む気液二相流を解析する場合、自由表面形状を精度良く追跡しなければならない。自由表面を追跡する手法は、計算格子を界面変形に追従させながら解析する方法と計算格子の再構成を必要

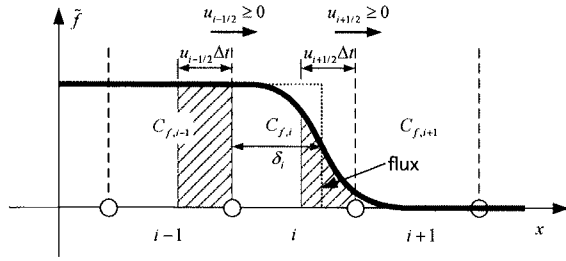


図-3 THINC法による流束計算

としない手法に大きく分けることができる。前者には、有限要素法、境界適合座標系、ラグランジュアン法が、後者にはMAC法⁸⁾、Level-Set法⁹⁾、VOF法¹⁰⁾などを挙げられる。その中で、流体の占有率に着目したVOF法がよく用いられている。しかしながら、VOF法は輸送される流体の体積を保存するために高精度なDonor-Acceptor法を採用したものの界面勾配は無視している。これを改善するため、PLIC法¹¹⁾に始まり、SL-VOF法¹²⁾やMARS法¹³⁾などのいくつかの方法が提案されているが、詳細なアルゴリズムが不明であったり、複雑なために3次元への拡張は難しい。一方、一般に3次元の波動場解析の場合は計算効率を向上させるため、比較的粗い格子も含む可変格子が用いられるので界面勾配まで考慮することが望ましい。そこで、本研究では、Yokoi⁴⁾によって提案されたTHINC/WLIC法を適用する。THINC/WLIC法は双曲型タンジェント関数を補間関数として利用した1次元のTHINC法¹⁴⁾を各方向の界面の勾配を考慮し、流束計算を修正する方法である。THINC/WLIC法では、気相と液相の位置において各々0と1を持つ特性関数 $f(x,y,z)$ を導入し、VOF関数 C_f を定義する。

$$C_{f,i,j,k} = \frac{1}{\Delta V} \iiint_{\Omega} f(x,y,z) dx dy dz \quad (10)$$

ここで、 ΔV はセルの体積、 Ω は計算セルの領域である。なお、特性関数 $f(x,y,z)$ は界面に対する法線ベクトル $\mathbf{n}$ から次のように書き換えられる。

$$f = \omega_x \mathbf{n} \tilde{f}_x + \omega_y \mathbf{n} \tilde{f}_y + \omega_z \mathbf{n} \tilde{f}_z \quad (11)$$

ここで、 ω と $\tilde{f}$ はそれぞれ各方向に対する重みと特性関数である。また、各々の $\tilde{f}$ は式(10)を満たす。これらにより、各計算セルでの $\tilde{f}$ がわかれば、各方向の流束の算定が可能になり、VOF関数の移流方程式(5)に方向分離法を適用することによって流体率を時間発展させることができる。VOF関数 C_f は $0 \leq C \leq 1$ の範囲にあるので、計算セルでの界面は以下のように双曲型タンジェント関数によって近似できる。

$$\tilde{f}_{x,i}(x) = 0.5 \left\{ 1 + \alpha_x \tanh \left[\beta \left(\frac{x - x_{i-1/2}}{\Delta x} - \delta_i \right) \right] \right\} \quad (12)$$

ここに、 α は $C_{i+1} \geq C_{i-1}$ の場合1を、それ以外は-1を持つ界面の方向パラメタ、 β はそれぞれ双曲型タンジェント関数の変化率を制御する変数($\beta=3.5$)、 δ は計算セルでの中央値を求めるため変数であり。

次式を満たすように決める。

$$\frac{1}{\Delta x_i} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \tilde{f}_{x,i}(x) dx = C_{f,i} \quad (13)$$

式(13)から得られた δ を式(12)に代入し、 $\tilde{f}_{x,i}$ が得られる。図-3は、THINC法による流束計算例を示したものである。

4. 数値モデルの検証

本研究で対象とする構造物はケーソンである。スリットを有するケーソンに対する3次元実験データが少ないため、3次元性を考慮したシマモラ¹⁵⁾の津波波力に対する実験結果と比較する。但し、対象とした実験ケースは、3次元性の強いケースとして陸域での建物群が密集した場合を対象とした。図-4は、実験装置と計測位置を示したものである。陸域に設置した建物模型は両辺が $B=10\text{cm}$ の正方形であり、建物間の間隔は $L=B$ である。一方、水理実験では、造波板を後ろに引いてから前方に押すことによって津波を再現したが、数値計算では、造波板から近い位置(図中のA1)での波高が再現できるように孤立波を数値造波させた。実験の詳細に関してはシマモラ¹⁵⁾の論文を参照されたい。シマモラ¹⁵⁾の実験で得られた水面変動の実測値と孤立波の数値造波による計算値を比較したものを図-5に示す。図から、造波板から近い位置であるA1での波形は、造波形式の違いによって位相差が発生するものの、

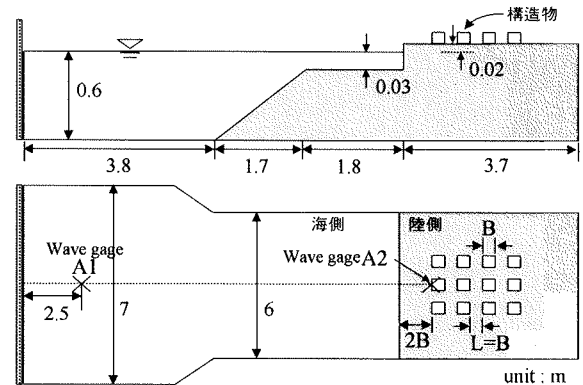


図-4 実験装置の配置図

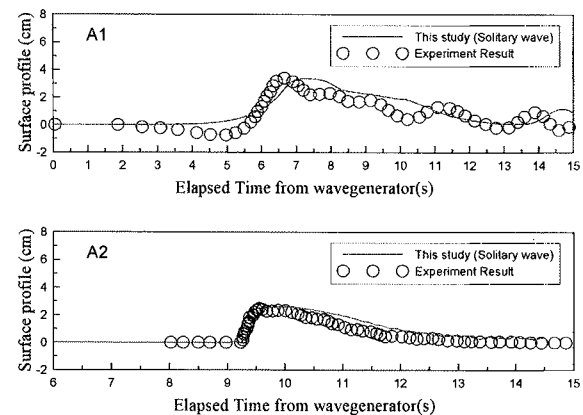
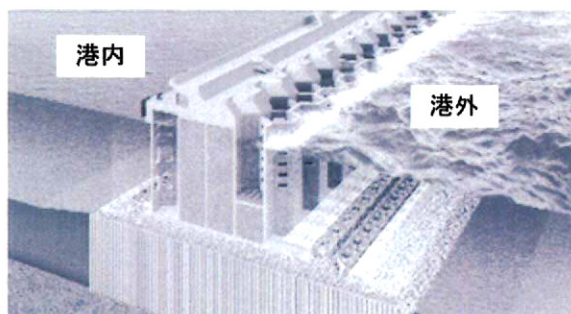
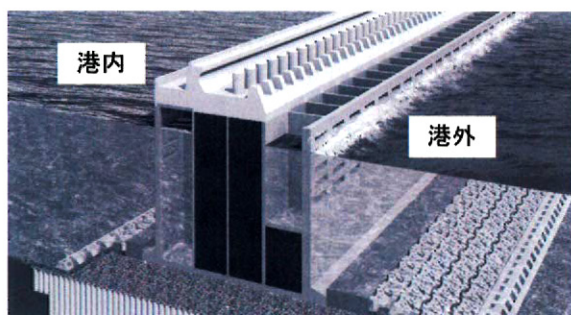
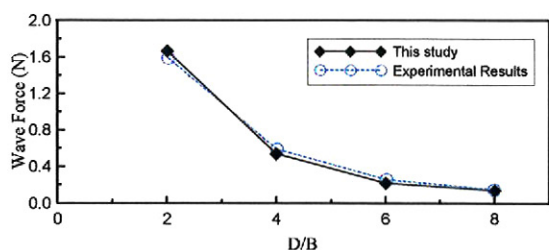
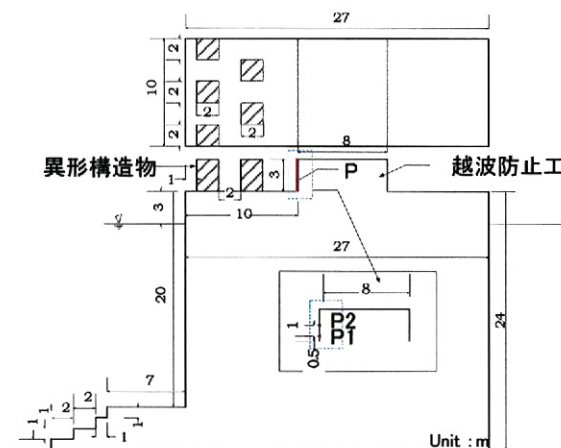
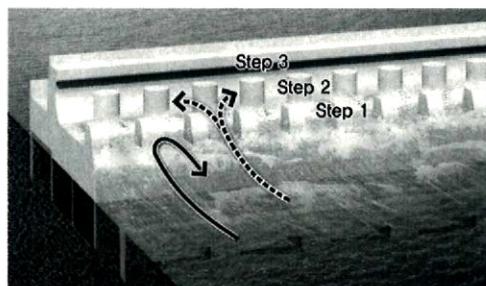


図-5 水面変動の比較



静水面から波峰までの波高はほぼ同様であることが分かる。更に、A2地点での陸域に遡上した波形は、孤立波を数値造波することにより良好に再現できていることが確認できる。図-6は、陸域での建物群が密集した場合、建物群に作用する流体力の最大値をシマモラら¹⁵⁾の実験値と比較したものである。波力は、建物模型の中央の列で測定した結果であり、図中のDは、護岸からの距離である。図から、前列の建物の存在によって波力が減衰する実験結果を良好な精度で再現できていることがわかる。特に、建物群が密集した場合の波力は、その配置によって異なるため¹⁵⁾、本研究で用いた3次元計算手法の妥当性が検証できた。



5. スリットケーソンへの適用

本研究で対象とするケーソン防波堤は、図-7と8に示すように横スリットケーソンと蜂の巣型スリットケーソンである。いずれのケーソンも、ケーソン天端に越波防止工であるパラペットを設置し、積極的に越波を防止するとともに断面効率の向上を図つ

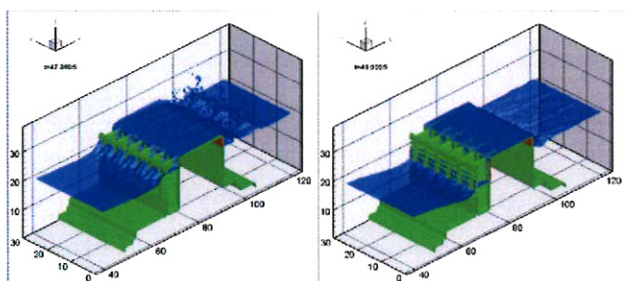


図-12 横スリットケーソン周辺の水面変動1(越波防止工無し)

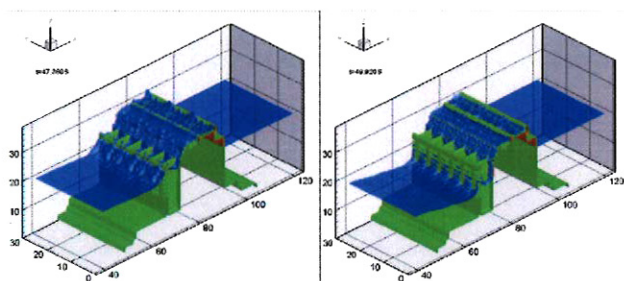


図-13 横スリットケーソン周辺の水面変動2(越波防止工有り)

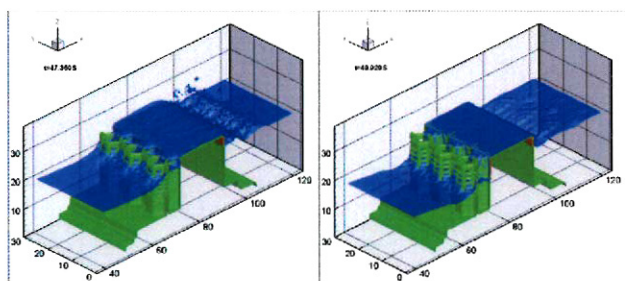


図-14 蜂の巣型ケーソン周辺の水面変動1(越波防止工無し)

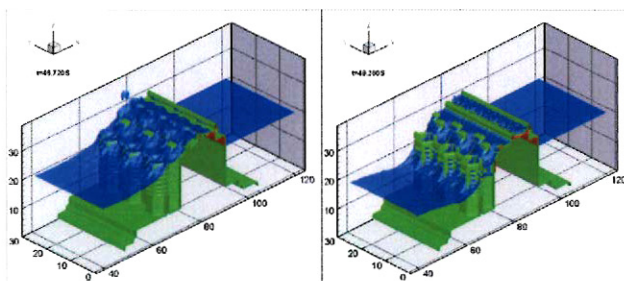


図-15 蜂の巣型ケーソン周辺の水面変動2(越波防止工有り)

を造波させた。また、水深は21mで海底の勾配は無視した。従来型のケーソンの上部に設置した異形構造物の有無による越波防止工の作用波圧の比較を図-11に示す。図から異形構造物の設置によって越波防止工に作用する衝撃波圧が顕著に減少することが確認できる。一方、異形構造物を設置した場合、ケーソン上部に越波した波が異形構造物によって戻りにくくなり、天端上での滞留時間が長くなるため、一定の静水圧が作用していることがP1で計測された波圧から分かる。また、図示しないが、一列の異形構造物より二列の異形構造物の方が波圧減衰効果があることを確認した。

(2) 越波防止工の設置有無による水面変動

次に両ケーソンに対して越波防止工の設置の有無によるケーソン周辺の水面変動の考察を行った。計算では、対象としたスリットケーソンをモデル化した形状を適用したが、形状特徴を最大限の表現できるように構造物周辺では細かい格子解像度を持つ可変格子を用いた。従って、構造物周辺での最大解像度は $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z = 0.4 \times 0.4 \times 0.4\text{m}$ （前面スリットのサイズ $\Delta x \times \Delta z = 2.4 \times 0.8\text{m}$ ）である。越波防止工の設置の有無による横スリットケーソン周辺の瞬間水面変動の計算結果（造波開始後の時間 $t = 175.36, 225.28\text{s}$ ）を図-12と13に、蜂の巣型スリットケーソンの計算結果を図-14と15にそれぞれ示す。なお、図中の水面変動は気相と液相の境界が位置する流体率関数 $C_f = 0.5, 0.1$ を用い、同面でプロットしたものである。図-12と14からわかるように、前面での横スリット壁を通過した入射波がケーソンに越流し、背後まで伝達される一連の水面変動が見受けられる。また、スリットケーソン内部と外部での水位差によって発生する横スリットを通過する沖側への反射まで再現している。一方、越波防止工（パラペッ

ト）を設置した図-13と15の場合は、越波防止工がない場合と同様に、横スリットを通過した波がケーソンの天端に越流するが、高天端の越波防止工によって越波は発生しないことがわかる。特に、越波防止工に作用する波力を軽減させるために設置したStep1,2の異形構造物を考慮した図-15の場合は、天端上の異形構造物間での複雑な水面が発生する様子が確認できる。

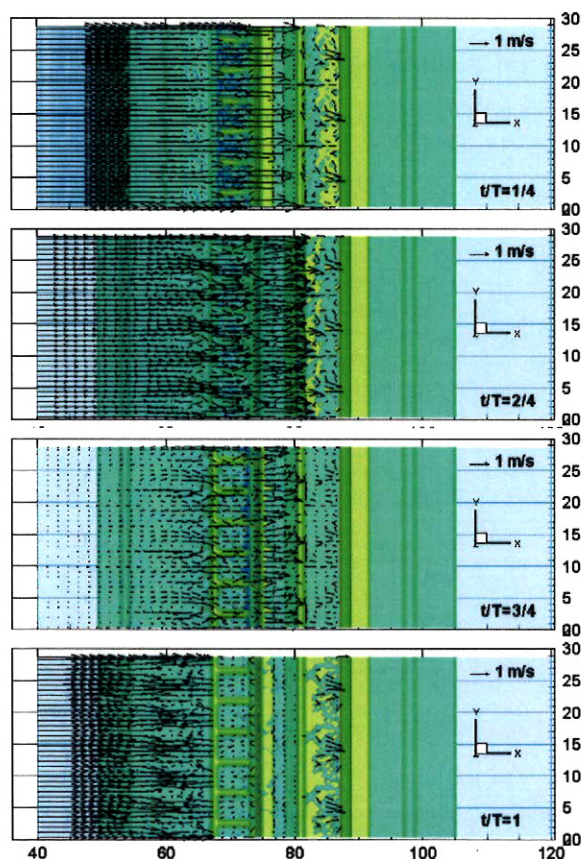


図-16 横スリットケーソン周辺の流速場

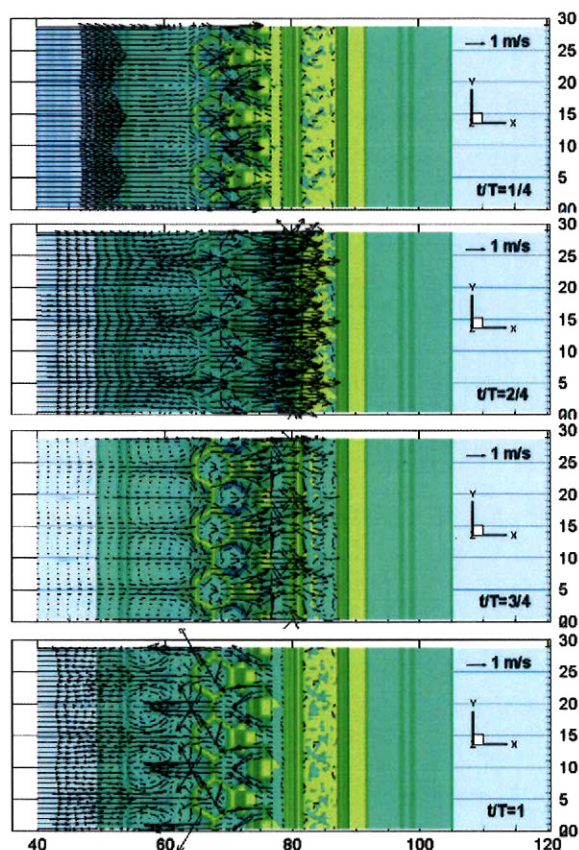


図-17 蜂の巣型ケーソン周辺の流速場

(3) スリットケーソンの流速場

図-16, 17は横スリットケーソンと蜂の巣型スリットケーソン周辺の代表的な流速ベクトル分布を波一周間の4つの位相(計算開始後の13周期目)に対してそれぞれ示したものである。また、流体率関数から得られた水面も同時に示している。図中に $t/T=1/4$ と $2/4$ の位相は波峰がケーソン前面に入射し、ケーソンを越流する来襲波が作用する位相であり、 $t/T=3/4$ と $4/4$ は波谷がケーソン前面に位置し、反射する波の位相である。なお、計算開始後の13周期での結果である。図-17から来襲波の位相には前面スリット壁を通過し、ケーソンの天端上に越流する早い流速ベクトル成分が見られ、反射波の時には、海側に前面スリット壁を通した強い流速成分が発達する様子が見受けられる。この様なスリットを有するケーソン周辺での流速ベクトルの特徴は蜂の巣型スリットケーソンの場合(図-17)でも確認できる。しかし、図-16と図-17を比較すると、蜂の巣型スリットケーソンの場合は、一様なケーソンの前壁を持つ横スリットケーソンに対して、より複雑な流速分布が形成されている。特に、スリットケーソンの内部($65 \leq x(\text{m}) \leq 75$)や上部の異形構造物間では形状による流速成分の発達が確認できる。

6. まとめ

本研究では、MCIP法とTHINC/WLIC法に基づいた3次元数値波動モデルを適用し、スリットやケーソンの上部に設置された異形構造物を有する複雑なケーソン防波堤の周辺波動場解析を試みた。数値モデルは、3次元性を含む既往の波力実験結果との比較によって検証した。数値計算により韓国のウルサン新港の北防波堤の築造工事に適用される新たなスリットケーソン周辺の水面変動や流速分布の特徴を調べた。その結果、スリットや上部の異形構造物の影響を含む3次元波浪場の特性が明らかになった。しかし、スリットケーソンに対する直接的な数値モデルの検証までは至っておらず、今後も引きつづき検討していく所在である。

参考文献

- 1) Ulsan Port Authority, www.upa.or.kr
- 2) 李光浩・大堀文彦・水谷法美：河口から遡上する孤立波および周期波と流れの相互作用に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.159-164, 2007.
- 3) 李光浩・大堀文彦・水谷法美・桑原真吾：河口から流出した流れと波の相互作用に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.897-902, 2008.
- 4) Yokoi, K.: Efficient implementation of THINC scheme: a simple and practical smoothed VOF algorithm, *Journal of Computational Physics*, Vol.226, pp.1985-2002, 2007.
- 5) 秋山守・有富正憲：新しい気液二相流数値解析-多次元流動解析-, コロナ社, 2002.
- 6) Nakamura, T. and Yabe, T.: Cubic interpolated propagation scheme for solving the hyper-dimensional Vlasov-Poisson equation in phase space, *Computer Physics Communications*, Vol.120, pp.122-154, 1999.
- 7) Takewaki, H. Nishiguchi, A. and Yabe, T.: The cubic-interpolated pseudo-particle (CIP) method for solving hyperbolic-type equations, *Journal of Computational Physics*, Vol.61, pp.261-268, 1985.
- 8) Harlow, F.H. and Welch, J.E.: Numerical study of large-amplitude free surface motion, *Physics of Fluids*, Vol.9, pp.842-851, 1966.
- 9) Osher, S. and Sethian, J.A.: Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations, *Journal of Computational Physics*, Vol.79, pp.12-49, 1988.
- 10) Hirt, C.W. and Nichols, D.B.: Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol.39, pp.201-225, 1981.
- 11) Youngs, D.L.: numerical methods for fluid dynamics, Academic Press, 1982.
- 12) Biaisser, B., Guignard, S., Marcer, R. and Fraunié, P.: 3D two phase flows numerical simulations by SL-VOF method, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.45, pp.581-604, 2004.
- 13) 功刀資彰：MARSによる3次元気泡発生シミュレーション, 第34回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp.815-816, 1997.
- 14) Xio, F., Honma, Y. and Kono, T.: A simple algebraic interface capturing scheme using hyperbolic tangent function, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.48, pp.1023-1040, 2005.
- 15) チャルレスシマモラ・嶋原良典・藤間功司：建物群に作用する津波波力に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.831-835, 2007.