

海域構造物に作用する波力の数値計算

Numerical Simulation of Wave Forces on Coastal Structures

許 東秀¹・水谷 法美²

Dong-Soo HUR and Norimi MIZUTANI

¹正会員 博(工) 名古屋大学助手 工学研究科土木工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工博 名古屋大学教授 工学研究科地圏環境工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Recent advanced computer technology encourages development of numerical simulation method of complex flow regime. Then, recent numerical simulation methods are able to simulate interactions between waves and coastal structures even for cases of rotational motions of viscid fluid. This kind of numerical simulation method has been applied to simulate mainly the interaction between waves and structure with vertical face represented by the breakwater. In the simulations, wave deformation, pressure on the face and wave overtopping have been analyzed, and acceptable reliabilities have been confirmed. Recently, the numerical simulation method has been developed to the three-dimensional problem for wave-structure interaction, where the vortex formed behind the structure is important. In this paper, applicability of the numerical simulation method in the estimation of the wave force on the structure is discussed. Moreover, the latest results of the application of the numerical simulation to the wave-structure interaction with asymmetric feature where the transverse force is significant are presented here.

Key Words : Wave forces, wave pressure, numerical calculation, VOF

1. 緒言

防波堤などに代表される海域構造物の耐波設計に最も重要な波力の算定には、主に水理模型実験やそれに基づいて提案された合田式などの波力公式が用いられてきた。しかし、精度高い水理模型実験を行うためには多くの時間と費用及び労力を必要とする。また、近年の構造物はその形状に多様性が増しており、波力公式の適用は、対象条件によっては経験係数などの面から精度面で必ずしも十分でない可能性が残されている。したがって、防波堤などの波力算定に数値計算が適用可能となれば、経済面・労力面の負荷が軽減できるだけでなく、多くのオプションの検討が可能になるなど、設計面に対する貢献は多大である。

従来より、構造物周りの流れ場の数値解析は数多く行われてきているが、多くは渦流れの影響が無視できる大型構造物の場合であり、速度ポテンシャルに基づく解析的扱いや境界積分方程式に基づく数値解析が数多く行われてきた¹⁾。小口径円柱のような小型構造物に対しても、渦糸分布法²⁾や渦素子

法³⁾などによる数値解析も提案されている。しかし、これらの手法は、基本的にはポテンシャル理論に基づいており、そのため、ポテンシャルポルテックスに対して生成と消滅、剥離点や剥離条件などを与えるなどの工夫が必要である。

一方、ポテンシャル理論による波動場の解析も、従来は規則波を仮定した周波数領域の解析が主であったが、開境界処理や無反射造波法などの開発により、不規則波動場へも適用可能な時間領域の解析が可能となり、数値波動水槽が様々な場に適用されるようになってきた⁴⁾。この開境界処理法や無反射造波法は、MAC法を発展させたVOF法のような直接数値シミュレーションにも適用されるようになり、ポテンシャル理論が中心であった数値波動水槽も粘性流体の回転運動をも対象可能な数値波動水槽へ発展してきた。このように、粘性流体の回転運動の数値解析が可能となると、構造物周りの波動場の解析も大きく進展すると期待される。

本研究では、波動場の直接数値シミュレーションとして最近広く使用されるようになってきたVOF法を対象に、海域構造物に作用する波力の直接数値計

算手法について検討するものである。

2. 数値計算

ここでは、汎用性が高く複雑な自由水面の取り扱いが可能であるVOF法と後述する透水性構造物による波変形にも適用可能なように透水性の影響を考慮できるポーラスボディモデルとを組み合わせた数値解析を取り上げる⁵⁾。

基礎方程式は3次元非圧縮性流体の連続式(1)と、運動方程式(2)~(4)、および自由表面の形状を模擬するためのVOF関数 F の移流方程式(5)である。

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y v)}{\partial y} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = q^* \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \gamma_y v \frac{\partial u}{\partial y} + \gamma_z w \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - M_x - R_x \\ + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zx}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial v}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial v}{\partial x} + \gamma_y v \frac{\partial v}{\partial y} + \gamma_z w \frac{\partial v}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - M_y - R_y \\ + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zy}}{\partial z} \right) - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial w}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial w}{\partial x} + \gamma_y v \frac{\partial w}{\partial y} + \gamma_z w \frac{\partial w}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \gamma_v g \\ - M_z - R_z + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zz}}{\partial z} \right) \\ - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - \beta w \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x F u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y F v)}{\partial y} + \frac{\partial(\gamma_z F w)}{\partial z} = F q^* \quad (5)$$

ここで、

$$q^* = \begin{cases} q(\gamma, z, t) / \Delta x_s & : x = x_s \\ 0 & : x \neq x_s \end{cases} \quad (6)$$

であり、造波のためのソース項である。

計算の安定条件には、移流項から生ずるCFL条件と、拡散項から生ずる拡散不安定条件を用いた。この数値モデルの詳細については参考文献⁶⁾⁷⁾を参照されたい。なお、本研究では、すべて直交格子に基づき、staggered meshを用いて上記の方程式を差分近似することにより、数値計算を行った。

3. 既往の研究

現在までにこれまでのようなNavier-Stokesの運動方程式を用いた波力算定の試みが多く、研究者によって行われている。van Gent et al.⁸⁾は、バーム式

防波堤を設置した波浪場の数値計算を行い、防波堤内部の圧力の計算値と実験値との良い一致を示している。混成防波堤に作用する波力や圧力の計算例としては、藤井ら⁹⁾とHsu et al.¹⁰⁾の研究例がある。藤井らは混成堤に作用する波力算定に数値波動水路の適用性の検討を行い、砕波圧が働く場合以外には実験結果との良好な一致を示している。Hsu et al.は、ケーソン前面と底面に作用する圧力の計算値が実験値を程良く再現していることを報告している。直立防波堤に作用する衝撃砕波力の数値計算は渡辺ら¹¹⁾、有川ら¹²⁾により行われており、渡辺らがそれぞれ砕波直前、砕波点及び砕波直後の波が堤体に衝突する時の衝撃力の違いに対し数値的な考察を行っている反面、有川らは衝撃砕波圧の数値計算を行い、波圧計算時に発生するスパイクノイズの除去方法を示すと共に、実験結果の精度高い再現よりその妥当性の検証を確認している。なお、Hamzahら¹³⁾は、海岸堤防に作用する津波力の直接数値シミュレーション(NASA-VOF)を行い、衝撃波圧のピーク値の再現にはチューニングが必要となるものの、安定性の検討に重要なネットとしての波力に関しては再現可能であることを示している。

また、数値計算による越波の研究も進んでおり、榊山・香山¹⁴⁾は、消波護岸の越波の数値シミュレーションを行い、越波量に及ぼす実験スケール効果の検討を行っている。

上記の研究はほとんど2次元構造物を対象としているが、その精度から見ると耐波設計への実用化に近いレベルまで来ていると言えよう。しかし、防波堤のような半無限長を有する構造物ではなく、円柱のように、構造物背後に渦や剥離が形成される構造物に対しては3次元的に取り扱う必要がある。

最近、著者らは擬岩をモデル化した3次元物体に作用する砕波波力の直接数値計算を行っており、砕波が作用する場合の波力であっても上述の直接数値計算手法により波力の推算が可能であることを示している⁶⁾⁷⁾。しかし、流れ方向に対して形状の非対称性を有する構造物など3次元構造物に対して直接数値計算を適用した例はない。そこで、本研究では、3次元構造物に作用する直方向力のみならず揚力の算定までを考え、3次元直接数値シミュレーションを用いることによる波力の直接数値計算手法の適用性と再現性の検討を行う。

4. 水理模型実験

数値解析手法の妥当性を検証するために水理模型実験を行った。まずその詳細について述べる。

本実験で対象になった3次元構造物は、波進行方向に対し、対称構造物と非対称構造物の2種類である。実験は名古屋大学工学研究科土木工学教室の二次元鋼製造波水槽(長さ30m, 幅0.7m, 高さ0.9m)で行った。

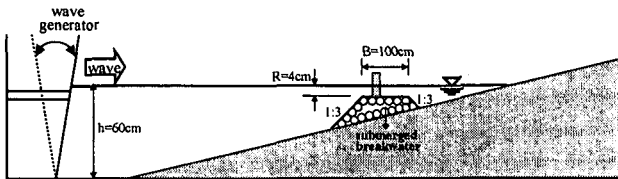


図-1 対称構造物に対する実験装置の概要

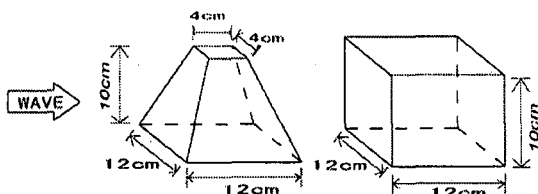


図-2 対称構造物の模型

(1) 対称構造物

水槽内に、一様勾配1/30の不透過木製斜面を設置し、その上に天端幅1m、岸側・沖側ともに法面勾配が1/3の潜堤を金網と石により構築した。なお、潜堤の法先水深を20cm、天端水深 R を4cmで一定とした。構造物模型は、これまでの施工例や数値解析結果との比較を考慮して、図-2に示すように四角錐台（上面4cm×4cm、底面12cm×12cm、高さ10cm）と直方体（底面12cm×12cm、高さ10cm）の二種類を採用した。これらの構造物を水槽に鋼製枠を介して固定した三分力計に底面の一边が波峰と平行になるように取り付けた状態で波を作用させ、波進行 x 方向の波力 F_x と鉛直 z 方向の波力 F_z を計測した。発生波は規則波とし、周期を3種類に変化させた。波高 H を、構造物に非砕波から砕波までの波が作用するように数種類変化した。

また、構造物側方で水位変動と潜堤天端上1cmにおける x と z 方向の流速の計測も併せて行った。計測は静水状態から約1分間行い、計測した水位変動、流速、波力の時間変化を2kHzでAD変換し、パソコン

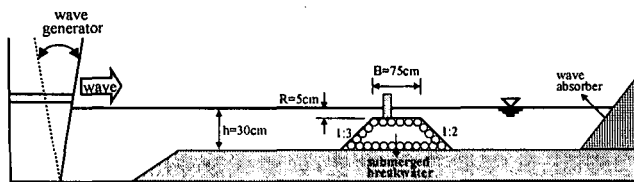


図-3 非対称構造物に対する実験装置の概要

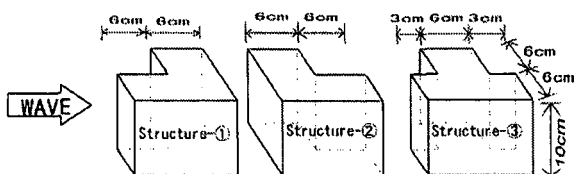


図-4 非対称構造物の模型

ンに取り込んで解析に使用した。

(2) 非対称構造物

幅70cmの二次元造波水槽内の水平床に、天端幅75cm、岸側法面勾配1/2と沖側法面勾配1/3の潜堤を金網と平均粒径30mmの碎石により構築し、その天端上に非対称構造物を設置した。なお、天端水深 R を5cmで一定とした。非対称構造物として、顕著な渦が形成されるような図-4に示す3種類の形状を採用した。これらの構造物を、対称構造物の実験と同じように、三分力計に取り付け、波進行 x 方向波力 F_x 及び直角 y 方向波力 F_y と鉛直 z 方向波力 F_z を計測した。なお、構造物周辺に容量式波高計4台と電磁流速計4台を設置し、水位及び流速の時間変化を計測した。発生波は規則波とし、その周期を3種類に変化させた。それぞれの周期の波に対し、波高 H を、構造物に作用する波の状況を変えるために数種類に変化させた。

5. 対称構造物に作用する波力

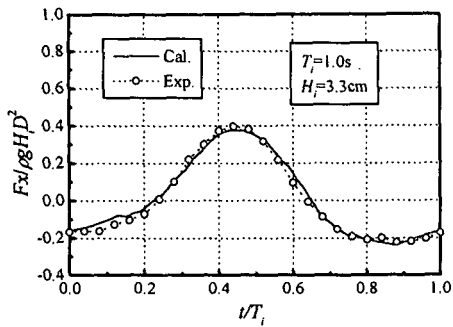
対称構造物に作用する波力の計算に用いた計算格子の大きさは、 x 、 y 、 z 方向にそれぞれ2cm×2cm×1cmとした。なお、波進行方向波力 F_x の計算値は構造物沖側と岸側の表面上の作用圧力に方向余弦をかけ、その瞬間の没水面全体にわたって積分して求めた。

(1) 直方体

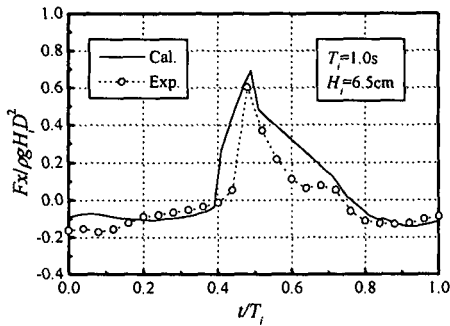
図-5に潜堤上の直方体に作用する波進行方向波力 F_x の計算値と実験値を比較した結果を示す。なお、図-5(a)は非砕波の場合の波力、(b)は衝撃的な砕波力が作用する場合の波力にそれぞれ対応する。

まず、図-5(a)より、非砕波の場合、 F_x の計算値と実験値は非常に精度よく一致していることが分かる。VOF法の計算手法の妥当性はこれまでも多くの研究者^{5) 15) 16)}によって検証されているが、三次元の波動場に対しても流速や水位変動のみならず圧力も制度高く再現可能であることがここから確認できる。

一方、図-5(b)に示す $H/L_t=0.423$ の場合の衝撃的な砕波力の時間変化については、計算値は波力の立ち上がりの位相や波力の低減する時間の長さなど、実験値の時間変化とは若干差が見られる。しかし、工学的に重要とされる砕波波力のピーク値と冲向き波力の最大値に着目すれば計算値は実験値を精度よく再現していると思わせる。計算値と実験値の間で時間変化に差が生じるのは計算格子が粗いことに依存すると考えられる。ここで対象とした砕波の場合、かなり急峻に立ち上がった波峰が崩れるような砕波であるが、本研究で採用した2cm×2cm×1cmの計算格子ではこのような空間的な変化の大きい波形の細部までを忠実に再現することは困難であるため、こ

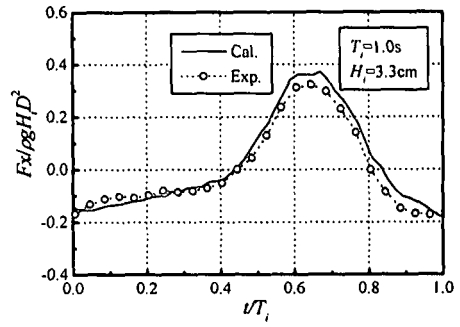


(a) $H/L_i=0.0215$ (非碎波)

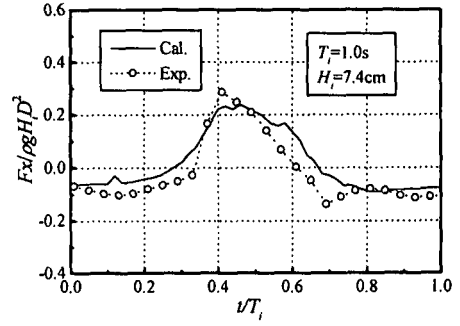


(b) $H/L_i=0.0423$ (碎波)

図-5 対称構造物に作用する波力の時間変化 (F_x , 直方体)



(a) $H/L_i=0.0215$ (非碎波)



(b) $H/L_i=0.0482$ (碎波)

図-6 対称構造物に作用する波力の時間変化 (F_x , 四角錐台)

のような差が生じたと考えられる。

(2) 四角錐台

計算格子に斜めの面を持つ四角錐台 (図-2参照) に対する計算について考察する。本計算の直交格子でこのように鉛直に対して傾斜を持つ形状をそのまま取り扱えないため、ここでは最も簡便な方法として計算上の構造物の形が対象とする四角錐台に最も近いような階段状の構造物に近似して計算を行った。

図-6に、四角錐台に対する水平方向波力 F_x の計算値と実験値の比較を示す。なお、図-6(a)は非碎波の場合の波力、(b)は碎波力が作用する場合の波力の時間変化にそれぞれ対応する。

図-6(a)の非碎波の場合、直方体と比べると精度は若干落ちるものの計算値は実験値を非常によく再現していることが確認できる。一方、図-6(b)の碎波の場合、直方体の場合と同様に、計算波力の立ち上がりの位相が実験値よりも早いこと、波力の低減が計算値の方が実験値よりも遅いこと、また、実験値のピーク値を若干過小評価しているなど、実験値との差は認められるものの、実験で計測された波力の全般的な時間変化を十分再現していると判断できる。

図-5と図-6を比較すると明らかなように、直方体の場合に比べて四角錐台に対する計算値の精度は若干悪くなるが、これは、前述したように、四角錐台を階段状の格子で近似しており、実験で対象とした形状と異なっていることに起因すると考えられる。すなわち、四角錐台の最大辺長が12cmであるのに対し、水平方向の格子の大きさが2cmと大きくなっており、必ずしもなめらかな形状で四角錐台を近似で

きていないためであると考えられる。したがってメッシュの間隔を細かくすれば衝撃的な碎波力の時間変化の位相についてもより精度よく再現できると考えられる。

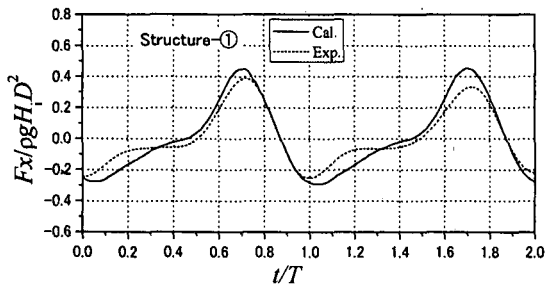
6. 非対称構造物に作用する揚力

非対称構造物の場合の計算には不等間隔格子を用いた。すなわち、構造物の影響が小さい所の格子間隔は、 x 、 y 、 z 方向にそれぞれ2cm×2cm×0.5cmとし、構造物周辺では1cm×1cm×0.5cmになるように徐々に格子間隔を変えた。なお、波進行方向波力 F_x と直角方向波力 F_y 及び鉛直方向波力 F_z の計算値は、対称構造物の場合と同じように、構造物表面上の作用圧力に方向余弦をかけ、その瞬間の没水面全体にわたって積分して求めた。

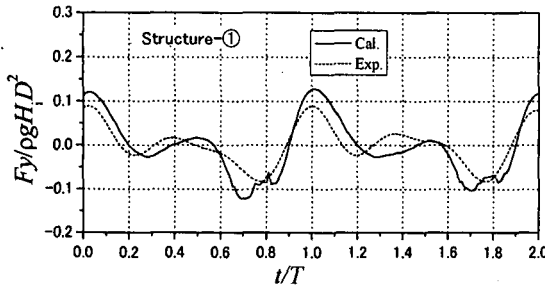
図-7はStructure-① (図-4参照) に作用する波力の計算値と実験値の比較を示している。なお、図-7(a)は波進行方向波力 F_x 、(b)は直角方向波力 F_y 、(c)は鉛直方向波力 F_z をそれぞれ示す。また図中実線は計算値を、点線は実験値を表す。

図-7(a)と(c)より、波進行方向波力 F_x 及び鉛直方向波力 F_z の計算値と実験値の時間変化の良い一致が認められる。

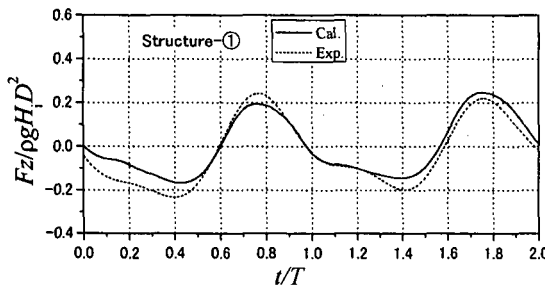
一方、図-7(b)の直角方向波力 F_y の時間変化の場合、一周期に二つのピークを持つ規則的な時間変化を持つ揚力が作用する。これは、作用波の正流時と反流時のそれぞれに対して構造物背後に非対称な渦流れが生成され、非対称圧力場が形成されるためと



(a) F_x

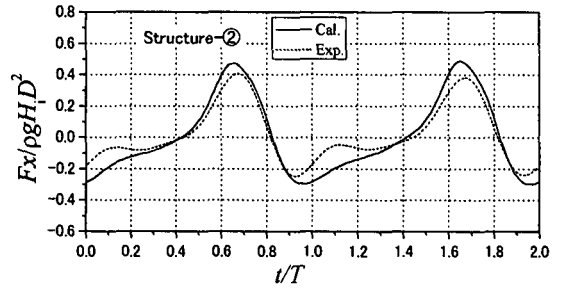


(b) F_y

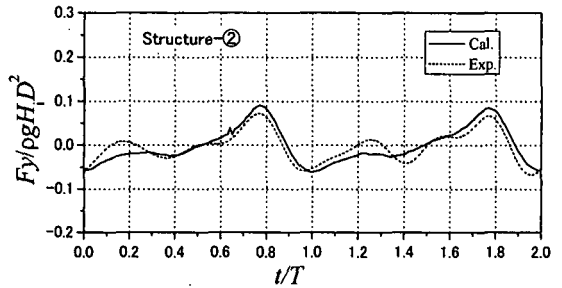


(c) F_z

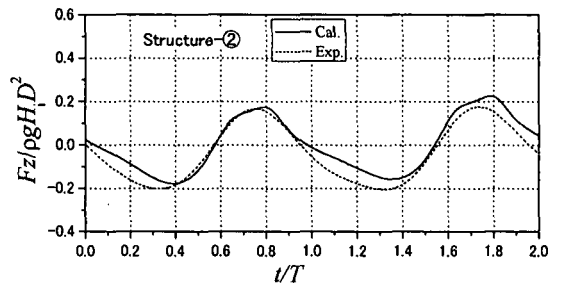
図-7 非対称構造物に作用する波力の時間変化 ($H/L_r=0.0196$, Structure-①)



(a) F_x



(b) F_y



(c) F_z

図-8 非対称構造物に作用する波力の時間変化 ($H/L_r=0.0196$, Structure-②)

考えられる。なお、構造物の波進行方向の非対称性のため、正流時と逆流時で揚力の大きさが異なることにより、二つのピークの値に差が生じたと思われる。また、計算値は二つのピークを持つ実験値の時間波形を良く再現していることが確認できる。

図-8と図-9に、Structure-②とStructure-③（図-4参照）に作用する波力の時間波形を示す。両図から分かるように、Structure-②とStructure-③に作用する波進行方向波力 F_x と鉛直方向波力 F_z はStructure-①に作用する波力と比べ、少しの位相差があるものの、殆ど同様な傾向を示している。一方、Structure-②に作用する揚力（図-8(b)）に着目すると、二つのピークの値がStructure-①の場合と反転していることが確認できる。これは、二つの構造物が波進行方向に対して逆の形をしていることに起因する。また、図-9(b)より、Structure-③に揚力が作用する場合、実験値の時間波形から三つのピークが確認できる。しかし、計算値を実験値と比較すると、揚力のピーク値は一致しているものの、若干の位相遅れや二つのピークしか現れていないなど少し異なった結果を示している。これについては今後更なる検討が必要である。しかしながら、図-8と図-9より、Structure-①の場合

と同じように、計算値はStructure-②とStructure-③に作用する三成分波力 (F_x , F_y , F_z) の時間波形の一般的な傾向を良く再現していることが認められる。

7. 結言

本研究では、流れ方向に対して対称性や非対称性を有する3次元構造物に作用する波力や揚力の水理模型実験を行うと共に、その波力や揚力の算定に3次元直接数値シミュレーションを用いることにより、その適用性及び再現性の検討を行った。その結果、直接数値シミュレーションにより求められた計算波力の時系列は、対称構造物に作用する波進行方向波力だけではなく非対称構造物に作用する波進行方向波力と直角方向波力及び鉛直方向波力の実験値の時間波形を精度良く再現できることが確認できた。

今後の課題として、数値シミュレーションの精度をもっと高めて行くと共に様々な海岸・港湾構造物への適用性を検討し、より汎用性の高い数値モデルとして向上して行く所存である。

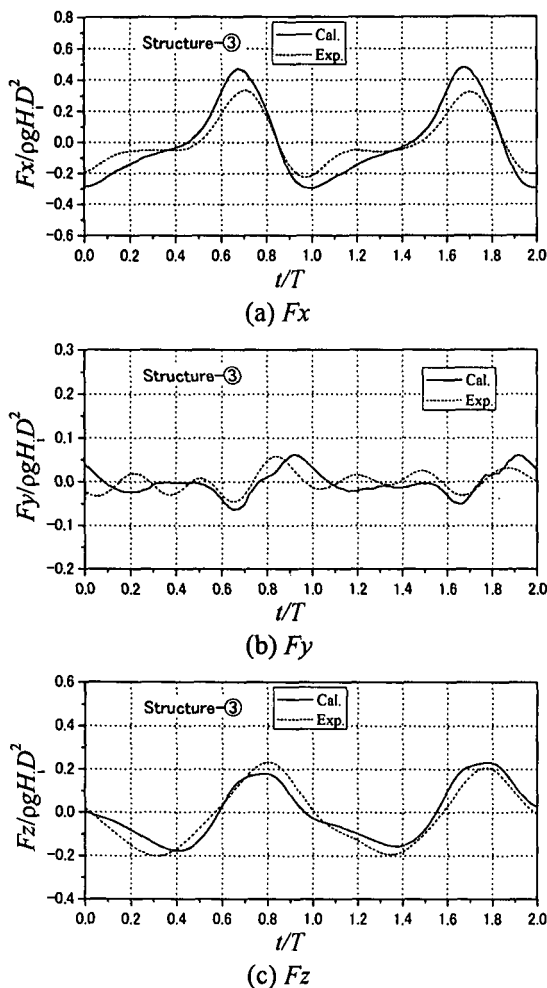


図-9 非対称構造物に作用する波力の時間変化
($H/L_1=0.0196$, Structure-3)

参考文献

- 1) 清川哲志・小林 浩・日野幹雄：軸対象構造物による波の散乱と波力，土木学会論文集，第321号，pp.103-112，1982.
- 2) 榎木 亨・松見吉晴・林 健児：有孔漁礁周辺の流況の数値シミュレーション手法について，海岸工学論文集，第29巻，pp.506-510，1982.
- 3) 小林智尚 渡辺晃：波動場における直立円柱まわりの流れの三次元数値シミュレーション，海岸工学論文集，第36巻，pp.419-423，1989.
- 4) 大山 巧・灘岡和夫：数値波動水槽を用いた潜堤

による波の分裂現象の解析，海岸工学論文集，第38巻，pp.16-20，1991.

- 5) 許東秀：潜堤による多方向不規則波の砕波特性と潜堤上の構造物に作用する波力特性に関する基礎的研究，名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻博士論文，177p，2000.
- 6) 許東秀・水谷法美：3次元物体に作用する砕波波力の直接数値計算，海岸工学論文集，第48巻，pp.811-815，2001.
- 7) Hur, D.-S. and Mizutani, N. : Numerical estimation of the wave forces acting on a three dimensional body on submerged breakwater, Coastal Eng., ASCE, Vol.47, pp.329-345, 2003.
- 8) van Gent, M.R.A., Tonjes, P., Petit, H.A.H. and van den Bosch, P. : Wave action on and in permeable structures, Proc. 24th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, Vol.2, pp.1739-1753, 1994.
- 9) 藤井直樹ほか：ケーソン防波堤の越波・波力算定への数値波動水路の適用，海岸工学論文集，第47巻，pp.706-710，2000.
- 10) Hsu, T.-J., Sakakiyama, T. and Liu, P.L.-F. : A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater, Coastal Eng., ASCE, Vol.46, pp.25-50, 2002.
- 11) 渡辺靖憲ほか：衝撃砕波力の数値解析，海洋開発論文集，第15巻，pp.375-380，1999.
- 12) 有川太郎・磯部雅彦・高橋重雄：VOF法を用いた衝撃砕波圧の計算と適用生，海岸工学論文集，第48巻，pp.831-835，2001.
- 13) Hamzah, M.A.・間瀬 整・高山知司・藤木繁男：海岸堤防に作用する津波力の実験と数値シミュレーション，海岸工学論文集，第47巻，pp.371-375，2000.
- 14) 榎山 勉・香山真祐：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.741-745，1997.
- 15) Petit, H.A.H., Tonjes, P., van Gent, M.R.A. and van den Bosch, P. : Numerical simulation and validation of plunging breakers using a 2D Navier-Stokes model, Proc. 24th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, Vol.1, pp.511-524, 1994.
- 16) Kawasaki, K. : Numerical simulation of breaking and post-breaking wave deformation process around a submerged breakwater, Coastal Eng. Journal, JSCE, Vol.41, pp.201-223, 1999.