

VOF 法による潜水浮体の波浪動揺と波変形に関する 有限変位解析手法の開発

水谷法美*・Ataur Md. Rahman**・許 東秀***・島袋洋行****

VOF 法による数値波動水槽を使って浮体の波浪応答を解析する手法について検討を行った。これまで浮体は微小変位を仮定してその中立位置で境界条件を与えられていたが、本研究では、浮体の有限変位を考え、浮体の時々刻々変化する位置を求め、波と浮体の動的相互作用を解析した。本研究では問題を簡略化するため、水平方向のみの運動方程式を解く近似解法を採用した。このため、浮体の動揺を過大評価する傾向があり、それにともなって波変形にも若干の差異が認められたが、計算結果は概ね実験結果を良好に再現していることが確認され、本計算手法が浮体の波浪応答を解析する有効な手法になることを示した。

1. 緒 言

浮体式の防波堤は漁港などで建設機会が増大している。特に最近では、港内外の海水交換性に対する関心が高まってきており、下部に透水域を有する浮体式防波堤は利点が多い。そして、近年では、従来のポンツーン式浮体だけでなく、消波などの付加機能を具備させたものも開発されるようになってきている(例えば、中村ら, 2003; Byram, 2000)。このように様々な形式や機能を持った浮防波堤の有効性を検討するにはポテンシャル理論に基づく数値計算も実施されているが、現状では水理模型実験が主たる手法であるといえる。消波機能を高めた浮防波堤の開発が積極的に行われることも予想され、それらの機能を事前に検討する上で精緻な数値解析モデルを構築しておくことは工学上意義が大きい。

現状の浮体の波浪応答に関する数値解析はポテンシャル理論に基づく解析が中心であり、さらに、微小変位を仮定してその中立位置で境界条件が与えられている。しかし、隅角部での渦の発生や浮体天端上への越波、さらに潜水浮体では浮体上での碎波などの現象は、浮体の動的波浪応答や波浪制御面で極めて重要であるにも関わらず微小変位を仮定したポテンシャル理論に直接反映させることは困難で、経験係数などの導入も必要となる。そこで本研究では、VOF 法による数値波動水槽内に浮体を設置し、浮体の運動方程式を解きながら新たな浮体位置を求め、その新たな浮体位置で波動場を解く有限変位に基づく時間発展型の数値解析手法の開発を行う。そして、水理模型実験を行ってその妥当性を検証する。

2. 数 値 解 析

浮体の波浪応答に関する数値解析はこれまでに数多く行われてきている。中村・井出(1997)は、ポテンシ

アル理論に減衰波理論を導入し、浮体周りの渦などによりエネルギー減衰を流体運動に抵抗を加えることで考慮する手法を提案しているが、潜水浮体のように上部で碎波が生じるような場合には別途減衰係数の検討が必要となる。また、Shirakura ら(2000)は 3 次元の数値波動水槽による強非線形シミュレーション手法を開発している。しかし、これらも潜水浮体上の碎波まで考慮することは困難である。このように従来の解析で問題となっている碎波に関しては、VOF 法のような数値計算手法が提案され、多くの適用例が報告されるとともに、その有効性が報告されている(Miyata ら, 1988, Van Gent ら, 1994, Kawasaki・Iwata, 1996)。

本研究では、造波ソース、付加減衰領域を付加した VOF 法に基づく数値波動水槽(川崎, 1998)を使って浮体の動的波浪応答とそれによる波変形の数値解析手法を開発することとする。この手法は時間発展型の計算手法であるので、浮体の移動も併せて解くことにより有限変位の解析も可能であると考えられる。そこで、以下では VOF 法に浮体変位を同時に求めながらその波浪応答を求める数値解析手法を開発した。ただし、現象を単純化させ、まず roll の発生しない鉛直緊張係留を対象とした。

基礎方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = q(x, z, t) \dots \dots \dots (1)$$

$$q(x, z, t) = \begin{cases} q^*(z, t)/\Delta x_s & \dots \dots \dots x = x_s \\ 0 & \dots \dots \dots x \neq x_s \end{cases} \dots \dots \dots (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \gamma_v u}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z u w}{\partial z} \\ = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 \gamma_x u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \gamma_z u}{\partial z^2} \right) + u q \dots \dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \gamma_v w}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w w}{\partial z} \\ = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 \gamma_x w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \gamma_z w}{\partial z^2} \right) + w q \\ + \frac{1}{3} v \frac{\partial q}{\partial z} - g - \beta w \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

* 正 会 員 工 博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

** 学生会員 M.Sc. 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻

*** 正 会 員 工 博 韓国慶尚大学校

**** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

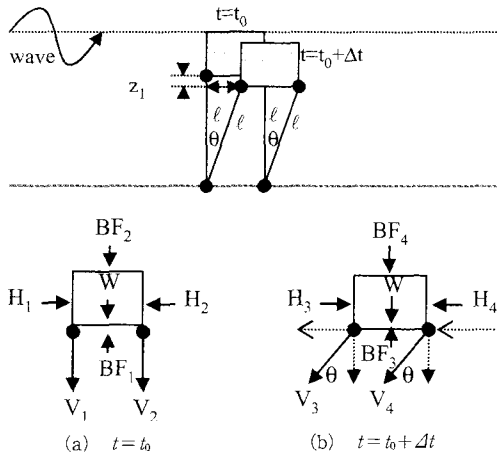


図-1 浮体の運動と外力の定義

$$\frac{\partial \gamma_v F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = F_q \quad (5)$$

ここに、 u と w は x と z 方向の水粒子速度、 q^* は造波ソースの強さ、 Δx_s は造波ソースにおける x 方向の格子長さ、 p は圧力、 ν は水の動粘性係数、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。また、 γ_v 、 γ_x 、 γ_z はそれぞれ体積空隙率、 x 、 z 方向の面積透過率である。なお、 x は波進行方向を正とする水平軸、 z は静水面から上向きを正とする鉛直軸である。

本来浮体の動的応答は、二次元に対する3つの運動モードに対する運動方程式を解きながら求めるべきであるが、本研究では以下のように仮定を加えた近似的な取扱を行った。まず最初に浮体表面の圧力（静水圧も含む）を求め、それを積分することにより、図-1(a)に示した浮体各面の作用波力 H_1 、 H_2 、 BF_1 と BF_2 を計算した。これらの波力と浮体の自重、および係留策の張力のバランスから以下の関係式を得る。なお、静水状態では鉛直方向の力は釣り合っているため、運動は x 方向の力

の作用により開始すると仮定し、 x 方向の運動方程式に基づいて浮体の運動を以下のように扱った。

$$\Sigma V = BF_1 - BF_2 - W - V_1 - V_2 = 0 \quad (6)$$

$$\Sigma H = F_0 = H_1 - H_2 \quad (7)$$

$$ma = F_0 \quad (8)$$

ここに、 m は浮体の質量、 a は水平方向の加速度である。これから Δt 時間後の浮体の水平方向の移動量 x_1 が次式で求められる。ただし、 $t=t_0$ における x 方向の移動速度を v_0 とする。

$$x_1 = v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a (\Delta t)^2 \quad (9)$$

また、係留策の伸びは非常に小さく無視できるとすると、水平方向の変位にともなって次式の鉛直方向変位が生じる。ただし、このとき生じる鉛直方向変位に対する流体抵抗は考えないものとする。

$$z_1 = l - z_0 - \sqrt{l^2 - (x_0 + x_1)^2} \quad (10)$$

これにより、 Δt 時間後の浮体の位置が求められることになる。なお、 (x_0, z_0) は $t=t_0$ での着目点の座標である。これを次のタイムステップの条件として計算を続ける。

次のタイムステップでも、鉛直方向の静的な力の釣り合いにより張力が求められるものとする。ただし、流体力である BF_3 と BF_4 （図-1(b)参照）は、新たな浮体位置における波動場の計算結果から新たに圧力から計算する。それにより

$$\Sigma V = BF_3 - BF_4 - W - (V_3 + V_4) \cos \theta = 0 \quad (11)$$

ただし、 θ は係留策が鉛直軸となす角である。ここで、さらに二つの張力が等しいと仮定すると（重心軸周りの回転モーメントがゼロとする）、張力が求められることになる。水平方向の波力を改めて F_0 とすると、 F_0 は水平方向波力と張力の水平方向成分の総和から求められる。

$$\Sigma H = F_0 = H_3 - H_4 - (V_3 + V_4) \sin \theta = 0 \quad (12)$$

この F_0 を運動方程式(8)に代入し、式(9)と式(10)

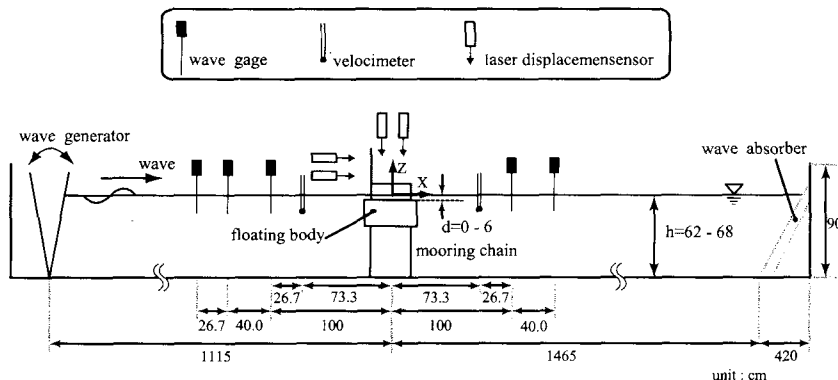


図-2 実験装置の概要

により次のタイムステップまでの x 方向と z 方向の移動距離を求め、これらの計算を繰り返すことにより浮体の有限変位を考慮した波浪応答解析を行った。したがって、本計算手法では、水平方向のみの運動方程式を考慮した近似計算となっている。なお、浮体が動くことによる影響は体積空隙率、面積透過率で考慮した。

なお、数値計算は、格子長さ $\Delta x=2$ cm, $\Delta z=1$ cm, 時間間隔 $\Delta t=0.001$ sで行った。

3. 水理実験

本計算手法の妥当性を検証するため、2次元造波水槽(長さ30 m, 幅0.7 m, 高さ0.95 m, 図-2参照)を使って水理実験を行った。水槽内にアクリル製(一部木製)のポンツーン型浮体(幅68 cm, 長さ40 cm, 高さ18 cm)をチェーンにより緊張係留し、規則波を作用させた。本研究では数値計算に合わせて、rollの発生しない鉛直係留を対象とした。実験では、係留索長を一定とし、その長さを静水深 $h=62$ cmで浮体の天端位置と静水面が一致するように決めた。実験では、静水深 h を62 cmの他に $h=65$ cmと68 cmの場合も採用し、合計3種類に変化させた。係留索長が固定されているため、 $h=65$ cmと68 cmの場合はそれぞれ天端水深が3 cmと5 cmとなる。

入射波の周期を $T=0.8$ s, 0.9 s, 1.0 s, 1.1 s, 1.2 s, 1.3 s, 1.4 s, 1.6 s, 1.8 s, 2.0 sの10種類変化させ、それぞれの周期の波に対し、波形勾配を $H/L=0.01$, 0.02 , 0.03 の3種類変化させた(L :波長)。

実験では、浮体の前面の3点、後面の2点で水位変動を計測するとともに、4台のレーザー変位計を使って浮体の動揺を計測した。このとき、潜水状態の浮体天端にレーザービームのターゲットとして、図-3に示すような発泡スチロール製の枠を取り付けた(水谷ら, 2004)。その形状は波が天端上を通過する際の妨げにならないような形状とした。また、その質量は浮体に比べて非常に小さく、浮体の運動に及ぼす影響も極めて小さいものと考え

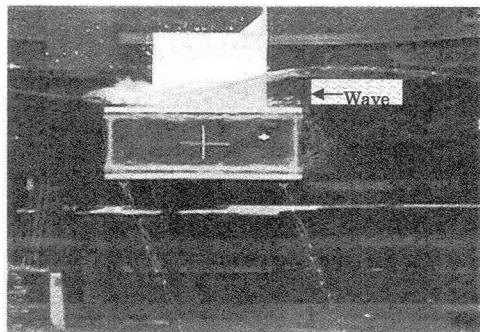


図-3 浮体模型とターゲット

られる。

計測は静水状態から開始し、サンプリングタイム0.01秒で6000個のデータをパソコンに収録した。また、実験では構造物の波浪応答と構造物付近の波変形をデジタルビデオカメラにて撮影した

4. 数値解析結果

図-4に本研究で開発した数値解析モデルで計算した浮体の波浪応答の結果について、波一周期の4位相を例示したものである。波の峰が入射してくると浮体は岸側に押され、逆に波の谷が入射してくると浮体は沖側に戻される様子が確認できる。したがって、浮体の波浪応答を定性的にうまく再現しているものと判断できる。

図-5は、浮体前面の水位変動の比較例を示したものである。場合によっては計算値と実験値の整合性が必ずしも良くない場合もあることが確認されたが、概して数値解析と実験結果の対応は良好であった。これを反射率・透過率を使って定量的に検討する。

図-6は本数値解析によって得られた水位変動から反射率 K_r と透過率 K_t を求めた結果を実験結果と比較した結果である。なお、反射率と透過率を三点法(岩田・清野, 1983)によって求めた。比較は半数のケースに対してのみ行っている。計算結果は反射率を若干過大評価し、逆に透過率を若干過小評価しているが、実験結果と同様の傾向を示している。さらに、入射波の周期が長くなるほど透過率が高くなること、逆に反射率が低くなる

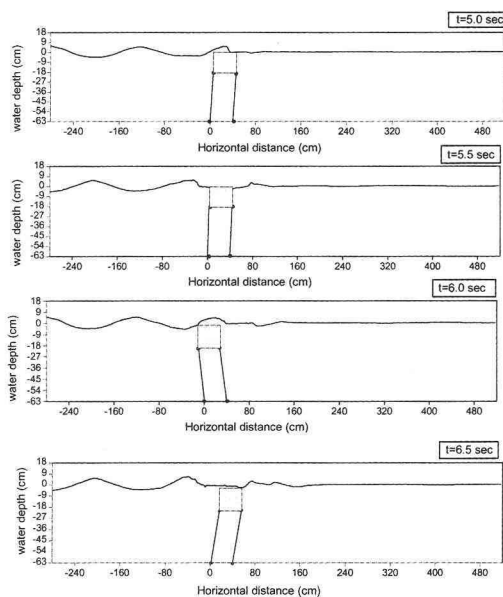


図-4 浮体の波浪応答の計算例($H_I=10.0$ cm, $T=1.0$ s, $h=62$ cm)

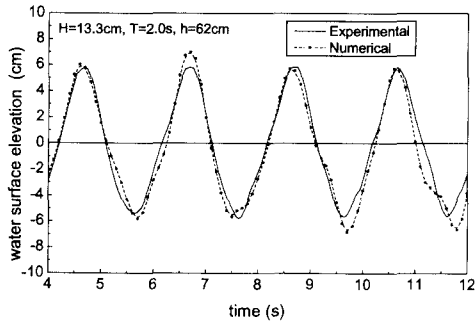


図-5 浮体前面の水位変動の比較例

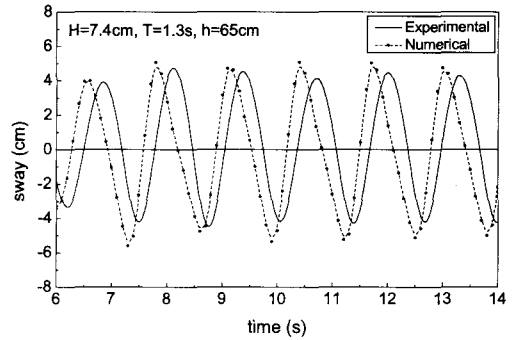
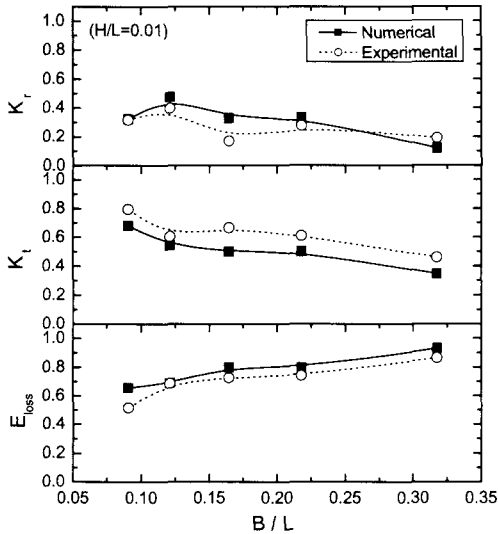
図-7 浮体の波浪動揺 (sway) の比較例 ($H/L=0.03$)

図-6 反射率・透過率・エネルギー損失の比較例

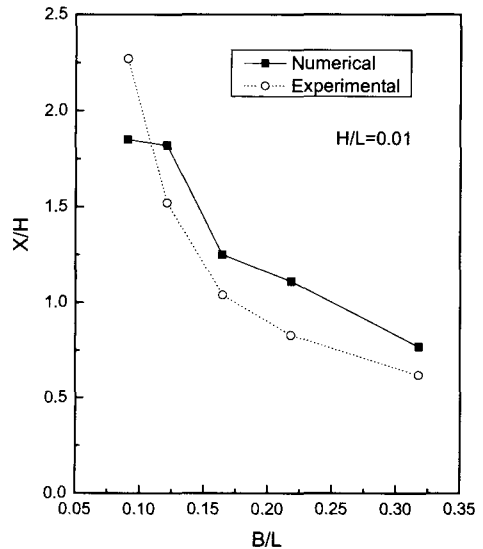


図-8 sway の振幅の比較例

傾向などが再現できている。また、反射率・透過率から求めたエネルギー損失係数 $E_{\text{loss}} (= \sqrt{1 - (K_r)^2 - (K_t)^2})$ は精度高く計算されているといえる。

図-7 は浮体の運動成分のうち、sway の運動振幅の時間変化を実験と計算で比較した例である。計算と実験で若干の位相差があるものの、浮体の波浪動揺についても再現性が高いと言える。この時間変化から求めた sway の振幅 X を比較した例を図-8 に示す。なお、本研究では鉛直緊張係留を採用しているため、sway と heave は従属関係にある。

図-8 より、sway は入射波長が長くなるほど増大する傾向があり、数値解析結果も最も波長の長いケースを除いて実験結果と同様の傾向を示している。しかしながら計算結果は sway の振幅を全般的に過大評価している。これは浮体の動揺変位を求める際、鉛直方向の運動方程式を解かず、浮体の位置を更新していることによると考えられる。すなわち、水平方向に浮体が動くとき係留

索長が変化しないため浮体は沈み込むことになる。このとき、浮体にはその運動に対する抵抗が加わると考えられるが、今回の近似手法ではそれを考慮していないため、計算の方が浮体が動揺しやすくなっていることが原因であると考えられる。また、この影響が反射率や透過率の差に表れていることも考えられる。この点については今後改善すべき重要な課題である。しかしながら、本数値解析手法でも実験結果と計算結果の対応は比較的良好であり、浮体の波浪応答を解析する上で、有力なツールになり得ると判断できる。

5. 結 言

以上、本研究では、VOF 法に基づく数値波動水槽を使って浮体の有限変位を考慮した波浪応答解析の数値計算法を開発した。本研究では二次元波動場の三つの運動成分に対する運動方程式を解かず、水平方向の運動方程

式だけを解く近似的な扱いをしたが、それでも反射率や透過率、さらには浮体の動揺振幅をうまく再現できることが確認された。ただし、浮体の動揺を過大評価する傾向があり、また、本研究は roll の発生しない鉛直係留を対象としているが、roll が発生するような係留方法に対しては本研究の近似は有効ではない可能性が高く、今後他の運動成分に対する運動方程式も組み入れるべくさらに改良を加えていく必要がある。

参 考 文 献

- 岩田好一朗・清野 博 (1983): 部分重複波の碎波限界に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 30 巻, pp. 1-4.
- 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, 名古屋大学大学院学位論文, 186 p.
- 中村孝幸・井出善彦 (1997): 減衰波中における浮体の動揺理論とその適正に関する研究, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 856-860.
- 中村孝幸・金 度 三・平岡順二・泉 雄士・浅井威人 (2003): 浮体低層取水施設の波浪動揺の低減法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 821-825.
- Bayram, A., (2000): Experimental Study of a Sloping Float Breakwater, *Ocean Engineering*, 27, pp. 445-453.
- Kawasaki K. and Iwata K. (1996): Numerical Analysis of Wave Breaking Due to Submerged Structure, *Proc. 6 th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Vol. 3, pp. 168-175.
- Miyata, H., Katsumata, M., Lee, Y. G. and Kajitani, H. (1988): A Finite Difference Simulation Method for Strongly Interacting Two-layer Flow, *J. Soc. Naval Arch. Japan*, Vol. 163, pp. 1-16.
- Mizutani, N., Rahman, Md. A. and Shimabukuro, H. (2004): Experimental Study on Interaction between Waves and Submerged Floating Breakwater Supported by Perforated Plates, *Annual J. of Civil Engineering in the Ocean*, Vol. 20 (in printing).
- Shirakura, Y. and Tanizawa, K. and Naito, S. (2000): Development of 3-D Fully Nonlinear Wave Tank to Simulate Floating Bodies Interacting with Water Bodies, *Proc. 10 th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Vol. 3, pp. 253-262.
- Van Gent, M. R. A., Tonjes, H. A. H. and van den Bosch, P. (1994): Wave Action on and in Permeable Structure, *Proc 24 th Int. Conf. on Coastal Eng.*, pp. 1739-1753.