

数値波動水槽を用いた構造物周辺の流れ解析技術

押村 嘉人 永瀬 恭一
平石 哲也^{*1}

概 要

数値解析手法の発達と計算機技術の発展によって、CFD(Computational Fluid Dynamics)技術が様々な分野で設計支援ツールとして活用されている。港湾構造物の設計技術としても、CFD技術が活用されているが、現状では、解析速度の制約などから鉛直2次元の単純なモデルへの適用がほとんどで、実構造物を詳細に再現した解析はあまり行われていない。また、海洋構造物の部材に作用する流体力については、水理模型実験によって検出するか、モリソン式を用いて算出するのが一般的であるが、水理現象や構造物が複雑な場合には、適用条件に課題があると考えられる。

本報では、波と流れの共存場に設置された円柱杭周辺の複雑な流動について、数値波動水槽技術を用いて解析し、水理現象を明らかにするとともに、杭に作用する流体力の算出を試みた。さらに、複雑な海洋構造物の検討に本技術を適用して、設計技術としてのCFDの実用性を検証した。

Analysis of Flow around Marine Structures by Using Numerical Wave Flume

Abstract

With the development of numerical analysis methods and computing machine technologies, Computational Fluid Dynamics (CFD) technology has been used in various fields as a design support tool. CFD technology has also been used as a design technology for port structures. However, perpendicular two dimensional models are usually used due to computational speed limitations, and analysis with precise modeling of actual structures has rarely been carried out. Although it is common to use hydraulic model experiments and the Morison's equation to calculate fluid forces acting on the members of the marine structures, there are some problems in the application of these methods when the hydraulic phenomena and the structures are complex.

In this study, flow around a circular cylinder in a co-existent wave-current field is analyzed by using numerical wave motion tank technology to clarify the hydraulic phenomenon and to try to calculate the fluid forces. In addition, the practicality of this technology as a design technique is examined by applying it to complex marine structures.

キーワード: CFD, 数値波動水槽, 流体力, 杭
構造物, 河口部

*1 (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部
波浪研究室長・工学博士

§1. はじめに

従来、海洋構造物を設計する際、部材に作用する流体力は、水理模型実験によって検出するか、モリソン式を用いて算出するのが一般的である。しかし、模型実験は多大なコストと時間が必要であり、モリソン式は一般に小口径の円柱など ($D < 0.2L$, D : 円柱径, L : 波長) に適用され、波の水粒子速度や加速度などを精度よく与える必要があり、構造物および水理現象が複雑な場合には、適用条件に課題があると考えられる。近年、計算機技術の発展に伴い、計算流体力学 (CFD) が海洋構造物の設計技術として活用されるようになり、ナビヤ・ストークス (NS) 方程式を直接離散化した数値波動水槽技術が海洋構造物周辺の解析に活用されている。しかし、解析速度などの制約から鉛直二次元などの単純なモデルへの適用がほとんどで、実構造物を詳細に再現した解析はあまり行われていないのが現状である。

本報は、既に報告した海洋構造物の解析結果¹⁾についていくつかの再検討を行って加筆したものである。解析対象として、水理現象が複雑な河口部に設置される単一杭および杭構造物の検討に3次元解析を実施して、現象の再現と流体力の算出を試み、設計技術としてのCFDの実用性を検証した。

§2. 単一杭モデル

2.1 解析方法

本研究では、功刀²⁾が開発したMARS (Multi interface Advection and Reconstruction Solver) 法を組み込んだ流体直接解析法を基にした数値波動水槽を用い、河川流と波浪が同時に作用する杭構造物周辺の流れを解析した。この解析手法では、気液二相流の解析が可能で、水面形や波圧が精度よく解析できる³⁾。

図 1 に計算モデルを示す。波浪は、解析領域境界で反射するのを防止するために、造波ソースを設定し規則波を入射させ、領域の両端にはエネルギー吸収層を設置した。河川流は解析領域の上流端や下流端に流入・流出境界を設定すると、エネルギー吸収層内で流速が減じられて不具合となるため、上流側の底面から湧き出させ、同じ流量を下流側の底面から排出することで設定した。上流側には整流板を設置し、底面から湧き出した流れを水平方向に誘導し、流入部での水表面の盛り上がりなどの不具合を防止した。

構造物の条件は、解析手法の検証のため、杭径 $D=1.8\text{m}$ の単一杭を設定した。座標は、鉛直上向きを z 軸として、河川流の進行方向を y 軸、その直角方向を x 軸とした。単一杭の設定においては、直交座標系で円筒形をできるだけ滑らかに精度よく表現するために、図 2 に示すよう

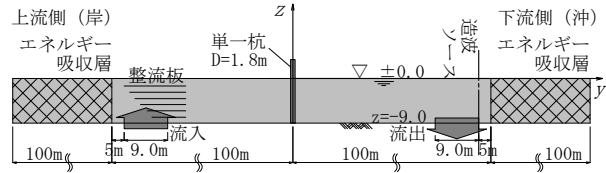
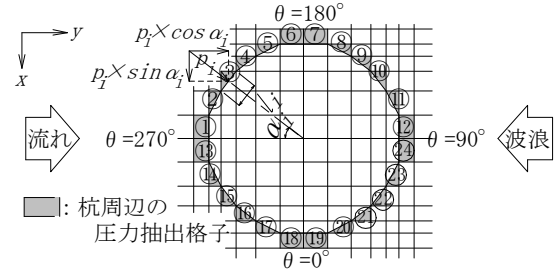
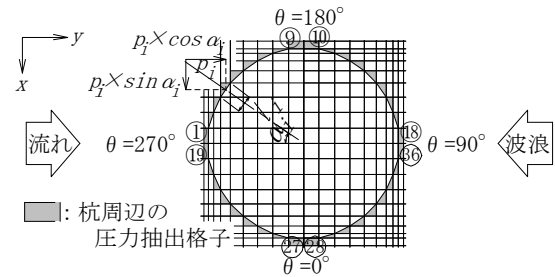


図 1 計算モデル



(a)10 分割



(b)16 分割

図 2 杭周辺の計算格子

表 1 水理条件

case	水深 $h(\text{m})$	河川流速 $V(\text{m/s})$	波高 $H(\text{m})$	周期 $T(\text{s})$	$v_m(\text{m/s})$	(K.C.) ₂
1	9.0	0.35	1.0	10.0	0.491	6.9
2	9.0	0.70	1.0	10.0	0.491	12.2
3	9.0	1.40	1.0	10.0	0.491	24.4

に、分割する円弧の長さが均等になるように格子を分割するとともに、3 角形要素を用いた。このとき、杭径を 10 分割および 16 分割するように計算格子を設定し、円筒形の表現の違いによる計算精度について検証した。

水理条件は、表 1 に示すように、河川流速 V を変化させた 3 ケースとした。

計算は、まず、河川流のみを与えて流れが安定した後に波浪を入射させ、単一杭周辺で、波高、流速、圧力の時系列データを抽出した。なお、本計算では、乱流現象の平均操作として、 $k-\epsilon$ モデルを使用した。

2.2 解析結果

図 3 に、case1 の計算結果を示す。上段は杭の直径を 10 分割した場合、下段は 16 分割した場合のもので、静水面と底面の中央断面 ($z=-4.5\text{m}$ 断面) での流速の時間変化を示している。 $\theta=0^\circ$ は波浪入射方向に対する杭の側面、 $\theta=270^\circ$ は背面の測点を示し、 $x=4.5, y=0$ とは、杭中心から x 軸方向に 4.5m 離れた測点である。また、計算流速 v と

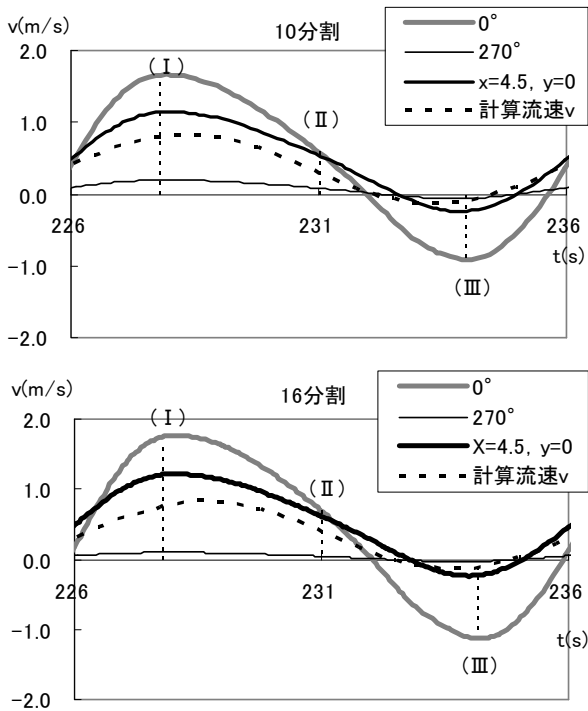
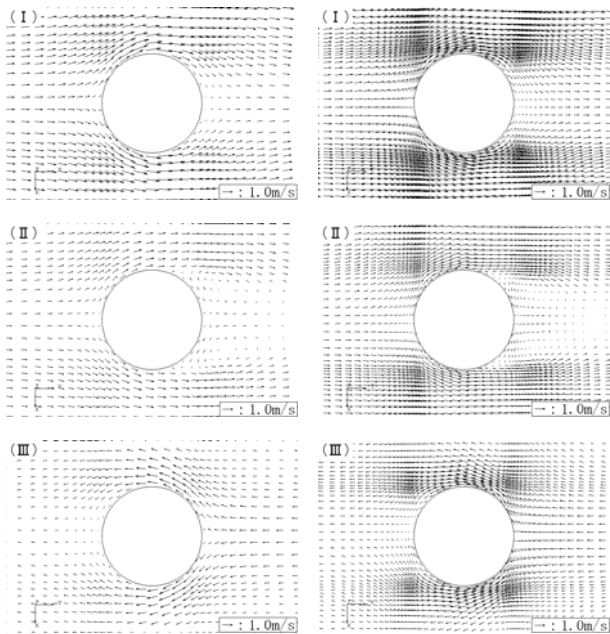


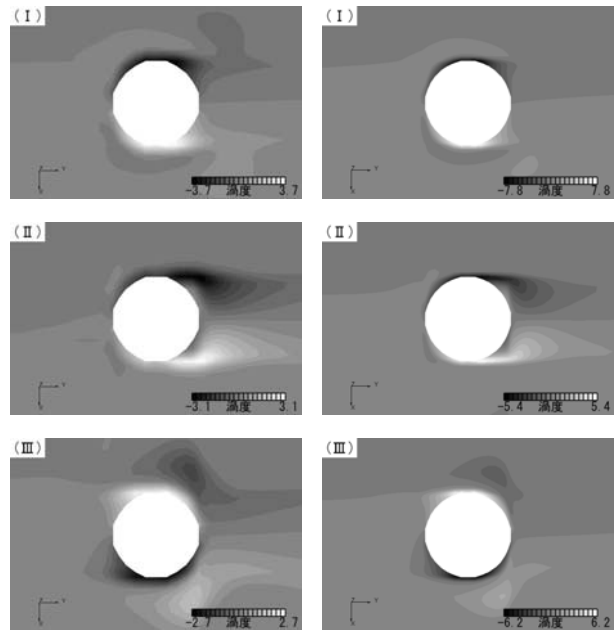
図3 流速の時間変化(case1, z = -4.5m)



(a)10 分割 (b)16 分割

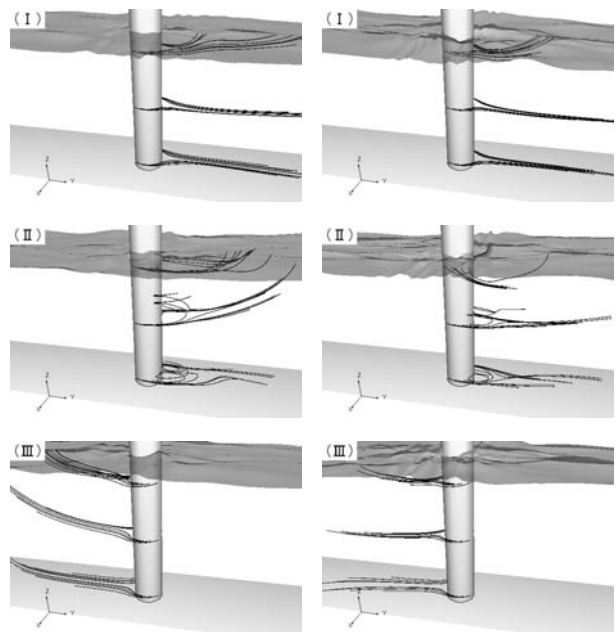
図4 流速ベクトル(case1, z = -4.5m)

は、微小振幅波理論で計算した流速に河川流を重ね合わせた流速である。図中の (I) の時刻では、杭中心付近が波浪の谷位相であり、沖向き流速が最大で、(III) は峰位相で岸向き流速が最大となる。杭径を 16 分割して円筒形を精度よく表現しても、計算精度に大きな違いはみられず、 $\theta=0^\circ$ では流速振幅が増加し、 $\theta=270^\circ$ では減少している。 $x=4.5, y=0$ では、計算流速とほぼ同様の变化を示すが、谷位相時 (I) での沖向き最大流速は、1.4 倍程度大きい。



(a)10 分割 (b)16 分割

図5 渦度分布(case1, z = -4.5m)



(a)10 分割 (b)16 分割

図6 流線(case1)

杭周辺の平面的流れを確認するため、図中の (I) ~ (III) の時刻での流速ベクトルを、図4に示す。16 分割の方が、格子数が多いため詳細に流速ベクトルが表示されているが、流れの傾向については、大きな相違は見られない。両者とも杭周辺の流れが詳細に再現できていて、流れが杭周辺を回り込むとき杭の側面で流速が増加し背後では減少している。(II) の時刻は、谷位相から峰位相に推移する時で、波浪による水粒子の流れが河川流に逆らう流動となり、杭の沖側で渦が形成されている。

図5は、(I) ~ (III) の時刻での渦度分布を示す。16 分

割の方が、杭周辺の平面的な流速変化を詳細に捉えているので、渦度は若干大きくなっている。(I), (III)の時刻では、杭に沿った流れによる流速向きの変動に伴い、杭側面付近に渦度が示され、(II)では、杭の沖側に発生する渦によって渦度が増加している。

次に、杭周辺の3次元な流れを確認するために、(I)～(III)の時刻における $z=-1, -4.5, -8.5\text{m}$ 断面での流線を、図6に示す。(II)の時刻では、沖向きから次第に岸向き流れが増加する際に杭の沖側に渦が発生するが、その時の杭周辺での流線の乱れが詳細に再現できている。(I), (III)では、全断面で杭を回り込むような流線が再現されていて、後流渦はみられない。

流れと波の共存場における後流渦パターンは、岩垣ら⁴⁾により新たなKeulegan-Carpenter数(K.C.数)として定義された $(K.C.)_2$ で分類され、水粒子の移動距離と円柱径 D の比によって次式で定義されている。

$|V| \leq v_m$ の場合

$$(K.C.)_2 = \pi \int_0^T |V + v_m \cos \sigma| dt / D \quad (1)$$

$|V| > v_m$ の場合

$$(K.C.)_2 = \pi VT / D \quad (2)$$

ここで、水粒子速度の最大値 v_m は水深方向における2乗平均の平方根の平均流速、 V は河川流の流速であり、これらの値は表1に示した。case1の水理条件では、式(1)より、 $(K.C.)_2=6.9$ となり、後流渦が発生する条件である。10, 16分割ともに杭側面で多少の渦度が確認されるものの、明確な後流渦の発生までは再現できていない。

2.3 流体力の算定

2.3.1 流体力算定方法

MARS法によるCFDにより単一杭周辺の水理現象について高い精度で解析できることが明らかになったので、流体力の検討への適用性について検討を行った。ここでは、解析において図2に示す位置で抽出した圧力値を積分し、円柱に作用する流体力の算出を試みた。

波浪と流れの主軸である y 軸方向のみに注目すると、各格子での流体力の y 軸方向成分 P_{yi} は、

$$P_{yi} = p_i \times \cos \alpha_i \times l_i \times |\cos \alpha_i| \times \Delta s \quad (3)$$

で求められる。ここに、 p_i :各格子での圧力値、 l_i :作用面の長さ、 Δs :部材軸方向の微小長さである。これを円周方向に積分したものが Δs に働く解析流体力 P_y となり、杭径を10分割した場合には、

$$P_y = \sum_{i=1}^{24} P_{yi} \quad (4)$$

で与えられる。一方、流れを考慮したモリソン式によると、杭

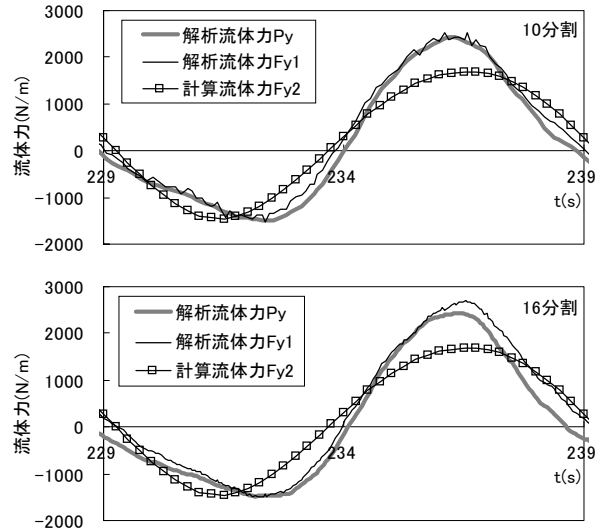


図7 流体力の時間変化(case1, $z=-4.5\text{m}$)

に作用する流体力は、

$$F_y = \frac{1}{2} C_D \rho (v+V) |v+V| D \Delta s + C_M \rho a A \Delta s \quad (5)$$

と表される。ここに、 F_y :鉛直距離 Δs に働く水平流体力、 C_D :抗力係数、 C_M :慣性係数、 v, a :波による y 軸方向の水粒子速度成分と加速度成分、 V :河川流の流速、 ρ :流体の密度、 D :部材軸直角方向の部材幅、 A :断面積である。波による水粒子速度 v は微小振幅波理論により与えられ、河川流の流速 V は水深方向に一樣であるとする。

2.3.2 流体力算定結果

図7に、case1での $z=-4.5\text{m}$ 断面における一周期分の流体力時間変化を10, 16分割について示す。解析流体力は、解析時に抽出した杭周辺の圧力および流速を用いて算出した結果で、計算流体力は理論値より算出した値を示す。 P_y は杭周辺の圧力値より式(3)、(4)を用いて算出し、 F_{y1} は、式(5)中の $v+V$ および a を、 $x=4.5\text{m}$, $y=0\text{m}$ 測点で抽出した流速から与え、 C_D, C_M については岩垣らによって $(K.C.)_2$ で整理された共存場での値 $C_D=0.8, C_M=1.6$ を用いて算出した。10, 16分割ともに、 P_y と F_{y1} は、ほぼ同様の変動を示し、圧力値から流体力が精度よく算出できているといえる。 F_{y2} は、式(5)中の $v+V$ および a を微小振幅波理論より与え、流体力係数は円柱部材の設計外力の算定に用いる標準値 $C_D=1.0, C_M=2.0$ を用いて算出した流体力を示す。このように、 P_y および F_{y1} は F_{y2} より最大値で1.4倍程度大きな値となった。流れが複雑な場合には微小振幅波理論でモリソン式中の水粒子速度や加速度を精度よく与えることが困難なため、数値波動水槽を用いた解析による流体力の算出が、有効な手法であると考えられる。

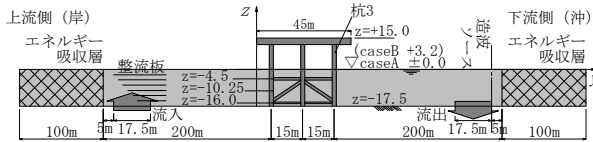


図8 計算モデル(杭構造物)

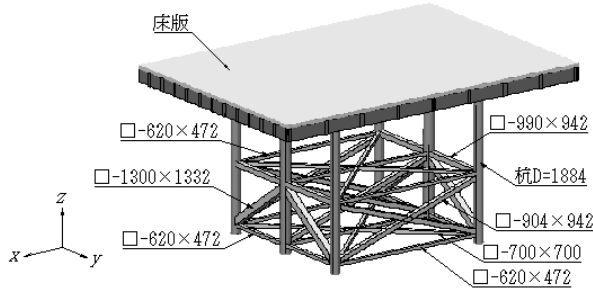


図9 杭構造物モデル

表2 水理条件(杭構造物モデル)

case	水深h(m)	河川流速V(m/s)	波高H(m)	周期T(s)
A	17.5	1.0	4.0	8.0
		2.0		
		0.0		
		1.0		
		2.0		
B	20.7	1.0	4.0	8.0
		2.0		
		0.0		
		1.0		
		2.0		

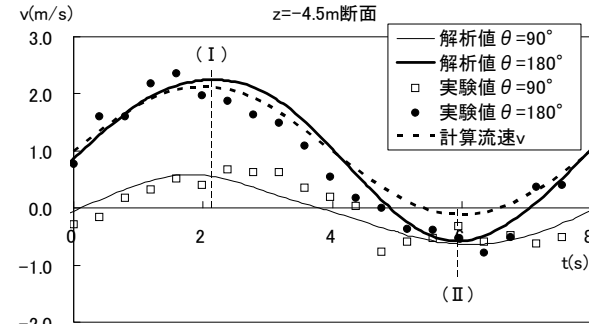
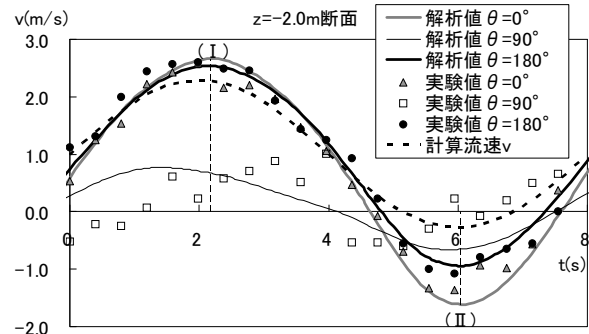
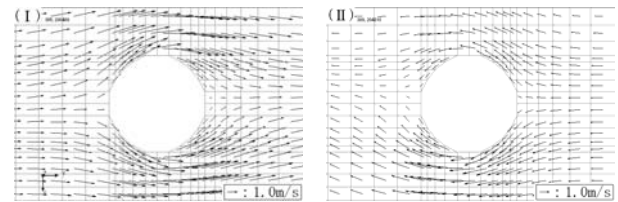
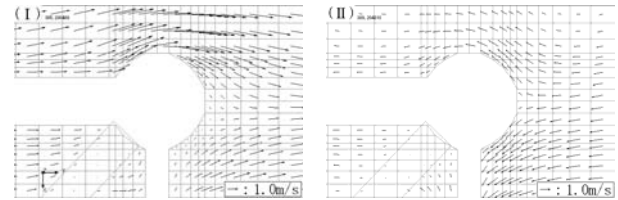


図10 流速の時間変化(caseB4)



(a) z=-2.0m 断面



(b) z=-4.5m 断面

図11 杭3周辺流速ベクトル(caseB4)

§3. 杭構造物モデル

3.1 解析方法

ここでは、実際に用いられる複雑な形状を有する海洋構造物周辺の解析への適用を試みた。単一杭モデルで、杭径を10, 16分割して計算した結果、計算精度に大きな相違はみられなかったため、杭構造物の杭径を10分割するように解析モデルを設定して、計算を実施した。

図8に、計算モデルを示す。流入境界や入射境界などは、単一杭と同様の方法で設定し、杭構造物は図9に示すようなモデルを設定した。

水理条件は、表2に示す10ケースとし、単一杭と同様に、まず、河川流のみを与えて流れが安定した後に波浪を入射させた。

3.2 解析結果

図10に、杭3周辺の $z=-2, -4.5$ m断面でのcaseB4における流速変動を示す。図中には、微小振幅波と河川流を重ね合わせた計算流速 v と、既に報告した模型実験結果¹⁾を示した。計算流速と比較すると、単一杭の場合と同様、

杭周辺を回り込む流れは流速が増加し、杭の背後では減少していることが確認できた。また、実験値との整合性は高く、解析によって十分な精度で再現できていることが分かる。

図10の(I), (II)の時刻での流速ベクトルを図11に示す。(I)では杭3付近が波の谷位相部で、沖向きの流速が最大となり、(II)では峰位相部になり岸向きの流れとなっている。これらの時刻での杭構造物内部側の流速は、 $z=-2$ m断面では外側より増加している、 $z=-4.5$ m断面では水平部材の影響で減少している。水平部材で流れが上下に分断され、部材のない上方および下方へ流速を増加させながら流れ込んでいる状況が確認できた。

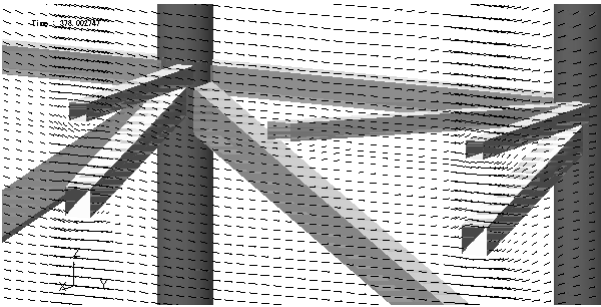


図 12 部材周辺流速ベクトル(caseB4)

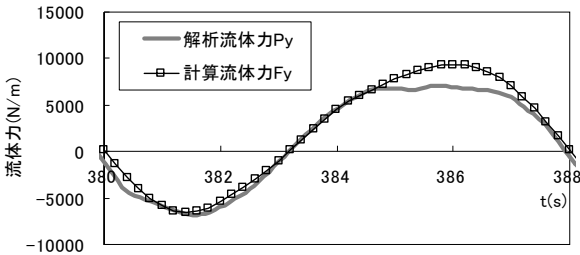


図 13 流体力の時間変化(caseA4, z=-2.0m)

表 3 流体力係数算出結果

case	A					B				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
C_D	0.6	0.7	0.8	0.6	0.6	0.3	0.4	0.8	0.7	0.5
	0.5	0.7	0.9	0.8	0.6	0.6	0.4	0.9	0.6	0.5
C_M	/	/	2.2	2.0	1.7	/	/	1.5	1.5	1.6
	/	/	1.8	1.5	1.0	/	/	1.6	1.3	1.3

図 12 に、水平部材および斜材周辺の流速ベクトルを示す。部材は、円筒形で表現すると格子間隔が小さくなりすぎるため、直方体としてモデル化したが、その周辺の流れが再現できている。模型実験では計測困難な箇所でも、このように解析結果を可視化することによって詳細に検討することができ、現象の理解や構造物の検討などに有効である。

3.3 流体力算定結果

図 13 に、caseA4 での杭 3 周辺における $z=-2$ m 断面の流体力を示す。 F_y は、単一杭の F_y と同様に、 $C_D=1.0$ 、 $C_M=2.0$ を用いた流体力を示している。 P_y は F_y と概ね一致するが、最大値で 0.9 倍程度小さな値となった。

式(5)中の流体力係数 C_D 、 C_M を、 P_y と F_y の残差が最小となるように求めた流体力係数の算出結果を、表 3 に整理して示す。表中、上段は $z=-2$ m、下段は $z=-10.25$ m の水平部材がない断面での結果である。条件によって多少の違いはあるものの、 $C_D=0.6$ 、 $C_M=1.6$ 程度の値で解析流体力をモリソン式により表現できる。この係数は水平部材や斜

材による影響も含まれているが、円柱部材の場合の標準値 ($C_D=1.0$ 、 $C_M=2.0$) と比較すると小さな結果が得られた。

§4. おわりに

本研究では数値波動水槽を用いて、波浪と河川流が同時に作用する海域に設置される円柱杭周辺の水理現象について再現できることを確認した。さらに、複雑な海洋構造物周辺の 3 次元数値解析を実施し、模型実験で計測困難な流速や圧力の時間変化などを詳細に解明できることを確認した。また、構造物に作用する流体力の算出を、各部材表面の圧力値を積分することによって精度よく検討できることを明らかにした。CFD の手法が港湾構造物の設計技術として適用できる可能性を示した。

謝辞 本研究では、汎用流体解析ソフト STREAM (株)ソフトウェアクレイドル社製) を使用し、解析手法の開発では (株)ソフトウェアクレイドル 島田昌也氏にご協力を頂きました。謝意を表します。

参考文献

- 1) 押村嘉人・平石哲也・永瀬恭一: 数値波動水槽を用いた構造物に作用する流体力検討技術, 海岸工学論文集, 第 53 巻, 2006.
- 2) 功刀資彰: 自由界面を含む多相流の直接数値解析法, 日本機械学会論文集 B 編, 63 巻 609 号, 1997.
- 3) 永瀬恭一・島田昌也: MARS 法を用いた数値波動水槽に関する研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, 2000.
- 4) 岩垣雄一・浅野敏之・永井文博: 波と流れの共存場に置かれた円柱に作用する流体力, 第 29 回海岸工学講演会論文集, 1982.
- 5) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会, 1999.



押村 嘉人

ひとこと

数値波動水槽技術を用いて、様々な海洋構造物を対象とした流体計算が可能で、透水性能を有する護岸などにも適用でき、臨海施設部の浸水計算も実施しています。