

非対称構造物に作用する揚力の発生機構とその直接数値計算法

許 東 秀*・水谷法美**・囿 康 隆***

本研究では、流れ方向に関して非対称性を有する 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ともに、流れ方向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適用し、その妥当性及び再現性の検討を行った。その結果、構造物の非対称性から生じる非対称な渦流れによる非対称圧力場が作用揚力に大きく影響することが判明した。また、直接数値シミュレーションにより求めた計算波力の時系列は、非対称構造物に作用する揚力（波進行方向の直角方向波力）だけではなく波進行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を確認した。

1. 緒 言

円柱などに作用する揚力は、その背後に形成される非対称剝離渦の発生に伴う圧力の非対称性に起因するため、その大きさと周波数特性が円柱を中心に研究され、その結果に基づいて揚力係数の特性や推奨値が提案されてきた（樫木ら, 1975；岩垣・石田, 1975）。しかし、構造物が非対称な場合、非剝離流れの状態でも揚力は発生し、さらに剝離状態の流れの場合、渦の発生に伴いより大きな揚力の作用が予想される。さらに、本質的な流れの非対称性により、揚力の周波数特性も従来議論されてきた対象構造物の場合と大きく異なる可能性がある。しかしながら、このような揚力の実態を議論した研究はなく、構造物の非対称性に起因する揚力の発生機構とその特性、さらにはその定量的な評価手法は、その重要性にもかかわらず検討されてきていないのが現状である。これまで揚力係数は実験に基づいて経験的に求められてきているが、対象性を持たない構造物は、一般に固有の形状を持たないと考えられ、したがって個々の形状に対してその大きさを評価する必要がある、常に水理実験によって評価するのは効率的ではなく、また、表示式そのものの妥当性も明かではない。著者ら（Hur・Mizutani, 2003）は三次元の直接数値計算法（DNS）により擬岩のような任意の形状の三次元構造物に作用する波進行方向と鉛直方向の波力の算定法を開発し、その妥当性を水理模型実験により検証してきた。この手法によれば、非対称性を有する構造物と波の相互作用も解析可能であり、直方向力と同じスキームで揚力を算定可能であると考えられる。そこで、本研究では、構造物の形状に強く依存する揚力を効率的に予測する手法として、DNS に基づく三次元数値波動水槽の適用し、数値解析手法を実用的なモデルとして改良して非対称構造物に作用する揚力を含む波力の予測手法を構築する。また、併せて非対称性な構造物に作用する三方向の波力を、水理模型実験を行っ

て計測するとともに、その周辺流速場の計測を行い、非対称性構造物に作用する揚力の大きさと周波数特性を流速場と関連づけて考究する。さらに、水理模型実験と数値計算結果にもとづき 3 次元非対称構造物周りの流れ場の特性が揚力に及ぼす影響について詳細な検討を行う。

2. 水理模型実験

実験を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 30 m, 幅 0.7 m, 高さ 0.9 m）で行った。図-1 に示すように、水槽内の水平床に、天端幅 75 cm, 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 30 mm 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。このとき、天端沖側端部から構造物中心部までの距離は 30 cm とした。なお、天端水深 R を 5 cm 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-2 に示す 3 種類の形状を採用した。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 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。各計測器の設置位置を表-1 に示す。発生波は規則波とし、その周期を 3 種類変化させた。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変化させた。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 2 kHz で AD 変換し、パソコンに取り込んで解析に使用した。

3. 数値解析

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（Hur・Mizutani, 2003）。

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

* 正 会 員 博(工) 名古屋大学助手大学院工学研究科土木工学専攻

** 正 会 員 工 博 名古屋大学教授大学院工学研究科地圏環境工学専攻

*** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻

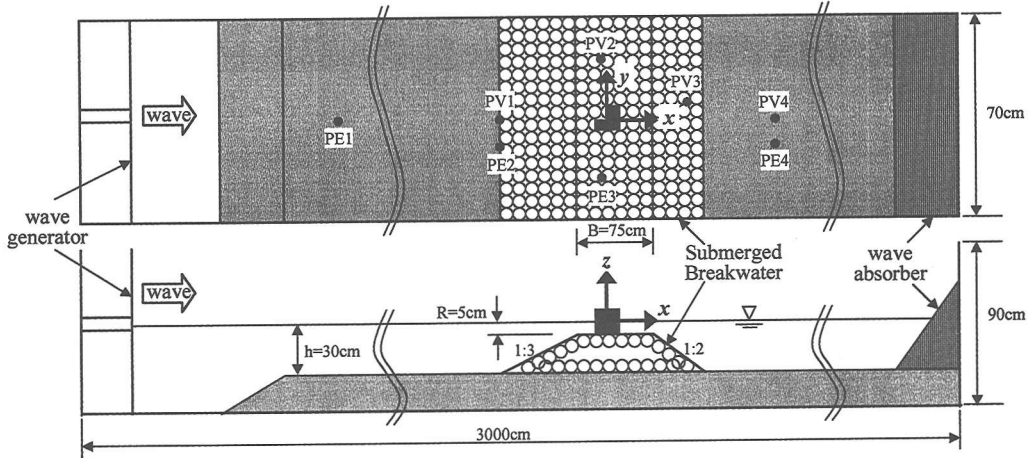


図-1 実験装置

ための VOF 関数 F の移流方程式 (5) である。

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

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

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

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

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

ここで、

$$q^* = \begin{cases} q(y, z, t) & : x = x_s \\ 0 & : x \neq x_s \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

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(許, 2000; Hur・Mizutani, 2003)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。なお、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 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ とし、構造物周辺では $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ になるように徐々に格子間隔を変えた。

4. 結果と考察

本章では、紙面の都合上、波形勾配 $H_i/L=0.0197$ の入射波に対する結果を取りあげて考察することとする。

(1) 波浪場と流速場

まず、構造物周辺の水位変動及び水粒子速度の計算値と実験値とを比較し、計算手法の検証をおこなう。

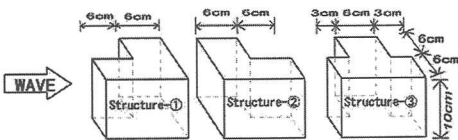


図-2 非対称構造物模型

表-1 水位変動と流速の計測位置

	x (cm)	y (cm)	z (cm)	
PE 1	-580.0	0		電気容量式波高計
PE 2	-105.0	-10.0		"
PE 3	-3.0(0)	-20.5		"
PE 4	170.0	-10.0		"
PV 1	-105.0	0	-8.5	電磁流速計 (u and w)
PV 2	-3.0(0)	20.5	-3.0	" (u and v)
PV 3	80.0	8.5	20.0	" (u and w)
PV 4	170.0	0	-13.5	" (u and w)

図-3に、Structure-①(図-2参照)の場合のPE3での無次元水位変動 η/H_i とPV2での x 及び y 方向の無次元水粒子速度 $v/(gH_i)^{0.5}$ を示す。水位変動の計算値はピークの部分で実験値より少々大きくなっているが、潜堤上での波の強い非線形性をよく再現すると共に、両者の良好な一致が見られる。また、 x 方向流速の計算値は2つのピークを持つ実験値をよく再現している。一方、 y 方向流速に関しては、計算値と実験値の間に若干の位相のずれと、実験値が4つのピークを持つのにに対し、計算値には3つのピークしか現れていないなど、多少の差異は認められるものの、流速の大きさなどは良好に再現できていると見なせ、計算結果は水位変動や流速場を全体的に精度よく再現していると考えられる。

(2) 揚力

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 を、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-4はStructure-①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-4(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。また図中の実線は計算値を、点線は実験値を表す。

まず、直方向力である波進行方向波力 F_x と鉛直方向波力 F_z は、図-4(a)と(c)に見られるように、計算値と実験値の時間変化の良好な一致が認められる。したがって、これまでの三次元物体と同様、物体形状が複雑になっても本計算手法が直方向力の直接数値予測の有効なツールであるといえる。

一方、図-4(b)の直角方向波力 F_y の時間変化の場合は、直方向力と異なり、一周期に二つのピークを持つ規

則的な時間変化を示す。これは、この場合、次節で後述するように、作用波の正流時と反流時のそれぞれに対して構造物隅角部に非対称な渦流れが生成され、波一周期内に二回非対称圧力場が形成されるためである。なお、揚力の二つのピークで大きさが異なるのは、構造物が波進行方向にも非対称性を有しているためである。すなわち、正流時と反流時で構造物背後の渦流れの様子が異なるため圧力の非対称性の程度に差が生じることによる。計算値は、このような複雑な揚力の時間変動を的確に再現していることが確認できる。

図-5と図-6に、Structure-②とStructure-③(図-2参照)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て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-5(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、2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-6(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3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2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-5と図-6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) の時間波形の全般的な傾向を良く再現していることが認められる。

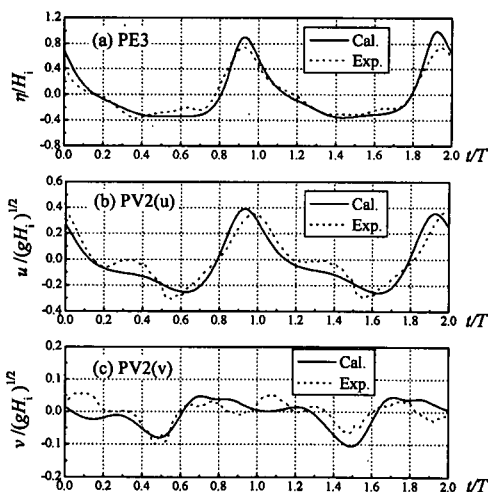


図-3 水位変動と水粒子速度の時間波形

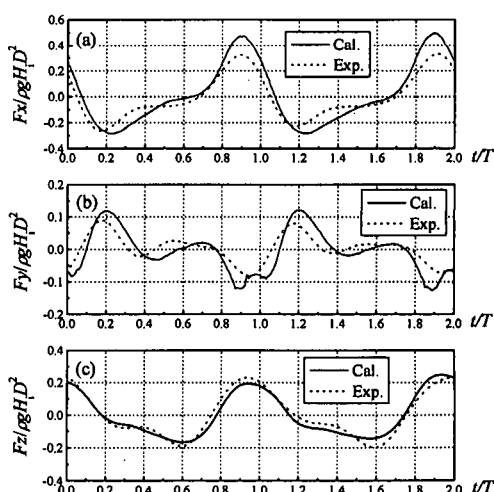


図-4 作用波力の時間波形 (Structure-①)

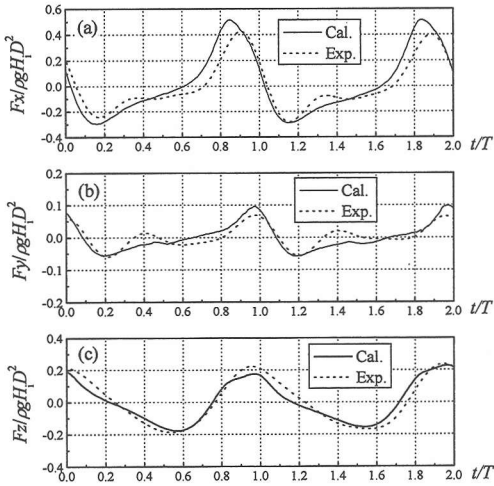


図-5 作用波力の時間波形 (Structure-②)

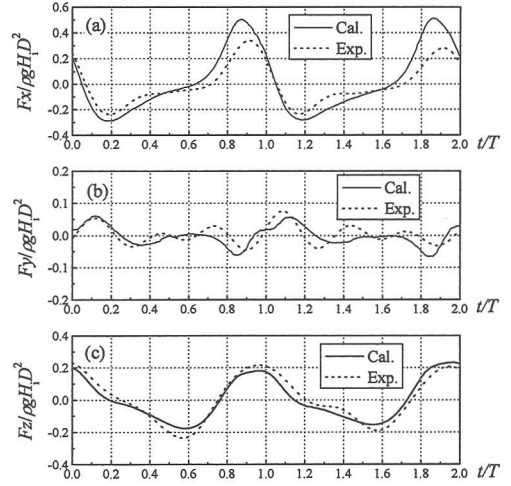


図-6 作用波力の時間波形 (Structure-③)

(3) 非対称性に起因する揚力の発生機構

まず、非対称構造物周りの位相平均流について検討する。図-7に、非対称構造物周辺の平均流ベクトルを示す。なお、この平均流ベクトルは潜堤上の全水深にわたって積分した流速の位相平均値であり、(a), (b), (c)は、それぞれ Structure-①, Structure-②と Structure-③の場合を示す。全ケースにおいて、構造物の隅角部周辺に渦の形成が認められる。構造物の形状に着目すると、 $y/L < 0.0$ での平均流速場は構造物の形状によらずほぼ同様の流況であるが、 $y/L > 0.0$ では波進行方向に対して対称な Structure-①と Structure-②の場合、流況も $x/L = 0$ に対してほぼ対称になっていることや、Structure-③の場合、波進行方向に対しては対称なため、流況も $x/L = 0$ に対してほぼ対称になっていることがわかる。また、Structure-②, Structure-③, Structure-①の順に $y/L > 0.0$ における構造物の突起部が波進行方向に移動すると共に、渦も同様に動くのが認められる。

次に、揚力の時系列と位相平均流及び渦度を関連づけて非対称構造物に作用する揚力の発生機構について考察する。図-8(a)は Structure-①に作用する揚力の時間波形を示しており、 F_{y1} は $y/L = -0.043$ (以下、対称面と呼ぶ)に、 F_{y2} は $y/L = 0$ と $y/L = 0.043$ (以下、非対称面と呼ぶ)に作用する力を、 F_y はその合力 ($F_{y1} - F_{y2}$)、すなわち揚力である。また、図-8(b)と(c)は、それぞれ F_{y2} の2つのピーク ($t/T = 10/25, 24/25$) に対応した位相での平均流及び渦度を示す。図-8(a)から、 F_{y1} は水位変動の時間波形 (図-3(a)) と同様な時間波形を示しているが、構造物の非対称面に作用する F_{y2} は2つのピークを持つ時間波形になっているのが認められる。これは、図-8(b), (c) から分かるように、非対称面には正流時 (図-8(c)) だけではなく反流時 (図-8(b)) にも強い渦度が働くことに起因する。したがって、Structure-①のような非対称構造物に作用する揚力の時間波形は、非対称性から生じる渦の形成の違いなどによ

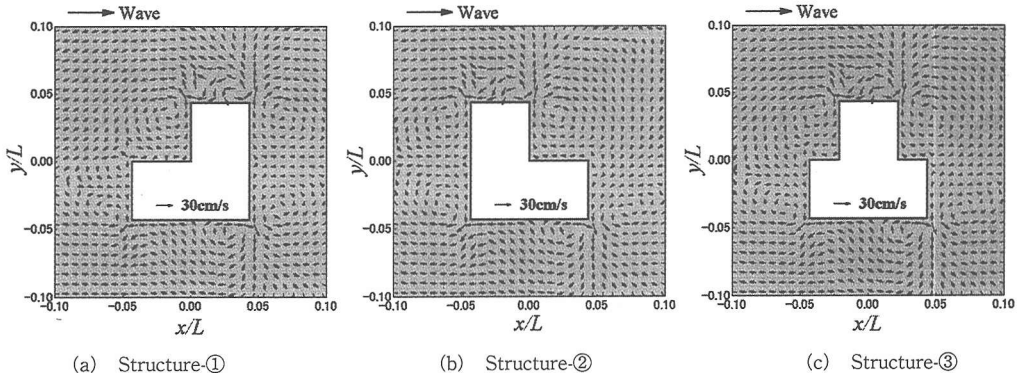
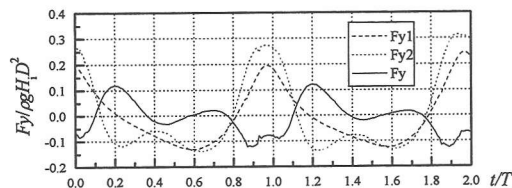


図-7 位相平均した構造物周辺の流速ベクトル



(a) 揚力の時間波形

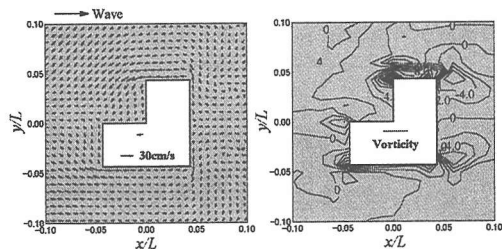
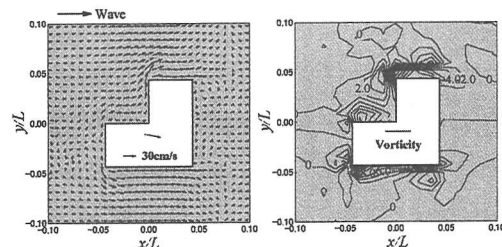
(b) 位相平均流速ベクトルと渦度 ($t/T=10/25$)(c) 位相平均流速ベクトルと渦度 ($t/T=24/25$)

図-8 揚力と構造物周辺の流速ベクトル及び渦度の関係 (Structure-①)

る作用する揚力が支配的であると言える。紙面の都合上図示できないが、Structure-②と Structure-③の場合においても、同じような傾向が認められた。

5. 結 言

本研究では、流れ方向に対して非対称性を有する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、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、非対称構造物に作用する揚力（波進行方向の直角方向波力）だけではなく波進行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。次に本研究で得られた主要な結論を示す。

- (1) 非対称構造物には、非対称渦流れによって生成される非対称圧力場により、一周期に複数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。しかし、構造物の波進行方向の非対称性のため、複数の揚力のピーク値は、それぞれ大きさが異なる。
- (2) 潜堤上のような複雑な流れ場での流速及び水位の時間変化の比較より、本研究で改良した直接数値計算手法の有効性を確認した。さらに、本数値計算手法は、構造物の前後・左右の非対称性に起因する揚力の複雑な時間変化を良好に再現している。また、波進行方向波力及び鉛直方向波力の予測精度も良く、したがって、揚力を含め、任意形状構造物の作用波力の予測に適用可能であると期待できる。

参 考 文 献

- 岩垣雄一・石田 啓 (1985): 小口径円柱周りの波圧分布と後流渦について, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 531-537.
- 樫木 亨・中村孝幸・喜田 浩 (1975): 円柱に作用する規則波による揚力について, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 525-530.
- 許 東秀 (2000): 潜堤による多方向不規則波の碎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, 名古屋大学学位論文, 177 p.
- Hur, D. S., and N. Mizutani (2003): Numerical estimation of the wave forces acting on a three dimensional body on submerged breakwater, Coastal Eng., Vol. 47, pp. 329-345.