

着底式海洋構造物の沈設および再浮上時の動的挙動

今井 貫爾*・永富 政司**

1. はじめに

石油プラットフォームなどに代表される大型の着底式海洋構造物は海上で建造・曳航・位置決め・沈設という施工段階を踏んだ後、海底面に設置される。最終施工段階であるプラットフォームの沈設時には次のような問題が考えられる。沈設が進み、構造物底版と海底面のクリアランスが小さくなった状態で波浪が作用した場合、過剰な水平動揺あるいは回転運動を生じて海底に局部的に接触し、底版に取り付けてある突起構造物（スカート、ダウエル）が破壊する可能性がある。

現在まで浮遊構造物の波浪に対する動揺量を計算する数値シミュレーションは特異点分布法¹⁾を始めとして多くの研究が行われている。しかし、これらは水深に比して喫水が小さく、浮体の運動が海底の影響を受けない場合についても行ったものがほとんどである。

本研究では、プラットフォームの縮尺模型を使用して、喫水を係留初期から着底寸前まで何段階か変えた状態で波浪による浮体の動揺実験を行い、基本的な動揺特性を把握した。また、実験結果と線形理論に基づく動揺計算との比較を行い、計算方法の実用性について検討した。

一方、油やガスの生産が終了し、不要となったプラットフォームは、現地より浮遊させて撤去される。このような巨大海洋構造物の撤去技術、浮揚技術は今後必要不可欠のものになると予想される。そこで構造物を海底に着底した状態から浮揚させる過程（以降“再浮上過程”と呼ぶ）について取り上げることとした。海洋構造物が長年に渡って海底地盤に設置していると種々の原因により構造物底版と海底地盤の間にサクシヨンフォースと呼ばれる吸着力が働くことが知られている^{2),3)}。この吸着力の大きさが顕著な場合、何も対策を施さずに浮力を大きくしていけば、浮力が吸着力より大きくなった時点で急激に浮上し、作業上支障をきたす可能性がある。現在においてもサクシヨンフォースの働く機構については未解明の部分が多く、直接室内実験で再現することも難しい。本研究では吸着力が底版内で一様に分布し、かつ瞬時

に力の釣り合いが失われるものと仮定して、再浮上後の構造物の動的挙動に焦点を当て実験的に検討を行った。

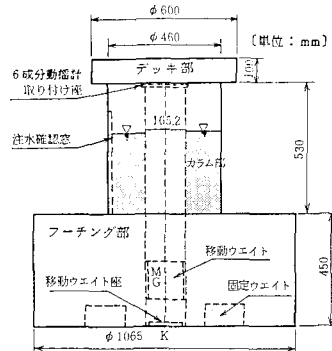
2. 沈設時の波浪に対する安定性について

2.1 沈設実験の概要

(a) 模 型

実験の対象とする模型は、水深 80 m の海域に設置することを想定して試設計したプラットフォームをフルード則に従い縮尺 1/100 で縮小したものである。模型は図一1に示すようにデッキ部、コラム部、フーチング部から構成されている。コラム部の内部（ $\phi 16.5 \sim 45.9$ cm）に注排水することにより模型の喫水を調整できるようにしてある。各喫水深ごとの浮体諸元を表一1に示す。模型材料およびカウンターウェイトの配置から計算する方法と直接計測する方法より求め、できる限り原型と一致させるようにした。

ただし、実物のプラットフォームと注水箇所が違うため、喫水を大きくしていくに従い、重心が高くなりメタセンター高さが小さくなっている。また、各喫水ごとに自由浮体および係留した状態での構造物の固有



図一1 浮体模型型の概要 (S=1/100)

表一1 各喫水深での浮体諸元

喫水 d (cm)	重量 W (kg)	底版からの 重心位置 GK (cm)	重心周りの回転半径		メタセンタ 高さ GM (cm)
			K_{xx} (cm)	K_{zz} (cm)	
60	423.8 (436.7)	22.9 (21.1)	33.1 (35.3)	32.4 (32.7)	1.8 (3.7)
70	440.6 (453.8)	24.5 (21.1)	33.1 (34.9)	32.4 (32.3)	1.7 (5.3)
75	448.9 (462.4)	25.5 (21.0)	33.1 (34.6)	32.4 (32.1)	1.6 (6.1)

() 内は実物の諸元

* Ph.D. 鹿島建設(株) 技術研究所

** 正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所

表-2 各喫水深での自由振動試験結果

吃水 d (cm)	動揺	対数減衰率 δ		固有周期 T_i (sec)	
		自由 浮体	係留 浮体	自由 浮体	係留 浮体
60	Surge		1.073		
	Heave	0.304	0.343	5.3	5.3
	Pitch	1.026	0.923	6.3	6.0
70	Surge		0.999		
	Heave	0.392	0.471	5.6	5.6
	Pitch	1.025	0.963	6.3	6.0
75	Surge				
	Heave	0.536	0.529	6.4	6.2
	Pitch	0.887	1.719	6.6	6.0

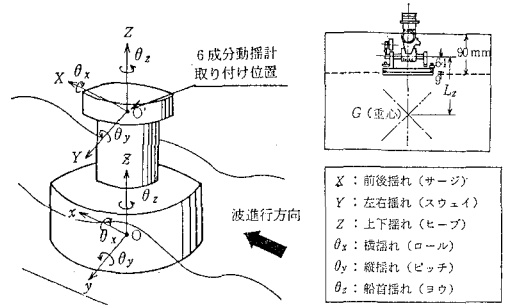


図-3 動揺量の定義

表-3 沈設時の動揺実験の概要

実験項目	概観図	実験条件	測定項目
係留初期時の喫水における動揺実験 (フーチング上部の波の変形を調べる。)		水深 80cm 喫水 60cm 波高 2, 4, 8 cm 周期 0.8~2.0sec 初期張力 0.15 kg	6成分動揺量 入射波高 係留張力
沈設段階での動揺実験 (喫水の変化による動揺特性を調べる。)		喫水 70, 75cm 波高 2, 4, 8 cm 周期 0.8~2.0sec 初期張力 0.1kg	6成分動揺量 入射波高 係留張力
着底直前時の動揺実験 (構造物底版と水底のクリアランスの影響を調べる。)		喫水 79cm 波高 4cm 周期 0.8~2.0sec 初期張力 0.1kg	6成分動揺量 入射波高 係留張力

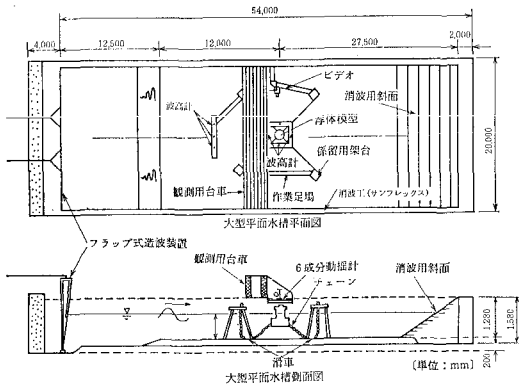


図-2 使用した水槽および計測系の概要

周期および対数減衰率を求めるため、静水中の自由振動実験を行った。その計測結果を表-2 に示す。

(b) 実験方法

実験に使用した平面水槽と計測系の概略を図-2 に示す。水槽の中央付近に観測台車を備え付け、その中央に6成分動揺計のための設置用架台を取り付け、入射波を乱さない状態で測定できるようにした。模型浮体の係留方法は、なるべく動揺に係留系の影響が入らないようにチェーン（単位長さ重量 0.125 kg/m）取り付け位置を重心の近くとし、係留索の長さを水深 80 cm の6倍程度の 5 m に取り、4 点で弛緩係留とした。

波高については容量式波高計により模型中心位置での入射波高を測定し、動揺については6成分動揺計を浮体模型のデッキ部に取り付けて測定した。模型浮体の形状が軸対称であるため、図-3 に定義した波浪に対する動揺成分のうち、サージ（前後揺れ）、ヒープ（上下揺れ）、ピッチ（縦揺れ）のみの2次元的な運動を示す。動揺量のうちサージについてはピッチと連成するため、数値計算結果と比較のため次式を用いて重心位置での動揺に換算するものとした。

$$x(t) = X(t) - L_z \theta_y(t)$$

ここに、 $x(t)$: 重心位置でのサージ変動

$X(t)$: 動揺計取り付け位置でのサージ変動

L_z : 動揺計取り付け位置と重心間の距離

$\theta_y(t)$: 動揺計取り付け位置でのピッチ変動

(c) 実験項目および実験条件

実験項目および実験条件を表 3 に示す。水深を 80 cm にし、模型の喫水を 60, 70, 75, 79 cm の4段階、入射波の周期を実波浪を考慮して 0.8~2.0 sec の範囲で8段階、波高を 2, 4, 8 cm の3段階に変化させた。模型は大きなフーチング部を持つ形状のため水中動揺試験の結果でヒープ、ピッチは 6 sec（現地換算 60 sec）付近に共振周期があり、かなり短周期側の領域で動揺実験を行なうことになる。なお、あらかじめ係留系およびカラム内部に注水された水バラストの動きが動揺量におよぼす影響を調べたが、今回の実験範囲内では自由浮体での動揺量とはほぼ一致することを確認している。

2.2 実験結果と数値計算の比較

(a) 喫水深の影響

海上で構造物を沈設する速度は波浪の速度に比して小さいため、解析および実験においては沈設速度の影響はないものとして取り扱う。図-4 に模型重心回りのサージ、ヒープ、ピッチについて波の周期に対する応答値を各喫水ごとに示した。動揺応答値はヒープ、ピッチについては喫水が大きくなるにつれて顕著に小さくなる傾向

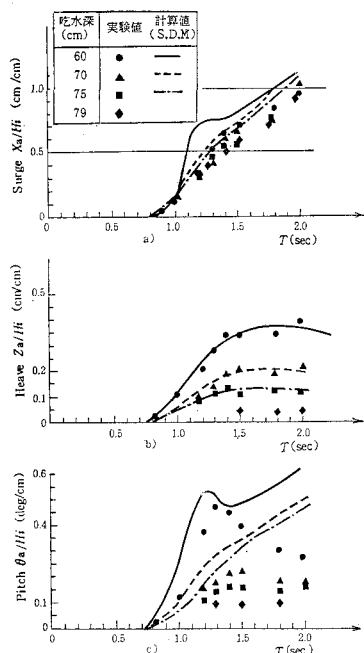


図-4 喫水による動揺応答値の変化

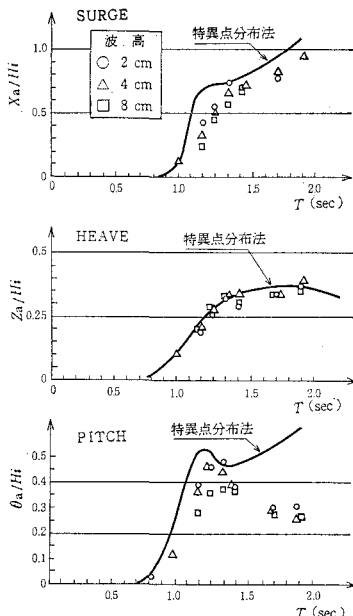


図-6 波高の変化による応答値の変化

にある。これに対してサージは喫水の変化であり変動しないことがわかる。波周期と動揺量の関係については 0.8 sec 以下になると動揺はほとんど見られない。周期 0.8 sec 以上の波に対してはサージは周期とともに単調増加している。ヒープは 0.8 sec から 1.5 sec まで周期とともに増大し、1.5 sec 以上で一定となる傾向を示した。ピッチについては最も喫水が小さい 60 cm の条件で、周期 1.3 sec 付近にピーク値を持っている。(以降、このピークを共振周期でのピークに対して、2nd. peak と呼ぶ。)ただし、この 2nd. peak は喫水が 70, 75 cm と大きくなると見られなくなる。

次に数値計算結果との比較を示す。数値解析法には浮体の没水表面上に多数の周期的吹き出し (source) を分布させ、その強さを未知関数として積分方程式を解く 3 次元特異分布法 (S.D.M.) を用いた。なお、計算では

係留および粘性の影響は無視している。図-4 に喫水 60, 70, 75 cm の条件での計算結果を示した。これによるとヒープについてはいずれの喫水においても実験値と計算値はよく一致している。サージについては喫水が大きい場合には実験値とは比較的よく一致しているが、喫水が 60 cm と比較的浅い場合には、ピッチの違いによる連成分が影響し、実験値と計算値にはやや差が見られる。ピッチについては喫水 60 cm で周期 1.3 sec 以下の範囲で計算値と実測値はほぼ対応しているが、1 sec 以上になると対応しなくなる。また、喫水が 70, 75 cm と大きくなると周期の大きさにかかわらず定性的には一致しているが、定量的には計算値が実測値をかなり上回る傾向にある。これは従来より指摘さ

れている粘性減衰⁴⁾の他にフーチング上部での圧力の計算精度が大きく影響してくるためと思われる。

次に図-5 に模型中心の側方での水位変動と動揺量の経時変化を示す。水位変動と各動揺成分との位相関係についてはヒープはほぼ同位相である。また、サージとピッチについては、それぞれ約 ± 90 度の位相差がある。つまり、大きなフーチング形状では浮体のデッキ部よりも下方にある底版の方がサージ量は大きいという運動特性を持つ。ただし、喫水が大きくなるとヒープ、ピッチの大きさが小さくなるためデッキ部も底版もサージ量は同程度になる。

(d) 底版と水底のクリアランスの影響

喫水が 79 cm と着底寸前の条件での動揺応答値については図-4 に示す通り、ヒープとピッチの波高に対する応答値はともに 0.1 (cm/cm, deg/cm) 以下で非常に

小さくなる。一方、サージについては沈設過程での傾向と同様に応答値はほとんど減少しないことが判明した。厳密には、構造物底版と海底面の間での流れの影響を考慮した解析⁵⁾が必要であるが、今回の規則波による実験範囲内では水底の影響により動揺量が増加するような現象は見られず、特異点分布法による計算ではほぼ動揺量を予測できることがわかった。

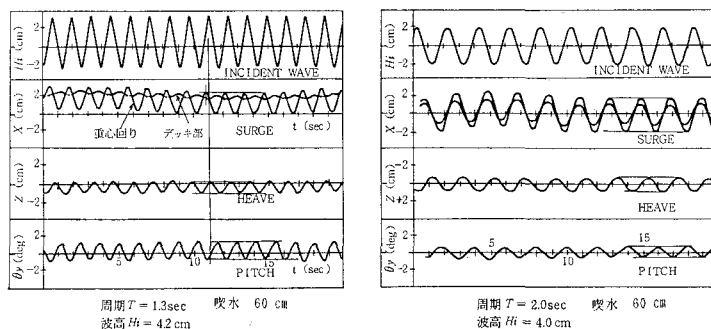


図-5 波浪による動揺の経時変化例

(c) 波高の変化による影響

図-6 に波高を 2, 4, 8 cm と 3 段階に変えた場合のそれぞれの応答曲線を示す。対象とする構造物は固有周期が非常に長いので、今回の実験周期の範囲では波高の影響は小さい。特にヒープについては喫水が 60 cm の時、フーチング上部で水面が砕波する波高 8 cm のケースを含んでいるものの計算値とよく一致している。

ただし、ピッチについては特に喫水が 60 cm で周期 1.3 sec の 2nd. peak 付近では若干波高の影響が見られ、波高が増大するにしたがい実験値が計算値よりも小さくなる傾向にある。これはサージ、ヒープがそれぞれ水平方向および鉛直方向の波圧の積分値で決まるのに対して、ピッチは水平方向の波圧分布形状とフーチング上部の鉛直方向波圧分布の両方から計算されるため、波高が大きくなりフーチング上部で砕波が発生すると線形理論による計算値との違いがでるものと思われる。

3. 再浮上時の運動特性に関する実験

3.1 再浮上実験の概要

大型の海洋構造物を海底より離脱させるには海底面と物体の間に働く吸着力を上回る浮力を構造物に与え、浮上させる方法が取られる。海洋構造物に働く吸着力については、室内レベルでの実験的研究^{5),6)}がいくつか見られるが、おおまかな吸着力の大きさは約 1.0 ton/m² のオーダーにあるといわれている。

再浮上実験は表-4 に示すように 3 つのケースを想定して行った。実験に使用した水槽、模型、計測方法は沈設実験と同じものである。再浮上させる手法について以下説明する。磁力 30 kgf の電磁石を 120° ごとに 3 個埋め込んだ厚さ 5 cm の鋼製の台座を水底に設置する。その上に鋼製のプラットフォーム模型を着底させ電磁石により吸着させる。その状態から水バラストを排除することによって、現地換算 1 ton/m² 前後の浮力をあらかじめ模型に与えておき、磁力を切ることにより一気に浮上

させる方式とした。

いずれのケースも再現性を考慮して数回繰り返し行い、浮上時の上昇変位、リバウンドによる水底面への再接触の可能性などについて検討した。

3.2 実験結果および考察

(a) 吸着力の変化による浮上の大きさの変化

代表的な運動の経時変化を図-7 に示す。また、このような記録から求めた水底を離れ最大上昇点まで達する間の最大速度 V_{Zmax} と初期浮力 F_s (吸着力) の関係を図-8 に示す。実験で変化させた初期浮力の範囲内では V_{Zmax} と F_s の関係は線形に近いことがわかる。

また、最大上昇位置に達した後、構造物底版が再度水底に近づくことになる。図-9 に底版中心での相対的な最大上昇位置 (Z_{max}/D) およびリバウンド位置 (Z_{min}/D) と初期浮力との関係を示す。これによると、初期浮力と水際面積から決まる最終クリアランス D に対する相対的な最大上昇位置は初期浮力の大きさに関係なく 1.5 という値となる。これに対し相対的なリバウンド位置 (Z_{min}/D)

は初期浮力が増大するにつれて 1.0 から減少する傾向にある。

ただし、この値は 0.5 に漸近するため、プラットフォーム底版が上下運動そのもので水底に接する可能性はない。実験では偏心を与えないように浮上させたが、初期浮力の増大に伴ない縦横揺れ運動が増加する傾向にあった。これは、

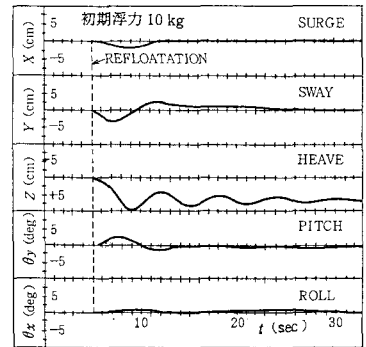


図-7 再浮上後の運動変化例

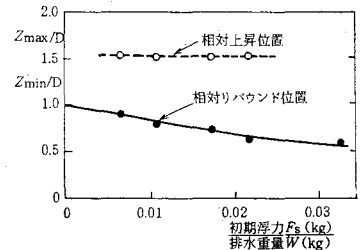


図-8 初期浮力と最大上昇速度の関係

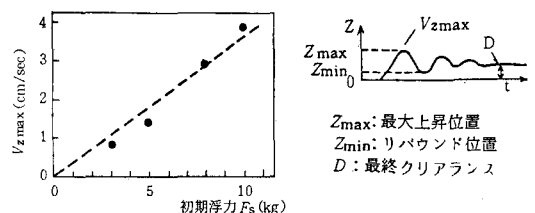


図-9 初期浮力と上昇位置およびリバウンド位置の関係

表-4 再浮上実験の概要

実験項目	概観図	実験条件	測定項目
吸着力の変化による浮上の大きさの変化を調べる実験		水深 80cm 初期浮力 3.5, 8, 10, 15 kg 単位面積当たり吸着力 0.34 ~ 1.68 g/cm ² 底版面積 8908cm ² 水線面積 1676cm ²	6方向運動 経時変化
吸着力のかたよりがある場合の実験		初期浮力 3.5, 8, 10, 15 kg 電磁石のスイッチを切る組み合わせを変えて偏心を与える。	6方向運動 経時変化
波浪がある場合の実験		初期浮力 10kg 入射波高 4cm 周期 0.8 ~ 2.0sec	6方向運動 経時変化 入射波高

が増大するとともに構造物周辺から流れこむ水やフーチング隅から剝離する渦の効果が大きくなり、縦横揺れを増加させるものと考えられる。

(b) 吸着力のかたよりがある場合の浮上特性

吸着力の大きさの分布にかたよりがある場合は構造物が偏心を受けた状態で浮上することになる。図-10に示すように偏心方向を模型中心から見て吸着力の最夫方向と定義すると、浮体重心部の運動の軌跡が偏心方向に直線的に続くのに対し、デッキ部では大きく揺れを伴った状態で移動

する運動特性が見られた。着底時から再浮上後静止するまでの重心の水平移動量は初期浮力が増すにつれて移動範囲が比例して増大しており、その移動量は、ほぼ最終クリアランス D のオーダーであった。再浮上時の縦横揺れは、偏心がない場合に比べ大きいものの、実験範囲内では水底への再接触は生じなかった。

(c) 波浪がある場合の浮上特性

図-11に波浪がある場合の再浮上後の重心およびデッキ位置での運動軌跡の代表的な例を示す。上下の図とも同じ吸着力と波浪条件(周期2sec)であるが水底を離れる瞬時での波の位相が異なっている。この位相の違いにより波進行方向あるいは逆方向に急激に移動する現象が見られた。この急激な移動が発生する理由は次のように考えられる。固定された構造物には波力が作用しているが、構造物底版が水底から離れ、一旦浮遊した状態では底面での摩擦抵抗がなくなるため、浮力の作用する方向に浮体が移動することになる。この現象は波力の大きさに関係するため、波高を一定とすれば浮体の径に比べて波長が大きい場合に顕著であった。

4. おわりに

大型着底式海洋構造物の沈設および再浮上時の運動特性について水理模型実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

1) 沈設実験：波浪に対する動揺量は喫水が大きくなるに従って小さくなり、安定性が増す傾向にあった。

また、着底直前時においては、ヒープ(上下揺れ)、ピッチ(縦揺れ)の応答値はかなり小さくなり、構造物底版と水底の間のクリアランスが動揺量に与える影響は小さいことが確認された。ただし、サージ(前後揺れ)

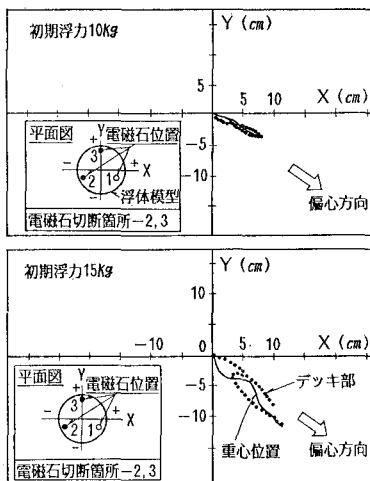


図-10 重心およびデッキ位置での運動軌跡(偏心を伴う場合)

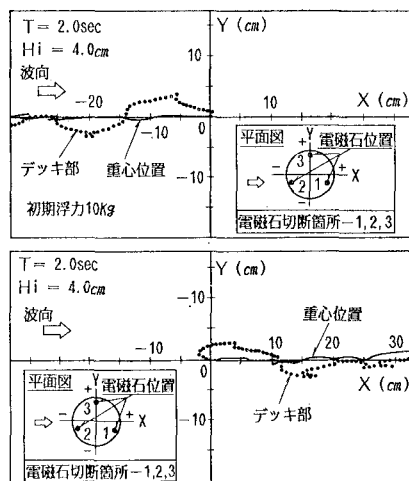


図-11 重心およびデッキ位置の運動軌跡(波浪がある場合)

については、着底直前でも運動が顕著である。特異点分布法を用いた動揺計算との比較では、サージとヒープについては、実験値とよく一致している。ただし、ピッチについては、喫水深に関係なく、計算値が実験値を過大評価する傾向にあった。

2) 再浮上実験：再浮上過程で構造物と海底面に顕著な吸着力が働くとして3つの悪条件下(①吸着力が大きい場合、②吸着力にかたよりがあり浮上時に偏心を受ける場合、③波浪が作用する場合)を想定して挙動を調べたが、リバウンドによる海底面への接触は起こらないことが確認された。

最後に本研究は、(財)日本船舶振興会の昭和61年度補助事業として行った造船研究協会第197部会の成果の一部であり、御指導を賜った藤田譲部会長(東京理科大学教授)に謝意を表します。

参考文献

- 1) Garrison, C. J.: Hydrodynamic Loading of Large Off-shore Structures; Dimensional Source Distribution Methods in Numerical Methods in Offshore Engineering, Eds. O. C. Zienkiewicz, R. W. Lewis and K. G. Stagg, Wiley, Chichester, England, (1978), pp. 97~140.
- 2) Pliskin, L.: Removal of Concrete Gravity Platforms, OTC Conference 1976, Paper Number 3475.
- 3) 井上令作・岩井勝美: 着底式海洋構造物の地切り力, 船舶技術研究所報告, 第13巻, 第4号, pp. 175~188, 1976.
- 4) 小舟浩治: 浮体係留における粘性抵抗力および拘束条件の影響について, 港湾技術研究所報告, 第17巻, 第4号, 昭和53年12月.
- 5) Svendsen, I. A., P. A. Madsen and C. Michaelson (1977b) Wave induced heave motion of a ship in shallow water. Inst. Hydrodyn. and Hydr. Engrg. Tech. Univ. Denmark. Prog. Rep. 43, pp. 23~30.
- 6) Mei, C. C., Yeung, R. W. and Liu, K. F.: Lifting of a large object from a porous seabed, Journal Fluid Mechanics, Vol. 152, pp. 203~215, 1985.