

沖合養殖筏施設の波浪動揺に関する研究

松原雄平*・野田英明**・黒岩正光***・安倍伸弥****

1. 緒 言

養殖筏施設はわが国の沿岸域でホタテ貝やカキあるいは真珠貝等の有用貝類の養殖に広範に使用されている。しかし、近年の内海域での海域汚染とくに養殖水域における投与餌料あるいは魚介類の排泄物等による富栄養化の進行で、貝類の養殖環境は悪化の一途をたどっている。このため外海域への養殖施設の試験設置が行われているが、設置後の施設流失や損壊が頻発し、特に 9111 号台風では瀬戸内海域に係留されていた多くのカキ養殖筏施設が壊滅的な被害を受けたことは記憶に新しい。

従来、波浪場での筏施設の係留問題を取り扱った例は数少なく、わずかに中村ら (1977) および松原ら (1991) が挙げられるのみである。中村らは、筏施設の設計外力を算定するために、比較的簡単なモデルで施設の動揺量を計算し、模型実験および現地観測結果と比較検討している。松原らは、離散化要素法を用いた等価な多自由度系の質量分布モデルによる動揺シミュレーションモデルを提案し実験結果と比較している。しかし索張力の解析ではカタナリー理論で検討したのみで索張力の動的変化については十分に検討されていない。そこで本論文では、前報で用いた離散化質量モデルに係留系の解析に拡張し係留索張力の計算精度の向上をはかるとともに、質量要素数を増やし、より実物に近い筏施設モデルを構築した。さらに施設の波浪動揺とイタヤガイの成長過程の関係を明らかにするため、貝を収容した養殖籠を人為的に長期間振動させ貝の成長過程を追跡した実験結果も報告する。

2. 波による養殖筏施設の動的応答解析

図-1 は本論文で対象とした筏施設を模式的に示したものである。施設は波の進行方向に 2 本の係留索で係留され、筏部から多くの養殖籠が垂下される構造形式である。座標系として、空間固定座標系と係留浮体の重心を中心とする空間移動座標系を考え、前者を波浪および係

留索の運動計算に、後者を筏部および垂下連部の運動計算に用いた。

図-2 は、筏施設の動揺解析を行うために、筏部、垂下連部および係留索を等価な球要素で置き換えたモデルを模式的に示したものである。

(1) 筏部の運動方程式

施設は 2 点係留されているため、筏部の運動として、Surge, Heave および Pitch の 3 自由度の連成運動を考えればよい。また、筏部に作用する流体力は、各要素部材ごとに作用流体力を求め、運動方向に単純加算することによって構造物全体の流体力とする Hooft 法を用いる (Hooft, 1971)。筏部の構成部材に働く流体力の算定には、Morison 式を適用でき、筏部の運動方程式は、

$$M\ddot{X}_G = -T_{Xf} + T_{Xr} + 4 \sum_{i=1}^5 {}^i T_{Xs} + 4 \sum_{i=1}^4 {}^i F_H$$

$$M\ddot{Z}_G = -T_{Zf} - T_{Zr} - 4 \sum_{i=1}^5 {}^i T_{Zs} + 4 \sum_{i=1}^4 {}^i F_V + B - Mg$$

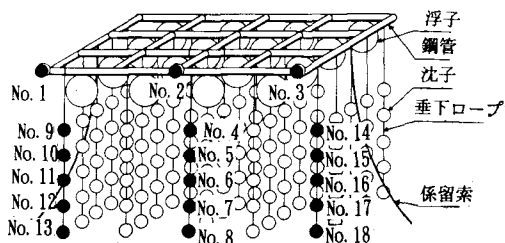


図-1 筏モデルの概要

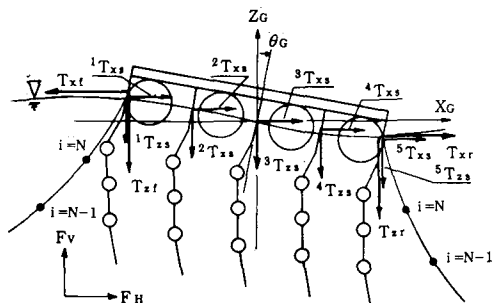


図-2 離散化要素モデル模式図

* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 鳥取大学助手 工学部土木工学科

**** 正会員 工修 鴻池組

$$\begin{aligned} I\ddot{\theta}_G = & (-T_{Xf} - T_{Xr})F_1 + (-T_{Zf} + T_{Zr})F_2 \\ & + 4\{^1T_{Xs} - ^5T_{Xs}\}S_1 + (-^1T_{Zs} + ^5T_{Zs})S_2 \\ & + \{^2T_{Xs} - ^4T_{Xs}\}S_3 + (-^2T_{Zs} + ^4T_{Zs})S_4\} \\ & + 4\{(^1F_H - ^4F_H)F_3 + (^1F_V - ^4F_V)F_4 \\ & + (^2F_H - ^3F_H)F_5 + (^2F_H - ^3F_H)F_6\} \end{aligned}$$

となる。ここに X_G , Z_G および θ_G はそれぞれ Surge, Heave, Pitch 運動を表す。また, M : 筏部の質量, B : 筏部の浮力, I : 筏部の Pitch 方向慣性モーメント, BD_0 : 筏部の幅, BD_1 , BD_2 : 浮子と筏部重心 G との距離, SD_1 , SD_2 : 垂下ロープの筏部取付点と筏部重心との距離, T_{Xf} , T_{Zf} , T_{Xr} , T_{Zr} : 沖側および岸側係留索の X 方向と Z 方向の張力成分, F_1 , F_2 : 係留索の筏部取付点における筏部重心から Z 方向および X 方向の張力作用線までの距離, $^i T_{Xs}$, $^i T_{Zs}$: 垂下ロープの X 方向および Z 方向張力, S_1 , S_2 , S_3 , S_4 : 垂下ロープの筏部取付点における筏部重心に対する Z 方向および X 方向の腕の長さ, さらに, F_H および F_V は, それぞれ部材要素に作用する水平波力および鉛直波力を表し Morison 式で算定される。

(2) 要素分割法による係留索の運動方程式

岸側および沖側係留索を 10 分割し, 各々の要素がヒンジ結合された離散化モデルに置換した。さらに筏部と索の接点変位量を索の境界条件とし係留索の動的解析を行った(小田ら, 1980; 中嶋ら, 1981; 庄司, 1975)。このとき, 係留索は常にカタナリー曲線を保持しながら動揺すると仮定し動的解析を行った。図-3 は, 離散化された索要素に作用する外力ならびに座標系を示したものである。このとき質点 i の運動方程式は次式で与えられる。

$$M_i \ddot{X}_i = P_{Xi} + T_i \cos \phi_i - T_{i-1} \cos \phi_{i-1}$$

$$M_i \ddot{Z}_i = P_{Zi} + T_i \sin \phi_i - T_{i-1} \sin \phi_{i-1} - W_i$$

ここに, $\ddot{X}_i$, $\ddot{Z}_i$ はそれぞれ質点 i の X 方向および Z 方向の加速度, また, T_i は節点 i および $i+1$ を結合する剛な直線に働く張力, P_{Xi} および P_{Zi} は節点 i に働く流体力の x 軸および z 軸方向の成分, W_i は節点 i に働く水中重量, ϕ は節点 i を結ぶ要素と水平軸とのなす角度である。垂下連部の取扱については前報と同様に, 養殖籠を等価な球形モデルに置き換え, 垂下ロープの伸縮, たわ

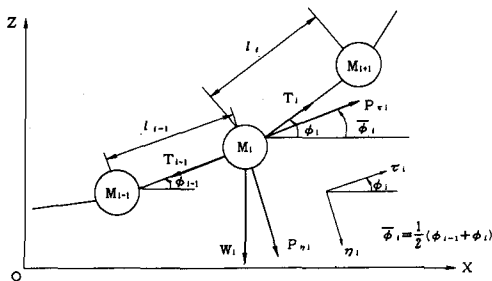


図-3 質量要素に作用する外力と座標系

みを無視して運動方程式を誘導した。

(3) 動揺計算

以上の各運動方程式ならびに要素間距離が一定という拘束条件式とを連立させて数値計算によって筏施設の波浪動揺解析を行った。計算手順は, ①特定の波浪条件に対し筏部の運動を解く②筏の移動で係留索の上端点が移動し, これを係留索の境界条件とし, 新たなカタナリー形状を算定する③筏の計算結果から与えられる各浮子の座標を垂下連の境界条件として, 垂下連の各要素について計算を行う, となる。この計算ループを定常な周期解が得られるまで繰り返せばよい。計算初期条件は, 造波開始前の平衡状態時の値とし, 得られた計算結果の妥当性を検証するために, 屋内水槽実験を行った。

3. 実験装置および方法

実験は, 長さ 24.0 m, 幅 0.6 m, 深さ 1.1 m の二次元波動水槽を用いて行なわれた。養殖筏施設の模型は, 筏部, 垂下連部および係留索から構成されている。筏模型は, 長さ 27.5 cm, 幅 20.0 cm のアルミパイプを組み合わせ構成されており, 16 箇所直径 3.0 cm のプラスチック球を配置し, 浮力を与えている。各垂下連は, ビニール製の釣り糸に直径 1.5 cm の沈子(プラスチック球)を等間隔に設置したもので, それぞれ筏から垂下されている。垂下連の沈子水中重量は, 球の中に砂(中央粒径 $d_{50}=0.028$ cm)を密に詰めることで, 調整されている。実験は, 垂下連数の異なる 5 種類の模型を用いて行なわれた。また, 模型の係留索には, 直径 0.5 mm のステンレスワイヤーを使用した。図-1 に示したように筏部および垂下連部の沈子には各位置に番号を付けた。以下では筏部の位置 No. 3 の位置を浮子 3 と記述する。養殖筏施設模型の動揺変位は, 水槽と平行に設置したビデオカメラを用いて測定し, ビデオカセットテープに収録した。施設模型の変位計測には, 画像解析システムを用いた。

実験条件

水深を 60.0 cm 一定とし係留索長を緊張係留時で 109 cm, 弛緩係留時で 115 cm とした。実験波はすべて深海波とし, 周期および波高の範囲を

$1.50 \text{ sec} \leq T \leq 2.51 \text{ sec}$, $2.40 \text{ cm} \leq H \leq 5.90 \text{ cm}$ に設定した。ここに, T は波の周期, H は波高である。

4. 流体力係数の決定方法

解析モデルを用いて筏施設の動揺計算を行うには, 抗力係数や質量力係数等の値を決める必要がある。そこでまず流体力係数が, どのように索張力の計算結果に影響するかを調べた。まず, $T=2.0 \text{ sec}$, $H=3.4 \text{ cm}$ の波浪条件で抗力係数を $C_D=2.0$ と一定に保ち, 慣性力係数を $C_M=1.0, 2.0$ および 3.0 と変えて索張力を計算した。そ

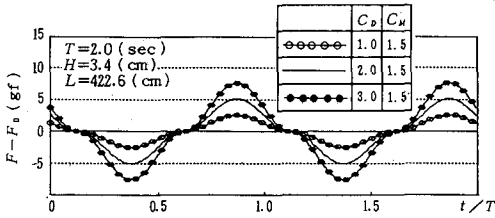


図-4 索張力におよぼす抗力の影響

の結果、慣性力係数が1.0~3.0の範囲で変化しても計算索張力へは、ほとんど有意な影響は及ぼさないことがわかった一方、図-4は、 $C_M=1.5$ と一定にし、 $C_D=1.0, 2.0$ および3.0の値を順次与え計算された索張力の計算結果を示したものである。抗力の影響が係留索張力の計算結果にも明確に現れ、 C_D が増大するにつれて索張力も一様に増加していることがわかる。すなわち、施設の動揺計算あるいは索張力の算定を精度よく行うためには抗力係数を適切に選択しなければならないことになる。そこで、静水中で筏施設模型の減衰自由振動実験を行った。これは、静水中で垂下連の上端部を固定し、一方で最下端部の沈子（養殖塊模型）に初期変位を与え、静かに離れた後の最下端沈子の水平方向変位の時間的変化を測定するものである。図-5は、垂下連の減衰自由振動の実測値と計算値を示したものである。縦軸は最下端沈子の水平方向の変位を示している。この図より、下端沈子は運動開始後約1.5 secで中立位置($x=0$)まで戻り、その後約2 secの周期で振動していることがわかる。また、同図中、実線で示される計算値は、法線方向と接線方向の抗力係数をそれぞれ $C_{Dn}=4.5$ 、 $C_{Dv}=3.0$ 、慣性力係数を $C_{Mn}=1.5$ 、 $C_{Mv}=1.5$ 、付加質量係数を $C_{vn}=0.5$ 、 $C_{vv}=0.5$ として得られたものである。計算値は実験値とほぼ一致しており、以後、垂下連の変位および垂下ロープによる張力の計算には、この値を用いる。

5. 計算結果と実験値との比較

筏部の動揺計算では要素に作用する流体力をMori-son 公式を用いて算定し、Hooft 法により各要素材の流体力を運動方向に加算して求めた。

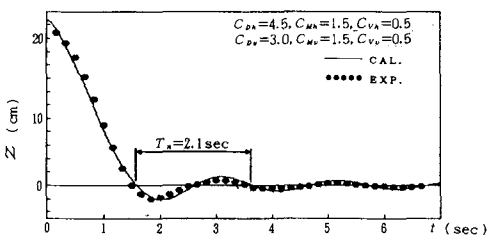


図-5 垂下連の減衰自由振動

図-6は、緊張係留時における筏施設の Surge, Heave および Pitch の時間的変化を示したものである。図中における実線、破線は計算値を、また●、○印は実験値を示している。緊張係留により筏施設が拘束されているため Heave と Surge の動揺振幅は、ほぼ同程度であり、その変化も正弦的である。また図には示していないが、さらに波高が大きくなるに従い、Heave, Surge および Pitch が増大すること、Pitch は水平方向の変位とほぼ同じ位相で変化していることなどがわかった。計算値を実験値と比較すると、Heave については計算値が、Surge については実験値が、それぞれやや大きく現れているものの、両者の位相は、ほぼ一致している。また、Pitch については、実験値に、ややばらつきが見られるが、計算値が大きく現れている。しかし、両者の位相はほぼ一致している。一方、図-7は弛緩係留時における Surge, Heave および Pitch の時間的変化を示したものである。Heave は、ほぼ静止時の位置を中心に動揺し、Surge は $X=4$ cm の位置を中心とした正弦的な変化となっている。しかし Pitch は大半の位相で負となって回転方向に非対称な運動となっている。これは前出の図-6でも見られ、垂下連の効果により筏施設の復元力が低減されることによるものと考えられる。このように弛緩係留では、施設に対する拘束が少ないため波浪漂流力により波の進行方向に水平移動が生じる。実験値と計算値を比較する

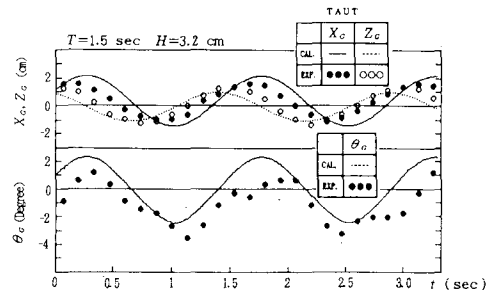


図-6 筏部の動揺量の時間的変化 (TAUT)

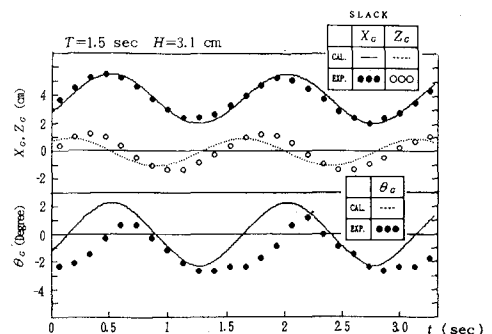


図-7 筏部の動揺量の時間的変化 (SLACK)

と, Surge, Heave については両者の振幅ならびに位相がほぼ一致していることから, 本応答モデルは, 筏施設の運動特性についてほぼ予測しうる。

図-8 は波動下で緊張係留された筏部ならびに垂下連部の 2 次元動揺を示し, 計算結果と比較したものである。図中●印は実験結果を, 実線は計算値を示し, 破線の交点は初期位置を示している。図より, 垂下連の振動は, ほぼ楕円に近い軌跡となっており, 下部になるほど水平方向の動揺振幅が大きいこと, 最下部の要素では, No. 13, No. 8, No. 18 と波の進行方向に進むにつれ動揺量も大きくなっていることがわかる。実験値と計算値を比較すると, 実験値は初期静止位置を中心とした運動となっているが, 計算結果は鉛直方向に運動中心がシフトして, 動揺する結果となっている。また計算値では水平方向の動揺量は, ほぼ実験値と一致するが, 鉛直方向の動揺量は, 計算結果がやや小さく現れている。他の波浪条件の結果からも同様の結果が得られており, 垂下連の水平運動については, ほぼ再現されることがわかった。

係留索張力の時間的変化

図-9 は, 緊張係留時の沖側および岸側索張力の時間的変化を示したもので, 図中実線と破線は計算値を, ●および○は実験値を示し, それぞれ沖側と岸側索張力を表している。これより, 索張力の最大値は岸側と沖側とで等しくはならず沖側張力が卓越することがわかる。しかし最大索張力の差異は垂下連の本数によって大きく異なる結果が得られた。実験値と計算値を比較すると張力波形の振幅ならびに位相とも両者よく一致していることがわかる。他の条件からも同様の結果となり, 衝撃的な

索張力が生じない波浪条件では, 本解析モデルで精度よい係留索張力の推定が可能である。

6. 養殖籠の動揺とイタヤガイの育成過程

これまで筏施設の動揺と養殖貝の成長速度や貝殻の変形に及ぼす影響について検討された例はあるが(野沢, 1984), 実証例がなく不明のままとされている。そこで, イタヤガイを対称種として強制的に動揺を与えた時の, イタヤガイの振動と成長過程の関係について検討した。

実験装置および方法

貝類を用いた実験を行う場合, 実海域に養殖籠を設置して調査することが望ましいが, 沖合域での籠の動揺や貝の成長を測定するのはきわめて困難である。そこで, 本研究では, 陸上の海水槽における振動実験を実施した。実験は, 鳥取県東伯郡泊村の鳥取県水産試験場内に設置されている開放試験池ならびに沈砂槽を用いておこなった。両水槽ともコンクリート製で屋外に設置されている。前者は, 試験場内での利用後の海水を一旦貯水し, 排水するための最終湛水池で, 一方, 後者は, 試験場の沖合い約 400 m から汲み上げた海水の砂, 浮遊物などを沈澱させることを目的とした池である。

実験に使用したイタヤガイは, 浮遊幼生を天然採苗し, 島根県隠岐島の水産試験場で中間育成したものである。採苗後, 約 8~9 ヶ月経過した 1991 年 10 月に殻長測定をおこなったところ, 殻長 4~6 cm の貝が約 1000 個, 殻長 2~4 cm の貝が約 200 個であり, おおのの平均殻長は, 前者が 6.23 cm, 後者が 3.64 cm であった。以下, これらの貝を中型貝, 小型貝と呼ぶことにする。

図-10 はイタヤガイを入れる養殖籠を示すもので, 殻長によって 2 種類用意し, 中型貝には丸籠を, 小型貝にはパールネットを使用した。籠に強制振動を与えるためリニアドモーターのスピードコントロールタイプ(オリエンタルモーター社製)を使用した。このモーターの特徴は, 交流電源を用いて上下の直線的運動が容易に制御でき, 任意の振動振幅を目的とする周期で操作することにある。開放試験池に, 周期 15.6 s と 70.0 s の振動装置を設置し, それぞれに丸籠を取り付け, 比較のため静止状態の丸籠と 4 段組のパールネットを設置した。一方, 沈砂槽には, 周期 15.6 s と 35.0 s の振動装置に丸籠を取り付け, 同様に静止状態の丸籠と 5 段組のパールネットを設置した。

図-11 は, 1991 年 10 月 5 日から 1993 年 2 月 3 日までの約 480 日間の開放試験池のイタヤガイの殻長変化を示したものである。これより, 1991 年 10 月から 1991 年 11 月までの約 60 日間は貝の成長速度が早く, 平均で 0.48 cm 成長している。ところが後半の 420 日間に成長速度が急激に減少し, この間平均 0.40 cm の成長にとどまっ

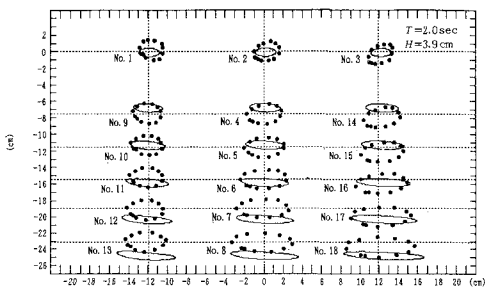


図-8 筏ならびに垂下連の 2 次元動揺量

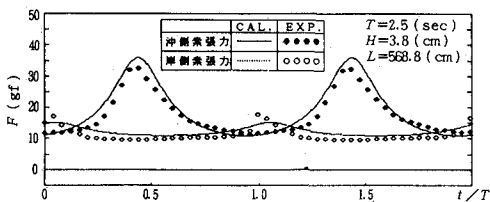


図-9 係留索張力の時間的変化

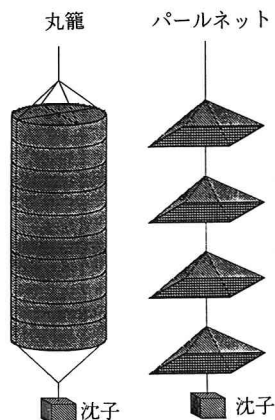


図-10 丸籠とパールネット

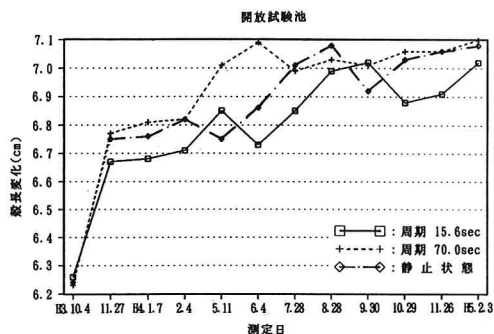


図-11 イタヤガイの殻長変化

ている。また、期間中に殻長が減少した結果が見られるが、これは籠内の貝の弊死によるものである。この図で注目すべき点として、振動周期が短いほど成長速度が低下していることで、成長率、生残率ともに振動周期が速いほど、低下することが明らかになった。このことで貝を効率よく育てるには、筏の動揺を低減する何等かの対策が必要であることを示している。このほか、観測を通して、さらにイタヤガイの生残率は、水温に大きく影響されること、シルトが混入、浮遊する沈砂槽における生残率は極めて低かったことから、シルト分の浮遊物質

はイタヤガイの生残率を低下せしめることが明らかとなった。

7. 結 語

本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- 1) 本研究で導いた解析モデルで、筏部ならびに垂下連の動揺量をほぼ算定できる。また係留索張力についても衝撃張力が発生する条件を除けば、実験結果と計算結果はほぼ一致した。
- 2) 筏施設が波動で動揺しているとき、垂下連の運動は、ほぼ円運動から楕円運動を示す。これは、垂下連数が少ないと係留方法による影響を受け、垂下連数の増加にともなってその影響は緩和される。
- 3) 養殖籠の動揺により、イタヤガイの成長は影響を受け、成長率、生残率ともに振動周期が速いほど、低下する。

なお、本研究を実施するにあたり、鳥取県水産試験場の研究員の方々には終始多大な御協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。また、本研究の一部は、文部省科学研究費一般研究C(代表者松原雄平)の研究費によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 小田一紀・富岡健一 (1980): 係留鎖の動的張力に関する基礎的研究, 第27回海講論文集, pp. 275-279.
- 庄司邦昭 (1981): 係留浮体の運動と係留索の張力に関する研究, 日本造船学会論文集, 第138号, pp. 233-246.
- 中嶋俊夫・元良誠三・藤野正隆 (1981): 係留浮体の運動を考慮した係留ラインの動的挙動について, 日本造船学会論文集, 第150号, pp. 266-277, 1981.
- 中村 充・上北征男 (1977): 養殖筏の設計外力に関する研究, 第24回海講論文集, pp. 625-628.
- 野沢正俊 (1984): イタヤガイの殻上輪紋と成長, 鳥取県水産試験場報告 27: pp. 10-13.
- 松原雄平・野田英明・西平福宏 (1990): 外海養殖いけす施設の波による動的応答, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 714-718.
- Hooft, J. P. (1971): A mathematical method of determining hydrodynamically induced force on a semi-submersible, TSNAME, Vol. 79, pp. 150-152.