

半潜水式海洋構造物の運動に及ぼす係留鎖に加わる 流体力の影響 : その2. 不規則波中での運動

中村, 昌彦
九州大学応用力学研究所 : 助手

小寺山, 亘
九州大学応用力学研究所 : 教授

経塚, 雄策
九州大学応用力学研究所 : 助教授

<https://doi.org/10.15017/4743829>

出版情報 : 応用力学研究所所報. 65, pp.165-177, 1987-12. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



半潜水式海洋構造物の運動に及ぼす 係留鎖に加わる流体力の影響 —その2. 不規則波中での運動—

中 村 昌 彦** 小寺山 亘***
経 塚 雄 策****

概 要

係留鎖に加わる粘性減衰力の大きさが被係留海洋構造物の運動の減衰力に比べて無視できない場合の不規則波中応答の計算法を示した。

なお、本論文で提案した波形近似法による計算結果は実験とよい一致を示した。

Key words : Motion, Irregular waves, Floating structure, Hydrodynamic force on mooring line

1. 緒 言

文献 1) では規則波中で係留鎖に加わる流体力がステーションの運動に及ぼす影響について報告し、縦揺の同調周期では係留鎖の影響が大きいことが実験、理論計算により確認された。しかし、上下揺、前後揺に関しては理論計算上はこれらの影響が大きいことが予想されても、規則波中の実験では同調周期が長い因此を確認することはできなかった。

本研究では不規則波中における実験と計算を行うことにより、係留鎖が上下揺、前後揺にどのように影響するかを調査した。

また、係留鎖変動張力は非線形性が極めて強い。この非線形性の強い要素が系に含まれていても不規則波中の応答を精度よく求める方法を提案した。

2. 実 験

実験は応用力学研究所津屋崎海洋災害実験所内の曳航水槽で行った。

* 西部造船会第 73 回例会にて一部発表

** 九州大学助手、応用力学研究所

*** 九州大学教授、応用力学研究所

**** 九州大学助教授、応用力学研究所

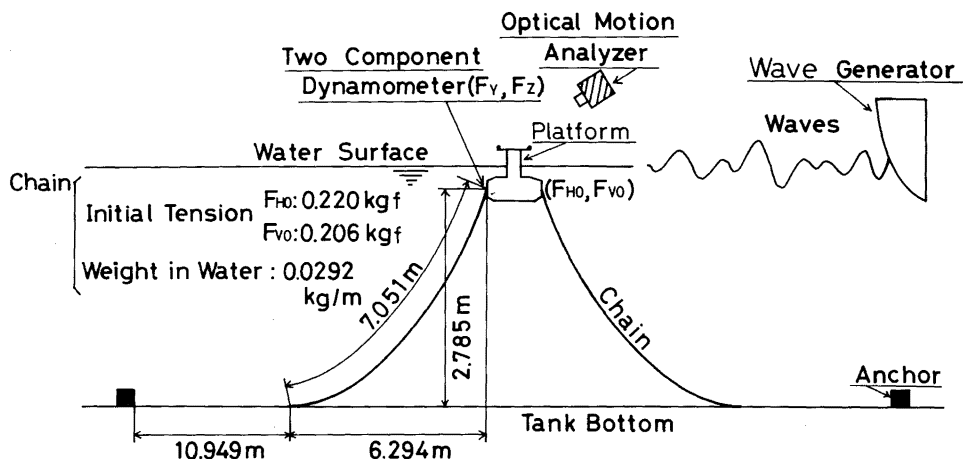


図1 実験状態

供試模型は文献1)と同じ軸対称半没水型ステーションの1/100模型を用いた。実験は

- a) コイルバネで係留。
- b) 鎖で係留。

の2状態について行った。図1に鎖で係留した場合の実験状態図を示す。係留は波上側、波下側の2点係留である。

入射波は有義波高7.2cm(平均波高4.5cm)、平均波周期1.4秒のITTC型の不規則波を使用した。

計測したデータは17.8Hz以上の高周波数成分をローパスフィルターで除いた後に磁気テープに100Hzのサンプリング周波数で収録した。

3. 理論計算

理論計算は次に示す3種類の方法で行った。それぞれをここでは便宜上、成分波法、波形近似法、応答関数法と呼ぶことにする。

- a) Method 1 (成分波法)

入射不規則波をフーリエ級数展開により成分波に分解し、成分波ごとに成分波の周期、振幅を用いて応答を計算する。その際、流体力係数等は各周波数成分に対応するものを使用する。その計算結果を重ね合わせて不規則波中の応答とする。

変動波漂流力は規則波中の定常波漂流力係数を用いてPinksterの方法²⁾により計算し、応答を上記の結果にたし合せる。

- b) Method 2 (波形近似法)

不規則波をゼロクロスごとに規則波の半波列であるとみなす。ゼロクロスから次のゼロクロスまでを1/2周期とし、その間の最大値を振幅とする。

それぞれの振幅、周期に対応する解を(1)~(3)式を解いて求めて半波ごとに順につなげて不規則波

中の応答とする。

変動波漂流力については Method 1 (成分波法) と同じ方法で計算し、応答を重ね合わせる。

c) Method 3 (応答関数法)

不規則波の波スペクトルに平均波高を使用して求めた応答関数を掛けて運動等のスペクトルを求める。

変動波漂流力については Pinkster の方法により換算波スペクトルを計算し、これに応答関数を掛けて長周期動揺のスペクトルを求める。

波形近似法の様に不規則波を規則波の半波列とみなす手法は一般的には変動波漂流力の時系列を求める場合に用いられる³⁾が、本計算法では一般の応答に適用した。逆に本計算法では変動波漂流力に対する応答を計算するのに波形近似法の手法を用いていない。これは係留鎖変動張力が周波数領域の計算であり、半波ごとの定常波漂流力を外力の時系列とし運動方程式を時間ステップごとに解くことが困難であるためである。

ステーションの運動は次に示す (1)～(3) 式を解いて計算した。

上下揺運動方程式

$$(M + a_{zz} + \Delta a_{zch})\ddot{Z} + (b_{zz} + b_{zv} + \Delta b_{zch})\dot{Z} + (\rho g A_w + C_{zz})Z = F_{HC} \cos \omega t + F_{HS} \sin \omega t \quad (1)$$

前後揺運動方程式

$$(M + a_{yy} + \Delta a_{ych})\ddot{Y} + (b_{yy} + b_{yv} + \Delta b_{ych})\dot{Y} + C_{yy}Y + (a_{y\theta} + \Delta a_{y\theta ch})\ddot{\theta} + (b_{y\theta} + \Delta b_{y\theta ch})\dot{\theta} + c_{y\theta}\theta = F_{SC} \cos \omega t + F_{SS} \sin \omega t \quad (2)$$

縦揺運動方程式

$$(J + a_{\theta\theta} + \Delta a_{\theta ch})\ddot{\theta} + (b_{\theta\theta} + b_{\theta v} + \Delta b_{\theta ch})\dot{\theta} + (WGM + C_{\theta\theta})\theta + (a_{\theta y} + \Delta a_{\theta ych})\ddot{Y} + (b_{\theta y} + \Delta b_{\theta ych})\dot{Y} + c_{\theta y}Y = F_{PC} \cos \omega t + F_{PS} \sin \omega t \quad (3)$$

ただし

ρ : 水の密度

W : ステーションの排水量

M : ステーションの質量 (= W/g)

A_w : ステーションの水線面積

J : ステーションの慣性モーメント

GM : ステーションのメタセンター高さ

F_{HC}, F_{SC}, F_{PC} : 上下揺, 前後揺, 縦揺に対する波浪外力の余弦成分

F_{HS}, F_{SS}, F_{PS} : 上下揺, 前後揺, 縦揺に対する波浪外力の正弦成分

a_{zz}, a_{yy} : 上下揺, 前後揺に対するステーション本体の付加質量

$b_{zz}, b_{yy}, b_{\theta\theta}$: 上下揺, 前後揺, 縦揺に対するステーション本体の造波減衰力係数

$C_{zz}, C_{yy}, C_{\theta\theta}$: 上下揺, 前後揺, 縦揺に対する係留鎖の静的復原力係数

$a_{\theta\theta}$: ステーション本体の縦揺付加慣性モーメント

$a_{y\theta}, a_{\theta y}$: 前後揺付加質量, 縦揺付加慣性モーメント連成項

$b_{y\theta}, b_{\theta y}$: 前後揺, 縦揺造波減衰力係数連成項

$c_{y\theta}, c_{\theta y}$: 前後揺, 縦揺に対する係留鎖の復原力連成項

$b_{zu}, b_{yu}, b_{\theta u}$: 上下揺, 前後揺, 縦揺に対するステーション本体の粘性減衰力係数

$\Delta a_{zch}, \Delta a_{ych}, \Delta a_{\theta ch}$: 係留鎖の動的変動張力から生じる上下揺, 前後揺, 縦揺に対する等価付加質量及び等価付加慣性モーメント

$\Delta b_{zch}, \Delta b_{ych}, \Delta b_{\theta ch}$: 係留鎖の動的変動張力から生じる上下揺, 前後揺, 縦揺に対する等価減衰力係数

$\Delta a_{y\theta ch}, \Delta a_{\theta ych}$: 係留鎖の動的変動張力から生じる前後揺, 縦揺に対する付加質量連成項

$\Delta b_{y\theta ch}, \Delta b_{\theta ych}$: 係留鎖の動的変動張力から生じる前後揺, 縦揺に対する減衰力連成項

波浪外力とステーション本体の付加質量 $a_{zz}, a_{yy}, a_{\theta\theta}$, 付加慣性モーメント $a_{\theta\theta}$, 造波減衰力係数 $b_{zz}, b_{yy}, b_{\theta\theta}$ は特異点分布法⁽⁴⁾⁽⁵⁾を用いて求めた。ステーションの GM は傾斜試験を行って求めた。前後揺に対するステーション本体の粘性減衰力係数 b_{yu} は強制動揺試験を行って求めた。また, 上下揺, 縦揺に対するステーション本体の粘性減衰力係数 $b_{zu}, b_{\theta u}$ は自由動揺試験から求めた減衰力から計算で求めた造波減衰力成分を差引いて求めた。

係留鎖の静的復原力係数 $c_{zz}, c_{yy}, c_{\theta\theta}$ はカタナリー理論により計算した値⁽⁶⁾を用い, 動的変動張力から生じる各運動モードに対する等価付加質量, 等価付加慣性モーメント $\Delta a_{zch}, \Delta a_{ych}, \Delta a_{\theta ch}$ 及び減衰力係数 $\Delta b_{zch}, \Delta b_{ych}, \Delta b_{\theta ch}$ は簡易計算法⁽⁷⁾⁽⁸⁾で動的変動張力を計算して求めた。これらの項は非線形性が強くステーションの運動振幅に強く依存するので, 最初これらの力をゼロとして求めた解を初期値として (1)~(3) 式を繰返し計算法により解いた。

定常波漂流力については線形の運動を (1)~(3) 式を解いて求め, この結果を用いて正則摂動法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾に

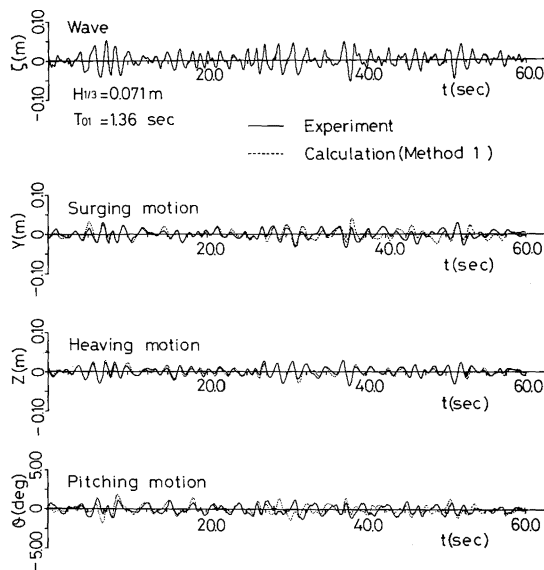


図2 入射波, 運動の時系列 (コイルバネ係留)

より計算した。

4. 実験及び理論計算の結果

4.1. コイルバネ係留の場合

図2にコイルバネ係留の場合の時系列を示す。この状態は非線形性が小さいと考えられる場合である。図は上から順に入射波、前後揺、上下揺、縦揺を表している。横軸は時間である。また、実線が実験結果、点線が成分波法による計算結果である。不規則波を円振動数 $\omega=0.1\sim12.8$ の間の128の成分波にフーリエ級数展開により分解した。この成分波を再合成して求めた時系列と計測された波の時系列はほとんど差のないことが図からわかる。前後揺、上下揺、縦揺の計算結果も計測されたそれぞれの結果とよく一致している。この様に非線形性が小さい場合は、成分波法による計算は実験とよく一致することがわかった。

図3は図2で示した波の時系列をFFT法によりスペクトル解析した結果である。横軸は円振動数、縦

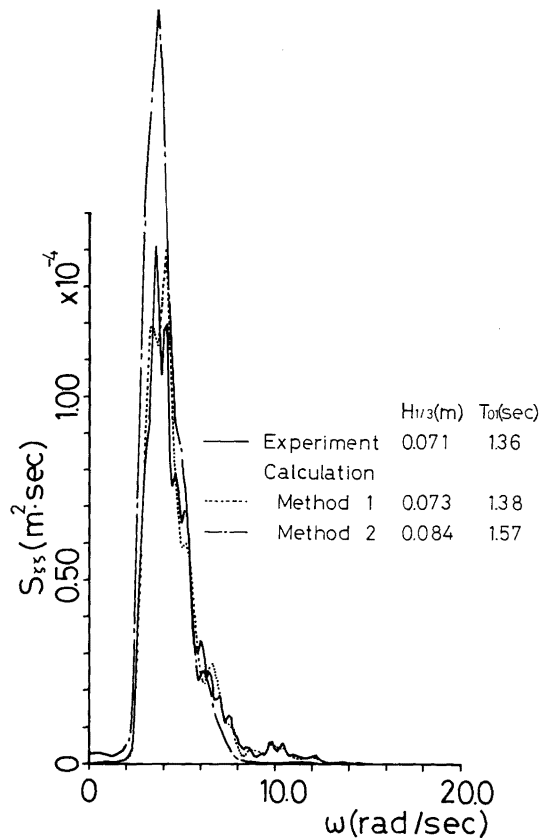


図3 入射波パワースペクトル (コイルバネ係留)

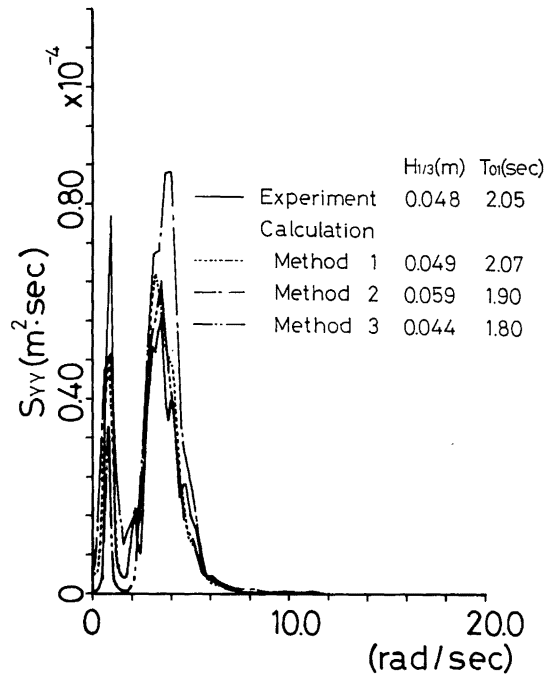


図4 前後揺パワースペクトル (コイルバネ係留)

軸は波のパワースペクトルである。また、実線が実験値のスペクトル解析結果、点線が成分波法により計算した時系列をスペクトル解析したもの、一点鎖線が波形近似法により計算した時系列をスペクトル解析したものである。成分波法による計算はスペクトル解析を行っても実験と非常によく一致している。波形近似法による計算は、平均波周期の所で実験値よりも若干高めに、高周波数領域で若干低めになる傾向がある。

図4は前後揺のスペクトル解析結果である。実線が実験、点線が成分波法による計算、一点鎖線が波形近似法による計算、二点鎖線が応答関数法による計算結果である。成分波法による計算結果は実験とよく一致している。

図5は上下揺のスペクトル解析結果である。成分波法による計算結果は長周期動揺のピーク値が小さいが平均波周期付近では実験とよく一致している。

図6は縦揺のスペクトル解析結果である。長周期動揺を含めてほぼ全周波数領域で成分波法による計算は実験とよく一致している。

以上よりコイルバネ係留の様に非線形性の小さい系の場合、成分波法及び応答関数法によるスペクトル計算が実験結果とよく一致することがわかる。

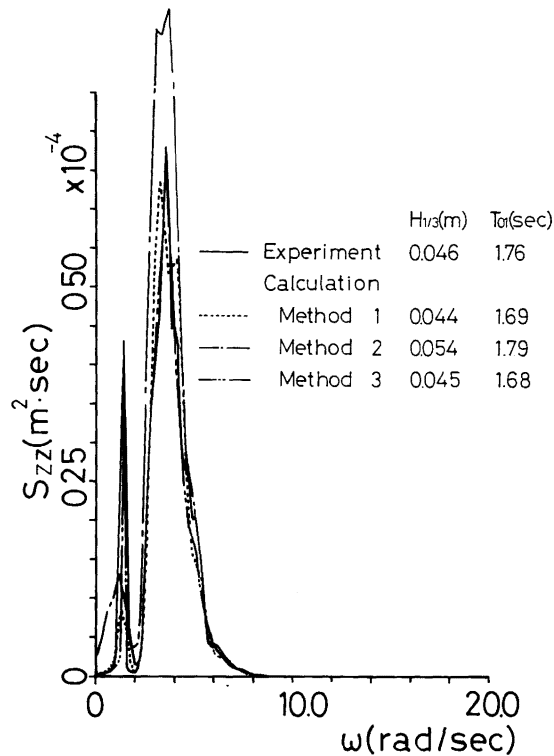


図5 上下揺パワースペクトル (コイルバネ係留)

4.2. チェーン係留の場合

図7はステーションをチェーンで係留した場合の時系列である。この状態はチェーンの動的変動張力により非線形性が強い場合である。入射波はコイルバネ係留の場合と同じ波を使用した。実線が実験結果、点線が成分波法による計算結果である。計算結果は前後揺、上下揺、縦揺ともに実験とよく一致しており運動に関しては成分波法でよい結果が得られることがわかる。

図8は係留鎖上端に働く力の時系列である。上から順に波上側の水平方向張力成分、波上側の垂直方向張力成分、波下側の水平方向張力成分、波下側の垂直方向張力成分である。点線は成分波法による計算結果である。鎖の変動張力のように非線形性の強いものは成分波法で計算すると実験結果よりかなり小さいことがわかる。これは不規則波を成分波に分けると平均波周期近くの周期の成分波が卓越し他の周期の成分波の影響は小さいと考えていたのが実際は広い範囲の成分波に分散しており、個々の成分波の波高が極めて小さいためと思われる。

そこで波形近似法で計算した結果を図9に示す。図8の成分波法による計算と比較すると、波形近似法による計算値は実験とよく一致するようになることがわかる。

運動については波形近似法による計算結果は成分波法で計算したものとあまり差はなかった。

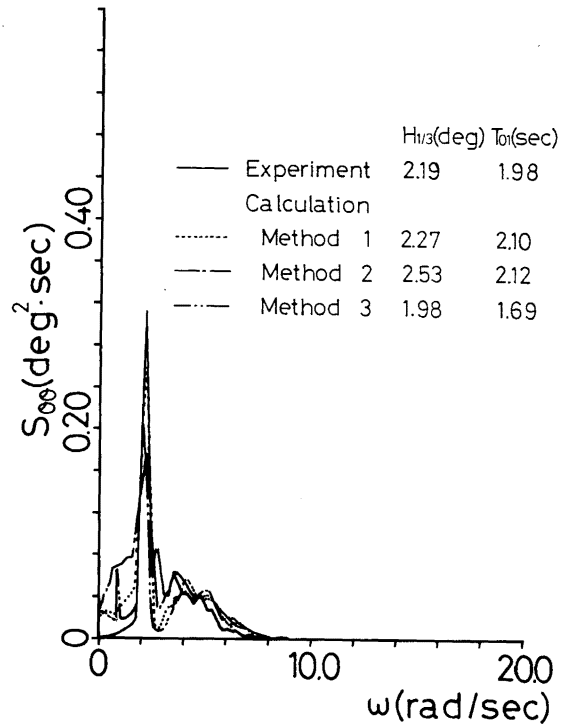


図6 縦揺パワースペクトル (コイルバネ係留)

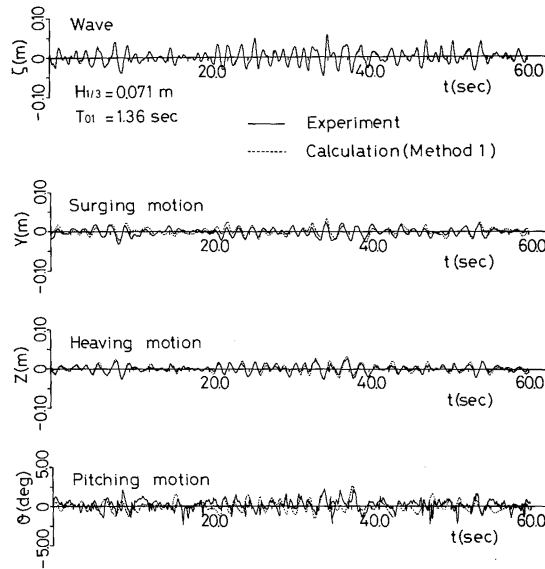


図7 入射波, 運動の時系列 (チェーン係留)

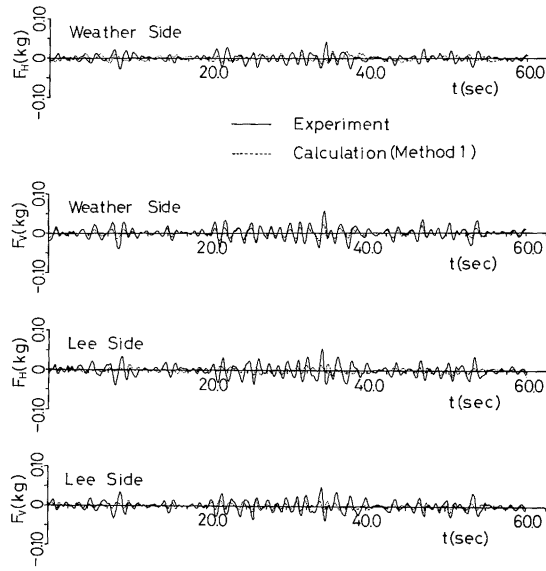


図8 係留鎖上端に働く張力の時系列 (成分波法)

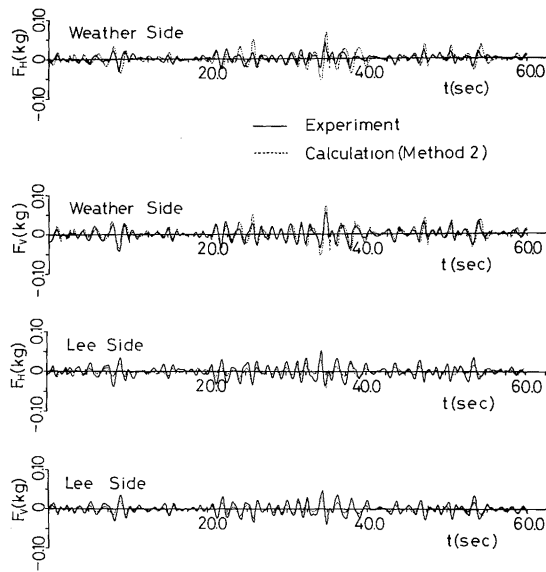


図9 係留鎖上端に働く張力の時系列 (波形近似法)

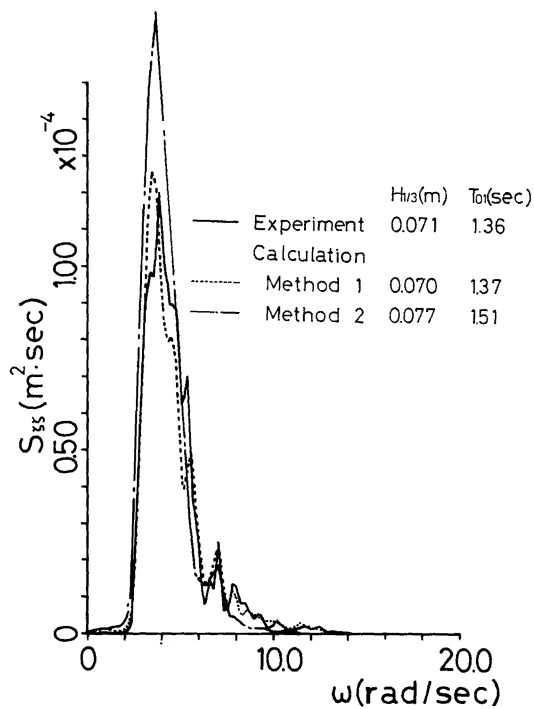


図 10 入射波パワースペクトル (チェーン係留)

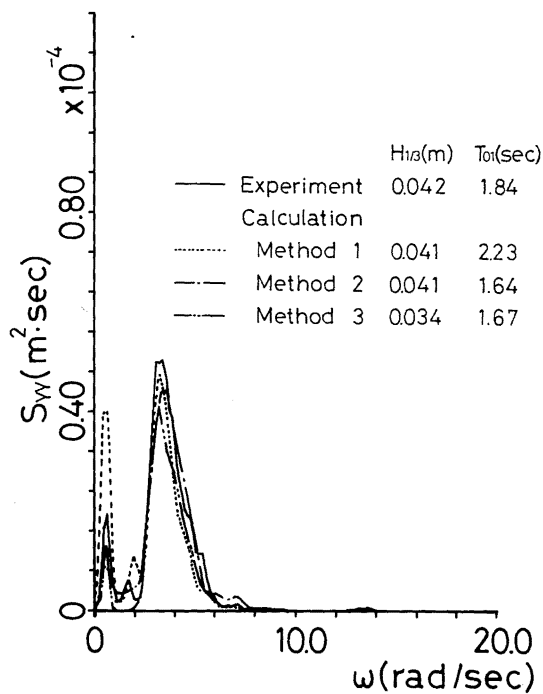


図 11 前後揺パワースペクトル (チェーン係留)

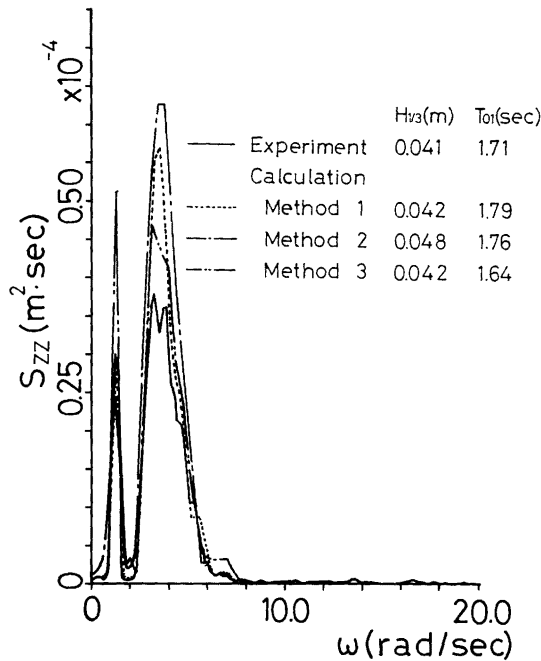


図12 上下揺パワースペクトル (チェーン係留)

図10は波形近似法で求めた波の時系列をスペクトル解析したものである。やはり波形近似法による計算は平均波周期付近の成分を若干高めに評価するようである。

図11は前後揺のスペクトル解析結果である。図4のコイルバネ係留の場合と比較すると鎖の動的影響により長周期動揺が実験値、計算値ともに小さくなっていることがわかる。

図12は上下揺のスペクトル解析結果である。図5のコイルバネ係留と比較すると、長周期動揺は実験では若干小さくなっている様である。

図13は縦揺のスペクトル解析結果である。実験値、波形近似法による計算結果をみると、図6のコイルバネ係留時よりも長周期動揺が小さくなっていることがわかる。また、応答関数法では前後揺の固有周期付近で縦揺を過大に評価する様である。

図14は波上側の張力の垂直方向成分のスペクトル解析結果である。図8、9の時系列からもわかる様に点線の成分波法では小さく見積りすぎる。一点鎖線の波形近似法では改善され実験とよく合っていることがわかる。

以上より非線形性の強いものは波形近似法がよいことがわかる。

図15は等価線形バネ定数を使用した波形近似法による係留鎖変動張力の静的計算結果である。動的影響を入れないと計算の位相が実験結果と異なり、垂直方向成分が実験に比べて非常に小さくなることがわかる。このことは最近の他の研究¹¹⁾でも報告されており、係留鎖そのものの設計の為には係留鎖に加わる流体力などの動的影響を考慮した計算が必要であることが検証された。

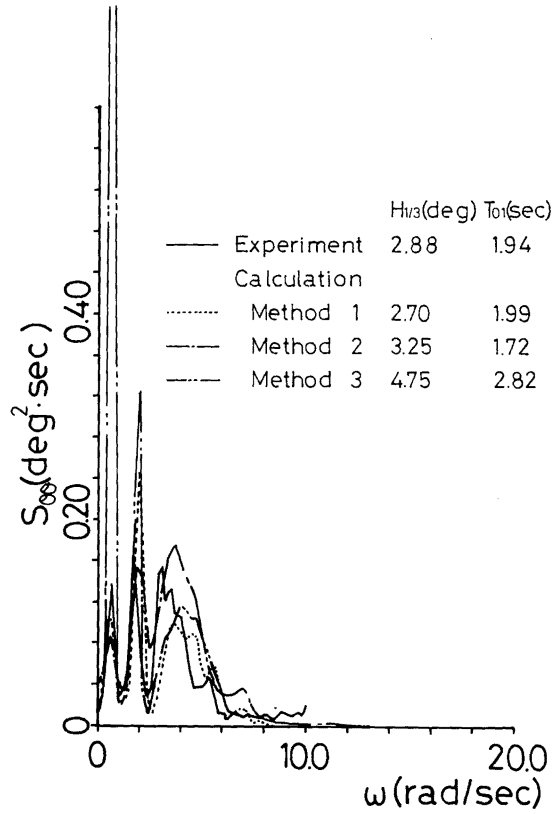


図 13 縦揺パワースペクトル (チェーン係留)

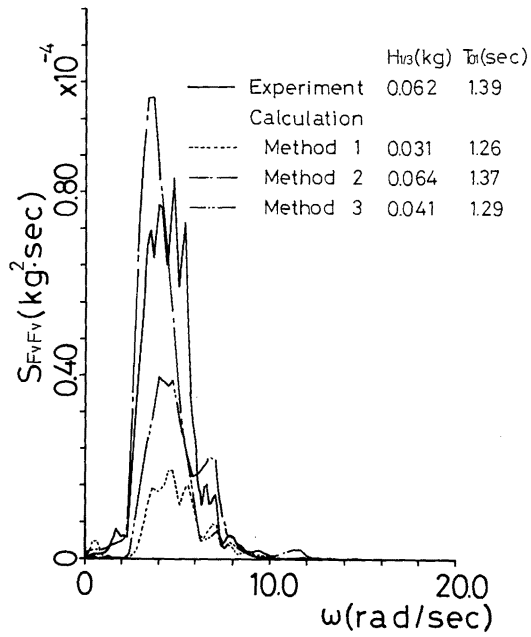


図 14 係留鎖の波上側張力のパワースペクトル

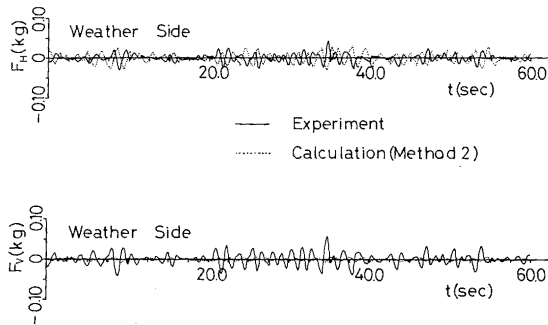


図 15 係留鎖上端に働く張力の時系列(波形近似法, 等価線形バネ定数使用)

5. 結 言

以上の研究結果より, 不規則波中では係留鎖の減衰力によりステーションの長周期動揺がコイルバネ係留と比較して小さくなることが確認された。

また, 係留鎖変動張力の様に非線形性の強いものに関する計算は, 本論文で提案した波形近似法によるとよいことがわかった。

終わりに本研究の一部は文部省科学研究費「エネルギー特別研究」によって行われたことを付記します。また, 計算は応用力学研究所電子計算機室 FACOM M360-AP によって行われた。

参 考 文 献

- 1) 小寺山亘, 中村昌彦: 半潜水式海洋構造物の運動に及ぼす係留鎖に加わる流体力の影響, 九州大学応用力学研究所所報, 第 63 号 (1987).
- 2) J. A. Pinkster: Low Frequency Phenomena Associated with Vessels Moored at Sea, Soc. of Petroleum Engineers of AIME, SPE Paper No. 4837 (1974).
- 3) 小林正典, 島田 潔, 藤平 徹: 複合外力下における係留浮体の応答シミュレーションプログラム, 三井造船技報, 第 125 号 (1985).
- 4) 根間 清, 山上順雄, 清水穂高, 大西登喜夫: 軸対称物体に働く流体力の計算法, 関西造船協会誌, 第 193 号 (1984).
- 5) 根間 清, 池淵哲朗, 山上順雄: 軸対称物体に働く流体力の計算法 (続報) — 上下揺, 縦揺の 2 次の定常力と長周期運動, 関西造船協会誌, 第 196 号 (1985).
- 6) 桑野研一: 二点支持懸垂線とそのバネ定数, 西部造船会性能部会資料 (1968).
- 7) 小寺山亘: 係留浮体の運動と係留鎖張力について, 西部造船会会報, 第 53 号 (1977).
- 8) 栖原寿郎, 小寺山亘, 田才福造, 肥山 央, 渡辺邦雄夫: 振動する繋留鎖の挙動と張力, 日本造船学会論文集, 第 148 号 (1980).
- 9) 経塚雄策: 二次元物体に働く非線形型流体力について (第 1 報), 日本造船学会論文集, 第 148 号 (1980).
- 10) 経塚雄策: 浮体の流体力の三次元影響について, 西部造船会会報, 第 73 号 (1987).
- 11) 栖原寿郎, 小寺山亘, 肥山 央, 古賀洋司: 振動する繋留鎖の挙動と張力 (II), 日本造船学会論文集, 第 152 号 (1983).

(昭和 62 年 5 月 30 日 受理)