

(昭和62年5月 日本造船学会春季講演会において講演)

半潜水式海洋構造物の長周期運動における 波浪中減衰力増加について

正員 齋 藤 公 男* 正員 京 江 宰**
正員 高 木 又 男***

On the Increased Damping for a Moored Semi-Submersible
During Low-frequency Motions in Waves

by Kimio Saito, *Member* Tsukasa Kyoe, *Member*
Matao Takagi, *Member*

Summary

In order to investigate the increased damping for a moored semi-submersible during low-frequency motions in waves, free oscillation tests were conducted both in still water and regular waves. Test results show that the wave effects as well as the viscous effects have on the low-frequency damping and it seems that the interaction effects among columns play an important roll in the increased damping due to wave effects in short waves. Calculations and experiments in regular wave groups were also compared to investigate the effect of the increased damping due to waves on the low-frequency motions.

1 緒 言

緩係留された浮体の長周期運動は、係留系と外力との同調現象と考えられ、その振幅は線形浮体運動に比して数倍大きく、その大きさを的確に推定するためには、減衰力に対する十分な考慮が必要である。

Wichers ら¹⁾は、長周期運動する大型タンカー模型に働く減衰力の波浪中での値は平水中のものより増加することを示し、その増分を wave damping と名付け長周期運動に及ぼす影響を論じた^{2),3)}。また、齋藤⁴⁾、Faltinsen ら⁵⁾は wave damping と波浪中抵抗増加との関連性について考察し、wave damping を wave drift (ing) damping と呼んだ。一方、半潜水式海洋構造物は形状が複雑で、水線面積も小さく船型のものとは異なった特性があると思われる。一般に、半潜水式海洋構造物に働く減衰力の中、ポテンシャル流れに基づく造波減衰力は小さく、波浪中において長周期運動する構造物に対する減衰力についても主として粘性減衰力が増加されている。たとえば、最近では海洋構造物の要素材で

ある円柱に関し、長周期運動と短周期運動が同時に存在する場合の抗力係数を実験的に求めた小寺山⁶⁾の研究がある。また、波浪中長周期運動する半潜水式海洋構造物に対する減衰力を取り扱ったものとしては、安藤⁷⁾、Chakrabarti⁸⁾、Cao ら⁹⁾の実験結果があるが、その特性については、まだ十分解明されていないのが現状である。

そこで、本稿では6本コラムの半潜水式海洋構造物模型を用い、平水中および規則波中において自由動揺実験を行って長周期運動に対する減衰力を求めその特性を調べた。その結果、サージモードの場合は、波周波数が高くなるにつれて減衰力が平水中のものより増加することや、減衰力が波周波数によって変化し、ハンプ・ホローの存在することが認められた。ここでは、ピーク周波数に対する検討よりコラム間の流体力干渉がこの現象の大きな原因であると考えた。この考えの是非は、造波や粘性に関する今後の詳細な検討に待たねばならないが、この種の問題を扱う際の参考になればと考え、ここに報告して諸兄の御批判を仰ぐ次第である。

2 長周期運動に対する減衰力の計測

平水中および波浪中において自由動揺実験を行い、浮体変位の時刻歴から長周期運動に対する相当線形減衰力

* 大阪大学工学部

** 川崎重工業(株) (研究当時大阪大学大学院工学研究科)

*** 日立造船(株)

Table 1 Principal dimensions of semi-submersible drilling rig model (SEMI)

Length of lower hull	L	: 1.287 m
Breadth	B	: 1.076 m
Draft	d	: 0.280 m
Displacement	Δ	: 74.87 kg
Center of gravity	x_G	: at the midship
	y_G	: at the center line
	z_G (KG)	: 0.151 m
Metacentric height	Longi. (LGM)	: 0.028 m
	Trans. (TGM)	: 0.137 m
Radius of Gyration	Roll	: 0.450 m
	Pitch	: 0.352 m

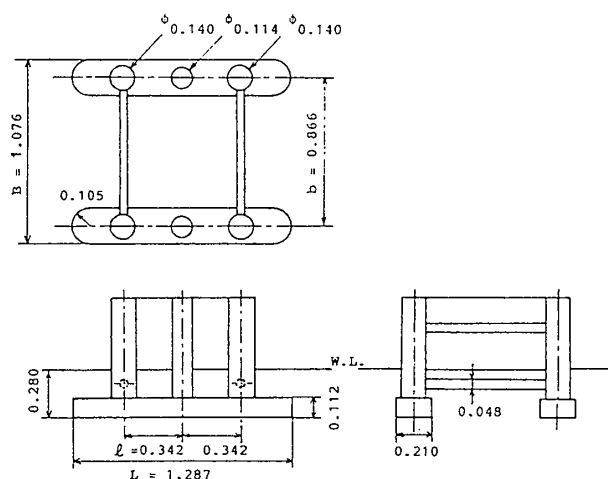


Fig. 1 Plans of SEMI

を求めた。

2.1 供試模型

実験に用いた模型は、Fig. 1 および Table 1 に示すように、6本コラムの半潜水式海洋構造物（以降、浮体と略称する）である。

2.2 実験方法

実験はサージモード（浮体をその長手方向に係留）と、スウェイモード（浮体をその幅方向に係留）の2種類について行った。浮体の係留はつる巻きばねによりあらかじめ変位を与えた状態で係留し、浮体の変位はリングゲージにより計測された力をばね定数で除して求めている。自由動揺実験では、係留浮体に約 10cm の初期変位を与え、その後の変位の時刻歴を平水中および波浪中で計測した。

2.3 実験結果とその考察

平水中および波浪中において計測された浮体変位の時刻歴から動揺振幅を読み取り、横揺減衰力を求めるのと同じ手法により長周期運動に対する相当線形減衰力を求めた。得られた結果は横軸に波周波数の無次元値を、縦軸には減衰力係数をとりサージモード、スウェイモードに対してそれぞれ Fig. 2, 3 に示した。Fig. 2 のサージモードの場合は、波周波数が高くなるにつれて減衰力が

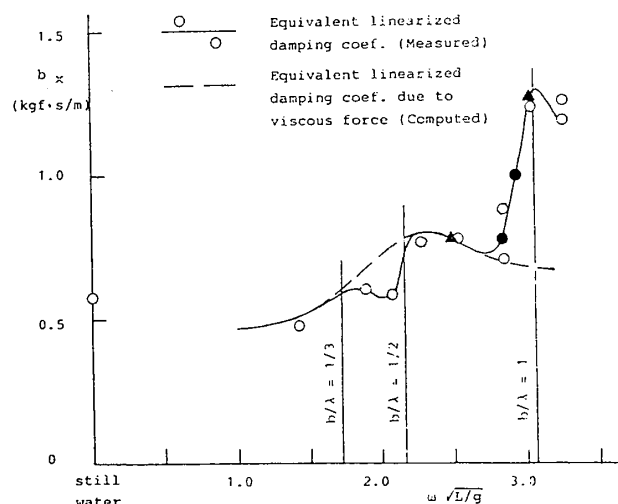


Fig. 2 Low-frequency damping coefficients for surging SEMI

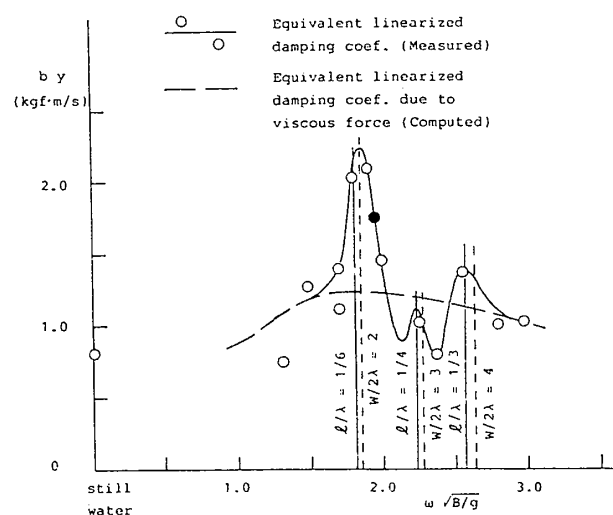


Fig. 3 Low-frequency damping coefficients for swaying SEMI

平水中のものより増加し、Cao ら⁹⁾の実験結果と定性的に一致するものである。しかし、今回の実験結果にはハンプ・ホローの存在が認められ、これについて以下の考察を行った。

(1) コラムの間隔とピーク周波数の関係

コラムの間隔とピーク周波数の関係は、複数本の鉛直円柱に働く波力についての大楠¹⁰⁾や影本ら¹¹⁾の実験や計算結果を見ても必ずしも明確とはいえないが、参考のためピーク周波数における値を図に示した。この場合、その理由は分からないが、コラム間隔が波長 λ の整数分の1となる波周波数に対してほぼピークの周波数が現われているように思われる。すなわち、Fig. 2 のサージモードでは、浮体の幅方向のコラム間隔の距離 b に対し $b/\lambda = 1, 1/2$ が、Fig. 3 のスウェイモードでは、浮体の長手方向のコラム間隔の距離 l に対し $l/\lambda = 1/3, 1/4, 1/6$ にはほぼピークの周波数が対応する。さらに、スウェイモードでは $\omega\sqrt{B/g} = 1.8$ 付近に大きなピークが見られる。

これは $l/\lambda=1/6$ のときの波周波数に対応しているが、このピークをコラム間の流体力干渉のみによるとは考えにくく、別な要因、たとえば、水槽壁（幅 $W=7.8\text{m}$ ）の影響などが考えられる¹²⁾。しかし、ここでは $W/2\lambda=2$ にそのピークの周波数がほぼ対応していることを示すに止どめ、その影響についての流体力学的検討は、今後の課題としたい。

(2) 粘性項を含む振動系に波力が作用した場合の長周期運動に対する減衰力

加藤・木下¹³⁾は、速度の自乗に比例する粘性項を含む振動系に外乱が作用した場合、自由振動の振幅は、外乱のない場合に比べて見かけ上速く減衰することを摂動法並びに数値計算により示した。ここでは数値計算によりこの減衰力を検討する。今、簡単のため、連成項を除いた浮体の前後揺れの運動方程式を記すと(1)式のようになる。

$$\begin{aligned} & \{M_{11} + m_{11}(\omega_0)\} \ddot{x}(t) + N_{11}(\omega_0) \dot{x}(t) \\ & + \frac{1}{2} \rho \left[\sum_i C_{DC} A_{Ci} \{ \dot{x}(t) - \dot{\zeta}_{WX}(t) \} \right. \\ & \times | \{ \dot{x}(t) - \dot{\zeta}_{WX}(t) \} | \\ & + \sum_i C_{DL} A_{Li} \{ \dot{x}(t) - \dot{\zeta}_{WX}(t) \} \\ & \times | \{ \dot{x}(t) - \dot{\zeta}_{WX}(t) \} | \Big] \\ & + c_{11} \dot{x}(t) = F_{WX1}(t) + F_{WX2}(t) \quad (1) \end{aligned}$$

ただし、 M_{11} ：浮体の質量、 c_{11} ：係留系の復原力係数、 $m_{11}(\omega_0)$ 、 $N_{11}(\omega_0)$ ：周波数 ω_0 で定常運動するときの付加質量と減衰力係数、 $\dot{\zeta}_{WX}(t)$ ：波粒子速度の x 方向成分、 $F_{WX1}(t)$ 、 $F_{WX2}(t)$ ：一次および2次のオーダの波浪外力（長周期成分のみを考える）、 A_{Ci} 、 A_{Li} ：コラム、ローハールの投影面積、 C_{DC} 、 C_{DL} ：コラム、ローハールに対する抗力係数で $C_{DC}=1.0$ 、 $C_{DL}=0.7$ と仮定している。また、(1)式の左辺第3項は粘性に基づく減衰力で、各コラムおよびローハールに対するものを代数加算して求められる。

(1)式を用いて初期変位を与えた後の平水中および規則波中での動揺を数値計算により求め、浮体変位の時刻歴から相当線形減衰力係数を得た。結果は Fig. 2, 3 に破線で示すように波浪中において減衰力の増加は認められるが、ハンプ・ホローは示していない。さらに、浸水面積を時々刻々変化した場合の計算も行ったが、上述の減衰力増加にはほとんど変化は見られなかった。

(3) Wave drift damping の推定

斎藤ら⁴⁾は wave drift damping を波漂流力と波浪中抵抗増加量との関係より考察した。すなわち、Fig. 4 に示すように、波の進行方向を波漂流力の正方向とすれば、速度 U で進行する浮体の x 方向の運動方程式は、

$$M\ddot{x} = F_0 - F_D \quad (2)$$

ただし、 M ：浮体の質量、 F_0 ：一般流体力、

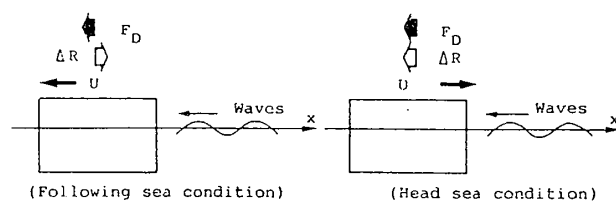


Fig. 4 Relationship between wave drifting forces and added wave resistance

F_D ：波漂流力

このとき、波漂流力と波浪中抵抗増加量 ΔR との関係は、

$$\dot{x} = U > 0 \text{ すなわち、向波のとき } F_D = \Delta R$$

$$\dot{x} = U < 0 \text{ すなわち、追波のとき } F_D = -\Delta R$$

そこで、向波および追波状態に対し速度 U を変化させた場合の ΔR より U と F_D との関係を求め、浮体の適当な速度範囲（長周期運動の振幅×円周波数）を考えてその範囲内で

$$F_D = b_{WX} \dot{x} + F_{D0} \quad (3)$$

と近似し、(3)式を(2)式に代入すると

$$M\ddot{x} + b_{WX} \dot{x} = F_0 - F_{D0} \quad (4)$$

となる。ただし、 F_{D0} は定常漂流力である。

したがって、wave drift damping 係数 b_{WX} は、向波および追波中における波浪中抵抗増加量が分かれば推定できることになる。ここでは浮体の向波および追波中抵抗増加量を波周波数が $\omega\sqrt{L/g}=2.5, 3.04$ の場合について波浪中曳航試験を行い実験的に求めた。得られた結果は、抵抗増加量を縦軸に、向波および追波中前進速度を横軸にとって Fig. 5 に示され、これらの実験点を(3)式に対応して直線近似するとその勾配より b_{WX} が求められる。次に(2)項で得られた波浪中粘性に基づく相当線形減衰力 (Fig. 2 の破線) を加えた値 (図中▲印で示す) を模型実験で求めた長周期運動に対する減衰力 (実線) と比較するとかなり良い一致が見られた。

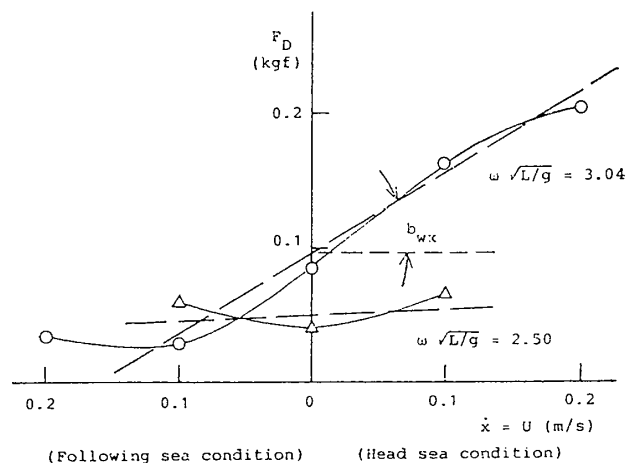


Fig. 5 Linear approximation of wave drifting forces at low advance speed

以上(2)および(3)項の検討より、コラムを有する半潜水式海洋構造物の長周期運動における減衰力にランプ・ホローが生じるのは、コラム間の造波に関する流体力干渉がその主要原因ではないかと考えられる。

3 規則的波群中における長周期運動

Wave drift damping が係留浮体の長周期運動に及ぼす影響を調べるため、2と同じ模型を用いて規則的波群中における浮体の運動を模型実験並びに数値計算により比較した。

3.1 実験方法

ここで用いた波群は、(5)式に示すように2個の振幅等しく周波数の近接した規則波を用いて作製したもので、波振幅 ζ_a を変化させて浮体の運動を計測した。

$$\zeta(t) = \zeta_a \sin \omega_1 t + \zeta_a \sin \omega_2 t \quad (5)$$

ただし、サージモードの場合は $(\omega_1, \omega_2) = (8.203, 7.505 \text{ rad/s})$ と $(8.509, 7.811 \text{ rad/s})$ で、スウェイモードの場合は $(5.998, 5.426 \text{ rad/s})$ である。いずれの場合も $\omega_1 - \omega_2$ がほぼ係留系の固有周波数 ω_0 に等しくなっている。

浮体の運動は、ビデオカメラによって収録された浮体

上の2つの輝点を X-Y 変位量検出装置により追従し、それらをマイクロコンピュータで処理することによって求めた。

3.2 数値計算

数値計算においては(1)式の運動方程式において、左辺に wave drift damping に基づく動揺速度の一乗に比例する $b_{WX}\dot{x}(t)$ を加えた。ここで減衰力係数 b_{WX} は Fig.2 の平均波周波数 $\omega_m = (\omega_1 + \omega_2)/2$ において破線から●印までの値として求めた。

スウェイモードの場合も Fig.3 より同様の方法を用いて b_{WY} を推定した。

3.3 実験結果と計算結果の比較

Fig.6 は、サージモードの長周期運動に及ぼす減衰力の影響を数値計算により求めたものの一例で、定常運動による減衰力 $N_{11}(\omega_0)$ 、粘性に基づく減衰力 $V.D.$ 、wave drift damping b_{WX} の有無が長周期運動に及ぼす影響を調べた。また、計算に用いられた規則的波群の時刻歴や実験結果も共に示されている。

Fig.7~9 は、長周期運動の振幅の2乗平均値の平方根 (root-mean squares) を縦軸に、波の有義振幅 ζ_w の2乗を横軸に示したものである。図中、3本の曲線は

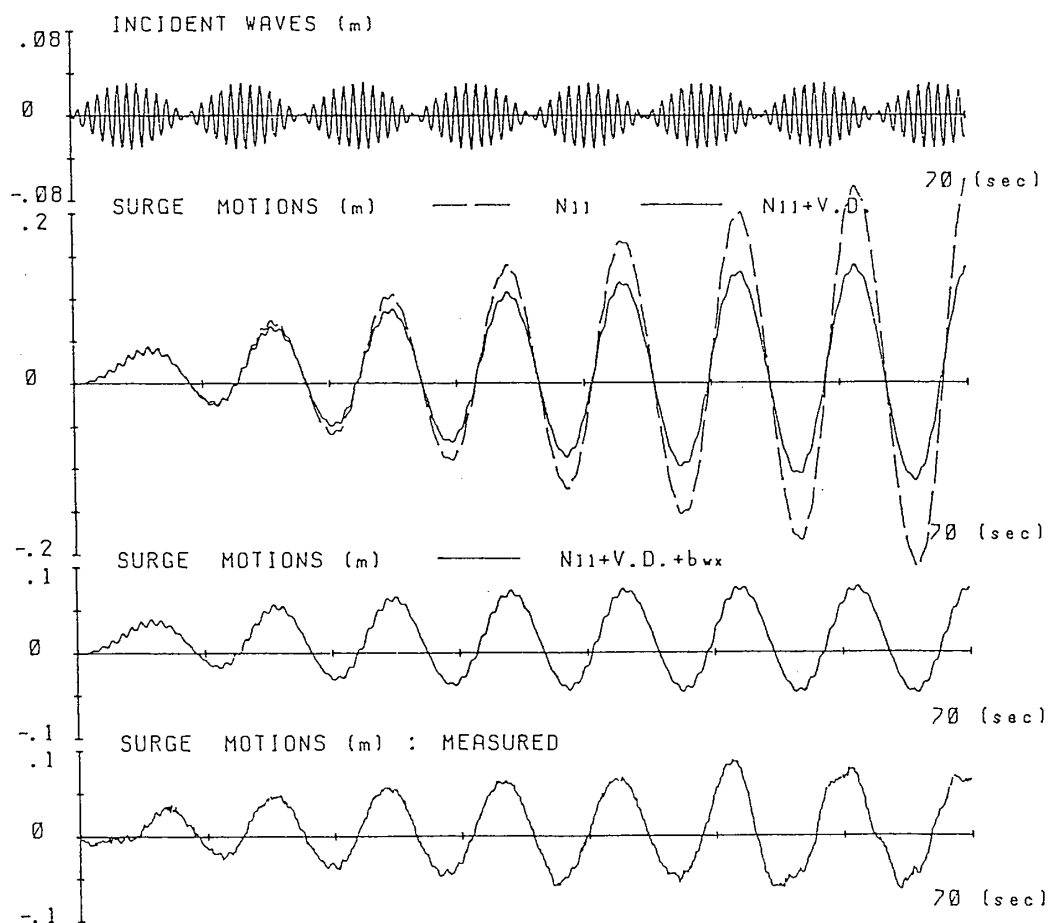


Fig.6 Comparisons between computed and measured time series of surge motions in regular wave groups ($\omega_m \sqrt{L/g} = 2.96$)

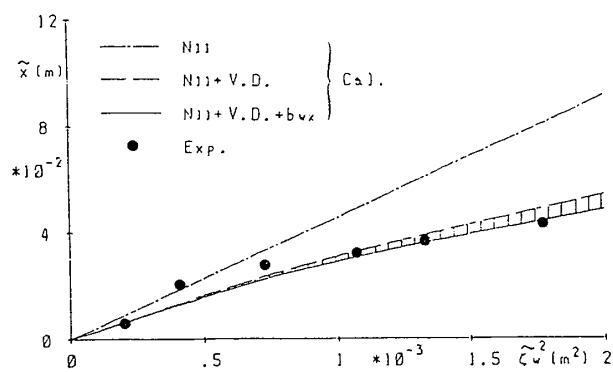


Fig. 7 Comparisons between measured and computed root-mean square values of surge motions in regular wave groups ($\omega_m \sqrt{L/g} = 2.85$)

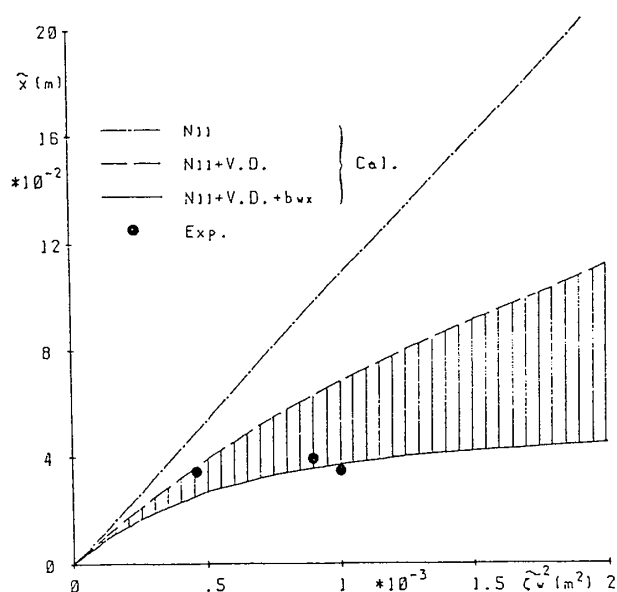


Fig. 8 Comparisons between measured and computed root-mean square values of surge motions in regular wave groups ($\omega_m \sqrt{L/g} = 2.96$)

Fig. 6 の減衰力を変化させた場合の数値計算結果に対応している。また、細い縦線で囲まれた部分は wave drift damping に基づく成分を示している。これらの図より Fig. 7 のサージモードでは、波高が大きくなっても wave drift damping の影響は余り見られない。しかし、Fig. 8 に示すように平均波周波数 ω_m を Fig. 2 のピーク値に近い値に選定すると wave drift damping の影響がかなり大きなものとなることが分かる。一方、Fig. 9 のスウェイモードにおいては、サージモードの場合に比べ粘性に基づく減衰力が大きく、波高の小さい領域では粘性の影響が顕著であるが、波高が大きくなるにつれて wave drift damping の影響が認められるようになる。

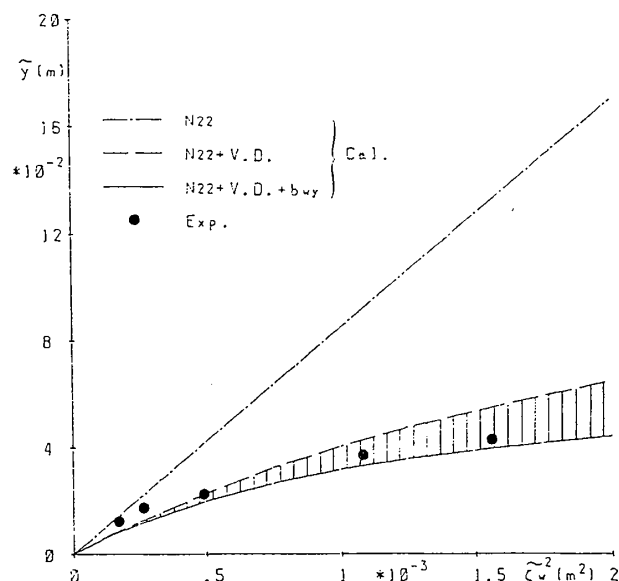


Fig. 9 Comparisons between measured and computed root-mean square values of sway motions in regular wave groups ($\omega_m \sqrt{B/g} = 1.89$)

4 結 言

6本コラムの半潜式海洋構造物模型の長周期運動における波浪中減衰力増加について、模型実験並びに数値計算による検討を行い、以下の結果を得た。

(1) 規則波中長周期運動に対する減衰力を自由動揺実験により求めると、減衰力係数～波周波数曲線にハンプ・ホローが現われる。簡単な数値計算の結果より、その原因が粘性とは考えにくい。サージモードに対するピーク周波数の検討より、波浪中抵抗増加に基づく wave drift damping の成分が認められ、ハンプ・ホローはコラム間の流体力干渉がその主な原因と考えられる。スウェイモードについても同様のことが推察されるが、今回の実験ではその他の要因、たとえば水槽壁の影響等も考えられ、干渉についての詳細な流体力学的検討は、今後の課題としたい。

(2) Wave drift damping が係留浮体の長周期運動に及ぼす影響を、規則的な波群を用いて模型実験並びに数値計算により検討したところ、自由動揺実験で大きな減衰力を示した波周波数において波高が高くなるにつれてその影響の大きいことが認められた。特にサージモードに対しては、波の短い所で wave drift damping の影響がかなりあることが分かった。

終りに本研究の遂行にあたり、終始御激励を賜った大阪大学名誉教授 中村彰一先生に厚くお礼申し上げます。また、模型実験に際し惜しみない協力を頂いた大阪大学大学院修士課程1年生 式田尚人君、学部4年生 小川利明君らにも謝意を表します。

なお、数値計算には大阪大学計算機センター ACOS SYSTEM 1000 を利用したことを付記します。

参 考 文 献

- 1) Wichers, J. E. W. and Sluijs, M. F. van : The Influence of Waves on the Low-frequency Hydrodynamic Coefficients of Moored Vessels, O. T. C. paper, No. 3625 (1982), p. 2313~2319.
- 2) Wichers, J. E. W. : On the Low-Frequency Surge Motions of Vessels Moored in High Seas, O. T. C. paper, No. 4437 (1982), p. 711~718.
- 3) Wichers, J. E. W. and Huijsmans, R. M. H. : On the Low-frequency Hydrodynamic Damping Forces Acting on Offshore Moored Vessels, O. T. C. paper, No. 4813 (1984), p. 315~321.
- 4) 斎藤公男, 高木又男, 大久保寛, 平島充男 : 長周期運動する係留浮体に働く減衰力について, 関西造船協会誌, 第 195 号 (1984), p. 51~59.
- 5) Faltinsen, O. M., Dahle, L. A. and Sortland, B. : Slowdrift Damping and Response of a Moored Ship in Irregular Waves, 5th OMAE Tokyo Symposium, Vol. 1 (1986), p. 297~303.
- 6) 小寺山亘, 中村昌彦, 小林正典 : 波浪中で長周期運動する鉛直円柱に加わる粘性減衰力について, 日本造船学会論文集, 第 159 号 (1986), p. 139~148.
- 7) 安藤定雄, 加藤俊司 : 浮遊式海洋構造物の長周期運動時の流体力係数について, 日本造船学会第 7 回海洋工学シンポジウム (1984), p. 53~62.
- 8) Chakrabarti, S. K. : Moored Floating Structures and Hydrodynamic Coefficients, Proceedings Ocean Structural Dynamics Symposium '84 (1984), p. 251~266.
- 9) Cao, J. -Z., Fu, Y. -G. and Feng, Y. : The Low-Frequency Hydrodynamic Coefficients in Surge for a Semisubmersible, 5th Tokyo OMAE Symposium (1986), p. 311~316.
- 10) 大楠 丹 : 複数本の鉛直円柱に働く波力について, 日本造船学会論文集, 第 131 号 (1972), p. 53~64.
- 11) Kagemoto, H. and Yue, D. K. P. : Interactions Among Multiple Three-dimensional Bodies in Water Waves ; An Exact Algebraic Method, J. Fluid Mech., Vol. 166 (1986), p. 189~209.
- 12) 松井哲哉, 大森博司外 : ピン係留式円筒カラムに働く長周期波漂流力 (第 2 報 規則波中の計測実験), 日本造船学会論文集, 第 160 号 (1986), p. 67~76.
- 13) 加藤俊司, 木下 健 : 速度の自乗に比例する減衰を有する振動及び強制動揺に及ぼす外乱影響について, 第 56 回海洋工学委員会性能分科会資料, OH 36~12 (1983).