係留浮体の波浪中強制動揺試験について (第 2 報)

正員 木 下 健* 正員 高 岩 千 人*

Slow Motion Forced Oscillation Test of Floating Body in Waves (2nd Report)

by Takeshi Kinoshita, *Member* Kazuhito Takaiwa, *Member*

Summary

The previous paper showed results of slow motion forced oscillation tests in regular waves concerning slow drift oscillation of a floating body moored in random seas. Systematic combinations of waveheight, wave frequency, motion amplitude and motion frequency were chosen as test parameters. In equation of hydrodynamic forces which is used for analysis of the measure forces, wave orbital velocity is taken into account in relative velocity to the model in Morison's drag term in this paper, although it was neglected in the previous one. Obtained results of wave drift damping are in much better agreement each others than the previous ones, although waveheight, wave frequency, motion amplitude and motion frequency are different for them.

In addition to a box-shape barge which is tested in the previous paper, tanker and semi-submersible models are newly tested. This paper shows the results of wave drift dampings for these three models as well as drag coefficient increases for them due to waves. Drag coefficient increases due to waves for a tanker and a box-shape barge are less important than those for a semi-submersible.

1 ま え が き

係留浮体の波浪中での長周期運動に対する流体力の研究, 特に波浪中減衰力増加の推定は長周期運動を推定する際重要な問題となる。しかし, 強制動揺実験の難しさとパラメーター (強制動揺の振幅と周期, 波の振幅と周期) の組み合わせの多いことから現象がなかなか明確にはされなかった。

著者らは, 前報¹⁾において, 模型の運動を許すことにより波周波数成分の力を小さくして精度よく長周期成分を検力する事のできる独自の強制動揺装置を開発し, この装置を用いた実験により減衰力と付加質量の各パラメーターに対する依存性を明確にした。

前報では, 波浪中での強制動揺の運動方程式を

$$(M+m)\ddot{x} + d^{total}\dot{x} + \frac{\rho S}{2}C_d|\dot{x}|\dot{x} + kx = f \quad (1)$$

として, 全減衰力増加 d^{total} と付加質量 m を求めた。ここで, M は浮体の質量, ρ は水の密度, S は断面積, C_d は抗力係数, k はばね定数, x は変位, f は力である。以上の式では左辺第 3 項の符号付速度の自乗項は模型の運動速度のみを考えているが, 波粒子との相対速度

を考えるならば左辺第 3 項は

$$\frac{\rho S}{2}C_d \left| \dot{x} + \omega \zeta_a \frac{1}{K}(1 - e^{-Kh}) \cos(\omega t + \alpha) \right| \cdot \left[\dot{x} + \omega \zeta_a \frac{1}{K}(1 - e^{-Kh}) \cos(\omega t + \alpha) \right] \quad (2)$$

と書き換えられる。ここで, K は波数, h は浮体の喫水, ζ_a は波振幅, ω は波の周波数, α は入射波と長周期運動の位相差である。本来は各部材の C_d と α をとるべきであるが, 今回は全体の C_d を考え α は重心位置での値をとることにした。

本報では, この波粒子速度を考慮した運動方程式により前報で示した箱船について解析をおこないこの影響をみた。さらに, タンカーや半潜式海洋構造物についても同じ強制動揺実験と解析をおこない各パラメーターに対する依存性を調べた。また, 半潜式海洋構造物については wave drift damping d の他に抗力係数の波浪中増加分の存在が示唆されたためこの効果も解析モデルで考慮した。

2 実 験 概 要

強制動揺装置と計測方法は前報と同様である。実験模型は, Fig. 1 に示した箱船に加え, 今回は Figs. 2, 3 に示したタンカーと半潜式海洋構造物を使用した。

* 東京大学生産技術研究所

Fig. 1 Model of a barge (unit ; mm)

Fig. 2 Model of a tanker (unit ; mm)

Fig. 3 Model of a semi-submersible (unit ; mm)

Table 1 Principal particulars of each models

	Barge	Tanker	semi-sub.
Length:L	1.6	2.5	1.15 (m)
Breadth:B	0.2	0.39	0.6 (m)
Draft:h	0.2	0.13	0.2 (m)
Volume	0.016	0.11	0.034(m ³)
Natural freq. (rad/sec)	Surge	0.88 1.26	0.52 0.8
	Heave	7.39	8.43
	Pitch	7.3	6.87

Table 2 Combination of parameters of forced surging tests for a tanker

in still water				
spring const.	A spring(5.47kg/m)		D spring(19.23kg/m)	
X_s \ ω_s	0.65	0.73	1.06	1.25 (rad/sec)
0.05	●	●	●	●
0.10	—	●	—	●
0.15	—	●	—	●
0.20 (m)	—	●	—	●

in regular waves												
X_s 0.125 (m)												
ω_s		0.73 (rad/sec)					1.25 (rad/sec)					
ζ_a	ω	4.45	5.94	7.41	8.92	9.93	10.9	4.45	5.94	7.41	8.92	9.93
0.016	—	●	—	●	—	—	—	—	●	—	●	—
0.022	—	●	—	●	—	—	—	—	●	—	●	—
0.030	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
0.035	●	●	●	●	●	—	—	●	●	●	●	—
0.040 (m)	—	●	—	●	—	—	—	—	●	—	●	—

in regular waves				
$\zeta_a=0.035(m)$, $\omega=7.41(\text{rad/sec})$				
X_s \ ω_s	0.65	0.73	1.06	1.25 (rad/sec)
0.05	●	●	●	●
0.10	—	●	—	●
0.15	—	●	—	●
0.20 (m)	—	●	—	●

Table 1 に各模型の主要寸法を示す。各模型とも Surging の固有周期を変えるためばねを2種類使用した。実験水槽の大きさは、30×50×2m である。強制動揺の周波数 ω_s と振幅 X_s また波の周波数 ω と波振幅 ζ_a の組み合わせをタンカーについては Table 2 に、半潜式海洋構造物については Table 3 に示す。なお、 ω_s は強

Table 3 Combination of parameters of forced surging tests for a semi-submersible

in still water						
spring const.	A spring(1.212kg/m)			B spring(2.848kg/m)		
X_s \ ω_s	0.50	0.52	0.55	0.77	0.80	0.84 (rad/sec)
0.05	●	●	●	●	●	●
0.08	●	●	●	●	●	●
0.11	●	●	●	●	●	●
0.14	●	●	●	●	●	—
0.17 (m)	●	●	●	●	●	—

in regular waves													
X_s 0.14 (m)													
ω_s		0.52 (rad/sec)							0.80 (rad/sec)				
ζ_a	ω	4.40	5.40	6.30	7.20	8.10	9.00	10.0	4.40	5.40	6.30	7.20	8.10
0.008	—	●	—	●	—	●	—	—	—	●	—	—	—
0.016	—	●	—	●	—	●	—	—	—	●	—	—	—
0.022	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
0.028	●	●	●	●	●	—	—	—	●	●	●	—	—
0.032 (m)	—	●	—	●	—	—	—	—	—	●	—	—	—

in regular waves		
$\zeta_a=0.028(m)$, $\omega=7.2(\text{rad/sec})$		
X_s \ ω_s	0.52	0.80 (rad/sec)
0.05	—	—
0.08	●	●
0.11	●	●
0.14	●	●
0.17 (m)	●	—

制動揺試験では4波、自由減衰試験では十分に減衰するまでの実験データを low-pass フィルターで処理した後 zero-cross point を読みその平均をとった。 X_s は強制動揺試験では1次のフーリエ係数より得られるが、自由減衰試験の場合、連続して変化する。

3 解析方法

波粒子速度、抗力係数の波浪中増加分を考慮した波浪中での強制動揺の運動方程式は次式である。

$$(M+m)\ddot{x} + d\dot{x} + \frac{\rho S}{2}[C_d + \Delta C_d]\left[\dot{x} + \omega\zeta_a \frac{1}{K}(1-e^{-Kh})\cos(\omega t + \alpha)\right] \cdot \left[\dot{x} + \omega\zeta_a \frac{1}{K}(1-e^{-Kh})\cos(\omega t + \alpha)\right] + kx = f \quad (3)$$

ここで、 ΔC_d は抗力係数の波浪中増加分である。変位 x と符号付速度の自乗項として力 f はフーリエ係数を用いて次式のように表す。

$$x = A_{k_1} \cos \omega_s t + B_{k_1} \sin \omega_s t \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \left[\dot{x} + \omega\zeta_a \frac{1}{K}(1-e^{-Kh})\cos(\omega t + \alpha) \right] \\ & \cdot \left[\dot{x} + \omega\zeta_a \frac{1}{K}(1-e^{-Kh})\cos(\omega t + \alpha) \right] \\ & = A_{k_2} \cos \omega_s t + B_{k_2} \sin \omega_s t \quad (5) \end{aligned}$$

$$f = A_{k_3} \cos \omega_s t + B_{k_3} \sin \omega_s t \quad (6)$$

結果は以上で得られたフーリエ係数を用いて次に示す各項についてまとめた。

1) 抗力係数 C_d

静水中の抗力係数 C_d は運動が正弦的とすると、(3)式の $d=0$, $\Delta C_d=0$ であるので次のように書ける。なお、波浪中も仮に $d=0$, $\Delta C_d=0$ として、次式より求めた抗力係数を C_d^{wave} とする。

$$C_d = \frac{\rho S}{2} \frac{A_{k_3} B_{k_1} - B_{k_3} A_{k_1}}{(A_{k_1}^2 + B_{k_1}^2)} \left/ \left[\frac{A_{k_2} B_{k_1} - B_{k_2} A_{k_1}}{(A_{k_1}^2 + B_{k_1}^2)} \right] \right. \\ \equiv \frac{A_{k_3} B_{k_1} - B_{k_3} A_{k_1}}{\omega_s (A_{k_1}^2 + B_{k_1}^2)} \left/ \left[\frac{4}{3\pi} \rho S \omega_s x_s \right] \right. \quad (7)$$

2) 波浪中での全減衰力増加 d^{total}

$$d^{total} = d + \frac{\rho S}{2} \Delta C_d \frac{A_{k_2} B_{k_1} - B_{k_2} A_{k_1}}{\omega_s (A_{k_1}^2 + B_{k_1}^2)} \\ = \frac{A_{k_3} B_{k_1} - B_{k_3} A_{k_1}}{\omega_s (A_{k_1}^2 + B_{k_1}^2)} - \frac{\rho S}{2} C_d \frac{A_{k_2} B_{k_1} - B_{k_2} A_{k_1}}{\omega_s (A_{k_1}^2 + B_{k_1}^2)} \quad (8)$$

ここで、 C_d は対応する ω_s, x_s の等しい静水中での値を用いる。

3) wave drift damping d

同一波高、同一強制動揺速度の組ごとに d^{total} を分ける。例えば半潜式海洋構造物の場合4つに分けられる。

それぞれの組は wave drift damping d と ΔC_d に対応する一定の成分との和で書くことができるので、

$$d_i^{total} = d_i(\omega) + a_i \quad (i=1 \sim 4) \quad (9)$$

4つの組ごとに他の組との差の自乗が最小になればよいので次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a_1} \sum_{k=1}^m [\{d_1(\omega_k) - d_2(\omega_k)\}^2 \\ + \{d_1(\omega_k) - d_3(\omega_k)\}^2 + \{d_1(\omega_k) - d_4(\omega_k)\}^2] &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial a_2} \sum_{k=1}^m [\{d_2(\omega_k) - d_1(\omega_k)\}^2 \\ + \{d_2(\omega_k) - d_3(\omega_k)\}^2 + \{d_2(\omega_k) - d_4(\omega_k)\}^2] &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial a_3} \sum_{k=1}^m [\{d_3(\omega_k) - d_1(\omega_k)\}^2 \\ + \{d_3(\omega_k) - d_2(\omega_k)\}^2 + \{d_3(\omega_k) - d_4(\omega_k)\}^2] &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial a_4} \sum_{k=1}^m [\{d_4(\omega_k) - d_1(\omega_k)\}^2 \\ + \{d_4(\omega_k) - d_2(\omega_k)\}^2 + \{d_4(\omega_k) - d_3(\omega_k)\}^2] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここで m は波周波数の数である。

(9) 式を (10) 式に代入して $a_1 \sim a_4$ を求めるが、このまま計算を行うと方程式が特異になるので最初 $a_1=0$ において $a_2 \sim a_4$ を求める。そして波粒子速度運動速度比零で ΔC_d が零の値をもつように a_1 を定め $a_2 \sim a_4$ を決める。

4) 抗力係数の波浪中増加分 ΔC_d

$$\Delta C_d = (d^{total} - d) \left/ \left[\frac{\rho S}{2} \frac{A_{k_2} B_{k_1} - B_{k_2} A_{k_1}}{\omega_s (A_{k_1}^2 + B_{k_1}^2)} \right] \right. \quad (11)$$

5) 付加質量 m

$$m = \frac{k}{\omega_s^2} - \frac{A_{k_1} A_{k_3} + B_{k_1} B_{k_3}}{\omega_s^2 (A_{k_1}^2 + B_{k_1}^2)} \\ + \frac{\rho S}{2} (C_d + \Delta C_d) \frac{A_{k_1} A_{k_2} + B_{k_1} B_{k_2}}{\omega_s^2 (A_{k_1}^2 + B_{k_1}^2)} - M \quad (12)$$

なお、今回は右辺第3項は実際には零としている。

4 解析結果

4.1 抗力係数

Figs. 4, 5 はタンカーと半潜式海洋構造物の静水中の抗力係数 C_d を表したもので、横軸には K_c 数をとった。次式はここで使用した K_c 数の定義式である。

$$K_c = \frac{2\pi x_s}{B} \quad (13)$$

ここで、 B は模型の幅である。なお、今回の実験のレイノルズ数 ($\omega_s x_s L / \nu$, L : 模型の長, ν : 動粘性係数)

Fig. 4 Drag coefficients of a tanker driven from forced surging tests in still water— K_c number dependence—

Fig. 5 Drag coefficients of a semi-submersible driven from forced surging tests in still water— K_c number dependence—

Fig. 6 Ratio of drag coefficients in waves to ones in still water of a semi-submersible—velocity ratio dependence—

はタンカーで約 $7.2 \times 10^4 \sim 5.5 \times 10^5$, 半潜式海洋構造物で約 $2.5 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^5$ である。Fig. 4 の実線と一点鎖線は2種類のばねによる自由減衰試験より求めた C_d であり、Fig. 5 のマークは強制動揺試験の結果である。 C_d は K_c 数により変化しており、半潜式海洋構

Fig. 7 Wave drift damping coefficients of a barge by forced surging tests

Fig. 8 Wave drift damping coefficients of a barge by free damping tests

造物の強制動揺試験と自由減衰試験の結果はよく一致している。なお、破線は摩擦による抗力係数の理論値¹⁾であり、半潜式海洋構造物の場合は実験値に比べ小さく、渦成分が大きい事を示している。

Fig. 6 は、半潜式海洋構造物の波浪中での減衰力をすべて抗力係数の変化として(7)式により得られたものである。横軸の強制動揺速度に対する波粒子速度の比と共に抗力係数が増加している傾向がみられるが、異なる運動速度、波振幅等のデータが含まれているため速度比が大きくなるほど値が幅をもつ。

4.2 wave drift damping

Figs. 7, 9, 11 は箱船、タンカー、半潜式海洋構造物の wave drift damping d を波周波数でまとめたものである。また Figs. 8, 10, 12 はそれぞれに対応する自由減衰試験の解析結果である。データは波振幅と運動速度の等しいものが同じマークになっている。実線は波漂流力の傾きより求めた計算値¹⁾である。

モデル別に考察をおこなう。

○箱船 データは自由減衰試験の結果も含め良いまとまりを示している。計算値との比較は値に定数分の差が

Fig. 9 Wave drift damping coefficients of a tanker by forced surging tests

Fig. 10 Wave drift damping coefficients of a tanker by free damping tests

Fig. 11 Wave drift damping coefficients of a semi-submersible by forced surging tests

Fig. 12 Wave drift damping coefficients of a semi-submersible by free damping tests

みられるが形状についてはよく似ている。この模型の場合、 d^{total} のデータのまとまりが良く、 $\Delta C_d=0$ として $d=d^{total}$ とすることもできる。

○タンカー 実験データのまとまりは箱船同様とても良く、この模型についても抗力係数の波浪中増加分は無視できる。計算値との比較は、計算値の極大値の点で良く一致しているが波周波数依存の形状については極小値近傍での実験を行なわなかったため現段階では分からない。

○半潜式海洋構造物 この模型の場合、抗力係数の波浪中増加分の影響がみられた。wave drift damping のまとまりは良く、計算値との比較では波周波数依存の形状が良く似ている。

Figs. 13, 14, 15 は各モデルの波漂流力係数の実験値と理論値を示したもので、wave drift damping の計算値はこれらの理論値の傾きから求めた¹⁾。Fig. 14 の理論線の形状が二つの山にはっきりと分かれているが、これは heave の影響によるものである。最初の山から谷にかけては heave の発散波が散乱波と同位相になり heave

Fig. 13 Steady drift force of a barge

Fig. 14 Steady drift force of a tanker

Fig. 15 Steady drift force of a semi-submersible

応答の形状とともに谷をもつが次の山からは逆位相になりさらに次の谷から散乱波が発散波に卓越して波周波数と共に上昇している。

4.3 抗力係数の波浪中増加分

Figs. 16, 17 は箱船、半潜式海洋構造物の抗力係数の波浪中増加分を波粒子速度運動速度比でまとめたものである。Fig. 16 はほとんど1近傍にデータが集まり抗力係数は波の影響を受けていないことがわかる。それに

Fig. 16 Increase of drag coefficients of a barge —velocity ratio dependence—

Fig. 17 Increase of drag coefficients of a semi-submersible —velocity ratio dependence—

比べ、Fig. 17 では波による影響を受けて変化している。1.5 倍程度にも値が大きくなる場合もある。これは実験誤差の他に各パラメーターの組み合わせによる影響と考えられる。

Fig. 18 はモデル別に抗力係数の波浪中増加分の変化を示したもので、箱船とタンカーに比べ半潜式海洋構

Fig. 18 Drag coefficients of each models —velocity ratio dependence—

Fig. 19 Added mass of a tanker driven from forced surging tests in still water —Kc number dependence—

Fig. 20 Added mass of a semi-submersible driven from forced surging tests in still water —Kc number dependence—

造物の変化の値が大きいことがわかる。

4.4 付加質量

Figs. 19, 20 はタンカーと半潜式海洋構造物の静水中の付加質量を、横軸を K_c 数に取りその依存性を調べたものである。両模型の結果とも K_c 数で付加質量に変化が認められるがその変化は小さい。図中の棒線は3次元特異点分布法によるポテンシャル流の付加質量の理論値と摩擦による成分である。両者の和は実験値に比べて少し小さく渦成分による付加質量も存在することを示している。図中に自由減衰試験から得られた付加質量の無次元値も示している。

5 結 言

前報の箱船に続きタンカーと半潜式海洋構造物について波浪中の長周期強制動揺試験を行った。今回は波粒子速度と抗力係数の波浪中増加分の影響を考慮した解析を行った結果、以下の傾向がほぼ示された。

1) 抗力係数 C_d は静水中では K_c 数により変化する (Figs. 4, 5)。そして全減衰力を C_d の形で表した場合、波浪中では、波粒子速度運動速度比とともに増加する (Fig. 6)。

2) 箱船とタンカーの波浪中での全減衰力増加を波周波数をパラメーターとしてみたものは自由減衰試験の結果を含めデータのまとまりがよく、抗力係数の波浪中増加は小さく波浪中での全減衰力増加を wave drift damping と考えることができる (Figs. 7, 8, 9, 10)。半潜式海洋構造物の結果は抗力係数の波浪中増加分の存在を示唆する。なお wave drift damping は波漂流力を用いた近似式による計算値と大略一致する (Figs. 11, 12)。半潜式海洋構造物の場合、自由減衰試験は波浪中で早く減衰してしまうため長いデータが得にくく解析結果にばらつきが生じ易いので強制動揺試験の方が減衰力を得るには適している (Fig. 12)。

3) 抗力係数の波浪中増加分は、箱船とタンカーの場合には顕著に見られないが、半潜式海洋構造物ではデ

ータに幅があるものの速度比とともに1.5倍程度にもなることが示される (Figs. 16, 17, 18)。このことは、半潜式海洋構造物の減衰力が箱船やタンカーのそれと異なり波漂流力により粘性抗力の成分が大きいこと、箱船のように角がなく渦放出点が固定されないこと等と関係していると考えられる。

4) 付加質量はポテンシャル流成分と摩擦成分の和より少し大きく、渦成分が存在する (Figs. 19, 20)。

謝 辞

本研究に御協力いただいた日本大学の増田光一助教授、同大学院生村上高宏君、東大生研宮島省吾助手に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 木下 健, 高岩千人: 係留浮体の波浪中強制動揺試験について, 日本造船学会論文集, 第162号 (1987), pp. 251~258.