

浅海における正方形浮遊構造物にかかる波漂流力

P. S. Renukaradhya*. 長崎 作 治**

1. 概 要

大水深に設置される海洋構造物は、固定構造物より浮遊構造物の方が経済的に設置できるので、近年広く用いられてきている。

浮遊構造物は、係留ラインによって定置されるので、波浪、風、流れなどにより構造物に加わる漂流力を算定し、これに対して安全な係留設計を行なうことが必要であり、特に、波漂流力は最も考慮すべき外力といえる。

深海における波漂流力についての研究は多いが、浅海における波漂流力に関する研究は少ない。浅海の場合、波漂流力は、浅海、構造物の喫水深、質量輸送などの影響を受ける。

本研究は、深海、浅海における規則波による波漂流力のモデル実験値、理論計算値を求め、比較検討し、それより波漂流力に前述のことがどのように影響するか求めた。

2. 波 漂 流 力

浅海における波漂流力は次式により計算できる。

$$F_d = n \rho g C_s^2 [H/2]^2 B \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで

$$n = 1/2[1 + 2kh/\sinh(2kh)] \quad \dots\dots\dots (2)$$

h が無限大の時、 n は $1/2$ となり (1) 式は次式¹⁾のようになる。

$$F_d = 1/2 \rho g C_s^2 [H/2]^2 B \quad \dots\dots\dots (3)$$

漂流力係数 C_s は、反射係数とも呼ばれ次に示す方法により求められる。

① 前後ゆれと上下ゆれの位相差 $\varepsilon_y, \varepsilon_x$ を井島教授の理論²⁾より計算し、(4) 式²⁾を用いて求める。

$$C_s = \cos(\varepsilon_y - \varepsilon_x) \quad \dots\dots\dots (4)$$

② 前後ゆれと上下ゆれとの位相差 $\varepsilon_y, \varepsilon_x$ を実験により実測し、(4) 式を用いて求める。

③ 波漂流力 F_d を実験により実測し、(1) 式を用いて C_s を計算し求める。

④ 入射波エネルギーは、反射波エネルギーと伝達波

エネルギーとに分けられる。そして、次式は、エネルギー法則を適用したものである。

$$a_I^2 = a_R^2 + a_T^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

上式を変形し、両辺を a_I^2 で割ると

$$\frac{a_R^2}{a_I^2} = 1 - \frac{a_T^2}{a_I^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

上式の左辺は、反射係数 C_s^2 と同様なものである。つまり、 C_s は次式により計算される。

$$C_s = [1 - (a_T/a_I)^2] \quad \dots\dots\dots (7)$$

⑤ 次に示すヒーリーの方法により反射係数を求める。

$$C_s = \frac{[a_{\max} - a_{\min}]}{[a_{\max} + a_{\min}]} \quad \dots\dots\dots (8)$$

反射波の極大、極小振幅 $a_{\max}, a_{\min}$ は、波高計を用いて実測する。

3. 実 験

実験は、東海大学海洋学部の二次元水槽および平面水槽で実施した。浮遊構造物の寸法を $100 \times 100 \times 70 \sim 20$ mm とし、縮尺 1 : 200 のモデルを用いて、浅海および深海で喫水深を変化させて実験を行なった。

モデル実験条件を表-1に示す。なお、モデルの重心は、モデル内部に適当な重さを加える事により調整した。

モデルの諸特性は、表-2に示される通りである。

浅海、及び深海の実験装置を図-1、2に示す。

実験は、次の4つについて測定した。

① 前後ゆれと上下ゆれの位相差の測定：前後ゆれと上下ゆれの測定は、モデルの重心位置に加速度計を取り付け、オシログラフに記録させ、その位相差を読み取り、(4) 式を用いて求めた。

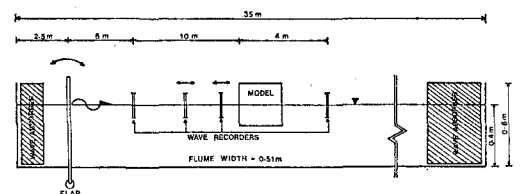


図-1 Experimental set-up in shallow water

* 学生会員 東海大学大学院海洋工学専攻

** 正 会 員 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科

表-1 Principal particulars of prototype and model to a scale of 1:200

Serial Number	Size		Draft		Weight		GM		MB		BG		Distance of CG above the base	
	Proto (m)	Model (cm)	Proto (m)	Model (cm)	Proto (tons)	Model (kg)	Proto (m)	Model (cm)	Proto (m)	Model (cm)	Proto (m)	Model (cm)	Proto (m)	Model (cm)
1	100×100×20	50×50×20	10	5	103 000	12.88	-1.06	-0.53	83.33	41.67	82.27	41.14	6.06	3.03
2	100×100×30	50×50×20	20	10	206 000	25.75	0.80	0.40	41.67	20.84	42.47	21.24	9.20	4.60
3	100×100×40	50×50×40	30	15	309 000	38.63	2.44	1.22	27.78	13.89	30.22	15.11	12.56	6.28
4	100×100×50	50×50×40	40	20	412 000	51.50	3.65	1.83	20.83	10.42	24.48	12.24	16.35	8.18
5	100×100×60	50×50×60	50	25	515 000	64.38	4.69	2.35	16.67	8.34	21.36	10.68	20.31	10.16
6	100×100×70	50×50×60	60	30	618 000	77.25	5.65	2.83	13.89	6.95	19.54	9.77	24.35	12.18

G: Centre of gravity, M: Meta centre, B: Centre of buoyancy

表-2 Salient features of model study

Model scale	1/200					
Water depths	40 cm			110 cm		
Wave heights	2.0 cm to 13.6 cm			1.1 cm to 2.0 cm		
Wave periods	0.8 sec to 2.5 sec			0.5 sec to 2.0 sec		
Model drafts (cm)	5	10	15	20	25	30
Natural periods in heaving (sec)	1.10	1.20	1.40	1.50	1.60	1.70

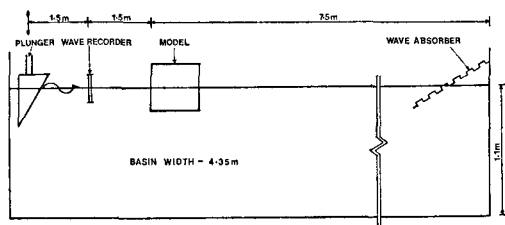


図-2 Experimental set-up in deep water

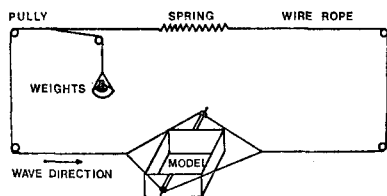


図-3 Measurement of wave drift force

② 漂流力の測定: 規則波進行方向における波漂流力は, 図-3 に示されるように, 反対方向にわたるウェイトで, 作用力を釣合わせることによって測定し, (1) 式を用いて C_s を求めた。

③ 浅海の場合: 反射係数は, 入射波高および伝達波高を実測し, 振幅を求め, (7) 式を用いて計算した。

④ 浅海の場合: $a_{\max}$ 及び $a_{\min}$ は, モデル前面において, 移動式波高計により実測し, ヒーラーの方法 (8) 式を用いて反射係数を求めた。

4. 結果および考察

4.1 浅海条件

(1) 漂流力係数 C_s と波振動数の関係

図-4 は, C_s と波振動数 ω を無次元化した $\omega^2/g \cdot B/2$ との関係を示したものである。

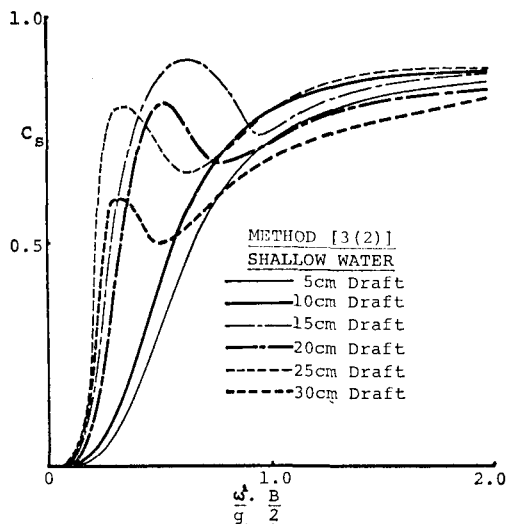


図-4 Relationship between circular wave frequency and drifting coefficient in shallow water (Based on actual measurement of drift force-[3②])

C_s は, すべての喫水深に対して, 周波数 ($1/T$) が 0.4 以下 (現場では, 周期 35 sec 以上) の時, 無視できるほど小さい。波振動数が 0.4 から 0.8 に増加 (周期が 35 sec から 14 sec に減少) すると, C_s は, ほぼ 0 から最大値, 約 0.8 に増加する。

C_s は, 喫水深が大きく, 波長が長いほど大きくなる。喫水深が 10 cm (20 m) 以深の場合, C_s は, 周期 2 sec 以下になると急激に増加し, その後, わずかに減少し, 再び増加しはじめ, 最大値となる。この傾向は, 図-4 に見られるように, 喫水深の増加に伴い, おだやかにな

り、長周期の方向に移動する。周期 1 sec (14 sec) 以下となると、 C_s はすべて喫水深に対して最大値 1.0 に近づく。周期 1 sec から 2.5 sec (14 sec から 35 sec) の間では、実験値より理論値の方が大きくなり、実験値と理論値は一致しない。浅海、質量輸送、構造物の喫水による影響は、喫水深に伴って増加し、喫水深 30 cm (60 m) の時、 C_s は、深海条件時より 30% 大きくなる。喫水深 60 m、波高 10 m、周期 14 sec 時に作用する波漂流力の理論計算値は 1700 トン、これに対して実験より求めた波漂流力換算値は 800 トンである。

(2) 漂流力係数 C_s と波形こう配 H/L の関係

H/L が 0.015 よりも小さい時、 C_s は無視できるほど小さい。しかし H/L が 0.015 を越えると C_s は急激に増加する。この増加傾向は、喫水深が大きいくほど急である。 C_s の理論値は喫水深の増加に伴って、実験値よりも大きくなる。喫水深 10 m、波高 10 m、波形こう配 0.1 時に作用する波漂流力の理論計算値は 1250 トン、これに対し、喫水深 60 m、波高 10 m、波形こう配 0.025 時では 1700 トンである。

(3) 漂流力係数 C_s と波長 (L) と構造物の長さ (B) の比 L/B の関係

L/B が 0 から 0.8 に増加すると、実験値 C_s は 1 か

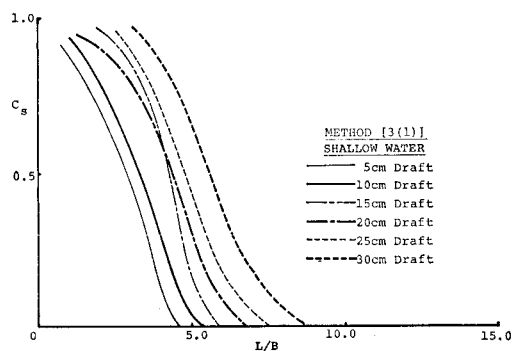


図-5 Relation between wave length to model length ratio and drifting coefficient in shallow water (Based on phase differences-[3(1)])

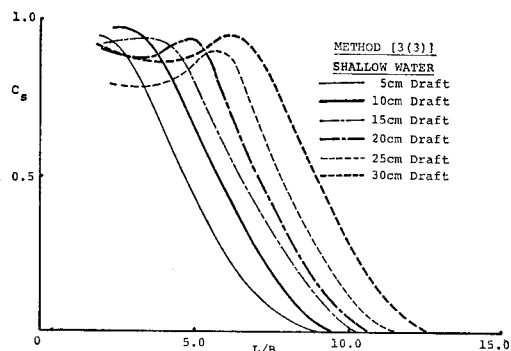


図-6 Relation between wave length to model length ratio and drifting coefficient in shallow water (Based on energy consideration-[3(3)])

ら 0 に減少する。水深の 40% 以下の喫水深では、波長 2.0 m (400 m) 以上の時、 C_s は無視できる (図-5, 6)。

(4) 2①, 3①, 3②, 3③ の方法によって得られた漂流力係数 C_s の比較

図-7, 8, 9 は、喫水深 10 cm, 20 cm, 30 cm (20 m, 40 m, 60 m) において、3 種の方法によって得られた実験値と理論値 C_s の比較を示している。位相差の読み取

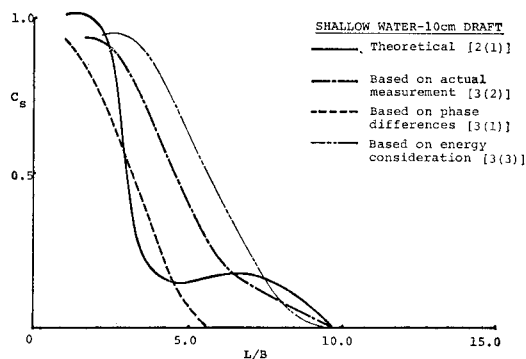


図-7 Comparison of drifting coefficients from different methods [2(1), 3(1), 3(2), 3(3)]-shallow water, 10 cm draft

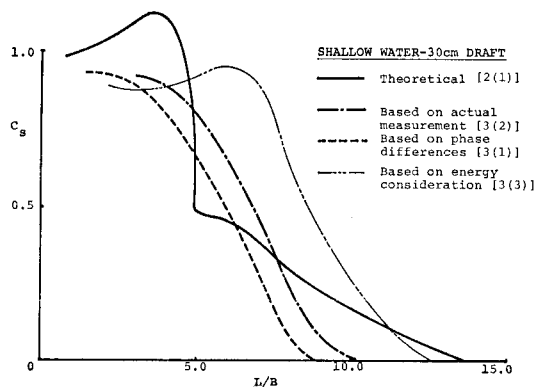


図-8 Comparison of drifting coefficients from different methods [2(1), 3(1), 3(2), 3(3)]-shallow water, 20 cm draft

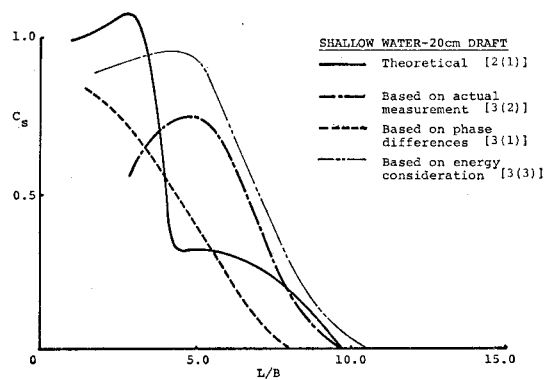


図-9 Comparison of drifting coefficients from different methods [2(1), 3(1), 3(2), 3(3)]-shallow water, 30 cm draft

りに際しては、人為的誤差が加わり易いにもかかわらず、実験値と理論計算値はよく一致している。

また、ヒーラーの方法によって求めた C_s も他の値と一致している。

4.2 深海条件

(1) C_s と波振動数の関係

図-10 に C_s と $\omega^2/g \cdot B/2$ の比較を示す。 C_s は、3つの喫水深に対し、波振動数が 0.7 以下の時、無視できる。言い換えれば、漂流力は、周期 1.4 sec (20 sec) 以上の時、無視されると言える。

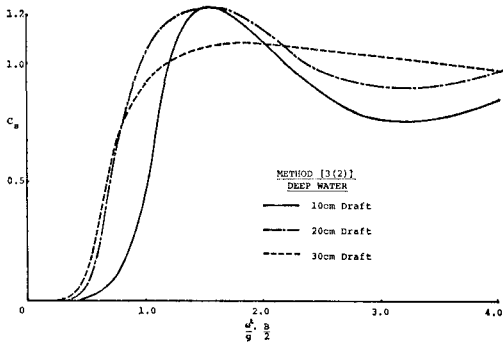


図-10 Relation between circular wave frequency and drifting coefficient in deep water-(Based on actual measurement of drift force-[3 ②])

波振動数が 0.7 から 1.2 に増加 (周期 20 sec から 17 sec に減少) すると、 C_s は 0 から 1.2 に急激に増加する。このことは、各々の喫水深の場合に対して言える。深海条件では、理論値と実験値はよく一致している。現場において作用する波漂流力は、波高 10 m, 周期 17 sec 時で、全喫水深に対し 1 800 トンになる。

(2) C_s と H/L の関係

浅海の場合と同様に、 H/L が 0.015 より小さい時、 C_s は無視できるが、 H/L が 0.015 から 0.03 に増加すると、 C_s は 1.1 に急激に増加する。 H/L がこれ以上になると、 C_s は約 1.0 で一定となる。この変化は全喫水深に対して同様である。波高 10 m, 波形こう配 0.03 時の波漂流力は 1 250 トンである。

(3) C_s と L/B の関係

L/B が 0 から 0.6 に増加すると、 C_s は 1.0 から 0.1 に急激に減少する。このことから、波漂流力は、波長が構造物の長さの 2.5 から 3 倍以上の場合、無視できると言える。

(4) 2 ①, 3 ①, 3 ② の方法によって得られた C_s の比較

図-11, 12, 13 は、喫水深 10 cm, 20 cm, 30 cm (20 m, 40 m, 60 m) の時、3 ①, 3 ② による実験値 C_s と理論計算値の比較を示したものであり、図より、各々一致していると言える。

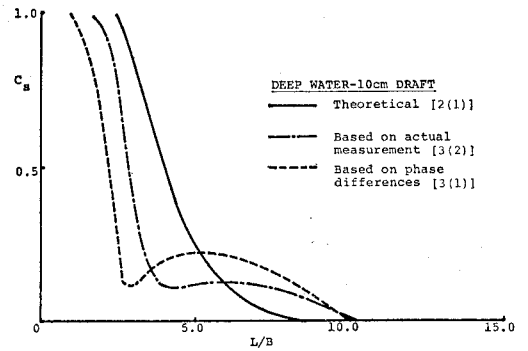


図-11 Comparison of drifting coefficients from different methods [2 ①, 3 ①, 3 ②], deep water, 10 cm draft

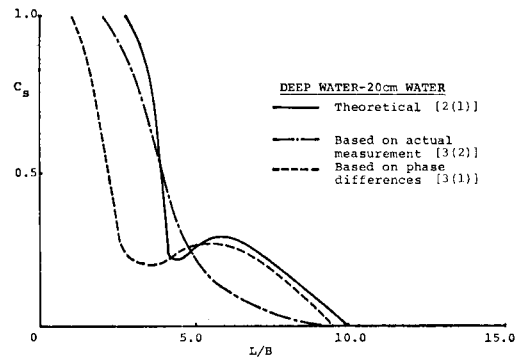


図-12 Comparison of drifting coefficients from different methods [2 ①, 3 ①, 3 ②], deep water, 20 cm draft

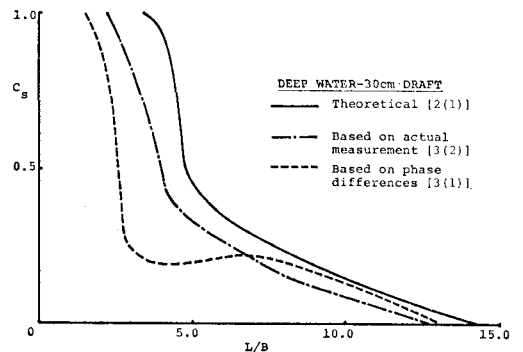


図-13 Comparison of drifting coefficients from different methods [2 ①, 3 ①, 3 ②], deep water, 30 cm draft

3 ③, 3 ④ による方法は、伝達波高および極大、極小波高を実験的に測定できない深海条件では適用しなかった。

5. 結 論

① 深海、浅海ともに波漂流力は、周期 2 秒 (28 秒) 以上の場合、無視できる。また、周期が 2 秒から 1 秒

(28 秒から 14 秒) に減少すると、波漂流力は増加し、最大値となる。周期 1 秒以下では、一定となる。

② 深海、浅海ともに波漂流力は、波形こう配 0.015 以下では無視できるが、波形こう配が 0.015 から 0.03 に増加すると、急激に増加し、最大値となり、波形こう配が、それ以上に大きくなると一定となる。

③ 波漂流力は、構造物の長さの 4 倍の波長の波が作用する時、無視でき、そして、波長が短くなるのにもない、波漂流力は徐々に増加する。

④ 2①, 3①, 3②, 3③ の方法によって得られた漂流力係数は、各々よく一致している。つまり、二次元的規則波の場合、入射および伝達波高、または、極大、極小波高を正確に測定することにより、精度のよい波漂流力を得ることができる。

⑤ 浅海の場合、構造物の喫水深が増加すると、浅海および質量輸送による影響の割合が大きくなる。深海の場合と比較すると、喫水深 30 cm (60 m) の時の波漂流力は 30% 程度浅海の方が大きくなる。

謝辞： 本研究の実験および論文作成に際し、東海大学海洋学部海洋土木工学科ならびに船舶工学科の諸先生方ならびに大学院生、四年生諸氏の協力を得たことに対し、深く感謝の意を表します。

記号

F_d = 波漂流力	ρ = 流体密度
g = 重力加速度	ω = 波振動数 ($=1/T$)
T = 入射波周期	k = 波数 ($=2\pi/L$)
L = 入射波長	B = 構造物の幅
H = 入射波高	a_I = 入射波振幅
C_s = 漂流力係数	a_R = 反射波振幅
h = 平均海面下水深	a_T = 伝達波振幅
ϵ_s = 上下ゆれと入射波との位相差	$a_{\max}$ = 最大波振幅
ϵ_x = 前後ゆれと入射波との位相差	$a_{\min}$ = 最小波振幅

参考文献

- 1) Maruo, H.: The drift of a body floating on waves, Journal of Ship Research, Vol. 4, No. 3, December 1960.
- 2) Tasai, F.: On the drifting force for cylinders on waves (in Japanese), Kansai Zosen Kyokai, No. 152, March 1974.
- 3) Ijima, T., M. Taguchi and Y. Yumura: Transformation of waves and the effect on the oscillations of a rectangular floating structure in limited water depths (in Japanese), Proc. of Society of Civil Engineers, Vol. 202, June 1972, pp. 33~48.