

浮防波堤に作用する波漂流力について

木暮健一郎*・鈴木康正**・溝内俊一***
片桐正彦****・武井泰男*****

1. はじめに

現在、わが国における港湾整備は自然条件の恵まれた地域から厳しい地域へと展開せざるを得ない状態にあるが、このような現状に対し、軟弱地盤地帯、大水深部における技術開発の一環として浮防波堤の開発が進められている。

運輸省第四港湾建設局では、耐久性に優れ、製作、施工が容易な、PC 製浮防波堤の開発を進めているが、室内実験による断面構造の検討、動揺解析を経て現在、実用化に向けての実証実験を熊本沖で行なっている。

さて浮防波堤の受ける外力の内、最も重要なものの一つである波漂流力については、丸尾による2次元断面構造物に対する理論式¹⁾がある。しかし空ゲキ部を有する浮体(後出の図-2参照)に作用する波漂流力、チェーン係留された浮体の様に移動や動揺がある場合での波漂流力の作用の仕方および不規則波という条件下での波漂流力の解析法については解明されていない部分が多い。

本研究は、理論値と実験により得られた実験値とを比較検討することにより、浮防波堤の波漂流力の算定法について検討したものである。

2. 実験の概要

実験は、第四港湾建設局下関調査設計事務所所有の2次元不規則波造波水路で行なった。実験水路および実験施設の概要を図-1に示す。実験水路の諸元は以下の通

りである。

実験水路: 鋼製、長さ 50 m、幅 1 m、高さ 1.5 m、
水路床 1/100 傾斜
造波装置: 規則波・不規則波造波装置
フラップ型
造波周期 0.5~2 s
造波板振幅 最大 0.3 m
波高 最大 0.18 m (規則波)

側面: 一部強化ガラス製

実験条件は現地実証実験を行なう熊本沖の波高を考慮して表-1に示す通りとした。

表-1 実験条件
(現地条件、模型縮尺: 1/20)

設置水深		-8.00 m			
L.W.L.		±0.00 m			
H.W.L.		+4.50 m			
	波 高 (m)	周 期 (s)			
規 則 波	1.0	4.0	8.0	14.0	
	2.0	5.0	10.0		
	3.0	6.0	12.0		
不規則波*	1.5	5.5			
	2.1				
	2.7				

注: * 不規則波は有義波の値である。

(1) 浮防波堤の形状

浮防波堤の構造については、断面実験等²⁾によって種々の波浪条件下における消波効果、反射効果等を測定し

浮体幅、長さ、吃水を決定した。また、本浮防波堤は越波による港内の擾乱を防止するため、遊水部を設けて越波した水塊を中央部の空ゲキ部に取り込み越波のエネルギーを散逸させるサイドフロタイプとした(図-2参照)。なお、遊水部の形状については、前記断面実験により諸元を検討するとともに、施工、製作

の容易さについても考慮して決定した。係留チェーン重量は単位長さ当り 0.144 tf/m (現地換算値、縮尺 1/20)とした。

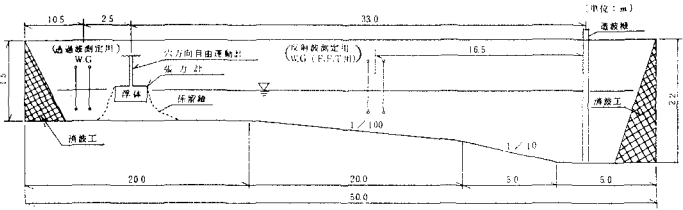


図-1 実験概要図

* 正会員 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所所長
** 正会員 (前)運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所次長
(現)運輸省第四港湾建設局海城整備課長
*** 正会員 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所調査課長
**** 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所建設専門官
***** 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所技官

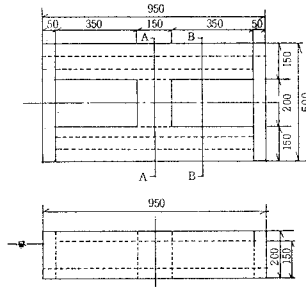


図-2 実験模型図

3. 規則波中における波漂流力

(1) 波漂流力についての理論

波漂流力については、いくつかの計算法が提案されているが、本文では次に示す丸尾の理論を用いて算定した。

丸尾の理論によれば波漂流力は次式で得られる。

$$F = \frac{a_I^3 \rho g}{4} (1 + K_R^2 - K_T^2) (1 + 2kh \operatorname{cosech} 2kh) l \quad \dots\dots\dots (1)$$

F : 波漂流力 K_R : 反射率 ($=a_R/a_I$)
 a_I : 入射波振幅 K_T : 透過率 ($=a_T/a_I$)
 a_T : 透過波振幅 h : 水深
 a_R : 反射波振幅 l : 浮体長
 ρ : 海水密度 k : 波数 ($=2\pi/L$)
 g : 重力加速度 L : 波長

この理論は流体場全体に対する運動場理論から漂流力を求める方法であり、野尻ほか³⁾によってその有効性が確認されている。なお、式中の反射率 K_R 、透過率 K_T は、浮体周辺の流体運動を解析すれば計算することができる。

(2) 浮体の波浪中における水理特性の解析

2次元矩形浮体の動揺特性および浮体による波の変化を求めるにはいくつかの解析法がある。しかし、本浮防波堤は越波防止のため遊水部を有しているため、これが浮体の水理特性に与える影響について検討を行った。

2次元矩形浮体の動揺解析法の代表的なものの1つとしては、井島ほかによる領域分割法⁴⁾がある。これに対し、図-2に示したような中央に遊水部を持つ浮体では特に鉛直方向に作用する流体力および遊水部の水塊重量の影響が大きいものと推測される。そこで、これらについて

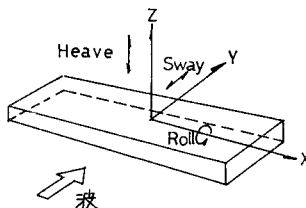


図-3 2次元浮体の運動モード

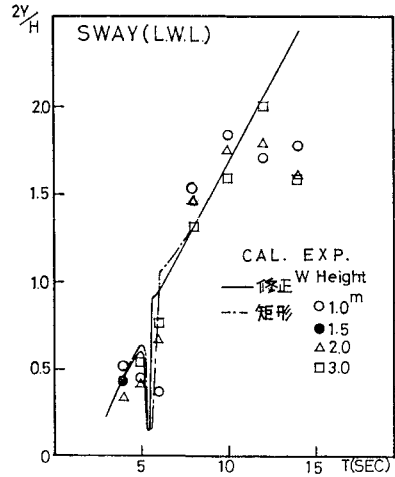


図-4 (1) 浮体動揺の周期応答特性 (Sway)

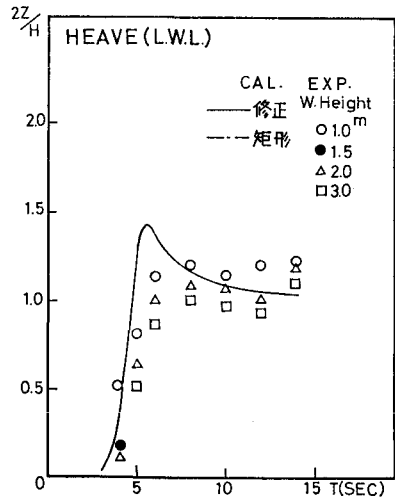


図-4 (2) 浮体動揺の周期応答特性 (Heave)

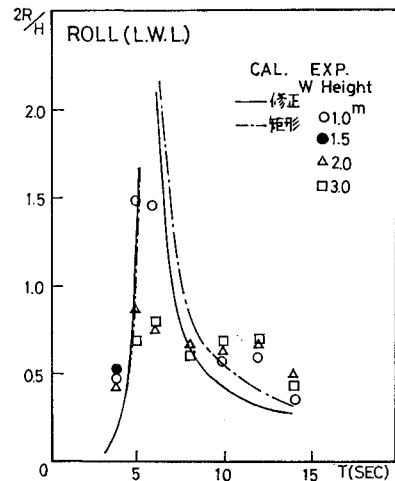


図-4 (3) 浮体動揺の周期応答特性 (Roll)

ての修正を施した運動方程式を解くことにより、図-3に示す3方向の動揺振幅を求めた。計算値と実験値を比較すると図-4のようになる。この図から、今回用いた浮体では遊水部があることの影響は小さく、修正解析法による結果と矩形浮体としての解析結果がほぼ等しく、かつ実験値とほぼ一致していることがわかる。このことから遊水部の効果については考慮する必要がなく、2次元矩形浮体の解析法がそのまま流用できるものと判断される。

ただし、特に図-4(3)を見るとわかるように、運動の共振点付近では、線形理論による計算値は動揺振幅を過大に評価する。そこで次にこの修正法について検討した。

実験値と理論値を比較すると共振周期はほぼ一致していることから、付加質量および付加慣性モーメントの誤差は小さいものと考えられる。そこでこのピーク値の相違については浮体動揺の減衰係数の修正を行なうことで理論値を修正することとした。

図-5は、ポテンシャル理論で求められた減衰係数お

よびそれを以下の様に修正した減衰係数を用いて計算した値と実験値を比較したものである。ただし、共振付近の様子が判り易い様に、図の横軸は $2l/L$ (l : 浮体長, L : 波長) をベースとしている。

Heaving の減衰係数

Swaying および Rolling
の減衰係数

① 理論値 $\times 1.0$

理論値 $\times 1.0$

② " $\times 1.25$

" $\times 5.0$

③ " $\times 1.5$

" $\times 10.0$

図-5から、線型ポテンシャル理論で求められる減衰係数を適切に修正すれば、計算値は実験値とほぼ一致することがわかる。ただし浮体の運動モードおよび入射波高によって修正法に相違があるので修正にあたってはこの点に留意する必要がある。

(3) 規則波中における波漂流力

規則波中に置かれた2次元浮体に作用する波漂流力は式(1)に示されるとおり、時間的に変動しない水平方向の定常外力である。したがって、図-1の様にチェーン係留された浮体は波漂流力と係留力が釣り合う位置まで

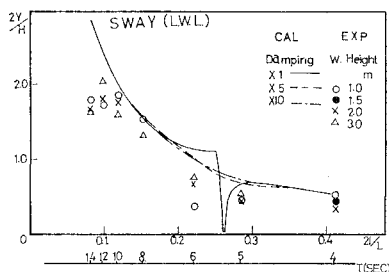


図-5(1) 浮体動揺と減衰係数 (Damping): Sway

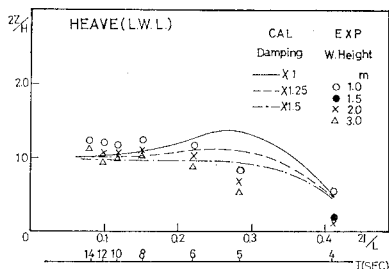


図-5(2) 浮体動揺と減衰係数 (Damping): Heave

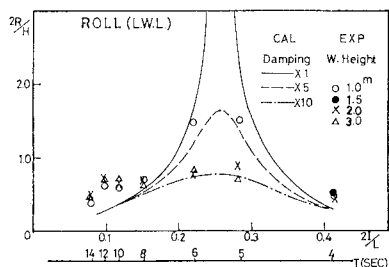


図-5(3) 浮体動揺と減衰係数 (Damping): Roll

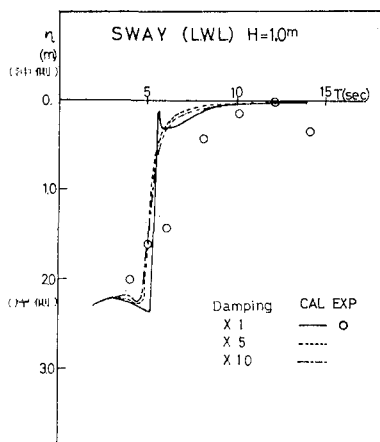


図-6(1) 波漂流力による浮体の水平移動量 (Sway)

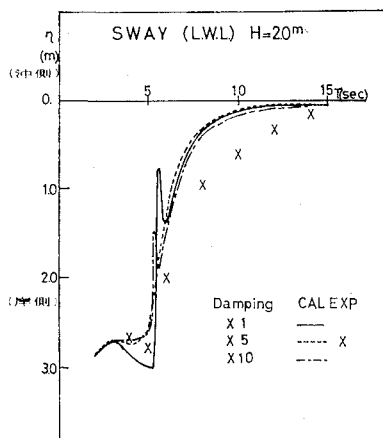


図-6(2) 波漂流力による浮体の水平移動量 (Heave)

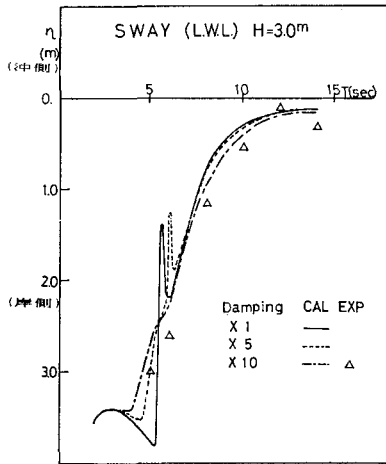


図-6 (3) 波漂流力による浮体の水平移動量 (Roll)

水平移動し、そこを平均位置として波による往復運動をする。そこで波漂流力を直接測定する代わりに浮体の水平運動の平均位置を測定すれば、間接的に波漂流力の大きさを知ることができる。

図-6 は波漂流力による浮体の水平移動量について、実験値と計算値を比較したものである。計算値は、前節で述べた修正ポテンシャル理論によって求められた K_R , K_T を用いて、式 (1) から波漂流力を求め、それによる浮体の水平移動量をカテナリー理論⁵⁾によって計算した。図の横軸は入射波の周期 T 、縦軸は浮体の水平方向の平均位置 η を示しており、単位はいずれも現地換算値である。

また、図の (1)~(3) はそれぞれ入射波高が 1.0 m, 2.0 m および 3.0 m の場合の結果を示している。

これらの図から、まず波漂流力はいずれの周期および波高に対しても浮体に岸向に作用していることがわかる。また、実験値にはバラつきがあるものの、波漂流力による平均移動量は、入射波周期が長くなるに従ってほぼ単調に減少している。これに対し、計算値は入射波周期によってやや複雑な変動を示す。この変動は、減衰係数の値を小さくとした場合および波高が大きい場合程大きい変動幅となる。また、計算結果に見られる極大点および極小点は、図-5 からわかるとおり、浮体の往復運動 (Swaying, Heaving, Rolling) の共振周期とほぼ一致している。

計算結果と実験結果とを比較すると、両者の周期に対する変化の傾向および絶対値は一部を除いてほぼ一致していることが判る。したがって、規則波中にチェーン係留された浮体に作用する波漂流力およびそれによる浮体の水平方向の移動量については、本文に述べた方法によって計算することが可能であるといえる。ただし、図に示した3種類の減衰係数を用いた計算結果と実験値を比較するとわかるとおり、特に入射波高ごとに適切な減衰係数を計算に用いる必要があることに留意する必要がある。

4. 不規則波中の波漂流力

前章まで述べてきたように、規則波中において浮体に作用する波漂流力は、基本的には丸尾の理論によって求

表-2 波漂流力計算結果

($h=100$ cm, $L=47.5$ cm)

実験 周期 T (s)	波 長 L (cm)	反 射 率 K_R	透 過 率 K_T	波 漂 流 力			丸尾理論式に左記数値を代 入し求めた入射波振幅 ar^* (cm)		実験における入射波高 H (cm) () 内は入射波振幅 ar (cm)			
				F_{mean} (gf)								
				$(F_{mean})_{min}^*$	$(F_{mean})_{mean}$	$(F_{mean})_{max}$	$[ar] \times (F_{mean})_{mean}$	$[ar] \times (F_{mean})_{max}$	H_{max} (ar_{max})	$H_{1/10}$ ($ar_{1/10}$)	$H_{1/3}$ ($ar_{1/3}$)	$\bar{H}$ ($\bar{ar}$)
1.04	168.0	0.624	0.232	- 82	91	334	2.4	4.6	13.98 (7.0)	12.26 (6.1)	9.87 (4.9)	6.17 (3.1)
1.05	170.1	0.634	0.246	-108	74	285	2.1	4.1	13.65 (6.8)	12.17 (6.1)	9.61 (4.8)	6.01 (3.0)
1.06	175.8	0.599	0.244	- 55	87	375	2.3	4.8	15.05 (7.5)	12.59 (6.3)	9.97 (5.0)	6.23 (3.1)
1.04	169.8	0.577	0.237	- 57	107	488	2.6	5.6	18.64 (9.3)	13.58 (6.8)	10.50 (5.3)	6.56 (3.3)
2.06	541.2	0.464	0.761	- 16	66	220	2.4	4.4	13.51 (6.8)	11.66 (5.8)	10.14 (5.1)	6.34 (3.2)
2.01	524.3	0.472	0.779	2	98	278	3.0	5.1	16.44 (8.2)	14.10 (7.1)	12.27 (6.1)	7.67 (3.8)
2.01	523.9	0.448	0.778	- 7	79	195	2.7	4.3	17.79 (8.9)	15.47 (7.7)	12.91 (6.5)	8.07 (4.1)
1.99	519.0	0.469	0.786	- 12	89	276	2.9	5.1	18.33 (9.2)	15.60 (7.8)	13.38 (6.7)	8.36 (4.2)
2.04	534.4	0.461	0.795	20	108	241	3.2	4.8	19.00 (9.5)	16.27 (8.1)	13.87 (6.9)	8.67 (4.3)

注: * $[ar] (F_{mean})_{min}$ は $(F_{mean})_{min}$ が負の値となるケースがあるので算出しなかった。

めることができる。しかし、実際の海の波は不規則波であるため、波漂流力も規則波中のものとは異なる性質を持つものと推測される。そのため、浮防波堤等の浮遊式構造物の設計にあたっては、その点についての検討が必要である。特に係留系の設計条件として不規則波中の波漂流力の最大値が最も重要な要素の一つであるので、これについて実験的に検討した。実験条件は表-1の中に示したとおりであり、実験に用いた波はブレッドシュナイダー型の周波数スペクトルを持つ一方向不規則波である。

不規則波では一波ごとに波高と周期が変化するが、波群全体としてみればやや大きい波の連続とやや小さい波の連続とが交互に繰返される⁶⁾。このため、浮体に作用する波漂流力によって変化する水平方向の平均位置も一波ごとの周期よりもかなり長い周期(今回の実験では5倍前後)で変化する。そこで図-7に示すように、チェーン張力からカテナリー理論によって換算した波漂流力の時間変化を求め、平均値の最小値を $(F_{\text{mean}})_{\text{min}}$ 、平均

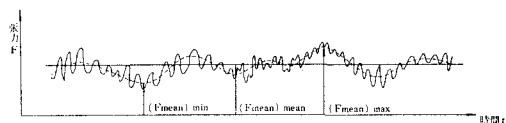


図-7 波漂流力の時間変化

値を $(F_{\text{mean}})_{\text{mean}}$ 、最大値を $(F_{\text{mean}})_{\text{max}}$ と定義した。

実験から K_R , K_T を求め、丸尾の理論式(1)から $(F_{\text{mean}})_{\text{max}}$ に対応する波高を逆算して実験波の波高と比較したのが表-2である。この表から、不規則波群中の波漂流力の最大値は式(1)の入射波振幅として有義波の値を用いればほぼ推定できることがわかる。

5. ま と め

本研究では浮防波堤に作用する波漂流力について検討した。その成果をふまえ、プロトタイプの浮防波堤を設計および製作し、熊本港沖に設置して現地実証実験を実施している。その結果については機会があれば御報告したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) Maruo, H.: The drift of a body floating on waves, J. Ship Research, Vol. 4, No. 3, 1960.
- 2) 運輸省第四港湾建設局: 浮防波堤開発試験報告書, その1, 昭和58年3月.
- 3) 野尻信弘・村山敏一: 規則波中の2次元浮体に働く漂流力に関する研究, 西部造船会会報第51号.
- 4) 井島武士・田淵幹修・湯村やす: 有限水深の波による矩形断面物体の運動と波の変形, 土木学会論文報告集, 第202号, 1972年.
- 5) 上田 茂・白石 悟: カテナリー理論による最適係留鎖の選定法及び計算図表, 港研資料 No. 379, 1981年6月.
- 6) たとえば, 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 昭和52年, pp. 172~178.