

浮防波堤の動揺特性に及ぼす波漂流力と減衰力の効果について

Effect of Wave Drift and Damping Forces on the Dynamics of a Floating Brekwater

中村孝幸^{*}・大森禎敏^{**}・井手善彦^{***}

Takayuki Nakamura^{*}, Sadatoshi Ohmori^{**} and Yoshihiko Ide^{***}

Dynamics of a floating breakwater to waves is examined theoretically and experimentally. Both methods, the time domain analysis and the frequency domain analysis, are applied to estimate the dynamic response of a floating breakwater to waves. Especially, focusing on the effect of wave drift forces on the variation of restoring forces by the mooring system, the resultant dynamics and the performance of the breakwater are clarified. In addition to the above examination, effect of the damping forces on the dynamics of the floating breakwater is also studied.

Key words: Wave response, Floating breakwater, Wave drift force, Damping force

1. まえがき

波浪制御構造物の一つとして浮防波堤があり、一般に複数のチェーンラインにより係留されている。浮防波堤の波浪動揺量や機能面である消波効果は、堤体断面形状や排水重量のみならず係留系の特性にも依存することになる。また、チェーン係留は、ラインがカタナリ性状を示すことから、その復元力特性は非線形性を呈することが知られている。従来の研究では、主に係留系と浮体の動揺特性の関係が検討されてきているが、係留系と浮防波堤で重要になる消波効果の関係などは知られていない。特に、チェーンライン係留系の非線形な復元力特性の影響については明らかにされていない。本研究は、浮防波堤の係留によく利用されるチェーンライン係留系を対象にして、係留系の非線形な復元力特性が浮防波堤の動揺特性や消波効果に及ぼす影響を理論および実験により明らかにする。特に、ここでは係留系の性状変化を引き起こす原因として、作用波力のみならず定常外力である波漂流力にも着目して検討する。そして、付随的に、共振応答状態で重要となる減衰力の影響についても考察する。

2. 解析法の概略

2.1 解析モデル

解析モデルおよび座標系は図-1に示すものである。すなわち、一定水深 h の波動場中に任意断面形状の2次元浮体がチェーンラインにより係留されており、これに波が作用する場合を考える。浮体まわりの波動運動は、微小振幅波理論で表現でき、浮体の運動も微小振動とする。入射波は、図中の x 軸の正方向に入射するもので、次式で示される。

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

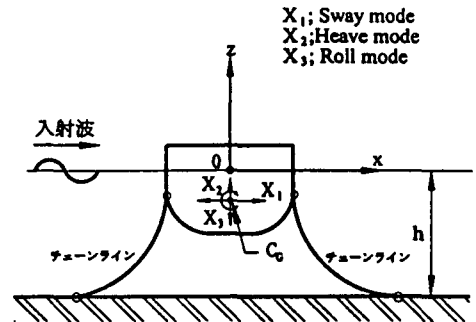


図-1 解析モデルおよび座標系

ここに、 η : 入射波の水面変動、 H : 入射波高、 k : 波数($=2\pi/L$, L :波長)、 ω : 角振動数($=2\pi/T$, T :周期)である。

上記のようなモデルでは、浮体の運動は x, z 軸方向への並進運動(Sway, Heave)と重心を通る水平軸まわりの回転運動(Roll)の3モード(それぞれ X_1, X_2, X_3)に限定される。

2.2 振動方程式

ここでは、浮体の動揺解析法として、従来よりよく知られている調和振動を仮定した周波数領域の解析法¹⁾と初期値問題として取り扱いを行う時間領域における解析法²⁾の両者を採用した。

従来、浮防波堤の設計に際しては、二つの面から検討がなされる。一つは、構造設計で必要とされる係留系の最大張力や浮体の最大動揺量の推定などであり、もう一つは防波堤としての主たる機能である消波性能である。消波性能は、動揺量などとは異なり、定常状態における平均波高、すなわち反射率や透過率といった波動場の時間・空間的な平均量が必要とされる。このため、一般には反射率や透過率などの推定には、定常状態を想定した周波数領域の解析法がよく

* 正会員 愛媛大学工学部環境建設工学科 (790 松山市文京町3)

** 正会員 五洋建設(株)

*** 学生会員 愛媛大学大学院

利用される。一方、最大動揺量の推定などには、係留系の非線形な反力特性を直接的に考慮できるなどの利点から、時間領域の非定常解析法が用いられる。

一般的に、図-1に示すような2次元浮体の周波数領域での運動方程式は、動的流体力や係留復元力などを考慮して、次式で示される。

$$(M+\mu)\ddot{X}+D\dot{X}+K_H X+F_E=F^B \quad (2)$$

ここで、 M ：浮体の質量および重心まわりの慣性モーメントを要素とする質量マトリックス、 μ ：浮体の付加質量マトリックス、 $\ddot{X}$ ：浮体の動揺加速度マトリックス、 D ：浮体が動揺するときの造波抵抗に相当する造波減衰マトリックス、 $\dot{X}$ ：浮体の動揺速度マトリックス、 $K_H X$ ：動揺変位マトリックス X に比例する静水力学的な復元力で、自重による影響も含むものとしており、 K_H がその比例定数マトリックスである。 F_E ：係留系による復元力マトリックス、 F^B ：浮体平衡時に作用する波力である。

一方、時間領域での運動方程式は次式で示される。

$$(M+m)\ddot{X}+\int_{-\infty}^t \lambda(t-\tau)\ddot{X}(\tau)d\tau+K_H X+F_E=F^B \quad (3)$$

ここで、 m ：動揺周波数が無限大のときの浮体の付加質量マトリックスで、水面の境界条件として速度ポテンシャル $\phi=0$ の条件を適用して求められる付加質量に相当する。 λ ：メモリー影響関数と呼ばれる量で、浮体の瞬時運動後の遷移状態下における動的流体力のマトリックスを表す。式(3)の実際的な解法には、初期条件が必要となり、線形加速度法などを用いて数値積分する必要がある。また、メモリー影響関数 λ は、既にCummins²⁾により示されているように、周波数領域の解析で現れる動的流体力係数とフーリエ変換対の関係にあり、周波数領域の結果を用いて算定できる。 m については、水面の境界条件として $\phi=0$ を適用した境界値問題を解くことにより与えられる³⁾。

2.3 定常漂流力の算定法

波動場中の浮体は、波からと、浮体自身が動揺することによる2通りの原因によって周囲の流体から力を受ける。これらの流体力は入射波と同じ周期成分を持つ成分の他に、時間的に定常な成分が含まれている。この定常成分が定常漂流力と呼ばれている。この定常漂流力は高次の非線形流体力に起因するもので、1次の線形流体力に比較すると小さいことが知られている。しかし、定常漂流力によって浮防波堤など浮体式施設が移動することはその係留系に変化を与えることになり、係留系による反力を推定する上で重要になる。運動量のバランスを考えて導かれる丸尾の理論⁴⁾によると水平方向の定常漂流力 $\bar{F}_x$ は後述する1次元的な反射率である c_R を用いた次式で与えられる。

$$\bar{F}_x = E \frac{C}{c} (2C_R^2 + E_L) \quad (4)$$

ここで、 C_g ：群速度、 C ：波速、 E_L ：エネルギー逸散率である。また、 $E=(1/8)\rho g H^2$ ：単位面積あたりの入射波の平均エネルギーである。式(4)より定常漂流力は反射率の2乗に比例することが分かる。

2.4 チェーンラインによる復元力

ここでは、チェーンラインによる係留を想定して、係留反力の算定には、主として庄司によるラインの弾性変形を近似的に考慮した修正カテナリ理論⁵⁾を用いた。この理論は、従来の弾性変形を無視した理論に比較して、ラインの幾何学的な制約が少ないなど、時間領域の動揺量の計算に適している。この理論でのカテナリ曲線の方程式は、以下の式で示される。

$$\bar{x} = \frac{T_H}{w} \left[\cosh \left(\frac{w}{T_H} \bar{x} - \frac{wS}{EA} \right) - 1 \right] + \frac{T_H^2}{2EAw} \sinh^2 \left(\frac{w}{T_H} \bar{x} - \frac{wS}{EA} \right) \quad (5)$$

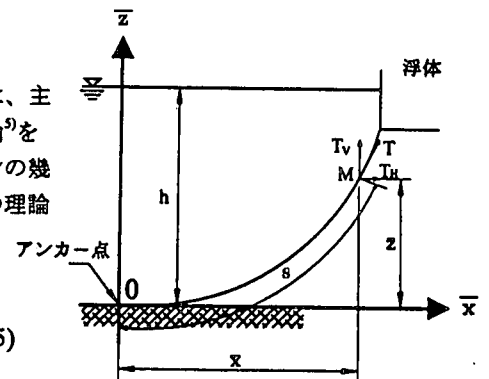


図-2 係留ラインおよび座標系

ここで、 w ：ラインの単位長あたりの水中重量、 T_H ：ライン張力の水平成分、 E ：ラインのヤング係数、 A ：ラインの断面積、残りの変数の定義は図-2に示す。また、ライン張力の鉛直成分 T_V は、ラインの垂れ下がりの長さを考えて求められる。そして、1本のチェーンラインによる係留点での水平反力は、ライン長さやその水平および鉛直射影長などを入力として、式(5)の超越方程式をニュートン法などにより近似的に解くことにより推定できる。

3. 実験装置および実験方法

実験で用いた模型は、浮防波堤の動揺特性およびその波変形を検討する際の浮防波堤のモデルとして採用したもので、現地のコンクリート製浮防波堤の約1/26模型に相当する。模型浮体および波高計の設置状況を図-3に示す。このときの浮体およびチェーンラインの諸元を現地量と併せて表-1に示す。実験では、図-3に示す計4台の波高計により、入射波、反射波および透過波を測定した。また、チェーンラインの張力は、浮体の係留点に設けたリングゲージを用いて測定した。浮体の動揺変位は、水槽側面よりビデオカメラで、浮体側面に設けたマークの移動を撮影して観測した。

模型浮防波堤の設置水深は全実験を通じて38cmと一定にした。模型浮防波堤に作用せしめた入射波は、周期T=0.6secから1.6secの14種類、波高Hは約4.0cm程度である。

4. 実験結果および算定結果

4.1 チェーンラインの反力特性

図-4は、浮体側係留点が水平移動したときに生じる水平張力の変化を実測結果とカテナリ理論に基づく算定結果の比較で示す。図中には実測結果とカテナリ理論に基づく算定結果および弾性変形を考慮した修正カテナリ理論による算定結果が示してある。この図より、チェーンラインの張力は、浮体の移動距離に伴い急激に増加するなど強い非線形性を呈することがわかる。また、その張力変化はほぼカテナリ理論で推定できる。

4.2 動揺特性に及ぼす減衰力の効果

ここでは、実験で観測された係留ラインの構造力学的な減衰効果や、矩形浮体隅角部よりの剥離流れなどの発生による流体減衰力の波浪動揺に及ぼす影響を検討してみる。

まず、図-5の(a)~(c)は、動揺変位の算定結果と実験結果の比較を示す。各変位は、次式で定義される無次元振幅 x_j^* で表示してある。

$$x_j^* = \hat{x}_j / (H/2) \quad (j=1,2,3)$$

(6)

図中には、算定結果として、時間領域の解析法と周波数領域の解析法による両者をプロットしてある。時間領域の解析法は、前述したように、係留系による復元力の非線形性を直接的に考慮する解析法である。また、周波数領域の解析法では、係留系の線形バネ定数の推定が問題になるが、ここでは静的平衡時の係留系を考えて求められる係留系全体の接線バネ定数を採用した。

これらの図から、算定結果および実験結果共に、L/B=3.5付近にRoll運動の共振点が見られる。従来から指摘されているように、共振点付近での実験値と算定値の一致度は良くない。これは、上述したような浮体の動揺時に作用する減衰力が考慮されていないことによるものと考えられる。一般にチェーンなどによって係留されている浮体は隅角部に生じる渦流れや係留系による構造力学的な減衰力の作用を受ける。特に、Roll運動では、造波減衰が支配的なSway、Heave運動とは異なり、減衰力が大きく関与することが知られている。自由浮体の動揺に作用する減衰力を推定する方法としては、実験的に減衰係数を求める方法などがある。しかし係留浮体は、上述したように流体力学的な減衰力と構造力学的な減衰力の両者を受けるため、減衰力の特性を明確にするには各減衰力の定性的・定量的な検討が必要になる。現時点では、このような2つの減衰力を定量的に見積もる手法は確立されていない。そこで、本研究では、振動系の研究で

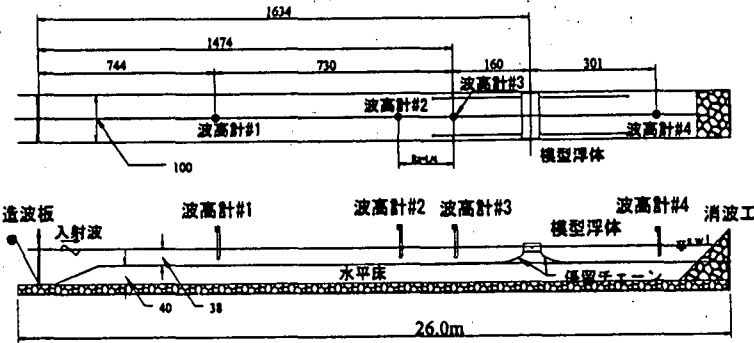


図-3 実験水槽および実験状況

表-1 浮防波堤の動的諸量および係留ラインの諸量

		原型		1/26模型
浮 防 波 堤	長さ	l_b	21.00m	98.6cm
	幅	B	10.00m	38.0cm
	高さ	D	4.50m	17.0cm
	喫水	d	3.00m	11.3cm
	排水重量	W	618.60t	41.6kgf
	重心位置 (水面より)	z_0	-0.17m	-2.7cm
	質量慣性 モーメント 及び慣性半径	I_y	$4.41 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{m}^2$	$4265.1 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$
係 留 索	単位水中重量	w	79.2kg/m	1.15g/cm
	全長	S	51.8m	197.5cm
	水平投影長	$\bar{x}_1$	50.4m	192.5cm
	鉛直投影長	$\bar{z}_1$	7.0m	26.7cm

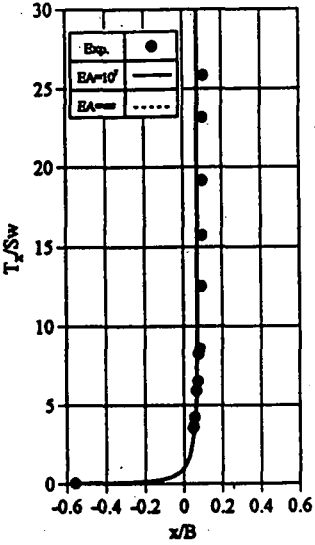
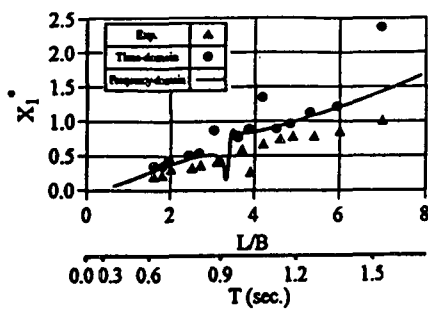
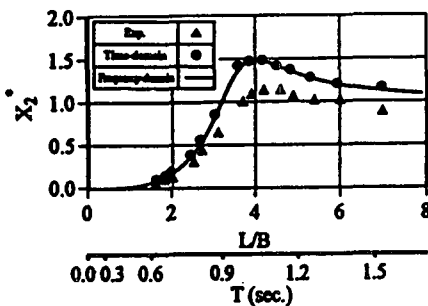


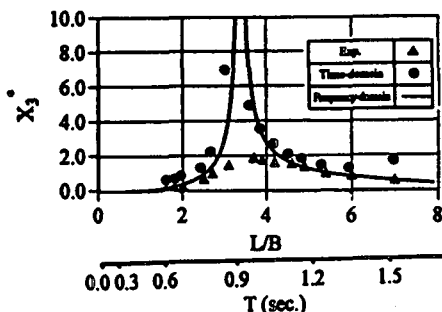
図-4 係留点の水平移動に伴う水平張力の変化



(a) Sway方向

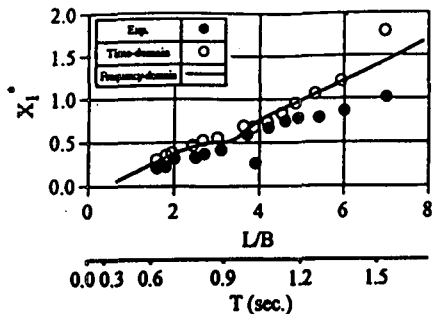


(b) Heave方向

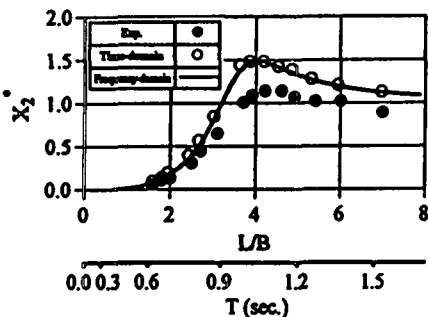


(c) Roll方向

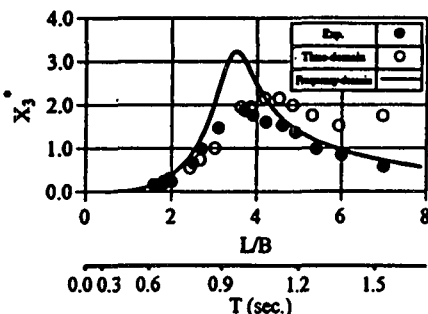
図-5 減衰力を無視した時の
算定結果と実験結果の比較



(a) Sway方向



(b) Heave方向



(c) Roll方向

図-6 減衰力を考慮した時の
算定結果と実験結果の比較

よく利用される、振動速度に比例する減衰力を仮定し、その減衰は臨界減衰に対する一定の割合で与えられるという手法を採用した。図-6は、このような手法により、減衰力を考えて波浪動揺を算定した結果の代表例を示す。このとき用いた減衰は、付加質量を考慮して求められる臨界減衰の15%に相当している。本研究では、各種に減衰を変化させて、動揺変位を算定しているが、図-6で採用した臨界減衰の15%のものが最も実験結果との対応がよいことを確認している。このため、以下の時間領域および周波数領域の算定では、線形減衰として臨界減衰の15%が適用できるものとした。

4.3 動揺特性に及ぼす波漂流力の効果

(1) 模型浮防波堤に作用する波漂流力と全体係留系の線形パネ定数の変化

係留浮体には、波周期と同じ周波数の流体力のみならず、定常的に作用する波漂流力が作用する。このような波漂流力が作用するとき、係留系の展張状況は、岸側および沖側のラインは非対称なものへと変化し、結果的に係留系の復元力特性に影響することが容易に推察される。図-7は浮体に作用する波漂流力の算定結果を示す。縦軸の F_x^* は次式によって無次元化されたものである。

$$F_x^* = \frac{F_x C}{\rho g (H/2)^2 C_g} \quad (7)$$

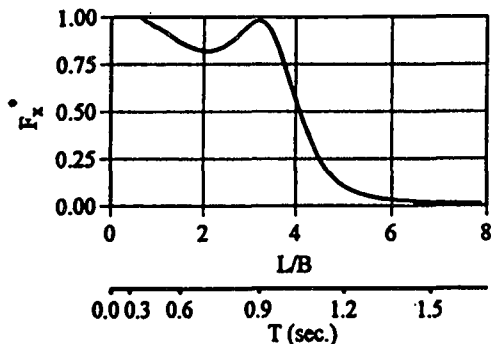
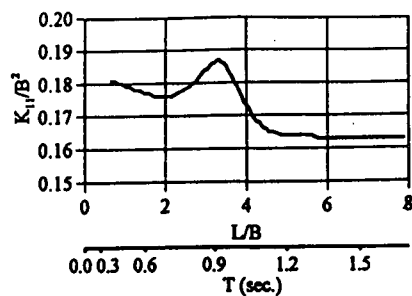
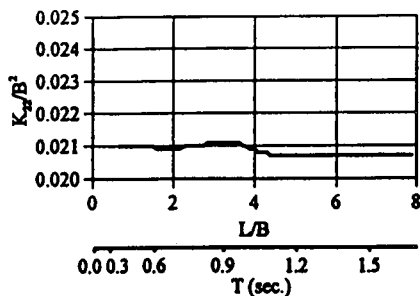


図-7 模型浮防波堤に作用する波漂流力

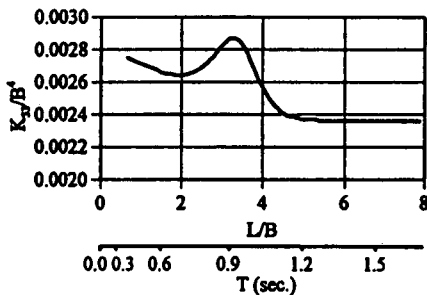
前述したように、波漂流力は浮体による反射率 C_x の二乗に比例する。



(a) K_{11}

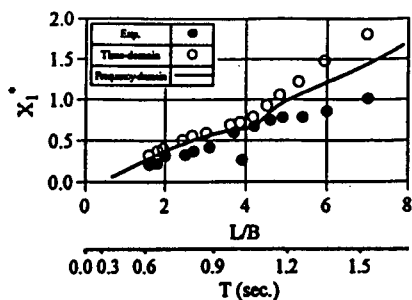


(b) K_{22}

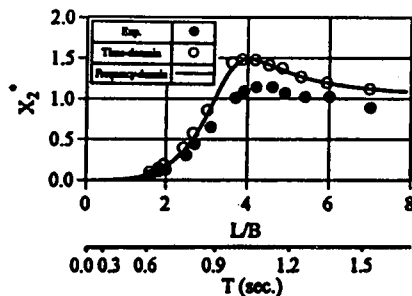


(c) K_{33}

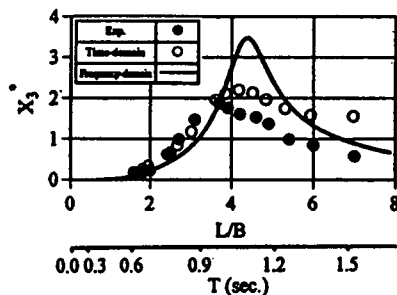
図-8 波漂流力による係留全体系の線形バネ定数の変化



(a) Sway方向

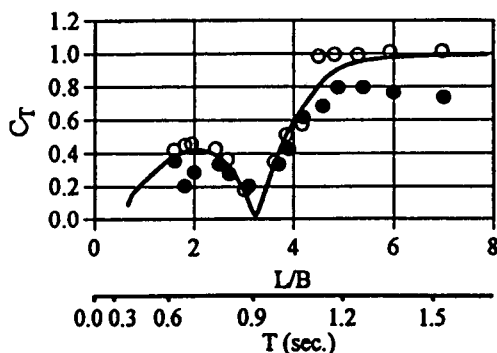


(b) Heave方向

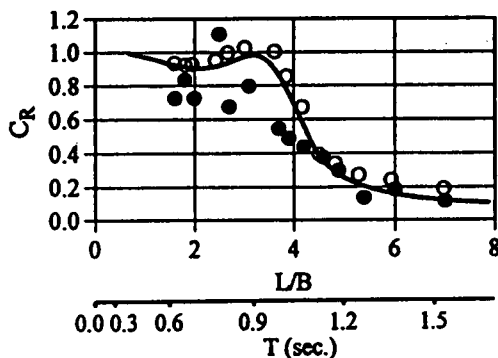


(c) Roll方向

図-9 波漂流力を考慮した時の動揺特性



(a) 透過率 C_T



(b) 反射率 C_R

図-10 波漂流力を考慮した時の透過・反射率

図-7からも L/B が3.5より小さな短周期波で波漂流力は大きくなり、3.5より大きい長周期波では減少していることが分かる。

次に、この波漂流力が作用することによって生じる全体係留系の線形バネ定数の変化について検討する。図-8の(a)~(c)は波漂流力による係留系の線形バネ定数の変化である。これらの図から分かるように、 $L/B < 3.5$ の範囲では波漂流力の作用により、水平方向の線形バネ定数である K_{11} や回転方向の線形バネ定数である K_{33} は波漂流力の変化に合わせて、波漂流力が大きくなれば、その線形バネ定数の絶対値も大きくなっている。一方鉛直方向の線形バネ定数である K_{22} では波漂流力による変化はほとんど見られない。

(2) 動揺特性

図-9の(a)~(c)は、波漂流力を考慮したときの模型浮防波堤の動揺特性を示す。時間領域の解析法での波漂流力の取り扱いについては、本来、浮体に作用する波漂流力を時間変化に応じて算定する必要がある。しかし、時間変化に応じて波漂流力を算定することは繰り返し計算を必要とし時間がかかることや、高次の非線形流体力の算定が必要になり、複雑な計算を要する。そこで、本研究ではあらかじめ周波数領域で求めておいた定常波漂流力を時間的に変化させながら浮体に作用させて時間領域の動揺算定を行った。

波漂流力を無視したときの動揺特性である図-6と図-9を比較すると、Sway運動では $L/B < 4$ の範囲で波漂流力を考慮したときの時間領域の算定結果が波漂流力を無視したときのそれよりもやや大きくなるが、両結果で有意な差は認められない。また、Heave運動でも、波漂流力を無視したときと考慮したときでは、有意な差は見られず、実験値と時間領域および周波数領域の算定結果はほぼ一致している。しかしRoll運動では、周波数領域の算定結果において、 $L/B < 4$ の範囲で波漂流力を考慮したときの方が無視した場合よりも小さくなり、実験値に近づく傾向が見られる。これは前述したように、係留系全体の線形バネ定数のRoll方向の成分が大きくなっているためである。また、実験値と時間領域の算定結果を比較してみると、同じく $L/B < 4$ の範囲で波漂流力を考慮した算定結果の方が実験値との一致度がよい。

次に、時間領域の解析法による算定結果と周波数領域によるそれとを比較してみると、検討対象とした周波数帯の中で共振状況を呈すRoll運動では、特に共振点近傍において、時間領域の算定結果のほうが周波数領域のそれより、実験結果により近い。これは、共振点近傍ではRoll変位が増大し、係留系の非線形的な増加を時間領域の解析法では考慮できることによる。しかしながら、両算定結果の差異はそれほど大きくない。これはRoll方向に線形性の強い静水力学的な復元力モーメントが存在し、係留系の非線形的な復元力の効果が直接的に現れにくいことによるものと推測される。一方、共振状況を示さないSway、Heave運動では、両算定結果の間に有意な差異は認められず、これは動揺変位が線形バネ定数で近似できる範囲内にあることによるものと考えられる。

4.4 透過率 C_T と反射率 C_R

図-10の(a)、(b)は透過率 C_T と反射率 C_R を示す。透過率 C_T では $L/B < 4$ の範囲では、実験値と時間領域および周波数領域の解析法による算定値はほぼ一致している。また $L/B > 4$ の範囲では実験値が各算定値を下回るが、全体的には三者はほぼ一致している。また、反射率 C_R は $L/B < 4$ の範囲で実験値が下回るものの、その他の領域で実験値と各算定値との一致度はよい。このように、透過・反射率の予測にあたっては、時間領域と周波数領域の解析法による差異はあまり顕著なものでない。

以上の検討より、Roll運動が共振状況を呈するような現地の浮防波堤では、時間領域の解析法を用いる方が周波数領域の解析法より、より実際の動揺変位を推定できる。また、本研究で提案した周波数領域と時間領域の解析法の両者を組み合わせた方法により、時間領域での波浪動揺の算定結果を活用して、透過・反射率の算定がほぼ可能であることが確認された。

5. 結語

- (1) 浮体の動揺解析では、時間領域および周波数領域の解析法に関係なく、Roll運動の共振点では、流体力学的な減衰力と構造力学的な減衰力を考慮する必要がある。また、浮体に作用する波漂流力は係留系全体の反力特性に有意な影響を与えることから、波漂流力を考慮した浮体の動揺予測が必要である。
- (2) 現地で設置されているような浮防波堤では、消波対象とする波周期の範囲でRoll運動の共振動揺が現れやすい。このような共振動揺を示す条件下では係留復元力が非線形性を示すようになるため、その非線形性を直接的に考慮できる時間領域の解析法を用いるのが望ましい。

参考文献

- 1) 中村幸孝・森田知志・小野正順(1987): 斜波中における任意断面浮体まわりの波浪変形の算定法、海洋開発論文集、Vol.3, pp.65-70, 1987.
- 2) Cummins, W. E.: The impulse response functions and ship motion, Dept. of Navy, David Taylor Model Basin, Washington D. C., Report 1661, 1962.
- 3) 中村幸孝・レフク、大森禎敏: 浮体の波浪動揺に及ぼす係留系の非線形効果について、海洋開発論文集、Vol.11, pp.321-326, 1995.
- 4) Maruo, H.: The drift on a floating in Waves, J. of Ship Research, Vol.4, No.3, 1960.
- 5) 庄司邦昭: 係留浮体の運動と係留策の張力に関する研究、日本造船学会論文集、第138号, pp.233-246, 1975.