

洋上備蓄基地における貯蔵船の運動シミュレーション

北沢孝宗*・山本 茂*・新井信一**・高木又男***

1. 緒 言

洋上備蓄基地では、防波堤に囲まれた泊地内に貯蔵船が係留される。通常、海象であれば外海の波（沖波）は泊地内にはほとんど侵入しないが、荒天時には沖波が越波および捨石よりの浸透現象によって防波堤を透過するため、泊地内には伝達波が発生する。したがって貯蔵船を安全に係留するためには、伝達波中における船の運動や係留装置に加わる力を、あらかじめ精度良く推定する必要がある。そのために、係留された浮体の運動や係留力を計算するシミュレーション・プログラムを開発し、実機の縮尺模型を用いた係留実験を行なって、その精度について検討するのが本研究の目的である。

2. シミュレーション計算の方法

数値シミュレーションは2つのステップに分けられる。まず第1のステップでは、ある与えられた沖波による伝達波を推定する。本研究では不規則な沖波の一波一波を波高が等しい規則波であるとみなして、実験によって求めた規則波の波高伝達率をかけ合わせ伝達波高の時系列を求める。第2のステップではその伝達波を入射波として、不規則な入射波中における係留された貯蔵船の運動および係留力を計算する。したがって波が防波堤と貯蔵船の間で複雑な干渉を起こす多重反射の影響は考慮していない。

さて、係留された浮体の運動方程式（2次元）は次のように書ける。ただし原点は浮体の重心にとり、また各運動のモードは図-1に示す通りである。

$$(M + A_{11})\ddot{\eta}_1 + B_{11}\dot{\eta}_1 + C_1(\eta) + D_1(\eta) = F_1(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$(M + A_{22})\ddot{\eta}_2 + B_{22}\dot{\eta}_2 + A_{23}\ddot{\eta}_3 + B_{23}\dot{\eta}_3 + D_2(\eta) = F_2(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$A_{32}\ddot{\eta}_2 + B_{32}\dot{\eta}_2 + (I + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_3(\eta) + D_3(\eta) = F_3(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで

$\eta = (\eta_1, \eta_2, \eta_3)$: 運動

η_1 : Heave, η_2 : Sway, η_3 : Roll

A_{ij} : 付加質量, B_{ij} : 減衰係数, $C_i(\eta)$: 復元力

$D_i(\eta)$: 係留力

$F_i(t)$: 波強制力

M : 質量, I : 慣性モーメント

上記方程式を Runge-Kutta-Gill 法¹⁾を用いて数値的に積分し、船体運動や係留力などの応答の時系列を計算した。その際に波強制力と流体力係数には領域分割法²⁾による計算値を用い、粘性の影響が大きい Roll の減衰係数 (B_{33}) にのみ、自由横揺れ試験による実験値を用いた。流体力係数には沖波の中心周期における値を用い、また波強制力の時系列は不規則な入射波の一波一波を波高が等しい規則波であるとみなして計算した。

3. 実験装置および実験状態

大阪市立大学河海工学実験場内の 100 m 波浪水槽において、実機の 1/50 の二次元断面を持つ防波堤と貯蔵船（実機寸法：397 m × 82 m × 25 m）を用いて実験を行った。実験装置の概略図を図-1に示す。貯蔵船はフ

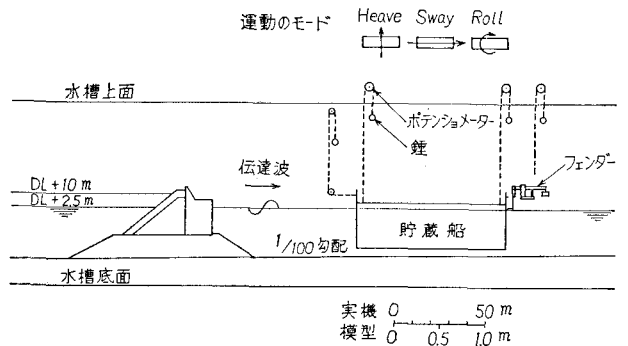


図-1 係留実験概略図

エンダーによって係留されている。実際のフェンダーは図-2に示すような非線型な変位反力特性を持っている。そこで図-3に示す天秤式模型フェンダーを製作し、実機の特性をシミュレートした。また沖波には光易Ⅱ型スペクトルを用いて発生させた不規則波を用いた。貯蔵

* 工務 日立造船（株）技術研究所流体研究室
 ** 正会員 工務 日立造船（株）技術研究所流体研究室
 *** 工務 日立造船（株）技術研究所流体研究室長

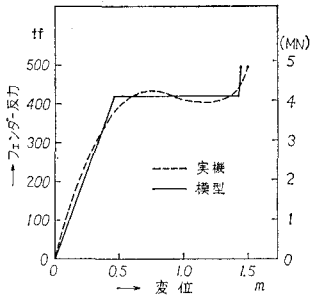


図-2 フェンダーの変位反力特性

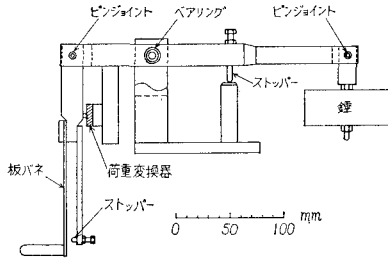


図-3 模型フェンダー

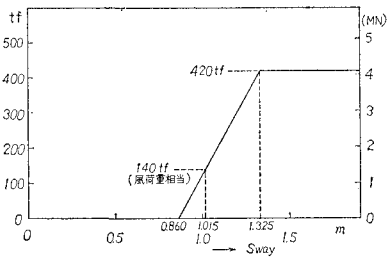


図-4 フェンダー特性と風荷重 (フェンダー 1 個当り)

船の載荷状態は満載 (喫水 22 m) と空載 (喫水 4.5 m) の 2 状態とし、水位は捨石よりの浸透波のみが存在する DL +2.5 m と頻繁に越波が起こる DL +10 m の 2 状態とした。また、なるべく実際の現象に近い状態で実験を行なうために、図-4 に示すようにフェンダー 1 個当り 140 tf (1.37 MN) の風荷重に相当するおもりをかけ、そのまわりで実験を行なった。船体運動はポテンショ・メーターで、フェンダー反力は荷重変換器を用いて計測した。

4. シミュレーション計算の精度の検討

4.1 伝達波高

図-6 に沖波のスペクトルを示す。また 図-5 には実験によって求めた規則波の波高伝達率を示す。図-7 には捨石からの浸透波のみが存在する DL +2.5 m での、計算による伝達波と貯蔵船がない状態で実測した伝達波をスペクトル解析した結果を示す。実測値は若干周期の

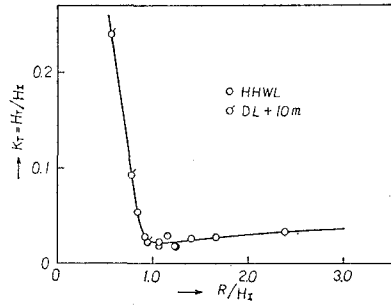
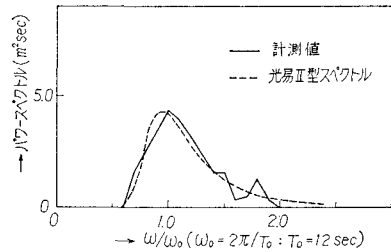

 図-5 波高伝達率 (R : 天端高さ, H_f : 入射波高)


図-6 沖波のスペクトル (DL +10 m)

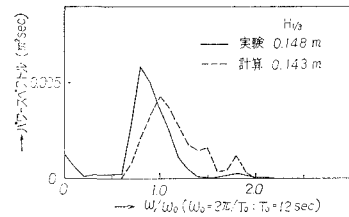


図-7 伝達波のスペクトル (DL +2.5 m)

長い側にズレている。これは周期の長い波ほど透過しやすいためであろう。しかし波高は非常に良く一致している。図-8 には頻繁に越波が起こる DL +10 m での計算値と実測値の比較を示す。実測値には高周波成分が存在する。そして船体の運動に寄与する低周波側では、スペクトルの形は良く似ているが計算値が大きめである。これは実験では越波の回数が計算よりも少ないためである。計算では沖波の一波一波を波高が等しい規則波であるとみなして伝達波を求めているが、実際には大波高の

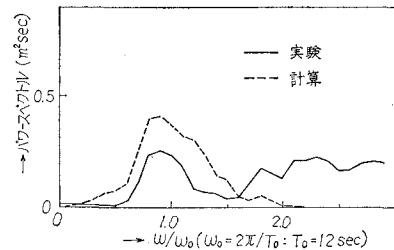


図-8 伝達波のスペクトル (DL +10 m)

波が連続しないと越波が起きないためであると考えられる。図-9には実験に使用した沖波とそれより計算した伝達波の時系列を示す。

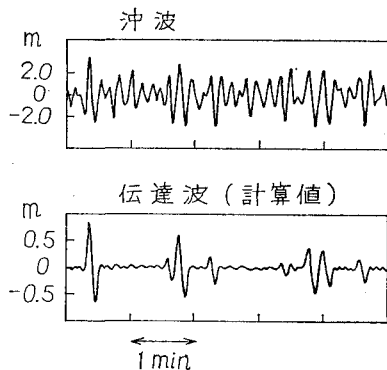


図-9 波の時系列 (DL +10 m)

4.2 貯蔵船の運動および係留力

船体運動や係留力などの応答の統計値を表-1および表-2に、また越波が起こる DL +10 m の満載状態における応答の時系列を図-10に示す。これらより以下の考察ができる。

① 貯蔵船の係留に関して最も重要な Sway の統計値に着目すると、満載状態では計算値は実験値とほぼ一致している。ただし越波がある時には、前述のように計算では実験よりも越波の回数が多いために、計算値は実験値よりも大きめである。また図-10に示すように、計算値の時系列は越波があったときの応答のパターンを良くシミュレートしている。

② 空載状態では、Sway とフェンダー反力の計算値は実験値よりもかなり大きい。これは係留系の固有周期

表-1 応答の統計値 (満載)

項 目	状 態	DL +10 m		DL +2.5 m	
		実 験	計 算	実 験	計 算
沖 (m) 波	R	1.19		1.02	
	H	4.67		3.98	
伝 達 (m) 波	R	—	0.128	—	0.036
	H	—	0.468	—	0.143
Heave (m)	R	0.048	0.054	0.012	0.009
	H	0.195	0.241	0.045	0.035
Roll (degree)	R	0.107	0.180	0.037	0.030
	H	0.438	0.778	0.143	0.128
Sway (m)	R	0.082	0.088	0.028	0.026
	h	0.103	0.158	0.050	0.049
フェンダー反力 (tf)	R	66.2	65.3	30.6	24.8
	h	132.7	133.3	55.0	48.9

R: 標準偏差, H: 有義両振幅, h: 有義片振幅

表-2 応答の統計値 (空載)

項 目	状 態	DL +10 m		DL +2.5 m	
		実 験	計 算	実 験	計 算
沖 (m) 波	R	1.19		1.02	
	H	4.67		3.98	
伝 達 (m) 波	R	—	0.128	—	0.036
	H	—	0.468	—	0.143
Heave (m)	R	0.052	0.079	0.025	0.023
	H	0.215	0.313	0.096	0.092
Roll (degree)	R	0.108	0.145	0.052	0.035
	H	0.442	0.642	0.195	0.132
Sway (m)	R	0.098	0.304	0.033	0.072
	h	0.126	0.489	0.055	0.136
フェンダー反力 (tf)	R	54.1	126.0	27.3	65.3
	h	87.5	264.6	51.3	123.8

R: 標準偏差, H: 有義両振幅, h: 有義片振幅

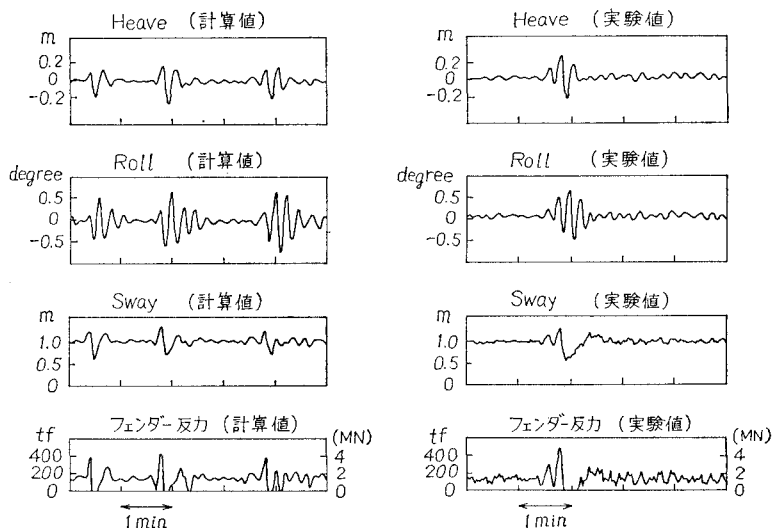


図-10 応答の時系列 (DL +10 m, 満載)

が沖波の中心周期に近いことや、減衰係数に対する粘性の影響のために、Sway 振幅を過大に評価しているためであると考えられる。

③ 防波堤と貯蔵船の間で波が複雑に反射をくり返す多重反射現象が、貯蔵船の運動に及ぼす影響は、①の考察より小さいと推察される。

5. 結 言

洋上備蓄基地における貯蔵船の運動や係留力を推定するためにシミュレーション・プログラムを開発し、実機の縮尺模型を用いた実験を行なってその精度について検討した。その結果、貯蔵船の満載状態では実用上ほぼ十分な精度で各応答の予測ができること、また空載状態では運動や係留力を大きめに推定することがわかった。今後さらに越波がある時の伝達波の推定法や、浅喫水船の

運動の減衰係数に対する粘性の影響などについて検討することによって、さらに精度の良いシミュレーション・プログラムの開発が可能になると考えられる。

終りに、本研究を行なうにあたって、大阪市立大学永井莊七郎名誉教授ならびに同倉田克彦助手からは実験について種々のご指導をいただいた。また運輸省港湾局、同技術研究所および関係各位からは貴重な助言をいただいた。ともに厚くお礼申しあげる次第である。

参 考 文 献

- 1) 例えば、磯田和男ほか：FORTRAN による数値計算ハンドブック，オーム社，pp. 184～187，1971.
- 2) 井島武士ほか：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，pp. 33～48，1972.