

岸壁に直接係留された浮体の動揺特性と係留力及び 荷役稼働に関する研究

増田 光一*・大澤 弘敬**・片山昌大郎***

1. 緒 言

荷役作業船のように岸壁に直接係留される浮体は、フェンダーと係留索の複合係留方式をとるため、その係留特性は非対称なものとなる。これによって生じる現象で作業の安全性、稼働率に影響を及ぼすと考えられるものにサブハーモニック現象が挙げられる。荷役作業船のような浮体が係留される海域は湾奥や比較的静穏度の高い港湾であると考えられるが、最近の実船観測では係留特性の非対称性だけでは船体運動を正確に予測することができないと言われている。従来の研究では不規則波中の比較的長い周期の波によってこのような現象が増幅されていると指摘されており、特に最近の研究においては、港外長周期波の港湾内への進入によって引き起こされる港内の副振動による長周期運動の荷役稼働に与える影響が指摘されている。しかし、これらの研究は波浪外力を線形の範囲で検討した結果であり、浅海域で問題となるセットダウン波として知られる2次入射波を含めた長周期変動波漂流力の荷役稼働への影響については検討されていないものと考えられる。そこで本論ではまず係岸船舶の動揺に与える長周期変動波漂流力の影響について、荷役稼働率を用いて比較検討を行うことを第一の目的とする。さらに、船体の動揺に与える影響因子として岸壁反射率、離岸距離についても着目し、その影響について検討を行うことを第二の目的とする。

2. 理論解析

本論においては、長周期変動波漂流力や係留系の復元力特性といった非線形問題も取り扱うため、時間領域の6自由度運動方程式による3次元非線形数値シミュレーションを用いた。本論で用いた座標系を図-1に示す。

2.1 運動方程式

時間領域の運動方程式は、固有周期に対応した同調現象も含め、時々刻々の流体力係数を選択できる次式で示される運動方程式を用いるものとする。流体力係数、波

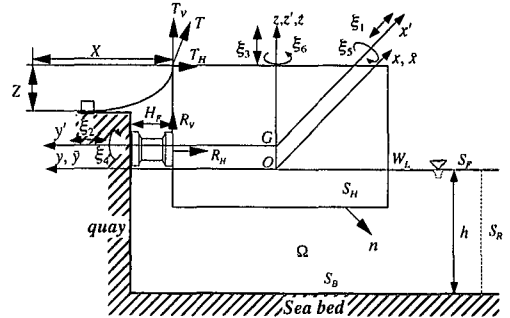


図-1 座標系

強制力については岸壁に鏡像の原理を応用した3次元特異点分布法により求めた(増田ら, 1994及び1995)。

$$\sum_{j=1}^6 \left[\{m_{ij} + am_{ij}(\infty)\} \ddot{\xi}_j(t) + \int_0^\infty K_{ij}(t-\tau) \dot{\xi}_j(\tau) d\tau + N_{vij} \dot{\xi}_j(t) | \dot{\xi}_j(t) | + B_{wij} \dot{\xi}_j(t) + C_{ij} \xi_j(t) + G_i \{ \xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t) \} \right] = F_i^{(1)} + F_i^{(2)} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 m_{ij} ：広義の付加質量、 $am_{ij}(\infty)$ ：周波数無限大での広義の付加質量、 K_{ij} ：メモリー影響関数、 N_{vij} ：粘性減衰力係数、 B_{wij} ：波漂流減衰係数、 C_{ij} ：静的復元力係数、 G_i ：係留索及びフェンダーの係留力、 $F_i^{(1)}$ ：1次波強制力、 $F_i^{(2)}$ ：2次波強制力である。

2.2 波浪外力

1次波強制力、2次波強制力は波振幅 $\zeta(t)$ とインパルス応答関数 $g_i^{(1)}(\tau)$ 、 $g_i^{(2)}(\tau_k, \tau_l)$ との畳み込み積分により以下のように表現できる。

$$F_i^{(1)}(t) = \int_{-\infty}^\infty g_i^{(1)}(\tau) \zeta(t-\tau) d\tau \dots \dots \dots (2)$$

$$F_i^{(2)}(t) = \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty g_i^{(2)}(\tau_k, \tau_l) \zeta(t-\tau_k) \zeta(t-\tau_l) d\tau_k d\tau_l \dots \dots \dots (3)$$

また、インパルス応答関数は1次、2次の伝達関数 $H_i^{(1)}(\omega)$ 、 $H_i^{(2)}(\omega_k - \omega_l)$ を用いて以下のように表される。

$$g_i^{(1)}(\tau) = \text{Re} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty H_i^{(1)}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \right] \dots \dots \dots (4)$$

* 正会員 工博 日本大学教授
** 正会員 工博 海洋科学技術センター
*** 工修 (株)日本港湾コンサルタント

$$g_i^{(2)}(\tau_k, \tau_l) = \text{Re} \left[\frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_i^{(2)}(\omega_k - \omega_l) \cdot e^{i(\omega_k \tau_k - \omega_l \tau_l)} d\omega_k d\omega_l \right] \dots\dots\dots (5)$$

ここで、2次伝達関数 $H_i^{(2)}(\omega_k - \omega_l)$ は、浮体の1次運動をその平均位置周りで摂動展開し、瞬時の没水面に働く流体圧を積分することで以下のように求められる。

$$\begin{aligned} H_i^{(2)}(\omega_k - \omega_l) = & -\frac{\rho g}{4} \int_{WL} \eta_{hk}^{(1)} \eta_{li}^{(1)*} n_i dl \\ & + \frac{\rho}{4} \iint_{SH} \nabla \phi_k^{(1)} \cdot \nabla \phi_l^{(1)*} n_i ds \\ & + \frac{i\rho\omega_l}{2} \iint_{SH} \bar{X}_k^{(1)} \cdot \nabla \phi_l^{(1)} n_i ds \\ & + \frac{m_i \omega_k^2}{2} \bar{X}_{ck}^{(1)} \times \bar{a}_l^{(1)*} \\ & - i\rho(\omega_k - \omega_l) \iint_{SH} \phi_k^{(2)}(\omega_k - \omega_l) n_i ds \\ & \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで、 ρ ：流体密度、 $\eta_k^{(1)}$ ：1次波面上昇量、 $\phi^{(1)}$ ：1次の全速度ポテンシャル、 $\bar{X}^{(1)}$ ：浮体上点の1次変位ベクトル、 WL ：浮体水線、 $\bar{X}_c^{(1)}$ ：浮体重心の1次変位ベクトル、 $\bar{a}^{(1)}$ ：1次変位角ベクトル、 $\phi_k^{(2)}$ ：2次差成分入射波ポテンシャルである。

2.3 係 留 力

(1) 弛緩係留

係留索により係留された場合の係留力 G_i は、物体固定座標系上での各浮体側係留索取付点座標 $(x'_{Pi}, y'_{Pi}, z'_{Pi})$ 及び水平面内での各係留索取付角 α_i を用いて以下のように表すことができる。

$$G_1\{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)\} = \sum_{i=1}^N -T_{Hi} \cos \alpha_i \dots\dots\dots (7)$$

$$G_2\{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)\} = \sum_{i=1}^N -T_{Hi} \sin \alpha_i \dots\dots\dots (8)$$

$$G_3\{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)\} = \sum_{i=1}^N -T_{Vi} \dots\dots\dots (9)$$

$$\begin{aligned} G_4\{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)\} = & \sum_{i=1}^N T_{Hi} z'_{Pi} \sin \alpha_i - T_{Vi} y'_{Pi} \\ & \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_5\{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)\} = & \sum_{i=1}^N T_{Vi} x'_{Pi} - T_{Hi} z'_{Pi} \cos \alpha_i \\ & \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_6\{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)\} = & \sum_{i=1}^N T_{Hi} y'_{Pi} \cos \alpha_i - T_{Hi} x'_{Pi} \sin \alpha_i \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

ここで、各索の水平張力 T_{Hi} 及び鉛直張力 T_{Vi} は修正カテナリー理論を用いて求める。

(2) フェンダー係留

フェンダーには定反力フェンダーを用いるとする。そ

の係留力 G_i は、各フェンダーの圧縮量を便宜上 x_i とすると以下のように表される。

$$G_1\{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)\} = \sum_{i=1}^N f_j(x_i) \cos \alpha_{di} \dots\dots\dots (13)$$

$$G_2\{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)\} = \sum_{i=1}^N f_j(x_i) \sin \alpha_{di} \dots\dots\dots (14)$$

$$G_3\{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)\} = \sum_{i=1}^N \mu_i f_j(x_i) \dots\dots\dots (15)$$

$$\begin{aligned} G_4\{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)\} = & \sum_{i=1}^N \mu_i f_j(x_i) y'_{Di} - f_j(x_i) z'_{Di} \sin \alpha_{di} \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_5\{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)\} = & \sum_{i=1}^N f_j(x_i) z'_{Di} \cos \alpha_{di} - \mu_i f_j(x_i) x'_{Di} \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_6\{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t)\} = & \sum_{i=1}^N f_j(x_i) x'_{Di} \sin \alpha_{di} - f_j(x_i) y'_{Di} \cos \alpha_{di} \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

ここで、 $(x'_{Di}, y'_{Di}, z'_{Di})$ ：物体固定座標系上での各フェンダー圧縮点の中心座標、 α_{di} ：各フェンダーの水平面内で x 軸となす角、 μ_i ：受衝板の摩擦係数である。また、 $f_j(x)$ は各圧縮歪みの関数として反力を表したものである。

3. 荷役稼働率

荷役稼働率は上田ら(1994)による算出法を基に求める。まず、有義波高、有義周期ごとの係留浮体の数値シミュレーションを行い、その結果に基づいて、荷役の可否で規定される荷役許容動揺量を用いて、船種、船型、波向、波周期別に荷役許容波高を求める。荷役許容波高は、数値シミュレーション結果から得られる各有義周期での各動揺振幅の最大値と有義波高の関係を回帰分析し、最大動揺量を荷役許容動揺量以下とする波高として算出する。最後に、算出された荷役許容波高と、設置海域における波高と周期の結合出現確率を用いて、以下のように荷役許容波高を算出する。

$$P = \int_0^{H_\infty} \int_0^{T_\infty} Q(H, T) W(H, T) dT dH \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 P ：荷役稼働率、 H_∞ ：波高の最大値、 T_∞ ：周期の最大値、 $Q(H, T)$ ：波の出現確率、 $W(H, T)$ ：各有義波での荷役可否である。

4. 数値計算モデル

数値シミュレーションに用いたモデルを図-2に、その諸元を表-1に示す。計算モデルは、岸壁に直接係留された10,000 DWT級程度の一般貨物船を対象としている。計算条件は、Bretschneider-光易型スペクトルから算出した不規則波とし、波の入射方向は浮体の動揺に一番厳しいと考えられる90度方向からとした。係留索には

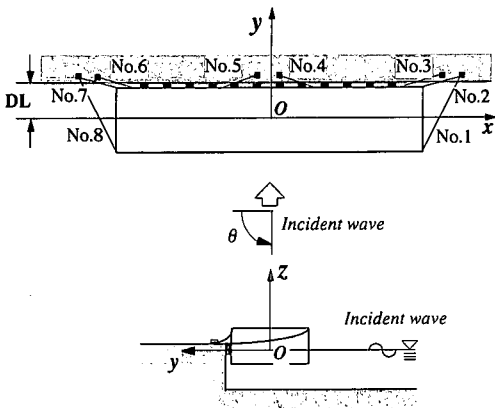


図-2 数値シミュレーションモデル配置図

表-1 数値シミュレーションモデル諸元

長さ (m)		128.0
幅 (m)		18.0
吃水 (m)		3.0
排水量 (m³)		6912.0
ロープ長	No. 1, No. 8	24.0
	No. 2, No. 7	12.7
	No. 3, No. 6	14.6
	No. 4, No. 5	12.7
フェンダー高さ (m)		0.8
水深 (m)		10.0

せていることが考えられる。8.0秒より長い周期の場合には、1次波強制力のみでもサブハーモニック現象により十分な動揺量を示し、長周期変動波漂流力の影響は顕著に現れないと考えられる。次に、この結果に基づき、表-3、表-4に示すような波浪分布を持つAの港湾(上田ら, 1994)、Bの港湾(港湾資料 No. 744, 1993)についてそれぞれ荷役稼働率を算定したものが表-5である。まず、Aの港湾においては、長周期変動波漂流力を考慮する場合としない場合を比較しても大きな差はみられない。これは、この港湾では波浪分布が沖波とほぼ同等であり、荷役許容波高の差が顕著に現れない周期帯を中心に波浪分布が集中しているため、全体としての稼働率に与える長周期変動波漂流力の影響は小さかったものと考えられる。この結果は、対象船舶は違うが上田ら(1994)によるAの港湾での30,000 DWT、波向き60度での荷役稼働率の結果(63.8%)より考えると、波向き90度とした本計算による稼働率はほぼ妥当であると考えられる。次に、波浪分布の異なるBの港湾についても同様の比較を行った。この場合、荷役稼働率は大きく異

表-2 許容動揺量

一般貨物船	運動モード					
	前後揺れ (m)	左右揺れ (m)	上下揺れ (m)	左右揺 (deg)	前後揺 (deg)	船首揺 (deg)
	±1.0	±0.75	±0.5	±2.5	±1.0	±1.5

60φのナイロンロープを用い、8本で係留した。フェンダーは、800 H の定反力型フェンダーを用い、8.0 m 間隔で岸壁に12基設置した。

5. 結果及び考察

5.1 荷役稼働率による比較

図-2に示したモデル用いて、岸壁前面での浮体の荷役稼働率を算定した。この時、岸壁は完全反射とした。まず、有義波高、有義周期ごとに行った数値シミュレーション結果に基づいて求められた荷役許容波高の1次波強制力のみを考慮したものと長周期変動波漂流力まで含めて考慮したものとの比較を図-3に示す。この荷役許容波高は表-2に示す一般貨物船の荷役許容動揺量に基づいて、各運動モードの最大動揺量が許容動揺量を超過しないように決定したものである。この結果から、長周期変動波漂流力を考慮した場合としない場合とでは、短周期側での荷役許容波高が大きく異なっている。これは、そのような周期においては1次波強制力のみを外力とした場合、サブハーモニックに起因する左右揺れの動揺量が小さいため、長周期変動波漂流力を考慮すると、動揺量に与える2次の長周期運動の影響が顕著に現れ、動揺量を増幅さ

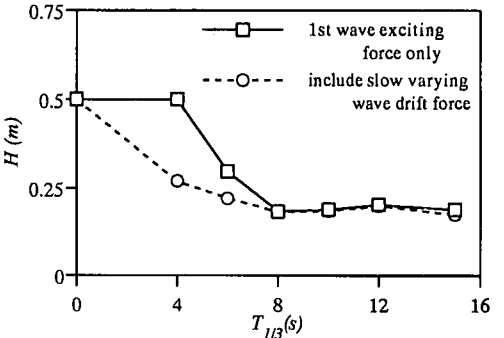


図-3 荷役許容波高

表-3 波浪の頻度分布 (Aの港湾)

沖波波高 (m)	有義周期 (s)														合計
	0-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15		
0.00-0.05	0.39	0.99	1.89	3.39	5.09	5.00	4.20	2.80	1.31	0.39	0.10	0.00	0.00	25.55	
0.50-1.00	0.10	0.71	2.60	6.20	11.31	12.20	8.39	4.80	3.01	1.60	0.71	0.19	0.00	51.82	
1.00-1.50	0.00	0.00	0.49	1.40	1.89	3.20	3.47	2.30	1.80	0.79	0.19	0.10	0.00	15.63	
1.50-2.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.40	0.60	0.99	1.07	0.70	0.30	0.19	0.00	0.00	4.55	
2.00-2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.20	0.40	0.30	0.30	0.20	0.00	0.00	1.60	
2.50-3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.00	0.00	0.60	
3.00-3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	
3.50-4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
4.00-4.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
4.50-5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5.00-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	0.49	1.70	4.98	11.29	18.79	21.10	17.35	11.47	7.32	3.58	1.49	0.29	0.00	100.0	

表-4 波浪の頻度分布 (Bの港湾)

冲波波高 (m)	有義周期 (s)														合計
	0-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15		
0.00-0.25	1.14	6.35	0.70	0.08	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.30	
0.25-0.50	6.71	61.04	8.93	0.69	0.11	0.06	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	77.56	
0.50-0.75	0.49	7.45	1.15	0.22	0.09	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.47	
0.75-1.00	0.02	1.72	0.91	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.71	
1.00-1.25	0.00	0.24	0.82	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10	
1.25-1.50	0.00	0.01	0.45	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	
1.50-1.75	0.00	0.00	0.15	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	
1.75-2.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	
2.00-2.25	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	
2.25-2.50	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
2.50-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	8.36	76.81	13.16	1.22	0.26	0.12	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	

表-5 荷役稼働率

	A 港	B 港
1 次波強制力のみ	48.31 %	83.43 %
1 次波強制力+変動波漂流力	44.32 %	24.00 %

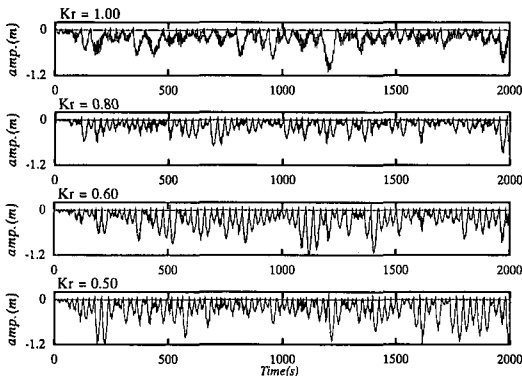


図-4 左右揺れ動揺量の時系列

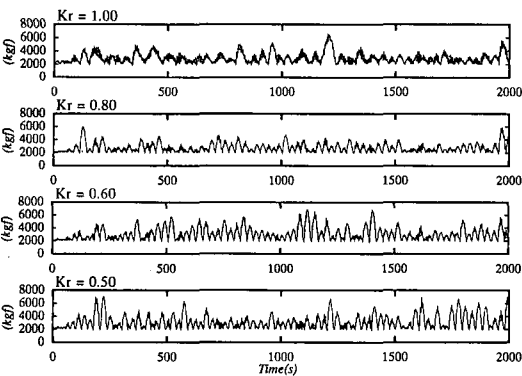


図-5 索張力の時系列

なる結果となった。この理由として、この港湾の波浪分布は荷役許容波高が大きく異なる周期帯に特に集中しており、全体としての稼働率に与える長周期変動波漂流力の影響が顕著に現れたものと考えられる。このようなことから、港湾の波浪分布が特に浮体の散乱・回折の影響が大きくなる比較的短周期側に集中するような場合、波

高は小さいにも関わらず変動波漂流力の影響が大きく現れることがあると言える。

5.2 岸壁反射率の影響

次に、離岸距離をフェンダー高さに固定し、岸壁の反射率(K_r)を1.00, 0.80, 0.60, 0.50と変化させた時の左右揺れ方向の動揺の時系列を図-4に、その時のNo. 1ロープの索張力の時系列を図-5に示す。また左右揺れ方向の動揺のスペクトルを図-6に、その時の索張力のスペクトルを

図-7に示す。この時の不規則波は、有義周期6.0秒、有義波高0.4mとした。まず、完全反射の場合と比べて反射率が0.8の場合には動揺量は減少する傾向がみられる。しかし、さらに反射率を小さくした場合には、完全反射の場合よりも大きな動揺量となっており、張力の時系列も同様の傾向を示している。さらに、ゼロアップクロス法により解析した各応答の最大値を表-6に示すが、この最大値からもこの傾向がうかがえ、反射率を低

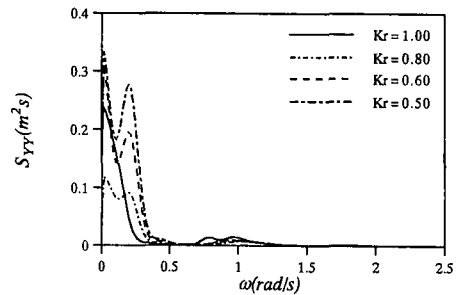


図-6 左右揺れ動揺量のスペクトル

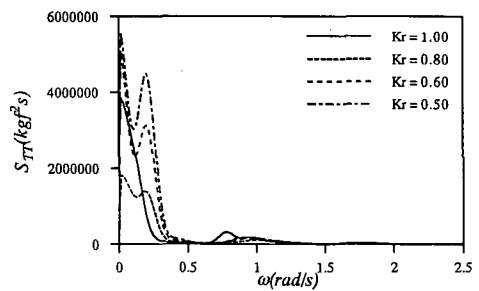


図-7 索張力のスペクトル

表-6 左右揺れ動揺量及び係留索張力の最大値

	左右揺れ動揺量 (m)	No. 1 索張力 (kgf)
$K_r=1.00$	1.115	6646
$K_r=0.80$	0.935	5937
$K_r=0.60$	1.164	6936
$K_r=0.50$	1.359	7783

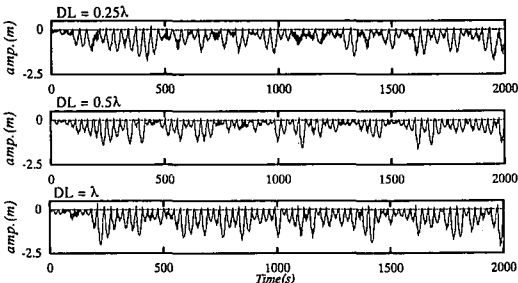


図-8 左右揺れの動揺量時系列

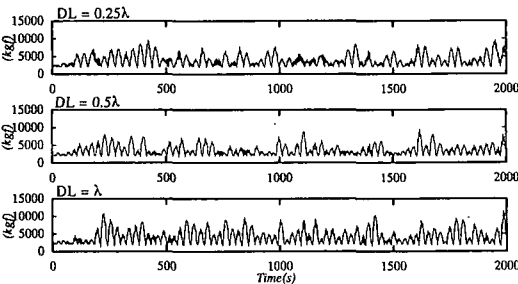


図-9 索張力の時系列

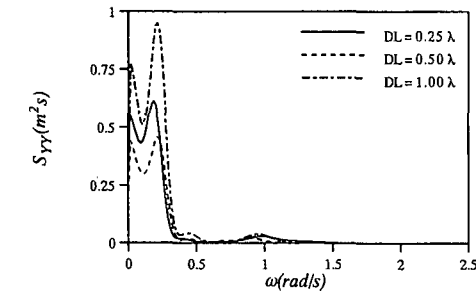


図-10 左右揺れ動揺量のスペクトル

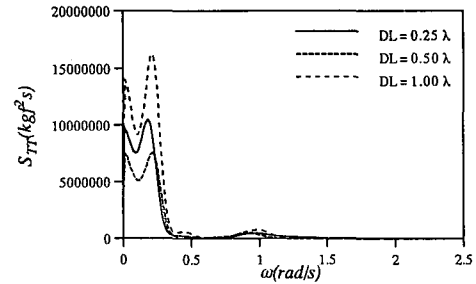


図-11 索張力のスペクトル

表-7 左右揺れ動揺量及び係留索張力の最大値

	左右揺れ動揺量 (m)	No. 1 索張力 (kgf)
$DL=1.25\lambda$	2.040	10750
$DL=0.50\lambda$	1.675	9531
$DL=1.00\lambda$	2.510	13070

ロープの索張力 (No. 1 ロープ) の時系列計算結果を図-9 に示す。また、左右揺れ方向の動揺のスペクトルを図-10 に、索張力のスペクトルを図-11 に示す。さらに、ゼロアップクロス法により解析した各応答の最大値を表-7 に示す。この時の岸壁は完全反射としている。不規則波は岸壁反射率の影響の場合と同様のものを用いている。計算結果から、離岸距離と波長の比を1波長分とした時の動揺量が最も大きいことが分かる。また、離岸距離と波長の比を0.5λとした時に動揺量が最も減少しており、このことは、離岸距離と入射波の波長比により浮体と岸壁間の重複波の影響が顕著に現れ、入射波の半波長分の周期で応答が変動するとした従来の周波数応答の結果とも一致している (清川・平山, 1986)。

6. 結 言

本論で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 岸壁の反射率を低く見積もった場合、必ずしも動揺の低減は期待できない。
- (2) 離岸距離を大きくした場合、入射波の半波長程度の周期で、応答が変動する傾向がある。
- (3) 荷役稼働率を算定する場合、港湾の波浪分布によっては荷役稼働率に与える長周期変動波漂流力の影響が無視できない場合もある。

参 考 文 献

神谷昌文・榎美洋一・菅沼史典・小泉信男： 苫小牧東港における船体動揺に関する現地観測，海洋開発論文集 Vol. 1, 1995.
増田光一・大澤弘敬： 沿岸海域に弛緩係留された浮遊式建築物の運動応答及び係留索張力の予測法に関する研究，日本建築学会構造系論文集第 464 号，1994。
増田光一・大澤弘敬： 沿岸海域に弛緩係留された浮遊式建築物の運動応答及び係留索張力の予測法に関する研究 (第 2 報) 一避難場所を有する浮遊式建築物の応答評価一，日本建築学会構造系論文集第 471 号，1995。
庄司邦明： 係留浮体の運動と係留索張力に関する研究，日本造船学会論文集第 138 号，1975。
上田 茂・白石 悟・大島弘之・浅野恒平： 係岸船舶の動揺に基づく許容波高及び稼働率，港湾技研資料 No. 779，運輸省港湾技術研究所，1994。
運輸省港湾技術研究所： 全国港湾海洋波浪観測 20 年統計，港湾技研資料 No. 744，運輸省港湾技術研究所，1993。
清川哲志・平山彰彦： 岸壁全面の浮体動揺解析における 3 次元性の影響，第 33 回海岸工学講演会論文集，土木学会，1986。

くした場合においても、一概には動揺量の低減が期待できないと思われる。

5.2 離岸距離の影響

次に、離岸距離 (岸壁と浮体重心間の距離) と有義周期の波長の比を 0.25λ, 0.50λ, λ と変化させた時の左右揺れの動揺の時系列計算結果を図-8 に、その時の No. 1