

船体動揺計算における港内副振動の考慮方法と 粘性減衰係数の評価

藤畑定生*・秦 禎勝**・中山晋一***・森屋陽一****
関本恒浩***・池野正明*****・笹 健児*****

1. はじめに

近年, 船舶の大型化に伴い, 港内係留船舶の長周期動揺が荷役中断や係留索の破断の原因となり問題となっている。港湾の計画策定や運営に当たり, 係留船舶の動揺量を把握する必要がある, その評価を行うには数値計算を行う必要がある。

港内係留船舶の動揺の数値計算を行う場合には, 船体動揺と港内波浪場を連成させて解くことが望ましく, 榎木ら (1988), 大山ら (1992) により計算方法が提案されているが, いずれも規則波を対象とした周波数領域での計算法であるため, 長周期波まで含めた多方向不規則波浪場を扱うことは困難である。長周期波も含めた不規則波に対する動揺計算を行うには, 現時点では, 浮体の運動方程式にメモリー影響関数を導入して浮体の運動を時系列的に解く方法 (例えば, 久保ら, 1988) が最も有効であると考えられる。この手法を用いて, 長周期波も含めた不規則波に対する動揺計算は, 白石ら (1995) により行われている。しかし, 港内の長周期波は多重反射波浪場となるにも関わらず, 長周期波の多方向性は考慮しておらず, 外力としての波浪場の評価方法に検討の余地があるものと考えられる。

本研究では, まず, 浮体の運動方程式にメモリー影響関数を導入した船体動揺の時系列計算における港内副振動の考慮方法を提案し, 港内外波浪場と船体動揺の現地観測結果に基づき動揺量の最大値のみでなく動揺量の周波数スペクトルの形状についての比較検討も行った。次いで, 現地観測結果に基づいて, 動揺計算において重要なパラメタである粘性減衰係数の評価を数値的に行った。最後に, 係留船舶の動揺計算の外力として, 短周期波 (通常の風波) と長周期波の両方与えた場合, 長周期波のみ与えた場合, 短周期波のみ与えた場合について動揺量の比較を行い, 長周期動揺と外力波浪の周波数との

関係について検討を行った。

2. 計算対象条件の設定

熊本県の最西端の天草下島に位置し, 東シナ海に直接面している九州電力 (株) 苓北発電所専用港湾において, 1996年2月23日~25日および1996年3月14日~3月17日の期間に, 揚炭岸壁に係留された石炭運搬船 (約 68,636 DWT) を対象に, 船体動揺量, 係留索張力, 防舷材変位と港内外の水圧, 流速および水位の連続観測が行われた (観測の詳細については朝崎ら (1999) を参照)。図-1 に港湾形状および波浪場の観測地点位置図を示す。

観測期間中の3月15日に観測地点付近を低気圧が通過し, 有意な船体動揺が観測された。そこで, 本研究では港外有義波高が約 3 m, Surging の片振幅最大値約 0.9 m となった3月15日の13時からの1時間データを検

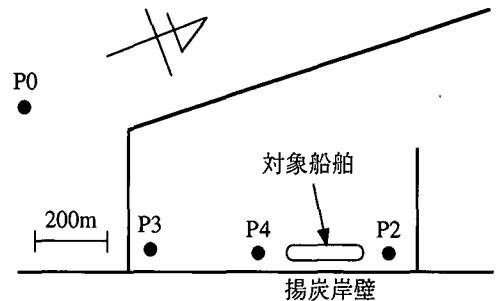


図-1 調査地点位置図

表-1 係留船舶の船体諸元

全長	L (O.A.)	224.0 m
垂線間長	L (B.P.)	215.0 m
幅	B (MLD)	32.2 m
深さ	D (MLD)	18.2 m
喫水	Draft (MLD)	7.94 m
排水量	Disp.	43,737 t
重心高さ	KG	8.19 m
重心位置	Mid-G.	2.91 m
水線上正面受風面積	AA	1,232 m ²
水線上側面受風面積	BB	3,189 m ²

* 正会員 工 修 九州電力(株)土木部火力原子力土木課
 ** 九州電力(株)土木部火力原子力土木課
 *** 正会員 工 修 五洋建設(株)技術研究所
 **** 正会員 博(工) 五洋建設(株)技術研究所
 ***** 正会員 工 博 電力中央研究所
 ***** 正会員 商船修 (株)日本海洋科学調査第一部

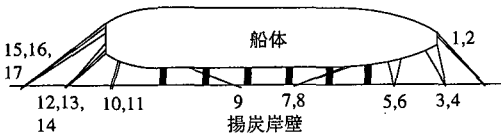


図-2 係留状況の模式図

討対象とした。

計算に用いた観測時の係留船舶の船体諸元を表-1に示し、係留状況の模式図を図-2に示す。揚炭岸壁に設置されている防舷材は厚み1,600 mmの定反力型防舷材であり、6基ほど接触する状態であった。観測時に係留船舶に用いられていた係留索はφ70 mm、破断荷重656.6 kNの繊維索であった。観測時の状況から判断して、係留索No.1~4, 6, 7, 9, 13~16には初期張力39.2 kNが作用しているものとし、残りの係留索には初期張力が作用していないものとして計算した。

3. 港内副振動を考慮した動揺計算

3.1 港内副振動の考慮方法

船体動揺の計算手法としては、浮体の運動方程式にメモリー影響関数を導入して浮体の運動を時系列的に解く方法(例えば、久保ら、1988)を用いた。

この方法を用いる場合、船体に作用する外力を時系列で評価する必要がある。港内に係留されている船舶には、短周期波(周期10秒前後)以外に港内副振動により発達し多重反射波浪場となった長周期波が作用するものと考えられる。

藤畑ら(1998)は、今回対象とした観測時に得られた港内外の水位変動および流速変動に関して、入射波の多方向性も考慮した Boussinesq 方程式の数値計算により、長周期波も含めて再現可能なことを示している。そこで、本研究では、Boussinesq 方程式を用いた港内波浪場の数値計算結果から、船体重心位置での長周期波の不規則性および多方向性を評価することにより、係留船舶の動揺計算に港内副振動の影響を考慮した。

具体的な港内副振動の考慮方法を以下に示す。

① 入射波の多方向性を考慮した Boussinesq 方程式の数値計算により、船体重心位置での水位変動の周波数スペクトル(図-3)を評価する。得られた周波数スペクトルをエネルギー等分割で短周期10成分、長周期10成分にそれぞれ分割し、合計20成分の振幅と周期を決定する。各成分間の位相は乱数により決定する。ここで、短周期成分と長周期成分の境界値は、港内外で観測された水位変動の周波数スペクトルのエネルギーが小さくなる周波数とし、短周期成分は0.06 Hz以上、長周期成分は0.005~0.06 Hzとした。

② 短周期成分の波向は港口からバース位置の方向として与える。長周期成分の波向は、Boussinesq 方程式の数値計算により、周波数スペクトルのピークに対応する数段階(ここでは5段階)の周波数幅に対する港内有義波高分布により決定する。図-4に例として、0.008~0.014 Hzの港内有義波高分布を示す。この周波数帯での波向は、図中の矢印の向きとした。図-5に設定した波向を模式的に示す。

③ 長周期成分は港内での重複波性を考えるため同一周期で相反する波向の2成分波として与え、2成分間の位相差は、成分毎に対応する反射壁を定め、対応する反

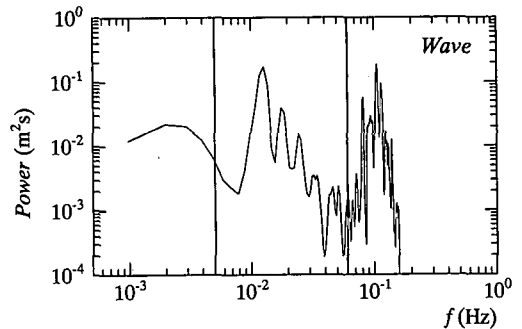


図-3 船体重心位置での波の周波数スペクトル

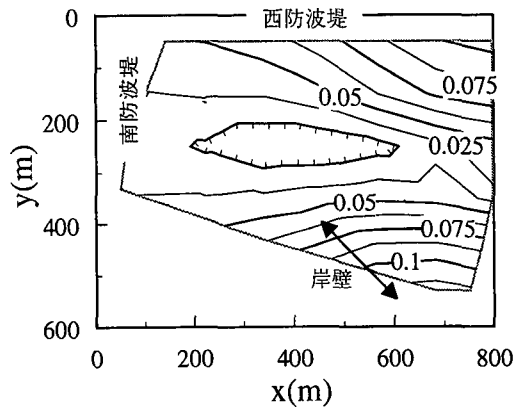


図-4 港内有義波高分布 (0.008~0.014 Hz)

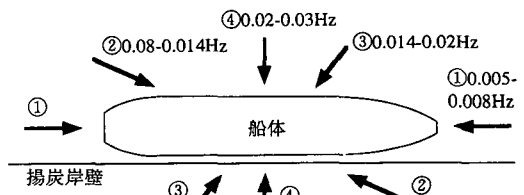


図-5 設定した波向の模式図

(0.03~0.06 Hzの範囲には成分波なし)

表-2 外力の違いの検討ケース

	外力評価位置	岸壁反射	副振動	風
Case 1	P 2 (船首)	—	—	—
Case 2	P 4 (船尾)	—	—	—
Case 3	P 2 (船首)	○	—	—
Case 4	船体重心	○	—	—
Case 5	船体重心	○	○	—
Case 6	船体重心	○	○	○

射壁までの距離と自由波としての波速を用いて決定した。2成分波として与えるため、振幅は反射壁での反射率を考慮して、エネルギー的に元の周波数スペクトルと矛盾しないように再度決定する。ここでは、岸壁構造を考慮してすべての長周期成分の反射率は1.0とした。

外力としての風は、観測時に得られた風速 (5 m/s)、風向 (WSW) の変動風とした。

流体力係数算定において、揚炭岸壁の存在のみ鏡像法により考慮し、他の防波堤の存在は流体力係数におよぼす影響は小さいと考え考慮しなかった。

動揺計算は、時間刻み 0.25 秒で 1500 秒間行った。予備検討の段階で 3800 秒間の計算も行い、1500 秒の計算結果と比較した。最大値には大きい場合で 1 割程度の差が認められたが、周波数スペクトルには有意な差は認められなかった。

上記方法により外力を作成し、表-2 に示す検討ケースに対して、外力の与え方の違いが動揺量に及ぼす影響の検討を行った。

3.2 検討結果

図-6 は各検討ケースにおいて長周期動揺が顕著であ

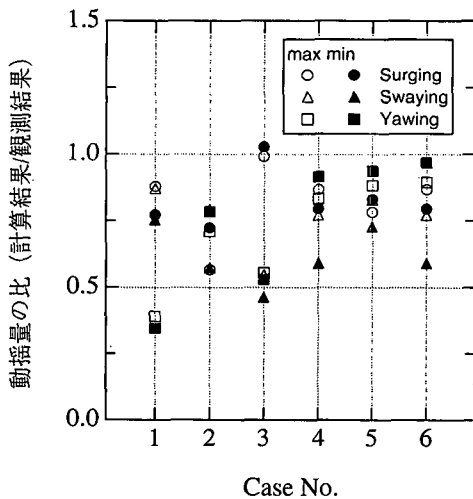
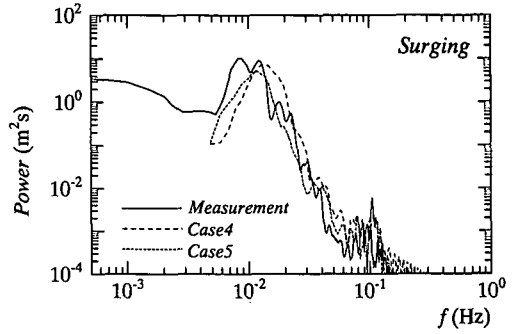
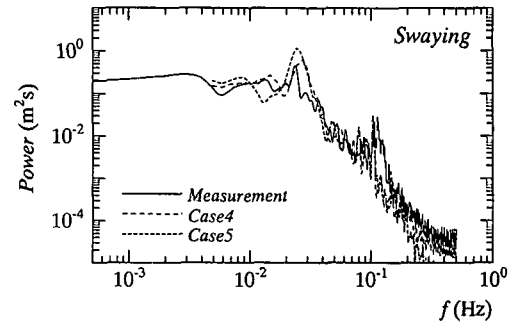


図-6 動揺量の最大値および最小値の比較 (動揺量の観測結果の値は表-3参照)



(a) Surging



(b) Swaying

図-7 港内副振動考慮の有無による周波数スペクトル

る Surging, Swaying および Yawing の最大値および最小値を比較したものである。

船体重心位置での波浪を外力として与えて計算することにより、Surging, Swaying および Yawing とも現地観測結果に近い値となる。また、船体重心位置での波浪を外力として与え、港内副振動を考慮していない場合 (Case 4) と港内副振動も考慮した場合 (Case 5)、さらに風も考慮した場合 (Case 6) を比較すると、動揺量の最大値および最小値に関する比較では、顕著な差は現れなかった。

図-7 は、港内副振動を考慮した場合 (Case 5) と考慮していない場合 (Case 4) の Surging および Swaying の周波数スペクトルを現地観測結果と比較したものである。動揺量の最大値および最小値に関する比較では、顕著な差は現れなかったが、Surging および Swaying の周波数スペクトルのピークとなる周波数は、港内副振動を考慮した場合としない場合でずれており、港内副振動を考慮した場合のほうが Surging および Swaying の周波数スペクトルは現地観測結果に近くなるという結果になった。

4. 粘性減衰係数の評価

久保ら (1988) によれば、粘性減衰力は次式で表され

る。

$$D_i(t) = a_i \frac{\partial x_i(t)}{\partial t} + b_i \left| \frac{\partial x_i(t)}{\partial t} \right| \frac{\partial x_i(t)}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $D_i(t)$ は粘性減衰力、 a_i および b_i は粘性減衰係数であり、 $x_i(t)$ は船体変位、添字の i は船体運動のモードを表す。粘性減衰係数は、

$$a_i = \frac{4.0\alpha_i}{T_{Ni}} \{M_{ii} + m_{ii}(\infty)\} \dots\dots\dots (2)$$

$$b_i = \frac{3.0\beta_i}{4.0} \{M_{ii} + m_{ii}(\infty)\} \dots\dots\dots (3)$$

で表される。ここで、 M_{ii} は浮体の質量または慣性モーメント、 $m_{ii}(\infty)$ は不変付加質量または不変付加慣性モーメント、 T_{Ni} は各動揺モードの固有周期であり、 α_i および β_i は減減係数である。

減減係数は係留船舶の自由振動の動揺曲線により評価が可能であるが、実船の自由振動の動揺を測定することは、容易ではないため、従来、数万トンクラスの大型船の粘性減衰係数は、久保ら (1980) により行われた排水量 430 t の小型船の自由振動実験により得られた減減係数の値を参考に、Surging 方向 $\alpha_1=0.5$ 、Swaying 方向 $\alpha_2=1.0$ 、他の減減係数の値は 0.0 として算定していた (Case 1~6 の計算も $\alpha_1=0.5$ 、 $\alpha_2=1.0$ として計算)。

ここでは、港内副振動等の考慮により動揺計算における粘性減衰係数以外の不確定要素はほぼなくなったと考え、動揺計算結果と現地観測結果を比較することにより、減減係数の同定を行った。ただし、変位速度に比例する係数 α の内の Surging と Swaying 方向の成分についてのみ検討を行い、他の減減係数の値は、従来用いられてきた値 0.0 とした。

図-8(a) は Swaying の減減係数を 1.0 として、Surging の減減係数を変化させて計算した場合の、Surging の 2 乗平均値の平方根 (rms 値) の変化である。図中の破直線は現地観測結果の rms 値を表している。Surging の減減係数の値としては、0.1~0.4 程度とすれば数値計算結果が現地観測結果とほぼ対応することがわかる。図-8(b) は Surging の減減係数を 0.3 として、Swaying の減

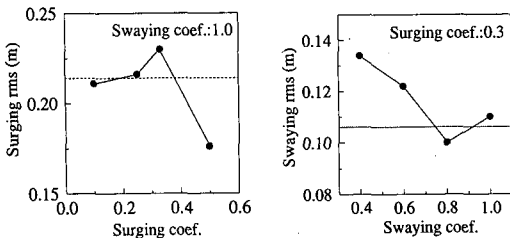


図-8 減減係数の変化による動揺 rms 値の変化

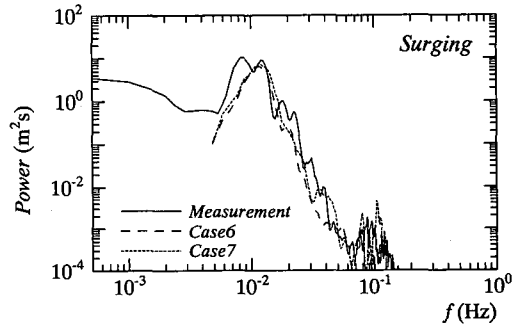
減減係数を変化させて計算した場合の Swaying の rms 値の変化である。Swaying の減減係数の値としては、0.7~0.9 程度とすれば数値計算結果が現地観測結果とほぼ対応することがわかる。

以上より、今回の検討条件における減減係数の最適値としては、Surging 方向 0.1~0.4、Swaying 方向 0.7~0.9 となると考えて良いであろう。そこで、Case 7 として減減係数を Surging 方向 0.3、Swaying 方向 0.8 とした計算 (Case 7) を行い、現地観測結果と数値計算結果の比較を行った。Case 7 の減減係数以外の計算条件は Case 6 と同じ (船体重心位置の波浪、港内副振動および風を考慮) である。

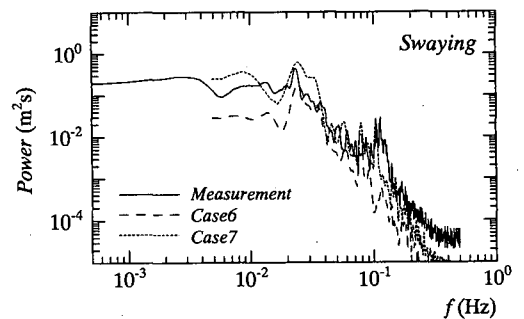
表-3 は現地観測結果と数値計算結果の Surging、Swaying および Yawing の動揺量の最大値および最小値を比較したものである。動揺の rms 値により減減係数の同定を行ったが、動揺量の最大値および最小値に関しても現地観測結果とよく一致する結果となった。

表-3 動揺量の最大値および最小値

	Surging (m)		Swaying (m)		Yawing (deg)	
	max	min	max	min	max	min
Meas.	0.557	-0.871	0.669	-0.117	0.408	-0.472
Case 6	0.483	-0.692	0.516	-0.069	0.365	-0.457
Case 7	0.565	-0.723	0.597	-0.084	0.293	-0.414

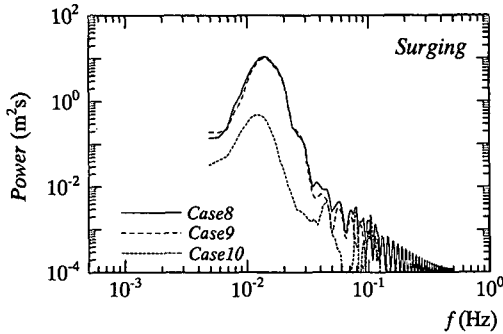


(a) Surging

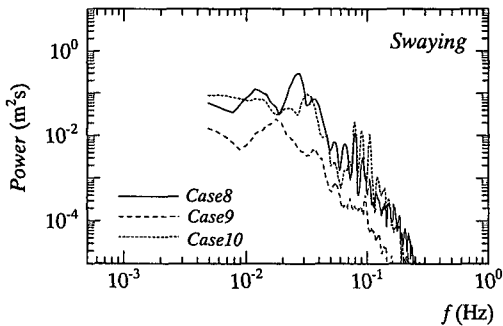


(b) Swaying

図-9 減減係数の違いによる周波数スペクトル



(a) Surging



(b) Swaying

図-10 短周期波の有無による周波数スペクトル

また、図-9は現地観測結果と数値計算結果の Surging と Swaying の周波数スペクトルを比較したものである。Case 6は図-7に示した Case 5に風を外力として加えたため、船体が岸壁に押しつけられ、現地観測結果に比べて Swaying の低周波数側のエネルギーが小さくなっているが、減減係数を適切に定めたことにより、周波数スペクトルのエネルギーレベルおよびピークとなる周波数も現地観測結果とほぼ同程度になった。

5. 長周期動揺と外力波浪の周波数の関係

係留船舶の長周期動揺と外力波浪の周波数との関係を検討するために、外力として短周期波および長周期波を与えた場合 (Case 8)、長周期波のみを与えた場合 (Case 9)、短周期波のみを与えた場合 (Case 10) の比較計算を行った。外力は Boussinesq 方程式を用いて波浪場の数値計算を行い船体重心位置での不規則波を与えた。港内副振動は考慮せず、短周期波の波向は港口からパースの方向とし、長周期波の波向は図-5で設定した②のパースに向かう方向の進行波として与えた。また、減減係数は Surging 方向 0.3, Swaying 方向 0.8 とした。

図-10は Surging と Swaying の周波数スペクトルを比較したものである。Surging は短周期波および長周期波を与えた場合と長周期波のみ与えて計算した場合の結

果がほぼ一致し、短周期波のみ与えて計算した結果は動揺のエネルギーがかなり小さくなる。しかしながら、Swaying に関しては、短周期波および長周期波を与えた場合と短周期成分のみ与えて計算した結果がほぼ対応し、長周期成分のみ与えて計算した結果は、かなり小さくなる。

以上より、係留船舶の長周期動揺を評価する際の外力としては、長周期波のみでなく、短周期波も正しく評価する必要があることがわかる。

6. おわりに

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

① 船体動揺計算において、短周期波のみでなく港内副振動を考慮して長周期波を入力することにより、動揺量の最大値のみでなく、周波数スペクトルの形状でも現地観測結果とよく対応する結果を得た。

② 現地観測結果と数値計算結果との比較により、粘性減減係数算定に用いる減減係数の同定を行い、今回対象とした条件に対する減減係数の最適値としては、従来用いていた値よりもやや小さく、Surging 方向 0.1~0.4, Swaying 方向 0.7~0.9 となることがわかった。

③ 長周期波のみ与えた計算では、Swaying のエネルギーはかなり小さくなり、係留船舶の長周期動揺計算の外力としては、長周期波のみでなく、短周期波も正しく評価する必要があることが確認できた。

参考文献

- 朝崎勝之・松尾淑親・鶴飼亮行・森屋陽一・津金正典 (1999): 港内係留船舶の長周期動揺に関する現地観測と動揺シミュレーションの入力条件の評価, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 77-82.
- 大山 巧・土田 充・清川哲志 (1992): 部分三次元モデルによる任意海底地形・任意形状港湾内の船体動揺解析, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 821-825.
- 久保雅義・今枝彬郎・奥村宗行 (1980): 長周期船体運動計測装置の試作と測定結果について, 神戸商船大学紀要, 第二類, 第28号, pp. 289-298.
- 久保雅義・斎藤勝彦・下田直克・岡本俊策 (1988): 岸壁前面係留浮体の不規則波による船体動揺の時系列解析について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 687-691.
- 久保雅義・笹 健児・白石 悟・榊原繁樹 (1997): 数値計算手法が長周期波作用下における長周期船体動揺へ及ぼす影響について, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 236-240.
- 榊木 亨・青木伸一・濱本 敏 (1988): 港湾形状を考慮した港内船舶の回折・造波問題, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 692-696.
- 白石 悟・久保雅義・上田 繁・榊原繁樹 (1995): 係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 941-945.
- 藤畑定生・秦禎勝・森屋陽一・中山晋一・関本恒浩 (1998): 現地観測による港内長周期波浪流速特性とその予測手法に関する検討, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 306-310.