

# 港内係留船の波浪動揺特性とその予測

榎 木 亨\*・青木 伸一\*\*・馬場 英通\*\*\*

## 1. ま え が き

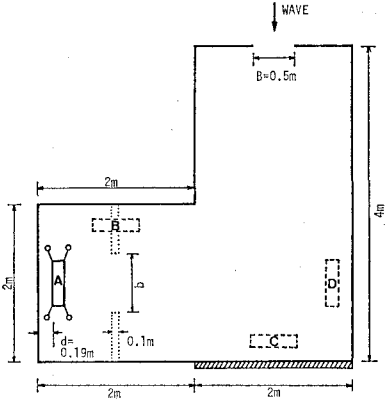
近年港湾の高度利用化や船舶の自動化が進み、さらには港湾活動の安全性に対する要求が高まるにつれて、港の静穏度を波や風などの自然条件で評価する従来の考え方に代って、利用者側からみたより直接的な指標である港内係留船の動揺量を評価基準にしようとする機運が高まっている。しかしながら現段階では、港内係留船の動揺を静度よく予測できる計算モデルの開発が十分ではなく、模型実験で検討された例はあるものの、我が国では未だ港湾計画に反映される段階にまでは到っていない。

本研究では、模型港湾内に線型係留された矩型浮体を対象とした水理実験により、入射波周期、バース位置、低反射岸壁の有無などによる動揺特性の変化を調べるとともに、著者らが先に開発した流体力算定モデルを用いて動揺計算を行い、その適用性を検討した。さらに、港内係留船の波浪動揺を低減させるために港側で講じられる種々の対策が、船体動揺に対してどのような影響を及ぼすのかについて若干の検討を加えた。

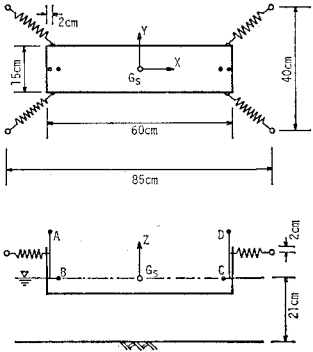
## 2. 実験装置および方法

水理実験は、平面水槽（長さ 13 m，幅 10 m）内に、図一1 に示すような L 字型の模型港湾を設置し、図中 A ～ D の位置に、矩型の模型船を線型バネで係留して行った。水深は 21 cm，入射波高は 1 ～ 3 cm の範囲内とし、入射波周期を 0.8 ～ 2.2 秒の範囲で変化させて模型船の動揺量を計測した。また図中に斜線で示した岸壁を、遊水部を有する多孔壁式低反射岸壁に置きかえて同様の実験を行った。係留状況を 図一2 に、模型船および係留系の諸元を表一1 に示す。

図一3 は 2 次元実験により得られた低反射岸壁の反射



図一1 模型港湾



図一2 模型船の係留状況

表一1 模型船および係留系の諸元

| モード   | 慣性                     | 固有周期 (港外) |
|-------|------------------------|-----------|
| Surge | 4.4 kg                 | 2.58 sec  |
| Sway  | 4.4 kg                 | 4.20 sec  |
| Heave | 4.4 kg                 | 0.60 sec  |
| Roll  | 0.023 kgm <sup>2</sup> | 0.93 sec  |
| Pitch | 0.166 kgm <sup>2</sup> | 0.67 sec  |
| Yaw   | 0.170 kgm <sup>2</sup> | 1.70 sec  |

船長 ( $L_s$ ) = 60cm      船幅 ( $B_s$ ) = 15cm  
喫水 ( $d_s$ ) = 4.9cm      型深 ( $D_s$ ) = 15cm  
重心位置：静水面下 0.08cm  
メタセンター高：1.44cm (Roll), 59.0cm (Pitch)

係留バネ定数 ( $k_i$ ) = 0.935kgf/m  
初期張力 ( $T_0$ ) = 0.103kgf

\* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科  
\*\* 正会員 工修 大阪大学助手 工学部土木工学科  
\*\*\* 正会員 工修 日本道路公団 新潟工事事務所

特性を示したもので、図中  $|K_R|$  は反射率を、 $D_n/L_w$  は岸壁前面から重複波の節までの距離と波長の比を示す。図には水深の異なる2つのケースが示されているが、 $|K_R|$ 、 $D_n/L_w$  とも、低反射岸壁の有水部幅  $B_p$  と波長の比によって統一的に表わされることがわかる。

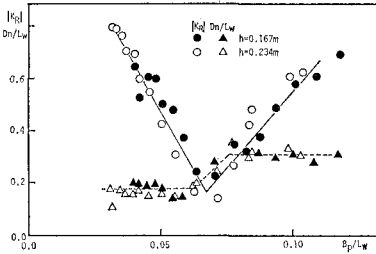


図-3 低反射岸壁の特性

動揺量の測定は、船の上方及び側方から、それぞれ2台のビデオカメラを用いて、船上に固定した標点(図-2のA~D点)の運動を撮影し、2台のカメラの同時記録を解析することにより、6自由度の運動(重心  $G_s$  の並進運動と重心まわりの回転運動)を分離・抽出した。

### 3. 計算法の概要

#### (1) 流体力の計算法

流体力の算定には、著者ら(1988)が先に提案した、グリーン関数を用いた境界積分方程式法を用いている。この方法は、図-4に示すように、対象とする領域を港外の半無限領域Ⅰ、船体近傍を除く港内領域Ⅱ、および船体近傍領域Ⅲに分割し、領域ⅠおよびⅡでは速度ポテンシャルを固有関数展開して2次元問題として取扱ひ、領域Ⅲでは3次元問題として取扱って、両者の解を仮想境界面  $B_1$ 、 $B_2$  上で接合させる方法である。ただし本研究では、図に示すように、船体が港湾境界に近接する場合および港内境界の一部が任意の反射率を有する場合にも適用できるように改良を行った。

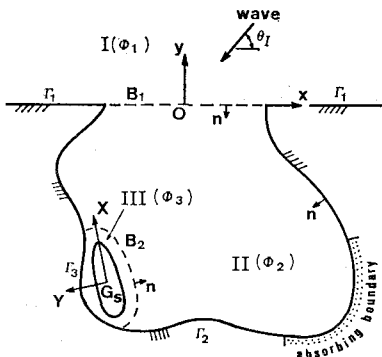


図-4 座標系と領域の分割

すなわち、船体が港湾境界に近接する場合には、領域Ⅲを近傍境界  $\Gamma_3$  を包含するようにとり、仮想境界面を図のように設定すればよい。また任意反射率を有する境界上では、次式で与えられる部分吸収条件を用いる。

$$\partial\phi/\partial n = ik\alpha\phi \quad \dots\dots\dots (1)$$

上式中の吸収率  $\alpha$  は、反射率  $K_R$  を用いて次式で与えられる。

$$\alpha = (1 - K_R)/(1 + K_R) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに  $K_R$  は複素数で、図-3の実験結果から反射率と位相差を読みとることにより与えることができる。ただし(1)式は本来進行波成分にのみ適用できる関係式であるので、進行波と減衰定常波を別々に取扱う領域Ⅱの境界上では、進行波成分についてのみ(1)式を適用し、減衰定常波成分については完全反射として取扱っている。

#### (2) 動揺の応答関数

図-2の  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  軸方向の並進運動を、それぞれ  $\xi_1$  (surge),  $\xi_2$  (sway),  $\xi_3$  (heave) とし、各軸まわりの回転運動をそれぞれ  $\xi_4$  (roll),  $\xi_5$  (pitch),  $\xi_6$  (yaw) とする。船体が線型系において角周波数  $\omega$  の正弦的な外力を受ける場合には、各モードの運動を次式で定義することができる。

$$\xi_i = \xi_{0i} e^{-i\omega t} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに  $\xi_{0i}$  は各モードの複素振幅である。

このとき、船体の運動方程式は次式で与えられる。

$$-\omega^2(m+M)\xi_0 - i\omega N\xi_0 + (c+k)\xi_0 = F_0^E \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $m$ 、 $M$ 、 $N$ 、 $c$  および  $k$  は、それぞれ船の慣性、付加慣性、減衰、復元力および係留力を表す  $6 \times 6$  のマトリックスであり、 $\xi_0$  および  $F_0^E$  は、運動および波強制力の複素振幅からなるベクトルである。

港内の船体に及ぼす波強制力は、港への入射波  $\zeta = \zeta_0 \cdot e^{-i(k \cos \theta_I x + k \sin \theta_I y + \omega t)}$  の関数であるので、次式のように表すことができる。

$$F_0^E = H^E(\omega, \theta_I) \zeta_0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに  $H^E$  は、単位振幅の入射波に対する波強制力を表すベクトルである。(5)式を(4)式に代入すると、 $\xi_0$  が次式で与えられる。

$$\xi_0 = H^S(\omega) H^E(\omega, \theta_I) \zeta_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに  $H^S(\omega)$  は、単位外力に対する運動の応答関数を表す  $6 \times 6$  のマトリックスで、次式で与えられる。

$$H^S(\omega) = [-\omega^2(m+M) - i\omega N + c + k]^{-1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

(6)式から明らかなように、港内係留船の運動は、船と港という2つの振動系を代表する2種類の応答関数  $H^S$  および  $H^E$  の積として表現されることがわかる。

今回の実験に対する動揺量の計算は(6)式を用いて行ったが、その際  $M$ 、 $N$ 、 $H^E$  については前述の数値計算法を用いて求め、 $c$  および  $k$  については船型およ

び係留状態から決定した。ただし  $k$  の算定には係留系の初期張力を考慮している。

#### 4. 実験結果および計算結果

##### (1) 港外での動揺との相違

図-5 は、模型船を港外に設置し、斜め前方  $45^\circ$  から波を作用させた場合の sway と pitch の運動応答である。ただし、 $\xi_{0s}'$  は pitch の動揺振幅に  $L_s/2$  を乗じた値を示す。これより、計算結果は波長の長い領域での pitch のピークを説明できていないが、全体的には実験値とはほぼ一致している。一方、図-6 および 図-7 は、港内のバース A および B での sway と pitch の運動応答を示したものであるが、港外での運動に比べると波長の変化に伴う変動が大きいがわかる。またバース位置の違いによっても応答特性はかなり異なっている。計

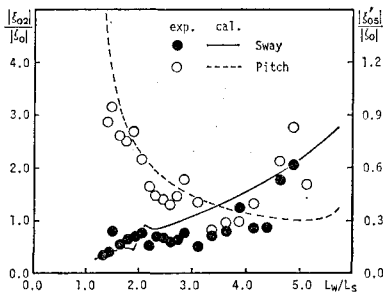


図-5 港外での運動応答

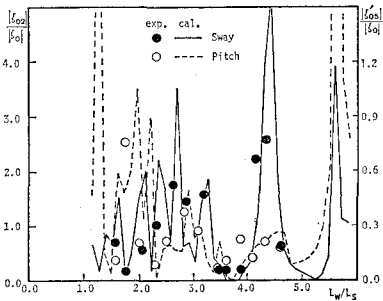


図-6 港内での運動応答 (バース A)

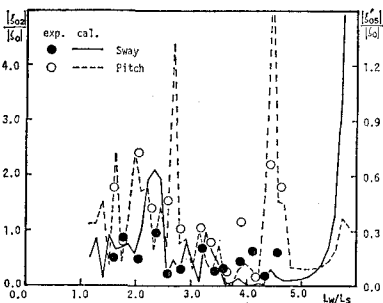


図-7 港内での運動応答 (バース B)

算結果は大略実験値を説明しているが、波長による変動は実験よりも過大に現われている。

港外と港内での動揺特性の相違をさらに詳細に調べるために、(6) 式中の  $H^S$ ,  $H^E$  の sway に対する成分を、港外とバース A で比較したのが 図-8 である。図中  $|H_{22}^S|$  は、sway に対応する  $H^S$  の対角成分の絶対値に  $\rho gh^2$  ( $h$  は水深) を乗じて無次元化した値であり、 $|H_{22}^E|$  は  $H^E$  の成分を  $\rho gh^2$  で除して無次元化した値である。これらの図より、 $|H_{22}^S|$  については港外と港内で大きな相違はみられないが、 $|H_{22}^E|$  は大きく異なっており、港内に現われる運動応答の大きな変動は、主として  $H^E$  の変動に起因していることがわかる。すなわち、今回の実験条件では、港湾境界の存在によって付加質量や造波減衰が変化することによる影響は、波力の変化の影響に比べると小さいと言える。

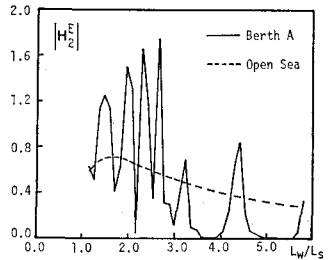
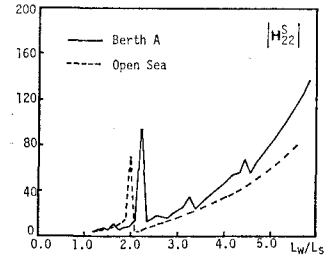


図-8 応答関数の比較

##### (2) Roll の減衰力について

図-9 および 図-10 は、港外および港内のバース C での roll の運動応答を示したものである。ただし、 $\xi_{0r}'$  は roll の動揺振幅に  $B_s/2$  を乗じた値を示す。図中点線は、港外での自由振動実験から得られた減減曲線を線型近似して減減係数を求め、造波減衰に付加して計算したものである。これより、港外では付加的な減衰力を考慮することによって、固有周波数付近の過大なピークを低減できるが、港内では大きな低減効果は得られていない。

この原因の 1 つとして、港内では各運動モード間の連成影響が大きいが考えられる。いま簡単のために、roll と sway のみの 2 自由度の連成振動を考える。sway の固有周波数が十分小さく、かつ係留系を通じての連成が小さいものとする、roll の固有周波数での振幅増幅率  $f_{a4}$  は次式で与えられる。

$$f_{a4} = \frac{|\xi_{04}|}{|\xi_{04}^*|} = \sqrt{\frac{1}{\delta_2^2 \delta_4^2 + 4(1 - \delta_2^2 \gamma_4)^2 \gamma_4^2}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $\xi_{04}^* = F_{04}/(c_{44} + k_{44})$ ,  $\delta_2 = M_{24}/(m_{22} + M_{22})$ ,

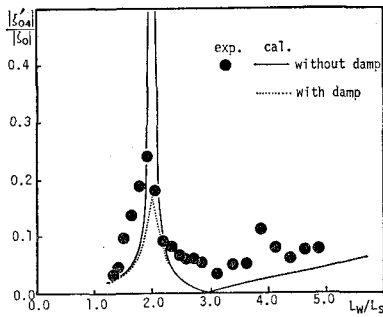


図-9 港外での roll の運動応答

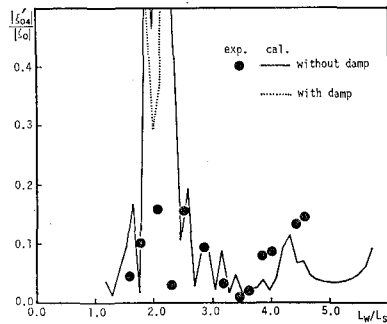


図-10 港内での roll の運動応答 (ベース C)

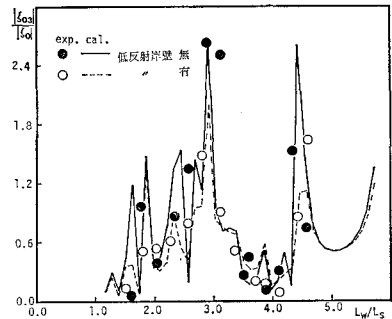


図-11 低反射岸壁の効果 (heave, ベース C)

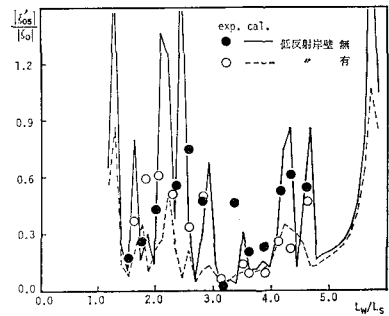


図-12 低反射岸壁の効果 (pitch, ベース D)

$\delta_4 = M_{42}/(m_{44} + M_{44})$ ,  $\gamma_4 = N_{42}/(N_{44} + N_{44}')$ ,  $\eta_4 = (N_{44} + N_{44}')/2\sqrt{(m_{44} + M_{44})(c_{44} + k_{44})}$  である。ただし、 $N_{44}'$  は roll の付加減衰を表す。(8)式より明らかなように、 $f_{a4}$  は roll の減衰比  $\eta_4$  のみならず、連成の影響を表す  $\delta_2$ ,  $\delta_4$ ,  $\gamma_4$  によっても変化することがわかる。以上は簡単な例であるが、港内では roll-heave 間にも強い連成があること、係留系を通じての連成も無視し得ないことなどを考慮すれば、roll の減衰は他のモードの運動の影響を強く受けていることが予想される。連成の強い振動系での付加減衰の与え方は今後の課題である。

### (3) 低反射岸壁の効果

図-11 および 図-12 は、ベース C での heave およびベース D での pitch について、低反射岸壁の効果をみたものである。これらより、低反射岸壁の設置によって動揺は若干低減しており、計算結果ともほぼ対応していることがわかる。

図-13 はベース C での heave の応答関数を、低反射岸壁がある場合とない場合と比較したものであるが、この場合にも、応答関数の変化は  $H^S$  よりも  $H^E$  の方に顕著に現われている。

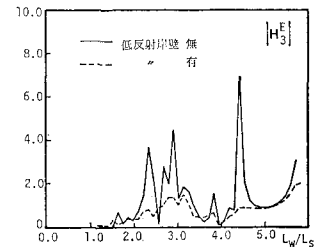
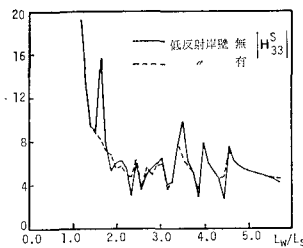


図-13 低反射岸壁の設置に伴う応答関数の変化 (heave, ベース C)

## 5. 港内係留船の動揺低減化に関する一考察

### (1) 低減化対策の考え方

ここでは、対象とする船舶の動揺を、同一の入射波条件のもとに低減させようとする場合、考えられる港側の対策をどのような観点から評価すべきかについて考える。

低減化対策はまず、船体運動の現状を把握することから始めなければならない。その際、(6)式の  $H^S$  および  $H^E$  のうち、どちらの応答関数が現状の運動に対して支配的であるか、言い換えればどちらが低減しやすいかを明らかにしておかなければならない。すなわち、波の周波数が運動の固有周波数に近いために動揺が大きくなっているような場合には、何らかの方法で  $H^S$  の低

減化を考えた方が効率的であるし、反対に  $H^E$  が大きい場合には、船体への波の作用をできるだけ小さくするような対策を講じなければならない。

一般に、応答関数の低減化法は、応答の形を変えずに全体的に小さくする方法と、応答の形そのものを変化させる方法の2つに大別されるが、後者の方法は、ある特定の周波数および運動モードを対象とする場合を除いて、有効な方法とは言えない。そこで以下では、前者の立場から応答関数の低減化を考える。

## (2) 造波減衰とエネルギー逸散

(7) 式より、 $H^S$  を低減させるためには、造波減衰  $N$  を大きくすればよいことは明らかである。港内の船舶の造波減衰を、Mei (1983) と同様にして、造波に伴うエネルギー逸散量で表すと、 $N$  の対角要素  $N_{ll}$  に対して次式を得る。

$$N_{ll} = \rho \omega k \left[ \iint_{S_H} \alpha_R |\phi_l|^2 dS + \iint_{S_\infty} |\phi_l|^2 dS \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに  $\phi_l$  は  $l$  モードの運動による発散波ポテンシャルを、 $\alpha_R$  は吸収率  $\alpha$  の実数部を表し、 $S_H$  および  $S_\infty$  はそれぞれ港湾境界および港外の無限遠方境界を表している。上式より、造波減衰は港湾境界上でのエネルギー逸散量および港外へのエネルギーの発散量に比例して大きくなることからわかる。したがって  $N_{ll}$  を大きくするためには、発散波の大きい箇所、すなわちなるべく船体近傍に、低反射岸壁等のエネルギー逸散を促す構造物を設置するか、港外への発散波を大きくするよう、港口幅を広げる等の対策を施せばよいことになる。

しかしながら、これらの対策によって、 $H^S$  だけでなく  $H^E$  も変化する。港口幅を広げる方法は、とりもなおさず  $H^E$  を増大させることになり、現実的な方法であるとは言えない。また今回の実験においては、図-13 に示したように、低反射岸壁は  $H^S$  および  $H^E$  の両方を低減させる効果があり、有効な対策であったが、どのような場合にも有効であるとは断言できない。

## (3) 数値シミュレーションによる検討

最後に、数値シミュレーションにより、港口部防波堤の延長および港内波除堤の効果について調べる。港口幅は 20 cm と 80 cm の2種類について、波除堤は図-14中に点線で示した位置に、 $b=70$  cm として設置した。

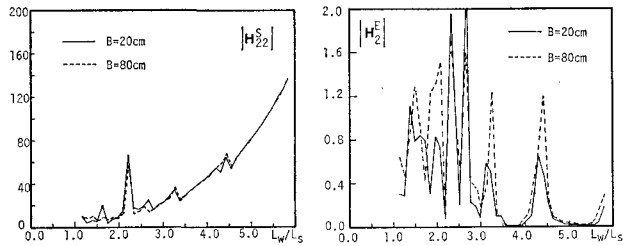


図-14 港口部幅の違いによる応答関数の相違 (sway, パース A)

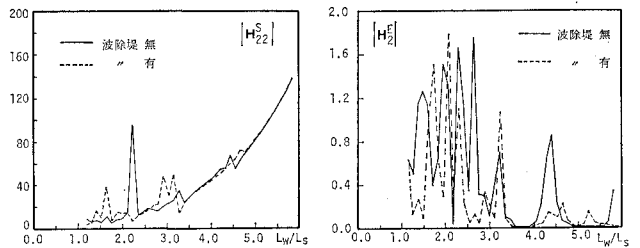


図-15 波除堤の設置に伴う応答関数の変化 (sway, パース A)

計算はいずれもパース A を対象としている。

図-14 および 図-15 は、sway の応答関数の相違を示したものである。これより、港口幅を狭くしても  $|H_{22}^S|$  はほとんど変化していないが、 $|H_2^E|$  は全体的に低減しており、防波堤延長の効果は  $H^E$  に現われていることがわかる。一方、波除堤を設置した場合には、 $|H_{22}^S|$ 、 $|H_2^E|$  とも応答の形状が変化し、全体的な低減化には結びついていないことがわかる。

以上のことより、港口部の防波堤のように、船体から遠方にある港湾境界を変化させることによる影響は、 $H^E$  の変化としてのみ現われるが、船体近傍に波除堤や低反射岸壁を設置する場合には、 $H^E$  および  $H^S$  の両方に影響を及ぼすと言える。これは、 $H^E$  については入射波の変形が直接関わっているのに対して、 $H^S$  を決定づける付加質量や造波減衰は、船体から発散する波の変形に起因しており、遠方境界の影響は小さいためであると推察される。また一般には、港湾境界を変化させることによる影響は  $H^S$  よりも  $H^E$  の方に大きく現われると言えよう。

## 参考文献

- 樫木 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・造波問題の解析, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 692~696.
- Mei, C.C. (1983): The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, John Wiley & Sons, pp. 319~321.