

荒天時の港内係留船舶の安全性向上のための基礎的研究

——ダッシュポット係留索による船体動揺低減化について——

榎 本 亨*・久 保 雅 義**

1. 緒 言

大阪湾や東京湾は埋立および船舶数の増大のため台風時の避泊水面が狭小化し、台風時にも港内避泊を行う気運が高まっている¹⁾。また外洋に面した新港では台風によるうねりや、冬期の季節風による波浪のため、時として港内係留船の運動が大きくなり、荷役中断や緊急出港の問題が生じている。これは係留船舶の造波抵抗や摩擦抵抗が小さいため、固有周期に近い波が侵入してくると共振し、係留索切断が生じるためと考えられる。そこでこのような荒天時の係留船舶の安全性向上のためには係留システムに減衰項を付加して共振を起さないシステムにする必要がある。先に著者らは係留システムにダッシュポットを組み込むことを提案し²⁾、水槽での模型実験と理論計算の両面より船体運動、特に横揺れの低減化にダッシュポットが有益であることを指摘した。横揺れが船の作業環境を悪化させる要因であることは既に指摘されているので^{3),4)}、この横揺れをダッシュポットにより抑制することができるのであれば、今後の荷役作業の安全に寄与するところは大きい。そこで今回は現地の港で小型船の係留索にダッシュポットを組み込んだ時(これを以後ダッシュポット係留索と呼ぶ)、どの程度船体動揺を減衰させることができるかを明らかにするため、実験を行った。

2. 現地実験の準備と実験の相似則について

実験は港の防波堤の港内側の水域で行った。岸壁の天端はヨットやカッターよりも高いので、実験に先立って天端高の調節可能な仮設岸壁を岸壁前面に取り付けた。

実験には長さ 6.2m、幅 2.35m、深さ 0.9m の小型船を用いたがこれを大型船の 1/30 の縮尺模型と見なし係留索のバネ定数を決めている。図-1 は係留索の変位-荷重特性を表わしている。これよりウインチによる巻き取りにより係留索に初期張力がかかっている場合とそうでない場合とでは係留索のバネ定数は相当異なることがわかる。前者のバネ定数を C_1 、後者のバネ定数を C_2

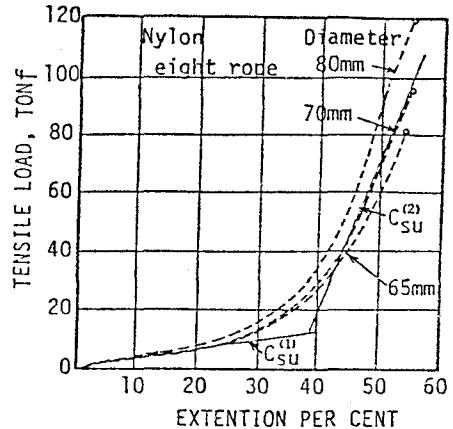


図-1 係留索の変位-荷重特性

とすれば、これらはそれぞれ次式にて近似することができる。

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= 20 / (0.6 l_m) \text{ (tonf/m)} \\ C_2 &= 80 / (0.15 l_m) \text{ (tonf/m)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに l_m は係留索の長さである。係留索の中で横揺れを抑制できる可能性が最も大きいのはプレストラインである。そこで本実験ではプレストラインにダッシュポットを組み込んでいる。プレストラインの長さは船幅 B とほぼ同程度で、 B と垂線間長 L_{pp} との間には次式が成立する⁵⁾。

$$l_m \div B = 0.368 L_{pp}^{0.805} \dots\dots\dots (2)$$

対象船の $L_{pp} = 6.2 \times 30 = 186 \text{ m}$ とし式 (1), (2) の関係より C_1, C_2 を求めるこれらは次のようになる。

$$C_1 = 1.35 \text{ tonf/m}, \quad C_2 = 21.6 \text{ tonf/m} \dots\dots\dots (3)$$

今回の実験ではフルードの相似則が使われるので長さの縮尺率を S とすれば、バネ定数の縮率 S_R は S^2 となる。 $S = 1/30$ とすれば、実験のバネ定数は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} C_{1m} &= 1.5 \text{ kgf/m} = 15 \text{ gf/cm} \\ C_{2m} &= 24 \text{ kgf/m} = 240 \text{ gf/cm} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

本実験におけるプレストラインのバネ定数は 115 gf/cm で C_{1m} と C_{2m} の中間であり、写真-1 に示すような形状のコイルスプリングを用いた。

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 神戸商船大学助教授 船貨輸送研究施設

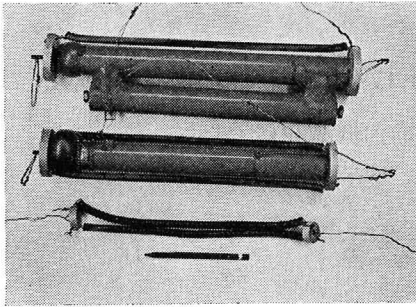


写真-1 上より弁付ダッシュポット、弁なしダッシュポット、プレストライン用バネ

3. ダッシュポット係留索の作製

ダッシュポットを作製する場合、まず減衰係数の大きさが問題となる。横揺れの周波数応答関数は一般に単一のピークを持つが、このようなピークをなくし、平坦な応答特性を与える減衰係数は次式にて与えられる²⁾。

$$k_{a0} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{W \cdot \overline{GM} \cdot g \cdot T_{Rn}}{\pi l^2} \dots \dots \dots (5)$$

ここに W は船の質量、 $\overline{GM}$ はメタセンタ高さ、 g は重力加速度、 T_{Rn} は横揺れの固有周期、 l は横揺れ抑制モーメントの腕で、次式にて与えられる。

$$l = \overline{GP} \sin \theta_g \dots \dots \dots (6)$$

図-2 に示すように G は船の重心、 P は舷側の係留点、 θ_g は GP とダッシュポットとのなす角である。 T_{Rn} は後述の減衰曲線より 2.7 秒である。 $W \cdot \overline{GM}$ は傾斜試験より求める。今 18 kg の質量を水平に 1.5 m 移動させ 0.0134 rad. 傾斜すれば、モーメントの釣り合いより

$$W \cdot \overline{GM} = 18 \times 1.5 / 0.0134 \approx 2000 \text{ (kg} \cdot \text{m)} \dots \dots (7)$$

となる。船の重心が不明なので、 l は正確には分らないが、 $B/2$ とみなしても大差ないであろう。以上を式 (5) に代入すれば今回の実験における k_{a0} は 8.6 (ton·sec⁻¹) となる。今 2 本のダッシュポット係留索で横揺れの抑制を行うので、1 本の減衰係数は 4.3 (ton·sec⁻¹) であればよい。このような減衰係数を与えるために写真-1 はに示すような筒形ダッシュポットのピストンに小穴をあけて、流体抵抗を与えている。この時の減衰係数 k_a は次式にて与えられる²⁾。

$$k_a = \frac{8\pi \mu l_{or} A_o^2}{(a_o C_a)^2} \dots \dots \dots (8)$$

ここに μ : 粘性係数=3 ポアズ、 l_{or} : オリフィス長=1 cm、 A_o : シリンダ断面積=9.62 cm²、 a_o : オリフィス断面積=9.05 mm²、 C_a : 流量係数である。一方ダッシュポットの移動速度 V とその時の軸荷重 F_a との関係より減衰係数を求めると k_a は 1.15 (ton·sec⁻¹) となる。これより先の C_a は 0.7 程度であることがわかる。

これ以外にダッシュポット係留索には次の点を考慮している。以前の試験²⁾ ではダッシュポットに油つぼを設

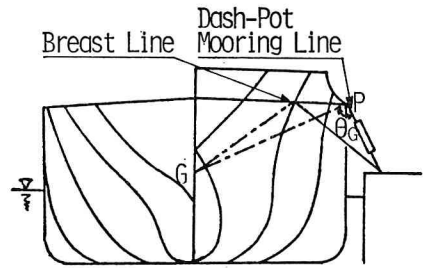


図-2 ダッシュポットの取り付け角について

けたが、今回の実験では油つぼは設けられないので、写真-1 のように軸とシリンダをゴム袋で結んでいる。これにより、油つぼおよび軸からの漏油の問題が解消する。

つぎにダッシュポットが船体運動により伸びた後、次の船体運動にまでに原形に復帰しておく必要がある。このためダッシュポット内部に弁を設けている。原形に復帰させるもう一つの方法は写真-1 に示すようにダッシュポットにバネを設け、これに初期張力をかけておき、このバネの力を復原力に使う方法である。実験ではこれら 2 つの方法でダッシュポットの復原を図っている。

4. 実験装置および実験結果について

実験では波高、横揺れ角、ダッシュポット係留索を設置した場合にはそれに作用する張力を測定している。

波高は防波堤の先端に超音波波高計を設置して測定している。横揺れ角は板バネの先端に重りを付けて、板バネ振り子とし、この板バネにストレンゲージを貼り、歪アンプで歪を電圧に変換して出力している。係留索に働く張力はリングゲージにより測定している。写真-2 はダッシュポットの先端にリングゲージを取り付けてダッシュポットに働く張力を測定している状況を示している。横揺れ角と出力電圧、および張力と出力電圧は実験より共に線型関係にあることがわかった。

以上の出力電圧はすべて 7 ch. のデータレコーダーに入力され、さらにそれらはペンレコーダーに記録されている。

今回はダッシュポット係留索が横揺れの減衰にどの程度有効であるかを調査するために次のような種々の実験を行った。

図-3 はダッシュポットの取り付け角 θ_g の効果を明らかにするための実験である。本実験では船の重心が不明であるため θ_g も正確には求められないが、およその重心位置より θ_g を求めている。図-3 は船首尾索のみでダッシュポット係留索がない場合、ダッシュポット係留索を $\theta_g=150^\circ$ 、 $\theta_g=110^\circ$ とした場合の横揺れの時系列を示している。各ケースはそれぞれ 10 分程度の測定記録で、外力としての波は 3 種類の実験でほぼ同様で、

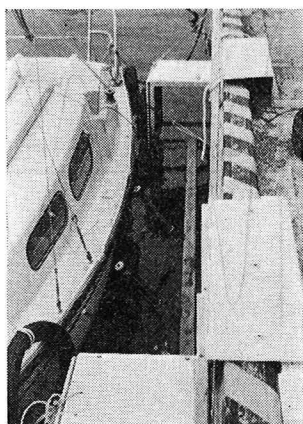


写真-2 ダッシュポット係留索の設置状況

有義波高 22 cm, 有義周期 2.6 秒であった。

側壁に何もつけない場合とダッシュポット係留索を $\theta_G=150^\circ$ でつけた場合を比較すると, 前者の場合大角度の横揺れが発生すると減衰しにくい, ダッシュポット係留索を装着すると横揺れはかなり急速に減衰している。しかし横揺れ角が小さい場合にはダッシュポットを装着しない場合とほとんど同様であり, 小角度の横揺れには余り効果のないことがわかる。 θ_G を 150° から 110° に変えると横揺れ角はかなり小さくなっている。先の研究²⁾において理論的に, $\theta_G=90^\circ$ において横揺れが最も抑制されることを指摘したが, 今回の実験結果によって θ_G は 90° に近い方が良いことが実証されたと言える。

図-4 は側壁に何も無い場合, 写真-1 に示したプレストラインを装着した場合, ダッシュポット係留索を $\theta_G=100^\circ$ で装着した場合, ダッシュポットに初期張力をかけた場合の横揺れを示す。この時の有義波高は 15 cm で, 有義周期は 2.9 秒であった。

これより現在, 船で用いられているようなプレストラインでは横揺れをほとんど抑制できないことが明らかとなる。

ダッシュポットを $\theta_G=100^\circ$ で取り付けると横揺れ角はダッシュポットがない場合と比較するとかなり小さくなり, ダッシュポットの有効性が確認できる。ダッシュポットに初期張力をかけて装着すると横揺れ角はさらに減少している。これは初期張力をかけると, 原形への復帰が速くなり, その分だけダッシュポットの有効動作時間は長くなり, 横揺れの抑制効果も大きくなったものと考えられる。

以上の実験でダッシュポットを原形に速く復帰させることの有効性が明らかになったので, ダッシュポットに弁をつけた場合とつけない場合の張力の発生状況を調べる。図-5 はほぼ同じような横揺れが生じている時に, ダッシュポット係留索に生じた張力の時間波形を示して

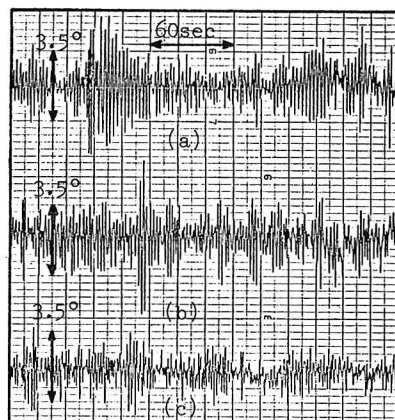


図-3 θ_G による横揺れ抑制効果 (a) 船首尾索のみ, (b) $\theta_G=150^\circ$, (c) $\theta_G=100^\circ$

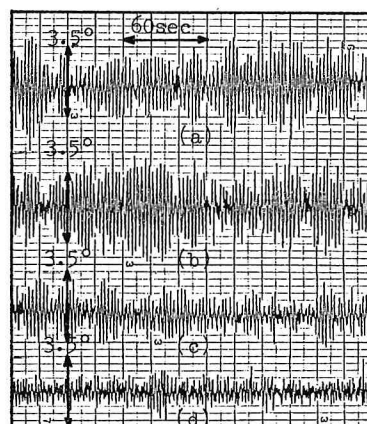


図-4 横揺れの抑制効果 (a) 船首尾索のみ, (b) プレストライン有, (c) ダッシュポット係留索有, (d) ダッシュポット係留索に初期張力

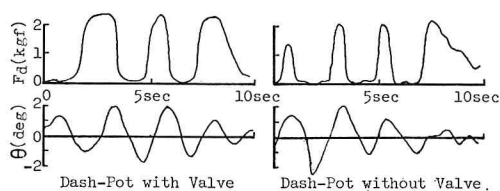


図-5 横揺れ角 θ とダッシュポット係留索に作用する張力 F_d の時間波形について

いる。これより弁をつけて戻りを速くすれば, ダッシュポットの有効動作時間が長くなるが, 弁がないと原形への復帰が遅れて有効動作時間が短くなる。これよりダッシュポット係留索としては弁付きの方が望ましいことが分る。

5. 実験結果の考察

(1) ダッシュポット係留索を装着した場合としない場合の最大横揺れ角の比較

波浪中での横揺れ運動方程式を簡単に次式で表わす。

$$I\ddot{\theta} + N\dot{\theta} + W \cdot g \cdot GM \cdot \theta = H_I \cdot W \cdot g \cdot R_M \cdot \sin \sigma t \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 I は船のみかけの慣性モーメント、 N は減減係数、 H_I は入射波高、 R_M は水深や吃水等の関数、 $\sigma = 2\pi/T$ で T は波の周期である。両辺を I で割ると次のように変形される。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta} + \varepsilon \dot{\theta} + n_0^2 \theta &= (H_I/I) \cdot W \cdot g \cdot R_M \cdot \sin \sigma t \\ \varepsilon &= N/I, \quad n_0^2 = W \cdot g \cdot GM/I \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここに ε は減減係数、 n_0 は固有角周波数である。この時の定常解は次式で与えられる。

$$\frac{\hat{\theta} \cdot B}{H_I} = \frac{W \cdot g \cdot B \cdot R_M}{I \sqrt{(n_0^2 - \sigma^2)^2 + \varepsilon^2 \sigma^2}} \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに $\hat{\theta}$ は定常解の振幅である。今ダッシュポットがない場合の減減係数を ε_0 、ダッシュポットがある場合の減減係数を $(\varepsilon_0 + \varepsilon_a)$ とし、これを ε_0 の m 倍とする。 $\hat{\theta}$ の最大は $\sigma = n_0$ で生じるので、これを上式に代入すれば次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\hat{\theta}_{a \max}}{\hat{\theta}_{0 \max}} &= \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_0 + \varepsilon_a} = \frac{1}{m} \\ \hat{\theta}_a \cdot B &= \frac{H_I \cdot A}{m \varepsilon_0 n_0} = \frac{H_I}{m} \cdot \frac{A}{\varepsilon_0 n_0} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに $A = W \cdot g \cdot B \cdot R_M$ である。上式よりダッシュポット係留索を装着して減減係数を m 倍にすれば、最大横揺れ角は $1/m$ に減少すること、これはまた入射波高を $1/m$ にすると同じ効果を持つことを示している。

(2) ダッシュポットがない場合の実験船の減減係数 ε_0 の推定

横揺れの自由振動曲線が得られるならば、減減係数は簡単に求められるが、現地では常に波があるため、自由振動曲線を直接求めることは困難である。ここでは高橋の方法⁷⁾により、実験船の横揺れ角の時系列より図-6のような減衰曲線が得られた。この減衰曲線より $\varepsilon_0 = 0.187 \text{ (sec}^{-1}\text{)}$ 、 $T = 2.7$ 秒、 $n_0 = 2.33 \text{ (sec}^{-1}\text{)}$ が得られる。

(3) ダッシュポットによる減減係数の増加

今回のダッシュポット係留索は引張りにおいてのみ有効で、片効きであるが、これを1行程すべて有効としてこの時の相当減減係数を k_e とおく。ダッシュポット係留索が1行程でなす仕事を等しいとおくことにより $k_e = k_a/2$ なる関係が与えられる。このような片効きのダッシュポット係留索を側壁に2本取り付け付けた時の減衰力 $N\dot{\theta}$ は次式にて表わせる。

$$N\dot{\theta} = 2(k_e \cdot l^2 \cdot \dot{\theta}) = k_a \cdot l^2 \cdot \dot{\theta} \quad \dots\dots\dots(13)$$

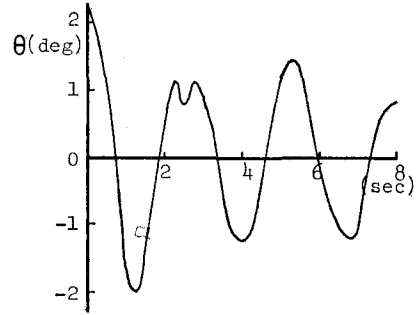


図-6 波浪中での横揺れ波形の集まりから推定した減衰曲線

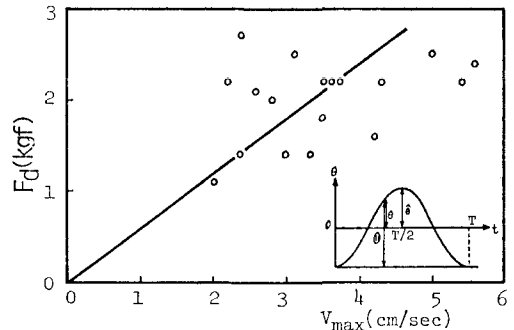


図-7 横揺れ角 θ から推定された $v_{\max}$ と張力 F_a との関係

ここに θ は図-7に示す角である。これより2本のダッシュポット係留索による減減係数 ε_a は次式で得られる。

$$\varepsilon_a = \frac{k_a \cdot l^2}{I} = \frac{k_a \cdot l^2 \cdot n_0^2}{W \cdot g \cdot GM} \quad \dots\dots\dots(14)$$

上式で l は不明であるので、次にこれを推定する。横揺れ角 $\hat{\theta}$ と横揺れの角周波数 σ がわかるとダッシュポットの軸の速度 $v_{\max}$ は $\hat{\theta} \sigma$ で与えられる。このような $v_{\max}$ と F_a の関係を図-7に示している。白丸は実験値で実線は $l = B/4$ とした時の F_a と $v_{\max}$ の関係式である。 $v_{\max}$ は横揺れ以外に左右揺の影響も入るが、ここではこれを考察しなかったために実験値がばらついたものと考えられる。

以上で式(14)の右辺はすべて与えられたので、これらを代入すると ε_a は $0.11 \text{ (sec}^{-1}\text{)}$ となる。これよりダッシュポット係留索を装着した場合としない場合の最大横揺れ角の比は式(12)より次式で与えられる。

$$\frac{\hat{\theta}_{a \max}}{\hat{\theta}_{0 \max}} = \frac{0.187}{0.3} = \frac{1}{1.6} \quad \dots\dots\dots(15)$$

図-3、4の横揺れ角においても $\hat{\theta}_{a \max}/\hat{\theta}_{0 \max} = 1/1.5 \sim 1/2.0$ であり、上記最大横揺れ角の比の推定法がほぼ妥当であることを物語っている。

6. 結 語

現地の小型船にダッシュボット係留索を装着して横揺れの抑制効果を調べた。今回の実験および考察から得られた結果を要約するとつぎのようになる。

- ① 従来使用されているプレストライには横揺れの抑制効果はない。
- ② ダッシュボット係留索で横揺れを効率よく抑制するためには取り付け角 θ_g がほぼ 90° になるように取り付けべきである。
- ③ ダッシュボットの有効動作時間を長くするためにシリンダー内に弁を設けて、戻りを速くすることは有効である。
- ④ ダッシュボット係留索を装着した場合としない場合の最大横揺れ角の比はそれぞれの減減係数の比の逆数で与えられる。
- ⑤ 横揺れ角を $1/m$ に減衰させたい場合には、まず現状の減減係数 ε_0 を求める。つぎに式 (14) の $\varepsilon_a = (m-1)\varepsilon_0$ となるようなダッシュボットの減減係数 k_a を算定する。このような減衰係数は式 (8) で与えられるダッシュボットにより設計可能となる。

- ⑥ 式 (12) で言及したようにダッシュボット係留索で横揺れ角を減少させることは入射波高を減少させることと同じであるが、費用面まで考えると前者の方がはるかに有利であると考えられる。

このようなダッシュボット係留索の現地への適用性については今後さらに検討を加えたく考える次第である。

参 考 文 献

- 1) 運輸省第三港湾建設局：大阪湾港内避泊対策調査研究報告書，p. 31, 1979.
- 2) 榎木・久保：ダッシュボットによる短周期船体運動の低減化に関する一考察，日本航海学会論文集，Vol. 66, pp. 127～135, 1981.
- 3) Bloom, M. J. and A. G. Posch: Container ship motion criteria, The Dock and Harbour Authority, Dec. 1980.
- 4) 榎木・久保：荷役限界からみた港内静穏度に関する研究 (第1報)，第24回海岸工学講演会論文集，pp. 610～614, 1977.
- 5) 片山・降旗・本・早藤：船舶諸元の相互関係，港湾技研資料，No. 101, 1970.
- 6) 谷口修ほか：振動工学ハンドブック，養賢堂，pp. 851～865, 1976.
- 7) 高橋浩一郎：振動体の不規則なる運動より，その周期並びに減衰率を求める方法に就きて，理研彙報，Vol. 14, No. 4, 1935.