

岸壁係留時の挙動に関する実船実測

新井 信一*・高梨 清一**・平山 久***

1. 緒 言

在港船舶は、現在のところ台風時の港外避泊を余儀なくされているが、船舶隻数の増加や船舶の大型化の影響で適当な避泊水域が不足しつつあり、台風時港内避泊の実現化の要請が強い。この場合には岸壁係留となろうが、ロープとフェンダーによる反力の非線形性のため、安全性の検討にはシミュレーション計算を活用する必要がある。上田ら(1984, 1985)は、この手法と模型実験により検討し、海側からの波と風に対してはフェンダーの強化による係留の可能性を、一方、陸側からの風に対しては防風対策の必要性和その有効性を指摘している。

岸壁側からの風については上屋を遮風構造物として利用し、風圧力を低下させ、係留ロープの必要本数を適当数にとどめるのが得策と考えられるが、上屋の遮風効果に関する実機検討例は殆どなく、シミュレーション計算の精度向上に用いる基礎資料が不足している。この度、上屋のある岸壁で、遮風効果を期待できる方向から風が吹いた場合の、係留船舶の挙動を現地計測する機会を得たので、その結果を報告する。

2. 現地実測の方法

(1) 実測の概要

実測は、新潟西港中央埠頭北岸壁に図-1のごとく係留された巡視船で実施した。この船舶は通常合計8本で係留するが、計測時には図示以外のラインを完全に緩めたので、4点4本係留となっている。フェンダーは図示の2組4個のみが作用する状態であった。岸壁には幅27m、高さ約12mの上屋がある。

a) 船舶、係留設備の主要諸元 まず船舶に関しては、全長105.4m、型幅14.6m、型深さ8.0m、喫水4.49m、排水量3,734tf、水線面積1,088m²、KGは6.13m、GMは1.41m、回転半径はロールが6.08m、ピッチとヨウがともに25.0mである。次にフェンダー

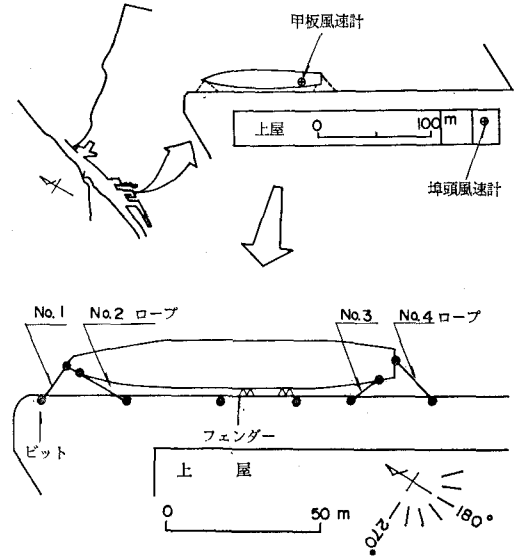


図-1 新潟西港中央埠頭係留状況

は、V型 Dock Fender 500H×1,000Lである。係留ロープはφ55mm ハイゼクスクスロープであり、風がほぼ止んだ状態でロープ長さを計測すると、No. 1が15.1m、No. 2が12.9m、No. 3が9.0m、No. 4が16.6mであった。さらに詳細は(財)沿岸開発技術研究センター報告書(1991)を参照願いたい。

b) 風 接近風速(埠頭風速)は28.4mの港湾事務所タワーの上で、また船体上風速(甲板風速)は船体後部甲板ヘリポート上1.91mで、それぞれ風車型微風風向風速計にて計測した。

c) 波浪 新潟西港の沖、港口から北東8km、水深35mの地点にある、マフコタワーの定点観測値を沖波データとして入手し、さらに泊地に近い港内観測点(検潮所と山の下)での記録例を参考にして泊地への進入波を推定する方法をとった。この他、船首付近の水底に圧力式波高計を設置し、参照データとしての泊地波高も計測した。

d) 係留ロープ張力 岸壁の係留ビットに容量30tfのロードセルを取り付け、それにロープを係留する

* 正会員 工博 足利工業大学助教授工学部土木工学科

** 正会員 工修 三井造船(株) 船舶鉄構総括本部技術開発部課長

*** (財)沿岸開発技術研究センター

ことにより、4本全ての張力を計測した。

e) 船体運動 ロールとピッチはパーティカルジャイロで、またヒープはサーボ式加速度計でそれぞれ計測した。

一方、長周期の動揺が予測されたサージ、スウェイ、ヨウは別途試作した後述のポテンシヨ式変位計により計測した。この方法の現地計測使用は初めてであったので、計測のバックアップシステムとしてビデオカメラでも運動を記録した。

(2) 運動計測方法

図-2の様に、船体任意定点 O_s に原点をおいた船体固定座標 (O_s-x, y, z) と陸側の任意定点 O に原点をおいた座標 ($O-x, y, z$) をとる。

a) ロールとピッチ ジャイロは船体上のどこにあってもよく、ロール角 ϕ とピッチ角 θ が直接計測される。ただし、あらかじめ陸上に角度の重力方向に対するゼロ点は把握しておく。

b) ヒープ 上下方向加速度にはロールとピッチの影響が参入する。いま、上向き加速度を正として計測された上下方向加速度を z_m 、運動による真の上下方向加速度を z_b 、重力加速度を g とすると、

$$\ddot{z}_t = \ddot{z}_m - g(1 - \cos \phi) - g(1 - \cos \theta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

である。これを2回時間積分して計測点の上下動 z_t が求まるので、これを重心位置の値に換算する。

c) サージとスウェイとヨウ ポテンシヨ式変位計は、直径 318 mm のプーリーから ϕ 0.54 mm のステンレスワイヤーを繰り出し、その先端を船体側壁に磁石で取り付けて、船体の変位をプーリーの回転角に変換し、それをポテンシヨメーターで計測するものである。図-2に示すごとく、船体側壁上の点 P_b の変位をポテンシヨ式変位計 P_1, P_2 で、もう1つの点 P_s の変位をポテンシヨ式変位計 P_3 を加えて計る。 P_1, P_2, P_3, P_b および P_s は同じ高さに設置し、 P_b-P_s は船軸 O_s-x に平行にとる。また、計測に及ぼす計測点の上下変位の影響が微小であるようにステンレスワイヤーの長さを確保する。今回は現地の事情によりこの長さは 3 m 前後

となった。

O 座標で考えて、 P_1 と P_2 と P_3 の座標およびポテンシヨで計測される船側壁上の点との距離を図-2のごとくとれば、 P_b の x, y 座標は、おのおの、

$$\left. \begin{aligned} x_b &= (x_1^2 + l_1^2 - l_2^2) / 2 \cdot x_1 \\ y_b &= (l_1^2 - x_b^2)^{0.5} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。これにて P_b と P_s の距離 L が定まるから、2点 P_b と P_s の距離を L_s とすると、

$$\left. \begin{aligned} L' &= (L^2 - L_s^2 + l_3^2) / 2 \cdot L \\ L'' &= (l_3^2 - L'^2)^{0.5} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

であり、結局、もう一方の計測点 P_s の x, y 座標は以下のごとく求まる。

$$\left. \begin{aligned} x_s &= x_b - (L' \cdot L_x - L'' \cdot L_y) / L \\ y_s &= y_b - (L' \cdot L_y + L'' \cdot L_x) / L \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $L_x = x_s - x_b$ 、 $L_y = y_s - y_b$ である。

従ってヨウは次式により定まる。

$$\psi = \tan^{-1}[(x_s - x_b) / (y_s - y_b)] \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、 O_s 座標からみた P_b 点の座標を (x_{sb}, y_{sb}, z_{sb})、 P_s 点の座標を (x_{ss}, y_{ss}, z_{ss})、重心 G 点の座標を (x_{sg}, y_{sg}, z_{sg}) とすれば、 O 座標からみた G 点のサージとスウェイは

$$\left. \begin{aligned} x &= x_b + (y_{sb} - y_{sg}) \cdot \phi - (z_{sb} - z_{sg}) \cdot \theta \\ y &= y_b - (x_{sb} - x_{sg}) \cdot \phi + (z_{sb} - z_{sg}) \cdot \theta \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。

一方、バックアップシステムとしてのビデオカメラは、図-3に示すように船体側に取り付け、 P_b 点の x, y 方向変位と P_s 点の y 方向変位をビデオ画像から読み取れるようにした。

3. 実測結果

計測は4日間行われた。上屋の影響下での状況を計測するため極力岸壁上屋方向からの風を待ったが、結果として SW から SSW の風を記録できた。その他、比較的強い風が吹いた N 方向の風も記録した。以後前者の風を SW 系の風、後者の風を N 系の風と称する。

取得したデータのうち記録状況の良い20分の区間を1ケースとして適宜選び、解析した。従って、平均風速は20分の平均値である。

(1) 気象・海象

a) 波浪 マフコタワーでの有義波高は、N系の風

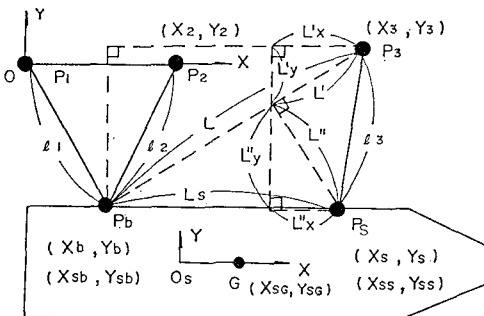


図-2 水平方向運動算出図

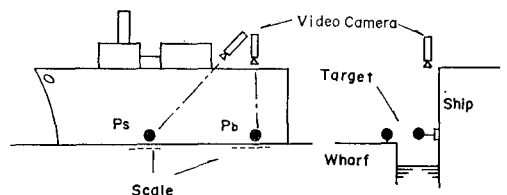


図-3 ビデオによる計測方法

の時に最大 2.4 m となったが、興味の焦点である SW 系の風の場合は、50 から 60 cm と小さかった。この時泊地波高は実測値で 1 ないし 3 cm と極めて小さく、外力条件としての波浪は無視できる状態であった。

b) 水深 解析ケースの岸壁水深は 10.1 から 10.25 m であった。

c) 風 計測された埠頭風速の最大は、N 系の風の 12 m/s であったが、岸壁側から吹く SW 系の風については 8 m/s 程度であった。28 m 高度の埠頭風速を対数則分布で 10 m の高度に換算すると、92% 程度の低下となる。しかしながら以下の考察では、埠頭風速を 28 m 高度のままで使用する。

図-4 に埠頭風速に対する甲板風速の低下率および風速と風向の標準偏差を示す。甲板平均風速は埠頭平均風速の 0.2 から 0.4 倍程度の値となっているが、埠頭風速により低下率は変化する。これは、上屋による風の後流域の大きさが風速によって変化するためであろう。

風速の標準偏差は風の乱れの程度を表すが、陸風である SW 系の風は、図-4 にみられるように、埠頭風速でも甲板風速でも乱れはほぼ同じオーダーである。従って上屋の背後では、平均風速は低下するが、乱れの度合いはほとんど同じであるということになる。SW 系の風は新潟市街地から吹いてくる風で十分に乱れており、上屋により生成される新たな乱れが、それ以上のスケールに成長しないからと理解される。なお、いずれの風も平均風速にほぼ比例して標準偏差が増加する。

一方、風向の標準偏差は、同図に見られるように、埠頭風速の N 系すなわち海風ではきわめて小さく、SW 系すなわち陸風では、埠頭で約 10° 、および甲板で 20° から 60° もの振れになっている。ここで主流に直角水平方向の風速変動成分 V' を調べてみる。主流方向平均風速を U_m 、変動成分を U' 、平均風向からの振れ角を χ とし、 U'/U_m と χ が微小であると近似すると、

$$V' = (U_m + U') \cdot \sin \chi \\ \approx U_m \cdot \chi \quad \dots \dots \dots (7)$$

とおける。この V' と U' の標準偏差 (rms) を比較してみたのが 図-5 である。これによれば SW 系の埠頭風速では U'_{rms} と V'_{rms} が同じ大きさであることが判明する。すなわち、ほぼ円形の構造をした渦が平均流に乗って移動している姿が想起されるわけである。甲板風速は V'_{rms} が U'_{rms} よりも少し小さくなるが、この風の場合は上屋のため U_m が低下しているから、 U'/U_m を微小と見るのは適当でなく、その分 (7) 式が V' を過小に算出する。従って実際には、 V'_{rms} はもう少し大きくなり、図にみるよりも U'_{rms} と近い値となる。以上のことを勘案すると、上屋背後の甲板にも埠頭風速とほぼ同じ構造の変動風が来襲していると見ることができ

よう。これに対して参考に示してある海風の N 系の風は、3 例にすぎないが、偏差が大きくなると U'_{rms} の方が V'_{rms} よりも大きくなる傾向がうかがえる。

図-6 には埠頭と甲板での平均風向の関係を示すが、上屋が接近風の風向を曲げていることがわかる。

(2) 船体運動と係留張力

運動には長周期成分が含まれているため、たとえば振幅の有義値のような量の意味が明確とはいえないので、ここでは運動の大きさを表す量として、平均値まわりの標準偏差を選んだ。張力は最大値に興味のあるところで

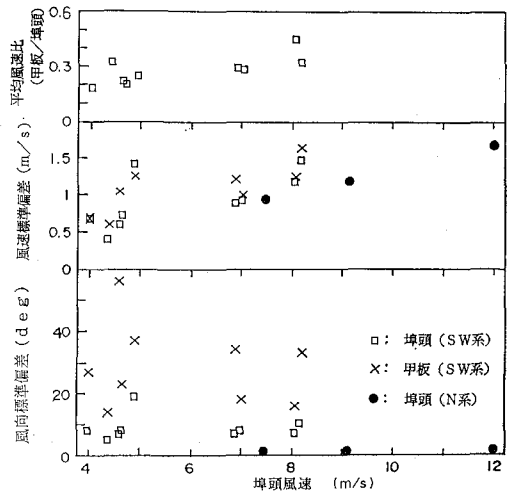


図-4 風速の平均値、標準偏差、風向の標準偏差

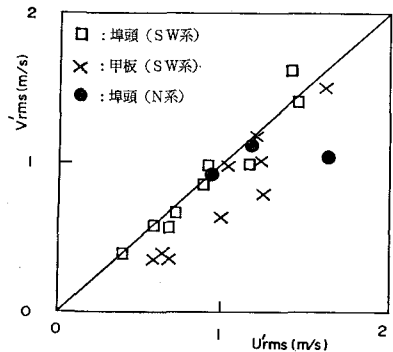


図-5 主流方向とその幅方向の風速変動成分

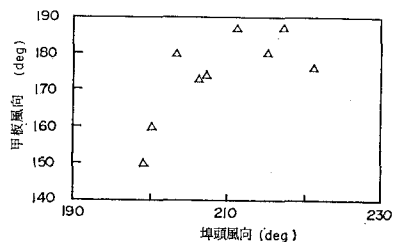


図-6 埠頭と甲板の平均風向

あるが、データ数の限られた実験値の最大値には偶然性が入り込むので、代わりに、より安定した値が得られる $1/10$ 最大値 $T_{1/10}$ を求めた。その際、平均張力 T_m に対するゼロアップクロス法によりピークを読みとり、 $T_{1/10}$ も T_m も初期張力からの増分値として表した。

a) 船体運動 図-7 は、船側壁上の点 P_b の変位について、ポテンショ式変位計による計測値とビデオ記録画像からの読みとり値の時系列の比較を示したものである。両者の結果はほぼ一致しており、計測は正しく行われたと言える。

図-8 は、運動の標準偏差をその原因となる埠頭風速に対してみるものである。運動は、風速 4 から 5 m/s の低風速で大きく、風速 7 m/s で小さくなり、風速 8 m/s でまた大きくなる特徴がみられる。

記録された時系列を注意深くみると、風速により異なる特徴の応答をしていることがわかる。図-9 には、風速、スウェイおよび No. 4 のロープ張力の時系列記録を、平均風速が 4 m/s と 8.1 m/s の場合について例示した。図中の矢印はフェンダーに接触した瞬間を示している。風速 4 から 5 m/s では船体がフェンダーに当たっては跳ね返される動きをゆっくりと繰り返す、ロープは弛緩と緊張を繰り返すような張力変化をしている。従ってこの場合は、ロープとフェンダーの反力が交互に作用する。このような挙動をタイプ A とする。これに対して風速 7 から 8 m/s では、風圧力が大きくなったため船体はほとんどフェンダーから離れ、ロープは緊張状態となり、比較的大きい張力が細やかに変動する。この場合はロープの反力が支配的となる。このような挙動をタイプ B とする。

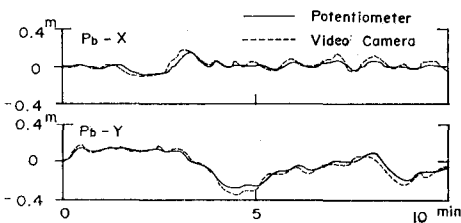


図-7 計測方法の違いによる P_b 点の時系列

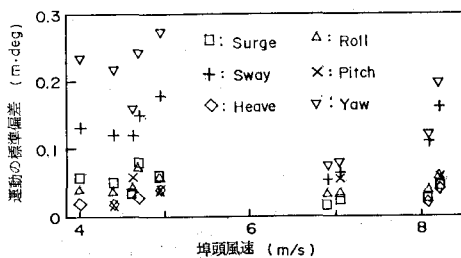


図-8 埠頭平均風速と運動の標準偏差

図-10 は、変動外力に対する運動応答の割合を見たものである。すなわち風抗力は風速の 2 乗に比例するとすると、その変動成分は近似的に $U_m \cdot U'$ に比例するから、外力の代わりにこれを取り、この標準偏差に対する運動の標準偏差の比を調べてみた。図からわかるように、風速 4 から 5 m/s のタイプ A は、7 から 8 m/s のタイプ B に比べて外力に対する応答が大きい。これは、タイプ A ではフェンダーとロープによる非線形・非対称反力が運動を増幅する現象が現れたものと考えられる。

再び 図-8 にもどる。平均風速が上がると変動風速が、従って変動外力が大きくなる。風速が低い間には変動外力が弱い、フェンダーとロープの相互作用により運動は大きくなる。風速が上昇し 7 m/s になると、船体はフェンダーから離れ、ロープのみの反力を受けるようになるが、この状態に移行するとともに運動は小さくなる。さらに風速が上がると変動外力のさらなる増加のため運動はまた増加し始める、と理解される。

b) ロープ張力 埠頭風速の変化に対する $1/10$ 最大張力を 図-11 に示す。風速 7 m/s 付近で小さくなるのは、先にみた運動応答の結果が現れているものである。これに対して平均張力は、図示を省略したが、風速の増加とともにほぼ単調に増加する。

この図で注目すべきもう 1 点は、4 本のロープの張力

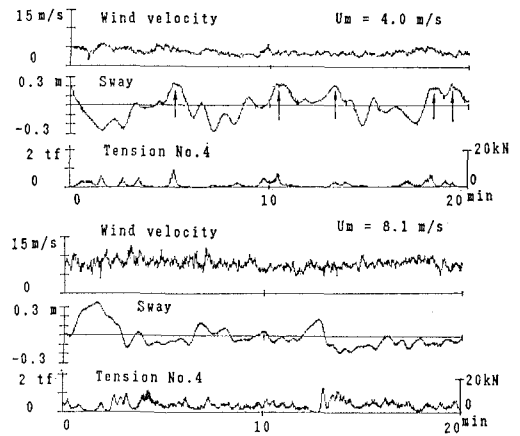


図-9 記録された時系列の例

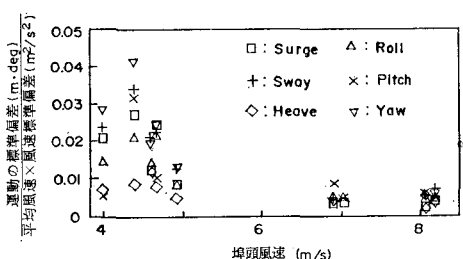


図-10 変動外力に対する運動応答比

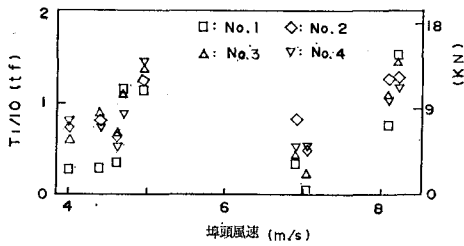


図-11 埠頭平均風速に対する 1/10 最大張力

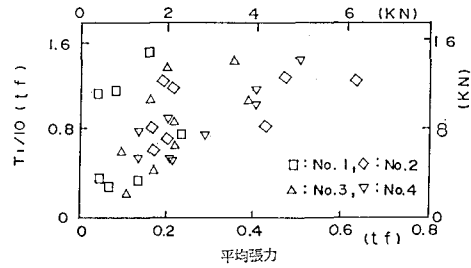


図-12 平均張力と 1/10 最大張力

の発生状況である。多少のばらつきはあるものの、張力が大きくなるほどより均等に 4 本で荷重を受け持っているといえる。繊維ロープの伸び特性が荷重の均等化に寄与しているものと思われる。

図-12 はそれぞれのロープに発生した平均張力と 1/10 最大張力の関係を一括して示したものである。風速が大きくなるに連れ平均張力は増加するのであるが、平均張力が増加しても 1/10 張力は余り大きくならない。つまり増加の割合が低下する。これも各ロープに作用する荷重の均等化の結果であろう。

4. 結 言

SW 方向すなわち岸壁から風が吹く場合を中心に実船実測を実施して考察し、主なる結果として以下を得た。

(1) ポテンシオメーターを利用した計測システムを試作し、長周期成分を含むサージ、スウェー、ヨウを計測できた。

(2) 上屋により船体位置での平均風速は接近風速の 2 ないし 4 割に低下したが、変動成分の大きさはほとんど同じであった。従って、上屋遮風効果のシミュレーション計算に用いる風外力は、この平均風速と変動風速の特性の違いを考慮して作成する必要がある。

(3) 本実測の場合、風速 4 から 5 m/s と 7 から 8 m/s では異なる性質の運動をしている。前者はフェンダーとロープの反力が作用する系で、外力に対する運動の応答の割合が大きい。後者は主としてロープによる反力の系で、外力に対する運動の割合は前者よりも小さくなる。

(4) 風が強くなると平均張力は増加していくが、平均張力の増加に対して 1/10 最大張力の増加の割合は低下する。

なお、本研究はシップアンドオーシャン財団の補助事業による研究会活動の一部として行われたものであること、また、計測と解析では関三造試験センターにご尽力いただいたことを記し、ここに関係各位に対する深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 上田 茂・小熊康文 (1984): 荒天時の係岸避泊の限界条件と係船付帯設備の設計手順について, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 456-460.
- 上田 茂・白石 悟・小熊康文 (1985): 強風下の係岸船舶の動揺とこれに対する防風壁の効果について, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 672-676.
- (財)沿岸開発技術研究センター (1991): 台風時港内避泊のための係留技術に関する研究報告書, 200 p.