建屋背後の係留船舶に及ぼす風の影響

EFFECT OF WIND LOAD ON A MOORED SHIP BEHIND BUILDINGS

伊藤麻衣子¹・新井信一²・相原昭洋³・高橋敏彦²
Maiko ITO, Shinichi ARAI, Akihiro AIHARA and Toshihiko TAKAHASHI

¹正会員 (有)東北構造社 (宮城県仙台市青葉区本町 2-2-3)

²正会員 東北工業大学教授 都市マネジメント科 (宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35-1)

³正会員 東北工業大学助手 都市マネジメント科 (同上)

Wind forces acting on a ship that harbors behind a big building is studied experimentally using an open channel instead of a wind tunnel. For the purpose of safety mooring, the effect of this wind force must be investigated sufficiently. The flow profile of 1/7 law are made in a channel by means of roughness set on floor. Then, a ship and a building of a fence or a warehouse are set in a flow. A ship is allowed sway only.

Measurements show the following. The length of regurgitation area of a wake of fence is about double of that of a warehouse. When the position of ship is near the building behind, time-averaged wind forces on a ship are pulling forces and when a ship leaves from a building, wind forces change to pushing forces. As the distance between a ship and a building becomes large, time-averaged wind forces become large and fluctuating wind loads become large as well as ship motions do. In addition, in case of a fence, pushing forces of wind on a moored ship is found to be larger a little than on a ship fixed.

KeyWords: Moored ship, Building, Wind load, Moored force, Sway, Time mean, Fluctuation

1. 緒言

強風に対して建て屋の背後では風が弱くなると考えられるので、例えば強風時の避泊のために船舶は倉庫などの大きい建て屋の陰での係留の可能性を求めることがある。

久保¹⁾は港内岸壁に係留された船舶の動揺を荷役限界の視点から調べた。岸壁係留ではロープで引張り、フェンダーで押し返すので係留力が非線形となり、係留船舶の挙動解析には時系列を追跡するシミュレーション計算が必要になる。上田ら^{2) 3)}はその計算精度を実験結果とつきあわせて調べている。その後、強風時の港外避泊をしないで済むように、建屋(上屋)の陰の遮風効果を期待した港内避泊の可能性が沿岸開発技術センター⁴⁾で検討された。その中で新井ら⁵⁾は実船計測を実施し、建屋の背後で係留力の時間平均値の減少を期待できるものの、時々揺れが大きくなり係留張力が大きくなることがあることを指摘している。その後、沿岸開発技術センターの挙動シミュレーションプログラムが定量的に実用的な結果を与えることから、港内係留の安全性の検討がシミュレーションで行われるようになるとともに、興味を中心は長周期波の影響へと移行していき、建屋による風の遮蔽効果の研究は下火になっていたといえる。しかし、先のシミュレーションプ

ログラムのインプットである風外力はその時間変動時系列を建屋の遮蔽効果によりある割合に下げる方法が採られており、変動風荷重の時間平均成分と変動成分の性質を分離して把握するものではなかった。

一般に流れの中に遮蔽物を置くと、その背後の流れは運動量を失い流速が低下するが、新たな渦、すなわち乱れが発生し変動成分が強くなる可能性が十分にある。この観点からは、建屋の陰では風により押される時間平均成分的力の減少は期待できるものの、強くなった風速の変動成分が船舶に挙動に影響し係留力が増大することがないかどうかは十分に検討しておく必要があると考えられる。

流れの中におかれた物体に働く力はレイノルズ数とマッハ数のみの関数である。風荷重については風洞実験によるのが通例であるが、風速 40m/s でもマッハ数は 0.1 のオーダーであるので圧縮性は無視できるとすると、レイノルズ数のみにより流れのはく離などの流れの様子が決まるので、空気の代わりに水流の中で乱れの効果を調べてもよいと判断できる。

そこで本研究では 2 次元開水路の床に地上風の風速分布を作り出し、建屋と船舶模型を配置して建屋背後における船舶に与える風の乱れの影響を調べることとした。ただし、後出の使用水槽の寸法等の能力から縮尺は大きめの 1/200 となる。

なお水槽実験ではあるが、以下では流速を風速、流体荷重を風荷重などとも表現する。

2. 実験方法

実験状況図を図-1 に示す。長さ 10m、幅 0.6m、高さ 0.4m の二次元開水路の上流に粗度を配置して、計測領域での時間平均速度分布を地上風の 1/7 乗則に近付けた。その計測範囲に建屋と船舶模型を配置し、その間隔 L_b を変えながら風荷重や係留張力がどのように変化するかを調べた。係留はバネの強さを 3 種類変えた。自由動揺試験による sway のそれぞれの固有周期は 2.40s, 2.15s, 1.63s である。これをそれぞれ順に弱係留、中係留、強係留と称することとする。なお、水槽の性能上から水深は $h=0.20\text{m}$ となり、水深によるレイノルズ数は 7300 である。

建屋模型は、倉庫として高さ $d=0.05\text{m}$ 、幅 0.1m の矩形型と、フェンスとして $d=0.05\text{m}$ 、厚さ 2mm の板型の 2 種類とした。いずれの模型も長さは 0.53m である。船舶模型はカーフェリーを想定し、高さ 0.03m、幅 0.08m、長さ 0.58m の立方体で近似した。模型縮尺はおよそ 1/200 となる。

図-1 水槽における模型配置

図-2 模型の係留状況（平面図）

図-3 係留状況（側面図）

船舶を固定して風荷重を計測する場合、建屋は粗度

の下流 2.4m に固定され、船舶の位置を変えながら計測した。流体荷重防止用のカバーを付けた検力棒を船舶から立ち上げ、直上に配置した日章電気の 6 分力計 (LMC-6524) により sway 方向の風荷重を計測している。

船舶を係留する場合には、図-2 に示すようにアクリル板で新しい側壁を設け、水槽壁との間の隙間に係留装置を設置した。図-3 に示すように、船舶左右端にて前後に 1 組のコイルバネが水平方向にかかるように係留し、前方の張力を共和電業のロードセル (LMA-A-20N-P) にて計測した。船舶模型は設置時の質量が 1.33kg であり、1.92m 上から吊り下げて sway のみを許している。このような設定をしたため、この場合には建屋の方を移動させて建屋と船舶の距離 L_b をかえている。なお、本研究の係留は通常の船舶の係留方法とはやや異なるが、ここでは単純な線形係留力を想定して検討した。

流速計測には粒子画像流速計 (PIV)⁶⁾ を使用した。計測範囲にシート状のレーザー光を当て、ハイスピードカメラで時間間隔 1/50 s とし 1 回あたり 60 秒間撮影した。なお、流速や検力の 1 回あたりの計測時間は 60 s であり、1 ケース当たり 5 回計測し、5 分間のデータとして整理している。

3. 実験結果と考察

(1) 速度場

計測範囲 $X/d=4\sim 16$ における時間平均流速の水深方向分布を図-4 に示す。1/7 乗則を実線で示しているが、底面近傍と水面付近を除けばほぼ期待した分布となっている。この流れの相対乱れ強度は図-5 に示すごとくで分布形状に不満が残るものの、全体の形と強さはおおよそ良しといえる。

建屋模型としてフェンスおよび倉庫を配置したときの、時間平均流速水平成分 u を接近流速 (断面平均流速) U で無次元化して、その分布を順に図-6 と図-7 に示す。図には流速分布から想定される逆流域を点線で示したが、フェンスの後流が倉庫のそれよりも大きい特徴がある。次に、変動速度の標準偏差 u' を接近流速 U で除した相対乱れ強度を図-8 と図-9 に示す。フェンスの上端で強い乱れが発生し、それが流下とともに一旦上昇して拡散しつつ地表に近づく様が見て取れる。倉庫の場合は生成された乱れがあまり上昇せず、拡散しつつ水平に流下していく様子を見せている。さらに、図-10 と図-11 には $X/d=-2\sim 6$ における渦度の強さの分布を示した。フェンス模型の先端で渦度が発生し、それが流下上昇しながら地面方向にも広がっていく様子がわかる。倉庫模型では、倉庫前端部の角から渦度が発生し、倉庫屋上を這いながら流下し、倉庫後流では速やかに地面方向に拡散していく様が見て取れる。この二つの

図-4 時間平均速度分布

図-5 相対乱れ強度

図-6 フェンス流速分布

図-7 倉庫流速分布

図-8 フェンスの相対乱れ強度分布

図-9 倉庫の相対乱れ強度分布

図-10 フェンスの渦度

図-11 倉庫の渦度

流れの様相の違いが図-6と図-7にみたフェンスの方の逆流域が大きいと言う違いと対応している。

(2) 固定時の船舶に作用する風荷重

まず建屋模型なしで船舶模型を固定設置して風荷重を計測した。その結果から、変動荷重の標準偏差

$F_{\sigma 0}$ を時間平均荷重 F_0 で除した、力の相対乱れ強度を図-12に示した。なお、建屋と船舶の距離を表す L_b はそれぞれの前面間の距離であり、建屋の高さ d で無次元化してある。船舶は流速の相対乱れ強度がおおよそ0.12程度のところに設置されているが、風荷重の相対乱れ強度は0.05強と小さくなる。これは船舶模型の長さを水槽幅一杯にとっているため、変動荷重が長さ方向にランダムに作用するための平滑化効果がある程度出たものと思われる。

次に建屋を配置した場合の船舶に働く風荷重として、時間平均風荷重 F を図-13に、また、変動風荷重の標準偏差 F_{σ} を図-14に示す。それぞれ建屋のない場合の風荷重で無次元化されている。

まず、図-13により時間平均荷重を見ると、フェンスも倉庫も、その背後の $L_b/d=4$ では荷重は小さく負の値となる。倉庫の方が小さくなるが、この位置はフェンスの場合にその背面から $4d$ 、倉庫の場合に $2d$ の距離にあることに注意する必要がある。この無次元された時間平均風荷重 F/F_{m0} は L_b が大きくなるに

図-12 建屋なしの風荷重の標準偏差

図-13 船舶に働く時間平均風荷重

図-14 船舶に働く変動風荷重の標準偏差

つれ1に近づくべき量であるが、船舶の位置が建て屋から離れるにつれ徐々に大きくなり、計測範囲で、遮は0.6まで大きくなっている。従って、時間平均風荷重は建屋から離れるほど大きくなり蔽効果がなくなるといえる。

次に、図-14により変動風荷重 $F_{\sigma}/F_{m\sigma 0}$ を見ると、フェンスの場合はフェンスがない場合の概ね2.0から2.5倍の値となる。ただし、フェンス直背後の $L_b/d=4$ では0.3倍と小さい。倉庫の場合は倉庫のない場合の1.5~2.0倍の値を示している。すなわち、建屋の背後付近を除けば、建屋により変動風荷重が1.5~2.5程度に大きくなり、建屋から船舶の距離 L_b にあまり依存しないと言える。

(3) 係留時における建屋の影響

最後に、先に示した図-3の様に係留したときの結果を示す。船舶は水槽端部で前後から係留されており、その上流側の2本の係留荷重が計測されている。その計測値から船舶両端部での変位を求め、船舶のswayとyawを求めた。解析の結果、yawはほとんどないことが分かっている。

図-15と図-16に係留ライン張力の時系列の例を示す。 $L_b/d=4$ では船舶が負の風荷重により引かれるので、初期状態に対してフェンスの場合も倉庫の場合も上流側の張力が減少している。船舶が建屋から離れるに従って風荷重により押される力が増えて張力が増加していく。同時に変動成分も大きくなっ

図-15 係留張力の例 (フェンス, 強係留)

図-16 係留張力の例 (倉庫, 強係留)

図-17 Sway のスペクトル(フェンス, 強係留)

図-18 Sway のスペクトル(倉庫, 強係留)

ていく様子が見て取れる。その変動の様子は、倉庫模型よりもフェンス模型の方が強く出ていると言える。

図-17 と図-18 にはそのスペクトルを示す。ここに示していない例も含めて、いずれも係留系の固有周期より長い周期成分で揺れていること分かり、sway の揺れには外力である風荷重の変動成分が強く影響していると考えられる。フェンスの場合を見ると、船舶が構造物に近づくほど sway の揺れのエネルギーが減少していく有様がはっきりと出ている。

さて、船舶の加速度による慣性力と速度による減衰力が存在するため、この係留ライン張力と船舶に働く風荷重の間に直接的な関係は立てられないが、時間平均力を考える場合には定常成分のみが関係してくるので慣性力や減衰力の影響を受けない。そこ

で計測された張力から sway の時間平均定常成分を算出し、その変位に対する係留ライン反力と振り子としての反力を考慮して定常外力を求めた。その結果を図-19 と図-20 に示す。図には船舶を固定して計測したときの定常外力も示してある。そして、それぞれ建屋がないときの計測値で無次元化してある。この結果によると、倉庫の場合には係留時も船舶固定時も風荷重の定常成分は同じであることが分かる。このことは、係留船舶の挙動シミュレーション構築の前提条件となっている。これに対してフェンスの場合には、固定時に対して係留時に定常外力が少し増加する傾向が現れている。船体の挙動と流れの相互干渉が発生しているのかもしれないが、今後よく調べてみる必要があるといえる。

風荷重の変動成分の影響を考察するため、船舶の sway の時間変動成分を調べてみた。図-21 と図-22 にその標準偏差を示す。極めて小さい揺れであるが、これを4倍すると目視の感覚に近い量である有義値になる。そしてそれは目視の量に概ね一致する。ここに示していないが、風荷重による定常的なドリフト量は係留が弱いほど、かつ船舶が建屋から離れるほど大きくなる。図-21 と図-22 に示した揺れの成分も同様の傾向を示していることが分かる。

そこで、ドリフト量と標準偏差の比を見たのが図-23 と図-24 である。図において分母であるドリフト量がゼロに近くなる場所のデータは除外されてい

図-19 係留船舶に働く時間平均風荷重(フェンス)

図-20 係留船舶に働く時間平均風荷重(倉庫)

図-21 係留時の Sway の標準偏差(フェンス)

図-22 係留時の Sway の標準偏差(倉庫)

る。この比は、建屋から離れると一定の値に落ち着くことが示されている。すなわち、船舶が建屋から離れて定常外力が大きくなり、ドリフト量が増えると、変動風荷重による sway の変動量も約 0.1 の割合で増加することが示されている。

4. 結言

建屋としてフェンス型と倉庫型を選び、その背後にある船舶にどのような風荷重がかかるかを調べたところ以下の結果を得た。

- 1) フェンスと倉庫では背後での乱れの発生の仕方が異なり、例えばフェンスの逆流域は倉庫の場合の 2 倍ほど大きい。
- 2) 固定した船舶に作用する風荷重は建屋がない時に比べ、時間平均成分は遮風効果があり、船舶が建屋に近いほどそれは大きい。変動風荷重は、建屋の直背後付近を除くと、建屋がないときの 2 から 2.5 倍となり、揺らす力が大きくなる。
- 3) 係留船舶に働く時間平均荷重を固定船舶への荷重と比較すると、倉庫の場合は同じであるが、フェンスの場合は若干大きくなる傾向が見られた。船舶の Sway は時間平均量であるドリフト量も、変動の大きさを表す標準偏差も、船舶が建屋から離れるほど、また、係留の復原バネ力が弱いほど大きくなる。しかし、ドリフト量に対する変動の標準偏差の割合は船舶と建屋

図-23 Sway ドリフト量に対する標準偏差(フェンス)

図-24 Sway ドリフト量に対する標準偏差(倉庫)

の距離が離れると一定となる傾向を見せ、それは本実験の場合、たかだか 0.1 程度であった。

謝辞：本研究実施するに当たり、東北工業大学平成 21 年度卒業研究生の佐藤孝氏、高橋政稔氏、原圭亮氏および平成 22 年度研究生の大友政治氏、鈴木隆広氏に多大な協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 久保雅義：荷役限界から見た港内静穏度に関する研究，大阪大学学位論文，p.241，1981
- 2) 上田茂，白石悟：係岸船舶の動揺に及ぼす波向と係留索の影響について，海岸工学論文集，第 31 巻，pp.451-455，1984
- 3) 上田茂，白石悟，小熊康文：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，海岸工学論文集，第 32 巻，pp.672-676，1985
- 4) (財) 沿岸開発技術研究センター：台風時港内避泊のための係船技術に関する研究報告書，1989-1992
- 5) 新井信一，高梨清一，平山久：岸壁係留時の挙動に関する実船実測，海岸工学論文集，第 38 巻，pp.741-754，1991
- 6) 相原昭洋，阿部至雄，及川 智宏：PTV 計測に基づく植生水制河道部の水理特性に関する考察，第 31 回可視化情報シンポジウム講演論文集，Vol.23，pp.107-110，2003