

係岸船舶の動揺に及ぼす波向と係留索の影響について

上 田 茂*・白 石 悟**

1. ま え が き

筆者らは、荒天時に船舶が係岸避泊するための港湾の施設整備に係わる技術的検討を行ってきており、これまでに係岸船舶の動揺シミュレーション手法を開発し、模型実験結果と比較しその実用性を確認した。また、四日市港や新潟港において係岸船舶の動揺の現地観測が実施されているが、港内では回折波や反射波の影響があるため、目視観測された波向を用いた単一方向波による係岸船舶の動揺シミュレーション結果については現地観測結果とあまり良い対応が得られていないし、係留索の初期張力やたるみ等の条件は、目視観測では十分に把握できておらず、目視観測より想定した条件では、現地の船舶の動揺を十分に説明することができない。このように港内における波向や係留索の条件については、係岸船舶の動揺に及ぼす影響が大きいと思われるので、これを十分に検討する必要がある。そこで、本論文では、波向が係岸船舶の動揺に及ぼす影響を新潟港の観測例で、係留索の特性が係岸船舶の動揺に及ぼす影響を四日市港と新潟港の観測例で検討する。

2. 実船調査の概要

(1) 調査地点、調査対象船舶

係岸船舶の動揺量の実船観測は、昭和 55 年度に運輸

省第 5 港湾建設局が四日市港富双地区で、昭和 56 年度に第 1 港湾建設局が新潟港臨港埠頭で実施した。計測回数は昭和 55 年度が 2 回 (S 55.9.11 および S 56.2.22)、昭和 56 年度が 3 回 (S 57.1.28, S 57.2.7, および S 57.3.2) である。昭和 55 年度の調査対象船舶は艀装中のコンテナ船 (3 584 GT, 全長 120.8m, 型幅 20.2m)、昭和 56 年度の調査対象船舶は、チップ運搬船 (37 120 GT, 全長 198.0m, 型幅 32.2m)、セメント運搬船 (993 GT, 全長 70.5m, 型幅 11.55m)、セメント運搬船 (1 403 GT, 全長 77.8m, 型幅 12.3m) である。本論文では、それぞれの調査船舶について、Y80-1, Y80-2, N82-1, N82-2, N82-3 と略記する。また、各船舶について計測はそれぞれ 6 回実施しており、各計測回について、例えば Y80-1-1 と略記する。

(2) 調査項目

調査項目は、1) 波高、波周期、波向、2) 風速、風向、3) 潮位、4) 船舶の動揺量 (サージング、スウェイイング、ヒーピング、ローリング、ピッチング、ヨウイングの 6 成分)、5) 係留索および防舷材の配置及び特性である。各観測時の波高、波周期、風速、風向などを表一に示す。

3. 港内における波向が係岸船舶の動揺に及ぼす影響

表一 観測時の風および波の記録

	Y80-1				Y80-2		N82-1				N82-2				N82-3			
	Wave		Wind		Wind		Wave		Wind		Wave		Wind		Wave		Wind	
	H _{1/3}	T _{1/3}	$\bar{U}$	φ	$\bar{U}$	φ	H _{1/3}	T _{1/3}	$\bar{U}$	φ	H _{1/3}	T _{1/3}	$\bar{U}$	φ	H _{1/3}	T _{1/3}	$\bar{U}$	φ
	m	s	m/s	deg	m/s	deg	m	s	m/s	deg	m	s	m/s	deg	m	s	m/s	deg
1	0.59	5.1	26	107	14	242	0.19	3.5	11	82	0.32	3.1	9	23	0.54	2.9	5	129
2	0.65	5.0	26	107	17	251	0.21	3.5	9	77	0.32	3.4	9	19	0.52	2.7	5	127
3	0.75	4.7	28	121	19	256	0.22	3.1	9	73	0.31	2.7	8	19	0.51	2.7	5	112
4	0.49	5.1	21	112	16	258	0.20	3.3	9	73	0.25	2.8	9	19	0.54	3.0	7	118
5	0.53	5.1	20	107	9	305	0.25	2.7	11	55	0.30	3.1	10	32	0.57	3.1	5	136
6	0.51	5.0	20	130	8	318	0.25	2.4	10	49	0.31	3.3	9	23	0.57	3.3	6	127

*) 風向は船首方向から吹いてくる場合を 0° として時計まわりに計った角度で示した。

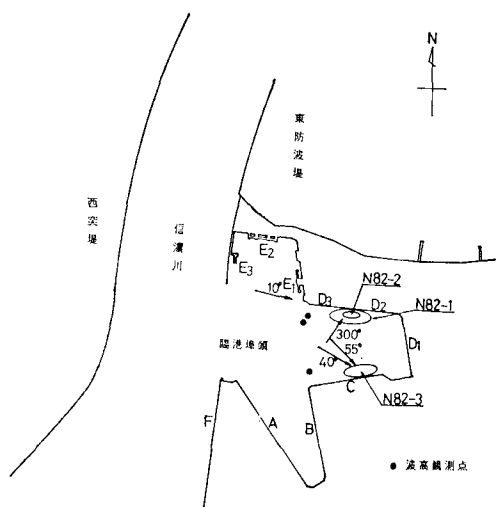
**) Y80-2 の波は記録紙上での振幅が小さく読取不能であった。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所構造部海洋構造研究室長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所構造部海洋構造研究室

(1) 入射波の波向

新潟港における観測例について、入射波の波向が係岸船舶の動揺に及ぼす影響を検討した。図一1に新潟港臨港埠頭における船舶の係留位置および入射波の波向を示すが、N82-1およびN82-2では、船舶は、D₂、D₃埠頭に係留されており、波向は目視により船首から時計回りに計って10°と報告されている。また、N82-3では、船舶はC埠頭に係留されており、波向は目視により55°と報告されている。しかしながら、目視観測による波向で係岸船舶の動揺シミュレーションを行った結果は、後述するように現地観測結果を十分に説明することができないので波向を数例変えて動揺シミュレーションを行なうこととした。



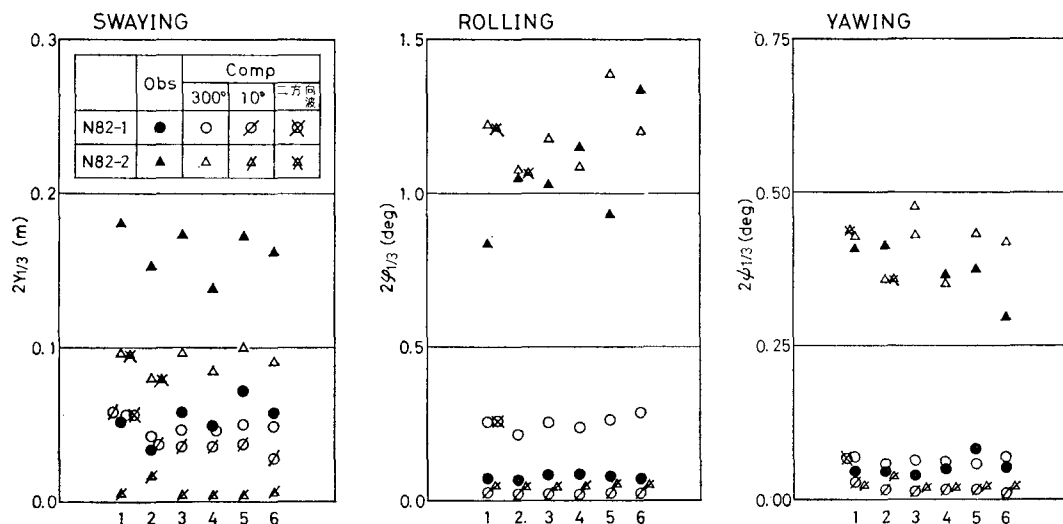
図一1 新潟港臨港埠頭

(2) 計算結果と観測結果との比較

図一2は、D₂、D₃埠頭に係留された船舶(N82-1およびN82-2)について、スウェーイング、ローリング、ヨーイングの観測結果と動揺シミュレーション結果とを動揺振幅(有義値)について比較したものである。波向10°で計算した動揺振幅は、N82-1のスウェーイングを除いては、観測結果よりもかなり小さく、波向10°とした動揺シミュレーションでは、現象を十分説明できないことがわかる。これに対して、波向300°で計算した動揺振幅は観測結果とほぼ一致する。ただし、N82-2については、波向300°としてもスウェーイングの動揺シミュレーション結果が観測結果に比べて小さいが、波向10°ではこれよりさらに小さく現象を十分説明できない。

なお、波向300°と10°の動揺シミュレーション結果の相互を比較すると、スウェーイングの動揺振幅はN82-1では差異が小さく、N82-2では差異が大きい。N82-1では、船舶が37120GT、船長198.0mで、船長との波の波長との比が10~20倍であるため、無係留状態の周波数応答計算より求めた波向300°と波向10°のスウェーイングの動揺振幅はいずれも小さく、また、その差も小さい。したがって、波よりもむしろ風によってスウェーイングの動揺振幅が大きくなっているものと考えられる。これに対して、N82-2では、船舶が993GT、船長が70.5mで、船長と波の波長との比が4~6倍であるから、波向300°と波向10°とのスウェーイングの動揺振幅の差異が大きく、また、船舶に作用する風圧力が小さいため波による動揺振幅が風による動揺振幅よりも大きい。

以上示したように、D₂、D₃埠頭に係留された船舶については、波向300°による動揺シミュレーション結果が観測結果と一致した。波向300°は図一1をみるとC



図一2 動揺振幅の観測値と計算値(N82-1およびN82-2)

埠頭からの反射波の波向に相当する。港内における係岸船舶の動揺を検討する際には、反射波の影響について十分検討する必要がある。ことが判る。

実際には、 D_2 、 D_3 埠頭に係留された船舶は、港口部からの入射波の作用とC埠頭からの反射波の作用によって動揺しているものと考えられる。そこで、係岸船舶に対して、波向 10° および 300° の二方向から波が同時に入射する場合の動揺シミュレーションを一部のケースで行った。ここでは、C埠頭からの反射波（波向 300° ）の波高が得られていないので、C埠頭の反射率を1.0と考え、波高観測点で得られた波高記録をそのまま用いることとした。図-2に示すように二方向波による動揺シミュレーション結果は、波向 300° とした動揺シミュレーション結果とほぼ等しい。この例では、波向 10° に対するスウェイング、ローリング、ヨウイングの動揺振幅が小さいためである。しかし、図には示していないが、波向 10° と波向 300° の動揺振幅がほぼ等しいヒービングについては二方向波による動揺シミュレーション結果がより適切と考えられる。形状の複雑な港湾では、港内における波の多重反射が考えられる。この場合には、多方向からの波を同時に作用させた係岸船舶の動揺シミュレーションを行う必要があると考えられる。

図-3は、N82-3について波向 40° および 55° とした場合のスウェイングとローリングについて、動揺シミュレーション結果と観測結果とを比較したものである。目視観測による波向 55° とするよりも、船舶の中心と防波堤の先端とを結ぶ角度 40° を入射波の波向とする方が、動揺シミュレーション結果と観測結果とが一致する。現地観測では、波向を目視した位置が適切でなかったものと考えられる。

以上、港内における入射波の波向が係岸船舶の動揺に及ぼす影響を検討した。係岸船舶の動揺シミュレーションにおいて波向を入力する際には、以下の点に留意する必要があると思われる。

- a) 港内における他岸壁からの反射波の影響の検討

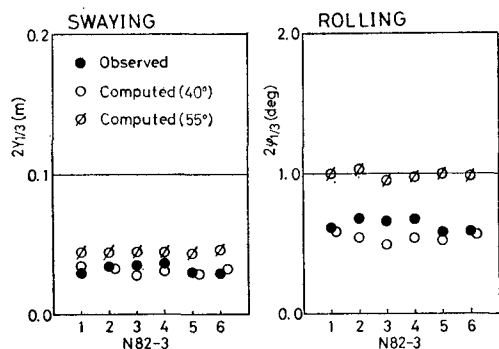


図-3 動揺振幅の観測値と計算値 (N82-3)

- b) 多方向からの入射波を同時に作用させた検討
c) 港内における波向は目視では把握しがたいので観測された波向に対して $10 \sim 15^\circ$ 程度の範囲で波向を変化させた場合の船舶の動揺の検討

4. 係留索の特性が係岸船舶の動揺に及ぼす影響

(1) 初期張力の影響

係留索の初期張力が係岸船舶の動揺に及ぼす影響についてN82-2で検討した。このケースでは、平均風速 $8 \sim 10 \text{ m/s}$ の風が岸壁側から海側に作用している。船舶に作用する風荷重は船舶を岸壁から離す方向に $0.4 \sim 1.3 \text{ tf}$ ($3.9 \sim 12.7 \text{ kN}$) あり、船舶に作用する外力としては小さいが、係留索の初期張力が船舶の動揺に及ぼす影響が大きいと思われたので以下に検討を行なう。

係留索の初期張力は現地観測では明らかではなかったので、ここでは、初期張力を 0 tf 、 0.25 tf (2.5 kN 、破断荷重の 1.1%)、 0.83 tf (8.1 kN 、破断荷重の 3.6%) として動揺シミュレーションを行った。動揺シミュレーションによって得られたスウェイングの時系列波形を図-4に示す。図中の正の値は船舶が岸壁から離れる方向を示し、負の値は船舶が防舷材に押しつけられる方向を示す。初期張力を 0 tf とした動揺シミュレーション結果では、船舶は岸壁から常に離れて動揺する。初期張力を 0.25 tf 、 0.83 tf とした動揺シミュレーション結果では、船舶は防舷材に接触したり離れたりして動揺し、観測された現象と一致する。

図-5は、係留索の初期張力とスウェイングの動揺両振幅および動揺周期の有義値との関係を比較したものである。係留索の初期張力が大きいほどスウェイングの動

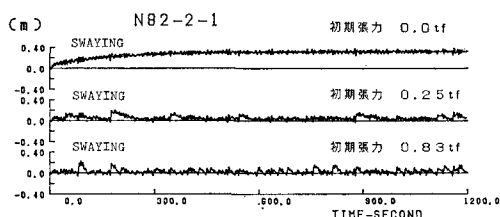


図-4 スウェイングの時系列波形 (計算値)

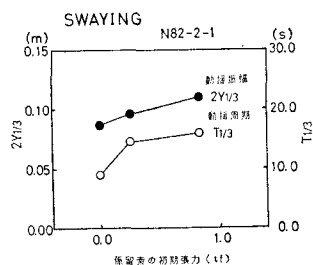


図-5 スウェイングの動揺両振幅と動揺周期

揺両振幅が大きくなり、かつ動揺周期も長くなる。防舷材の変位復元力特性は係留索の変位復元力特性に比べてかなり硬いので、スウェイング方向の変位復元力特性は全体として非対称となっている。したがって、係留索に初期張力を与えることによって船舶は防舷材に接触し、そのためにサブハーモニック現象が生じスウェイングの動揺両振幅が大きくなっている。

(2) 係留索のたるみの影響

係留索のたるみが係岸船舶の動揺振幅を大きくしたり、長周期動揺を助長している現象が四日市港において観測されたので、これを検討する。

まず、Y80-1 について検討する。この例では、パウライン、スターンラインについて緊張状態が観測されたが、その他の係留索についてはたるんでいる状態が観測された。係留索にたるみが生じた原因は、艀装中の船舶であり、係留索をボラードに巻きつけただけの非常に簡単な係留方法であったためと考えられる。

係留索のたるみの定量的な把握は目視観測では困難であったので、船舶の動揺振幅等から判断して、たるみが観測された係留索についてたるみの量を 0.3m および 1.0m として検討した。係留索がたるんでいるかどうかは目視では把握しがたい。もう少したるんでいる可能性もあるので、たるみを 1.0m としたケースについては、パウライン、スターンラインについてもたるみを 0.5m としたケースについても検討した。これらの係留索の条件を、以下ではそれぞれ係留索特性 1、係留索特性 2、係留索特性 3 と記述する。なお、ここで仮定した係留索のたるみは各係留ライン長に対して 1.2~3.6% のたるみに相当する。

Y80-1-1 および Y80-1-6 について、係岸船舶の動揺シミュレーションによるサージングの時系列波形を図-6 に示す。また、動揺両振幅(有義値)を図-7 に示す。ただし、図-6 に示すように時系列波形の初期では、自由

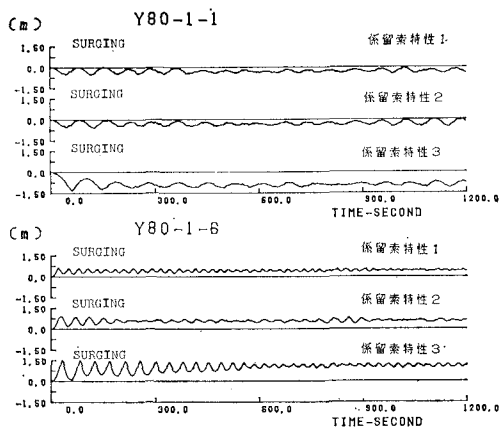


図-6 サージングの時系列波形(計算値)

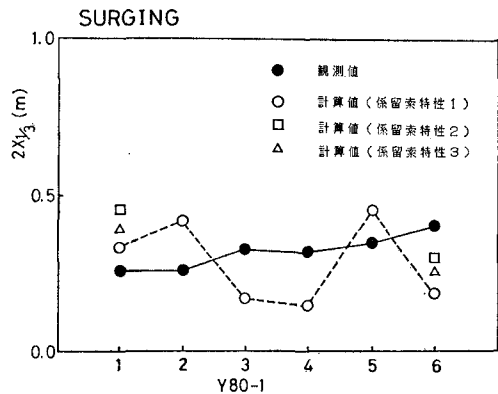


図-7 係留索のたるみとサージングの動揺両振幅

振動成分が残っているので、後半の 50%~100% の部分を解析して動揺両振幅の有義値を求めた。Y80-1-2~Y80-1-5 については係留索特性 1 で動揺シミュレーションを行っているため、これについても示した。

図-6 において正の値は、船舶が船首方向へ、負の値は船舶が船尾方向へ移動することを示す。Y80-1-1 では、風向は 107°, Y80-1-6 では 130° である。いずれの場合についても、風は船尾から船首の方向へ吹いている。しかし、風抗力係数が Y80-1-1 では正の値、Y80-1-6 では負の値であるため、前者では船舶は船尾方向へ移動し、後者では船首方向へ移動する。係留索のたるみを大きく仮定した動揺シミュレーション結果は、係留索のたるみが小さな条件で計算した結果に比べて動揺両振幅が大きい。Y80-1-1 では、たるみを小さく仮定した動揺シミュレーション結果が観測結果とほぼ一致し、Y80-1-6 では、たるみを大きく仮定した動揺シミュレーション結果が観測結果とほぼ一致する。

次に Y80-2 について検討を行なう。Y80-2 では、風が岸壁側から海側へ作用し、船舶が岸壁から常に離れて動揺し、係留索のたるみの影響が係岸船舶の動揺により顕著にあらわれている。図-8 は Y80-2-1、Y80-2-6 のサージングの観測結果の時系列波形である。観測では動揺の原点から明らかなので、ここでは各観測の初期状態を原点としている。

Y80-2-1 と Y80-2-6 では、サージングの動揺性状がかなり異なる。すなわち、Y80-2-1 では、動揺周期が約 50 秒で、動揺両振幅も小さいのに対して、Y80-2-6 で

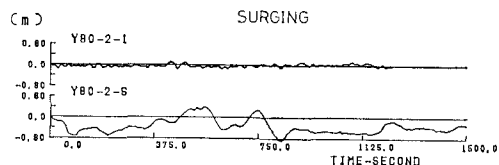


図-8 サージングの時系列波形(Y80-2, 観測値)

は、動揺周期が400~500秒にもなり、かつ動揺両振幅もかなり大きい。両観測回の時間差は2時間30分であるが、動揺両振幅および動揺周期が大きく変化するのには次のような理由と考えられる。Y80-2-1では、風向242°から平均風速14m/sの風が作用していたが、次第に風が強まり、Y80-2-3では、風向256°から平均風速19m/sの風が作用していた。その後、風は徐々に弱まり、Y80-2-6では、風向318°から平均風速8m/sの風が作用した。すなわち、Y80-2-1では、船舶は船尾方向から風圧力を受けるのに対し、Y80-2-6では、船舶は船首方向から風圧力を受ける。したがって、Y80-2-1では、スターンラインに張力が働いているのに対して、Y80-2-6では、風向が変化し、スターンラインの張力が解放され、バウラインに張力が働く。観測結果から判断するとバウラインはたるみも大きく柔らかい特性となっていたので、図-8に示したようにサージングの動揺量が大きくなったものと考えられる。

ここに示した現象は、非常に柔らかい係留系に高次の外力が作用して生じたものと考えられる。高次の外力としては、波漂流力や風圧力が考えられる。まず、波漂流力を丸尾の理論で計算すると周期は約30秒、最大波漂流力は0.07tf (0.7kN)である。サージングの周期はY80-2-6では、波漂流力の周期に比べて約10倍であるので、波漂流力が船舶の長周期動揺をひき起こす原因になっていないと考える。なお、Y80-2では波高記録が得られていないので、観測記録のヒーピングの周波数スペクトルとヒーピングの周波数応答計算値とから波スペクトルを逆算した。

長周期動揺を生じさせるいま一つの要因として風の変動性が考えられる。ダーベンボートの周波数スペクトルから変動風を発生させ、船舶に作用する風圧力を計算すると0.1~0.4tf (1.0~3.9kN)であり、その周期は100秒前後である。風圧力は波漂流力に比べれば大きく、かつ周期も長い。しかしながら、この風圧力を作用させて動揺シミュレーションを行っても、図-8に示すような船舶の長周期動揺を再現できない。風速が小さな場合には、平均風速は強風時のように一定しておらず、もう少し

し長い息づきをもって吹いたり止んだりしているものと思われる。このような状態では、船舶に作用する定常力はかなり長い周期で変動し、船舶の係留系が柔らかくみかけの固有周期が数百秒にもなるときには長周期動揺が発生するものと思われる。風速が小さなときの変動風圧力の与え方についてはさらに検討を要する。

船舶の長周期動揺は荷役など利用時に支障をきたすことがある。風速が小さなときにこの現象が生ずる場合には係留索を十分に強く張っておくなどの処置により防止することが可能であると考えられる。

以上、係留索の初期張力やたるみが船舶の動揺に及ぼす影響を検討した。船舶を係留する際に係留索の初期張力をとるように想定していても、係留中に何らかの原因で係留索の初期張力が失われたり、また、係留索にたるみが生ずることもある。このような場合には、係岸船舶は岸壁から大きく離されたり、振幅の大きな長周期動揺が生じ、荷役が不可能となることもある。したがって係岸船舶の動揺シミュレーションを行ない、荷役の限界条件の検討を行なう際には、係留索の初期張力の与え方に十分注意し、

- a) 係留索に初期張力が働いている状態
- b) 係留索の初期張力が零の状態
- c) 係留索にたるみが生じた状態

で検討を行なうのがよいと考える。

5. 結 論

(1) 港内における波の状況は複雑である。したがって係岸船舶の動揺シミュレーションでは、反射波の影響の考慮、多方向からの入射波を同時に作用させた検討、目視観測等によって設定した波向に対して10°~15°波向を変えた場合の検討等が必要である。

(2) 係留索の初期張力やたるみが係岸船舶の動揺に及ぼす影響は大きいので、荷役の限界条件の調査では、それらの条件を変えて検討することが必要である。

(3) 係留系が柔らかいときには、高次の外力によって船舶の長周期動揺が生ずる。長周期動揺をおさえるためには、係留索を十分強く張るなどの処置が必要である。