

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

上田 茂*・白石 悟**・小熊 康文***

1. ま え が き

筆者らは台風等荒天時における船舶の港内避泊の問題についてこの数年間研究を続けており、この間、係岸船舶の動揺の数値シミュレーション手法を開発した。また、水理模型実験および実船観測などを行ってそれらの結果と数値シミュレーション手法の比較を行い、不備な点を改良し実用化に努めている^{1),2),3)}。本研究では、強風下における係岸船舶の動揺とこれに対する風向の影響、防風壁の効果について、水理模型実験および数値シミュレーションを行って検討した。

2. 模型実験の概要

10 000 DWT (船長 132 m, 船幅 18.2 m, 型深さ 12.3 m) 級の一般貨物船の縮尺 1/30 の模型船を用いて、港湾技術研究所の平面水槽において変動風中および不規則波中の動揺実験を行った。なお、実験の詳細については文献 1) を参照されたい。

変動風に対する実験は風向として

- a. 90° および 120° (船舶を係岸に押し付ける方向)
- b. 180° (係岸に平行)
- c. 240° および 270° (船舶を係岸から離す方向)

の 3 分類 5 方向に対して実施したが、分類 c の風向に対しては、さらに防風壁を設置してその効果をも調べている。防風壁として、係岸岸上に係船岸法線から $l=1.2$ m (実物換算 36 m) の位置に高さ $h=0.2, 0.4, 0.6$ m (実物換算 6, 12, 18 m), および $l=2.0$ m (実物換算 60 m) の位置に高さ $h=0.4$ m の板を設けた。防風壁の長さは船長と同一とした。係岸船舶周辺の風速は分類 c のケースについてすべて測定したが、船舶の動揺実験は、 $l=1.2$ m で $h=0.2$ m および 0.4 m のケースについてのみ行った。実験においては、風と同時に波を 30°, 60°, 90°, 180° の方向から作用させ上記の風向の風と組み合わせている。風向と波向の組み合わせ、防風壁の諸元をとりまとめて表—1 に示す。なお、船舶の係留に用いる係留索は

ナイロンエイトロープ、防衝工は定反力型防舷材とし、それぞれについて実物と相似な特性を有する模型を製作し配置している。

表—1 実験ケース一覧

分類	風向	波 向	防風壁		シ リ ーズ 名
			l (m)	h (m)	
a	90°	90°	—	—	ABQH
	120°	90°, 60°, 30°	—	—	BBQH, CBQH**, DBQH**
b	180°	180°	—	—	IBQH
c	240°	90°, 60°, 30°	—	—	EBQH, GBQH**, HBQH**
			1.2	0.2	GBQHLow
				0.4	GBQHHigh
				0.6	*
				2.0	0.4
				1.2	0.2
	270°	90°	—	—	FBQH
			1.2	0.2	FBQHLow
				0.4	FBQHHigh
				0.6	*
			2.0	0.4	*

*: 風速のみを計測したケース。
**: 本報告では変動風のみを作用させた実験ケースを示す。

3. 風向が係岸船舶の動揺に及ぼす影響

(1) 風のみが作用する場合

図—1 (a), (b) は風向 90°, 120°, 240°, 270° で平均風速 5.48 m/s (実物換算 30 m/s) の変動風のみが作用する場合のスウェイングおよびローリングの動揺量を示したものである。風が海側から作用する場合、すなわち風向 90° (ABQH 30, ただし V 30 は実物換算風速が 30 m/s の変動風であることを示す) および 120° (BBQH 30, CBQH 30, DBQH 30), また風が係岸側から作用する場合、すなわち風向 240° (EBQH 30, GBQH 30, HBQH 30) および 270° (FBQH 30) のそれぞれについては、スウェイングおよびローリングの動揺量の最大値と最小値の差が小さい。これは風向 90° と 120° では、また 240° と 270° ではスウェイングおよびローリングに関する風圧力の差が小さいためである。風向 90° および 120° では防衝工がよく効いて、船舶のスウェイング方向の動揺量は小さくなっているが、風向 240° および 270° では船舶は変位復元力特性の柔らかい係留索のみで係留されることになるので船舶は係岸から大きく離されている。このときローリングの動揺も大きくなっているが、これは係留索による変位復元力特性が弱いためである。なお、風向 120° および 240° については、

* 正会員 工博 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主任研究官
*** 運輸省港湾技術研究所構造部海洋構造研究室

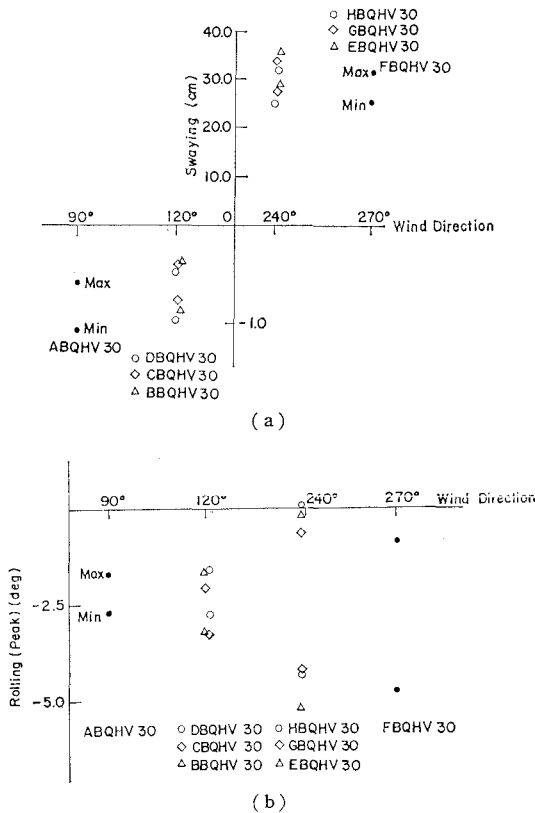


図-1 風のみが作用する場合の動揺量の比較

波向 30°, 60°, 90° の 3 ケースの実験を行ったが、それぞれについて模型および送風機の位置を変えたので風のみを作用させたケースについても動揺量を測定した。

(2) 波と風が作用する場合

つぎに、波向 90° で有義波高 1.67 cm (実物換算 0.5 m) の場合の係岸船舶の動揺に及ぼす風向の影響を検討する。図-2 は風向 90° (ABQH), 120° (BBQH), 240° (EBQH), 270° (FBQH) についてスウェイングおよびローリングの動揺量を示したものである。風向 90° および 120° の場合には波周期が長くなるにつれてスウェイングの動揺量は増加するが、風向 240° および 270° の場

合には動揺は波周期にかかわらずほぼ同一である。風向 90° および 120° の場合には、船舶は防衛工に押しつけられ、スウェイング方向の変位復元力特性が硬くなっているため、係岸船舶の動揺に対しては風よりも波の影響が大きい。したがって、図-2 に示すように定常風中 (CIR 30 と略記) と変動風中 (VIR 30 と略記) におけるスウェイングの動揺量の差異が小さい。これに対し、風向 240° および 270° の場合には、船舶が係船岸から離され変位復元力特性の柔らかい係留索のみで係留されることになり、図-1 に示すように風荷重の変動のみでかなり大きなスウェイングの動揺量が生じており、波よりも風の影響が大きい。

ローリングに対しては波周期の影響が大きく、風が海側から作用する場合および係船岸側から作用する場合のいずれについても、みかけの固有周期に近い波周期 2.19 s (実物換算 12 s) における動揺量が最大となっている。ただし、風が係船岸側から作用する場合には、船舶は係船岸から離され変位復元力特性が弱い係留索によって係留されるので、風が海側から作用する場合よりも動揺量が大きい。

風向 180° かつ波向 180° (IBQH) では、スウェイングおよびローリングの動揺量が減少するのに対してサージングの動揺量が増加する。ただし、サージング方向の風圧力が小さいので風よりも波の影響が大きくなっている。

以上述べたように風向 240° および 270° の場合には、船舶は係船岸から約 30 cm (実物換算 9 m) 離れ、ローリングの最大動揺両振幅は 20° にもなる。強風時には係留索の伸びが大きくなり切断のおそれもある。船舶を安全に係留するためには何らかの防風対策が必要となる。

4. 防風壁が係岸船舶の動揺に及ぼす効果

(1) 防風壁背後の風速分布

風向 240° および 270° に対して防風壁を設置した場合の風速を計測した。風速は係船岸法線の中心を原点として係船岸法線方向に ± 3 m, また係船岸直角方向に ± 3

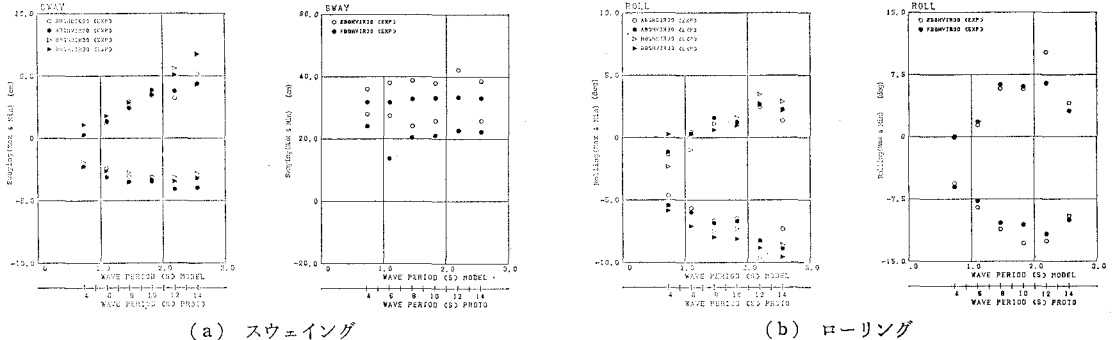


図-2 波と風が作用する場合の動揺量の比較

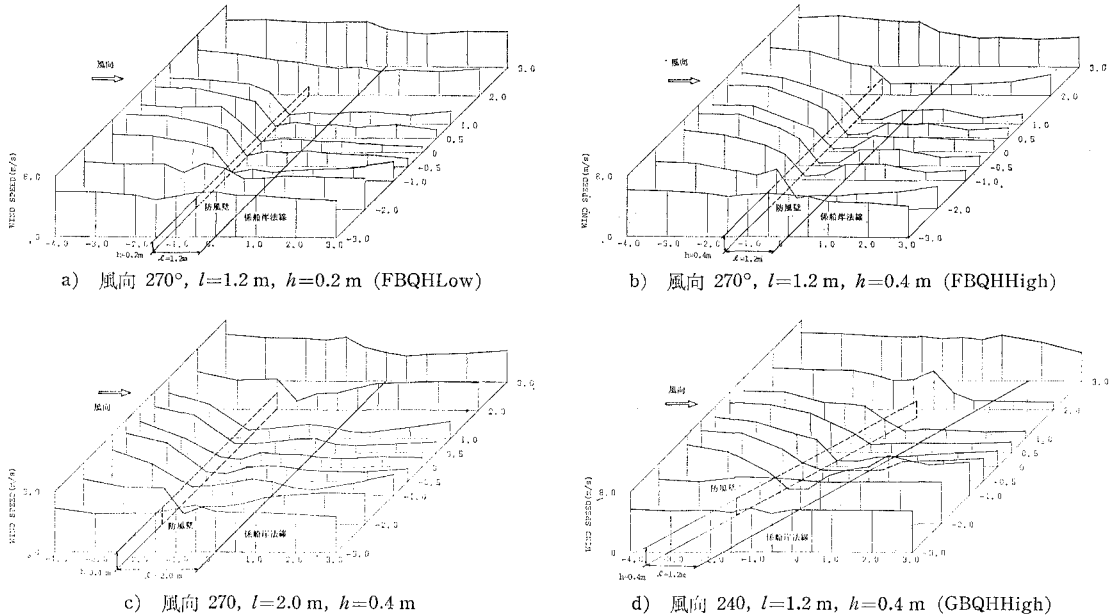


図-3 風速分布図

m, -4 m の範囲に計測点を 0.5 m ないし 1.0 m 間隔で格子状に配し、計測高さを水面上より 0.33 m および 0.17 m (係船岸上高さ 0.28 m および 0.12 m) とし熱線式風速計を用いて計測した。図-3 は、高さ 0.33 m における風速分布を示したものである。これらの図をみると、防風壁の背後で風速が急激に低下し風速は防風壁がない場合の 10~20% 程度、また係船岸位置では同じく 30% 程度になっていることがわかる。風向 270° で防風壁の高さが $h=0.2$ m と 0.4 m のケースとを比較すると防風壁が高いほど防風壁背後での風速の低下が大きいことがわかる。また、防風壁の設置位置 $l=1.2$ m と 2.0 m のケースとではいずれも防風壁背後から約 1.5 m 離れたところでいったん低下した風速が回復し、ついで約 3.0 m 離れたところでもう一度風速が低下し、その後、再び風速が大きくなることがわかる。風向 270° の場合には防風壁背後の風速分布が一樣であるが、風向 240° の場合には防風壁の端部から風が回り込むため風速分布は一樣でない。

図-4 は、風向 270° について、防風壁背後の中央測線上において係船岸上の高さ $h^*=0.28$ m での測定風速 U^* と基準風速 U_0 (防風壁がない場合の防風壁の設置位置における風速) との比 U^*/U_0 を、加藤⁴⁾らが風洞中に行った実験結果と比較して示したものである。ただし、加藤らの実験では平板上に防風壁が設置されているが、筆者らの実験では防風壁背後の 1.2 m または 2.0 m までは平板であるが、そこに 0.05 m の段差があり、そこから先は水面である。また、加藤らの実験と筆者らの実験とは基準風速が異なっている。しかし、これらの条件

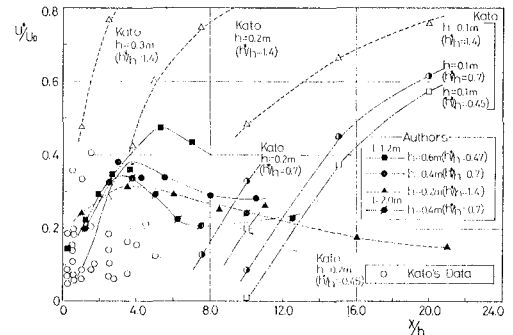


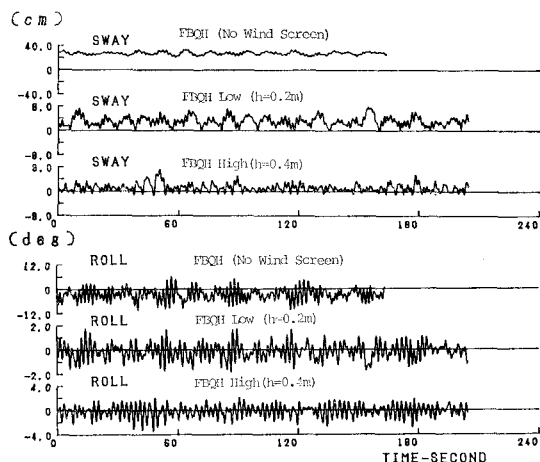
図-4 防風壁からの距離と防風効果の関係

が防風壁背後の風速と基準風速との比 U^*/U_0 に及ぼす影響は小さいものと思われる。さて、筆者らの実験結果では防風壁の背後で風速が 20% 以下に低下するが、 $X/h=(3.5\sim5.0)$ (X : 防風壁からの距離) の範囲では風速がやや増加し、 $X/h>(3.5\sim5.0)$ では再び風速が低下している。 $l=1.2$ m のケースではあまり明確でないが、 $l=2.0$ m のケースでは $X/h>8.0$ において風速は再び増加しているの、 $l=1.2$ m のケースについても同様な現象が生ずるものと思われる。これに対し、加藤らの実験結果では、 $h=0.3$ m かつ $h^*/h=1.4$ のときには $X/h=2.0$ で $U^*/U_0=0.6$ 、また $h=0.2$ m のときには $X/h=5.0$ で $U^*/U_0=0.6$ となっていて、防風壁背後で風速がそれほど低下していない。加藤らはこの現象は風洞の天井の影響によるものと解釈している。加藤らが行った $h=0.1$ m のときの実験結果をみると、天井の影響が少ないので $X/h=10.0$ においても $U^*/U_0=0.48$ であって、 $h=0.2$ m や 0.3 m のケースに比べて防風効果が大きい

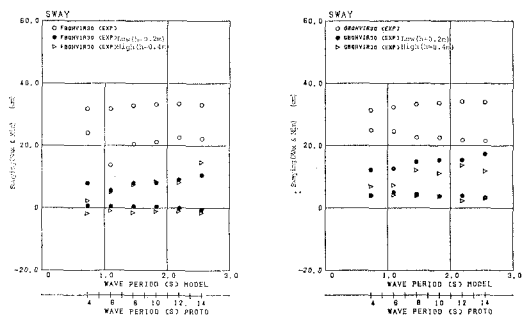
という結果になっている。なお、加藤らの実験においても、防風壁の高さより低い領域 ($h^*/h < 1$) における風速の分布は筆者らの実験結果と同様な傾向となっている。以上に示した実験結果から防風壁背後の $X/h < (6.0 \sim 8.0)$ の範囲では風速はおおむね基準風速の 40% 程度まで低下することがわかる。またこの領域はのちに説明するように逆風領域であると考えられるので船舶の係留に対して防風壁の効果が非常に大きいものと考えられる。

(2) 防風壁背後の係岸船舶の動揺特性

図—5 は、波向 90° かつ風向 270° の場合のスウェイングおよびローリングの動揺量の時系列波形を、防風壁がない場合、防風壁の高さが $h=0.2\text{ m}$ および 0.4 m の場合のそれぞれについて示したものである。ここでは、波は有義波高 1.67 cm 、有義波周期 1.83 s (実物換算波高 0.5 m 、実物換算周期 10 s) の不規則波である。防風壁がない場合には船舶は係船岸から離れスウェイングの動揺の平衡点はほぼ 30 cm (実物換算 9 m) であるのに対し、防風壁を設置することによって船舶が係船岸から離れる量は大幅に減少し、船舶は防衛工にときどき接触しサブハーモニックモーションが生じている。また、ロ



図—5 防風壁背後の係岸船舶の動揺量の時系列波形

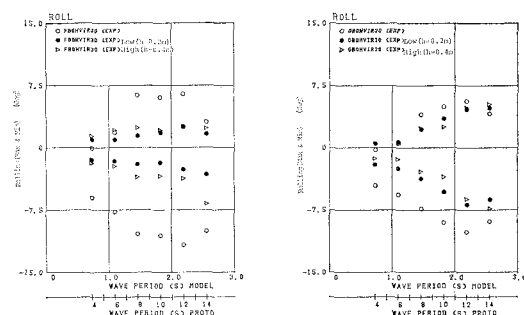


(a) スウェイング

ーリングの動揺量も大幅に減少する。

図—6 は、風向 270° かつ波向 90° (FBQH) および風向 240° かつ波向 60° (GBQH) の場合のスウェイングおよびローリングの動揺量を示したものである。スウェイングの動揺の平衡点は防風壁を設置することによって係船岸方向に移動する。FBQH と GBQH とを比較すると、GBQH では船舶は係船岸から常に離されているのに対し、FBQH では船舶は防衛工にときどき接触する。また、ローリングについても防風壁の設置により FBQH では動揺量が大幅に減少するが GBQH では減少量が小さい。これは風向 240° の GBQH の場合には、防風壁の長さが船長相当であるので 図—3 d) に示したように防風壁端部からの風の回り込みがあるためである。風の回り込みがある場合には逆風領域がなく船舶が係船岸から離れているので 3 (1) に示した理由により GBQH のローリングの動揺量が大きくなる。風の回り込みを防ぐために防風壁を連続的に設置することが望ましい。

図—7 は、防風壁の高さが異なる場合のスウェイングの動揺特性の相違をみるためにその周波数スペクトルを示したものである。防風壁がない場合にはスペクトルのピーク周波数は 0.08 Hz と 0.55 Hz 付近であり、 0.08 Hz 付近のエネルギーが大きい。この周波数はほぼ変動風のピーク周波数と一致する。つまり変動風が動揺に及ぼす影響が大きく船舶は係船岸から離れて長周期動揺を起こしていることがわかる。これに対し防風壁を設置することによって防風壁の背後では風速が低下するので船舶は防衛工に接触することになる。この実験ケースの場合には係留系の変位復元力特性の非対称性が強いので、スウェイングのサブハーモニックモーションが生じ、そのために動揺の周波数スペクトルのピーク周波数は防風壁がない場合と異なっている。すなわち防風壁の高さが $h=0.2\text{ m}$ の場合は 0.1 Hz 、 $h=0.4\text{ m}$ の場合には 0.2 Hz である。サブハーモニックモーションは係留系の変位復元力特性の非対称性が強く、風などによる定常力が小さいときに生ずることが知られている。



(b) ローリング

図—6 防風壁背後での係岸船舶の動揺量

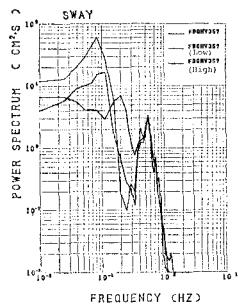


図-7 スウェイの周波数スペクトル

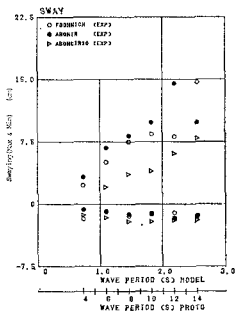


図-8 スウェイの動揺量

図-8は、風向 270° かつ波向 90° 、防風壁の高さ $h=0.4\text{ m}$ (FBQHH High) の場合のスウェイの動揺量と風向 90° かつ波向 90° で風速 0 m/s および 3.65 m/s (実物換算 20 m/s) (ABQHIR および ABQHCIR 20) の場合のスウェイの動揺量とを比較したものである。これをみると FBQHH High のスウェイの動揺量と ABQHIR (無風状態) の動揺量とがよく一致していることがわかる。防風壁背後の中央測線上の係船岸位置における風速は 2.2 m/s (実物換算 12 m/s) であったが、図-8 から判断すると風は海側から作用していたものと考えられ、防風壁背後には逆風領域のあることがわかる。

(3) 計算結果と実験結果の比較

波向 90° かつ風向 270° 、防風壁位置 $l=1.2\text{ m}$ 、高さ $h=0.4\text{ m}$ (FBQHH High) について計算結果と実験結果とを対比する。計算に用いる風速は係船岸前面で測定された風速 2.2 m/s (実物換算 12 m/s) とし、風向は実験結果から判断して 90° (風が海側から作用) とした。さらに、風向 270° (風が係船岸側から作用) とした計算および風速 0 m/s とした計算も行っておりこれらの結果を比較する。図-9は、スウェイおよびローリングの動揺量の実験値と計算値とを比較したものである。風が係船岸側から作用 (風向 270°) するものとした計算では、波周

期 1.83 s 以下では船舶が常に係船岸から離されて動揺し実験結果と異なる傾向を示す。これに対し風速 0 m/s もしくは風が海側から作用 (風向 90°) するものとした計算では、船舶は防衝工に接触したり離れたたりして動揺し実験結果と同様な傾向を示す。したがって風が海側から吹いていたと解釈するほうが実験値と計算値がよく対応する。ローリングについては風が海側から作用するものとした場合の計算値は実験値よりもやや大きく、むしろ風速 0 m/s とした場合の計算値とよく一致している。しかし、係船岸側から風が作用しているとする計算では動揺量が小さくなり実験値と一致しない。以上のことから防風壁背後の係船岸位置 ($X/h=3.0\sim 5.0$ 程度) では風速が低下し、かつ風向が逆であったものと考えられる。

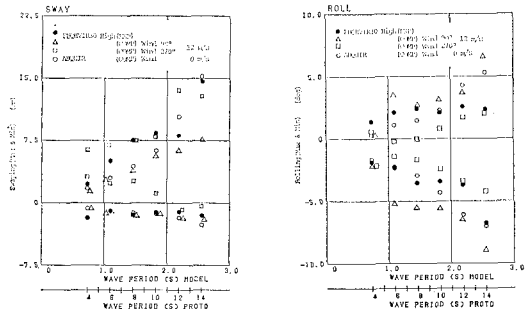
5. まとめ

強風下の係船船舶の動揺に及ぼす風向の影響と防風壁の効果を検討した。その結果以下の事項が明らかになった。

- 1) 風向 90° と 120° または風向 240° と 270° のそれぞれについて比較するとスウェイおよびローリングの動揺量の差異は小さい。
- 2) 風向 240° および 270° では風向 90° および 120° に比べてスウェイおよびローリングが大きくなり係留索の伸びが大きくなり切断のおそれがあるので防風対策が必要となる。
- 3) 防風壁を設置することによって防風壁背後の風速は $1/3\sim 1/4$ に低下する。この場合係船岸法線付近での風向が逆方向になることもある。
- 4) 係船岸法線から $l=1.2\text{ m}$ (実物換算 36 m) の位置に高さ $h=0.2\sim 0.4\text{ m}$ (実物換算 $6\sim 12\text{ m}$) の防風壁を設けることによって、船舶のスウェイ方向のドリフトを $1/3\sim 1/4$ に、ローリングの動揺量をほぼ $1/2\sim 1/3$ に抑えることが可能である。
- 5) 上屋の防風壁としての効果を期待できるのでこれを有効に利用し、海側から作用する風に対し防衝工を適切に配置すれば、強風時に船舶を係留することが可能である。

参考文献

- 1) 上田 茂: 係船船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技術資料 No. 504, 1984, 372 p.
- 2) 上田 茂・白石 悟・出路康夫・小島 晃: 係船船舶の動揺計算法と動揺の特性, 第30回海岸工学講演会論文集, 1983, pp. 455~459.
- 3) 上田 茂・白石 悟: 係船船舶の動揺に及ぼす波向と係留索の影響について, 第31回海岸工学講演会論文集, 1984, pp. 451~455.
- 4) 加藤 始・佐野喜久雄: 風洞におけるウィンドスクリーン の模型実験, 港湾技術研究所報告, 第11巻第1号, 1972, pp. 23~66.



(a) スウェイ

(b) ローリング

図-9 計算値と実験値との比較