

スリットケーソン岸壁における荷役障害対策の研究

STUDY ON TERMINATION OF CARGO LOADING AND UNLOADING ON SLIT CAISSON TYPE QUAY WALL

新保修¹・北島誠治²・近川喜代志²・渡辺朋洋²

Osamu SHINBO, Seiji KITAJIMA, Kiyoshi CHIKAGAWA and Tomohiro WATANABE

¹正会員 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所 (〒951-8011新潟市入船町四丁目3778)

² 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所 (〒951-8011新潟市入船町四丁目3778)

The termination of cargo loading and unloading often occurs in Tsuruga harbor in winter. One of these causes is induced to the rolling motion of ship caused in the jet flow from slit caisson, and one of others is the sympathizing motion of the roll of ship in the swell.

The paper shows the countermeasure for termination of cargo loading and unloading. In the study, the reduction of jet flow from the slit caisson is considered. The rolling motion of ship decreased by a part of slits covered in rigid wall. The cover of the slit of caisson found out the effective method to protect the termination of cargo loading and unloading.

Key Words : Ship motion, moored ship, slit caisson, tank test, Turuga harbor, termination of cargo loading and unloading, wave channel

1. はじめに

近年、物流の高度化に伴い港湾の効率的な運用が強く求められている。一方、外洋に面する港では係留船舶の動揺が大きくなり荷役が中断するなどの問題がたびたび指摘されている。敦賀港は敦賀湾の港奥に位置し、外海からの影響を受け難い自然な地形であることと、京阪神地区に隣接していることから、大型フェリーが着岸できるフェリーバースが整備されている。フェリーは運行の定時性が重要となるため、フェリーバースの静穏度を十分に確保する必要がある。このため敦賀港では反射率が少ないスリット構造ケーソンが、フェリーバースなどの係留施設に採用されるとともに、静穏度を向上させるために、港湾計画に基づき継続的な整備が行われている。しかし、冬季にフェリーバースで荷役障害が発生し、着岸バースの変更を余儀なくされることがあり、その原因の究明と対策が求められている。

港湾内の荷役障害に関する研究として、平石ら¹⁾による長周期波の研究や上田ら²⁾による係留船舶の荷役許容限界に関する研究などがある。そこで平成12年度^{3),4)}から対象バースでの静穏度調査として現地波浪観測およびブシネスクモデルによる数値シミュレーションを実施し、港内の波高分布や波の反射状況などを調査した。この結果、鞍山防波堤内側のフェリーバースは対岸に位置する金ヶ崎防波堤からの反射波の影響を直接受けることが判明した。また、荷役障害時の現地状況、現地波浪観測から、波

高は現状の静穏度の基準を満たす0.5m以下であるが、波周期が11sといったうねりが港内に進入しフェリーバースに到達すること、スリットケーソンの遊水部ではこのように長い周期のうねりを処理することができず、スリットから噴流が発生していることが明らかとなった。

さらに、うねりとフェリーに生じる荷役障害との関係を明らかにするため、湾内に停泊中のフェリーの動揺計測を行った結果、ケーソンのスリットからの噴流により船体に横揺れ(ROLL)が生じること、また、フェリーは着岸すると船体の横揺れ固有周期が航行中に比べて短くなり、うねりに同調した横揺れが生じる可能性があることが明らかとなってきた。

敦賀港では、現在、鞍山防波堤の延伸により港内静穏化が図られているが、港湾施設をすべて完成させるには時間を要するため、短期的な対策が必要となっている。

このような背景から本研究では、係留船舶の荷役障害が、遊水部を持つスリットケーソン岸壁にも発生していることに着目し、スリット部を閉切ることでの船舶の動揺量の低減効果および係留索や船の積み荷やバラスト水の積み付けによる船舶の動揺量の影響を明らかにするため、実験を実施した。

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験はフェリーバースでの荷役障害を解明するため、敦賀港のフェリーバースの縮尺模型を新潟港湾空港技術調査事務所水理実験場の平面水槽（長さ56.5m、幅6.1m）に設けた水路幅5.75mに再現した。敦賀港は、図-1のように港奥に位置し、フェリーバースに入射する波は金ヶ崎防波堤からの反射波が主成分となるので、実験では金ヶ崎防波堤を造波機側とし、ケーソンを水槽中央に再現した。ケーソンは、図-2～図-3に示すように幅19.9m、高さ10.5m、横スリットを4段有する、開口率14%のスリットケーソンで、全体で12函配置した。実験縮尺は水路規模、模型船の条件より、フルードの相似則から1/68で行った。ケーソンには表-1に示す大型フェリーの縮尺模型を係留した。この実験では、係船中の船の荷役障害を検討することから、スリットの形状や船の船体動揺に関わる主要目だけでなく、係留索や防舷材のばね特性なども実際のものに合わせた縮尺モデルを使用した。

実験では、図-4のようにケーソン前面での波高、流速および船体動揺として実船計測と同様に船のブリッジでの加速度と回転角（横揺、縦揺、船首揺）を計測した。なお、船体動揺は、発生頻度が高いフェリー上層部にあるトラックや乗客の出入り口での荷役障害を解明するため横揺れを中心に検討した。

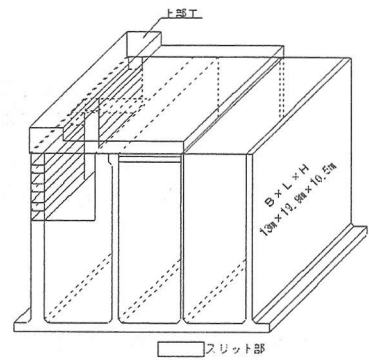
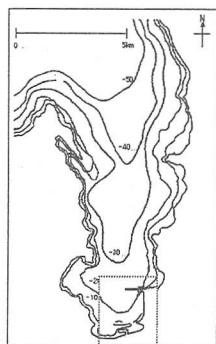


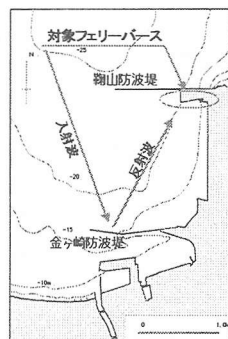
図-3 スリットケーソン形状

表-1 模型船の主要目

船体要目	実船	模型船
縮尺比	1 / 68	
船長 (m)	187.00	2.75
幅 (m)	25.00	0.37
喫水 (m)	7.1	0.104
排水量 (ton)	16,800	0.052



a. 敦賀湾全景



b. 港内状況

図-1 敦賀港の状況

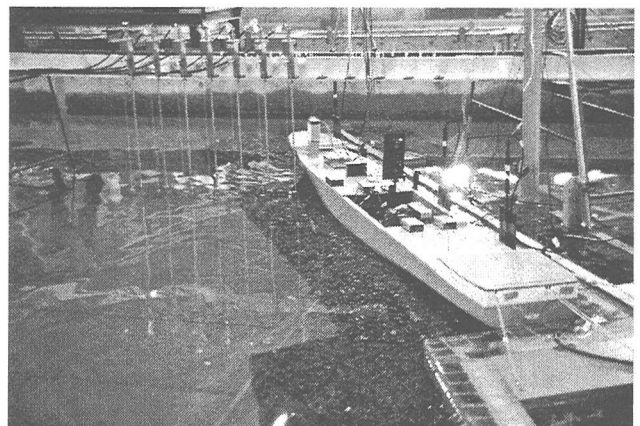


図-4 実験状況

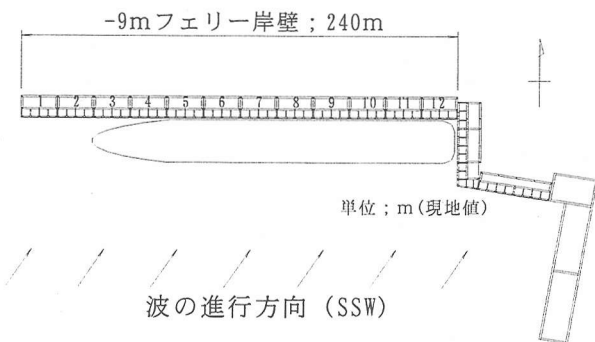


図-2 模型堤体・船体の配置図

(2) 実験フロー

実験は図-5のフローに従って進めた。実験は、まず荷役障害が発生した状況における船体動揺の基本特性を計測する船体特性試験、実船計測結果との再現性を確認する再現実験、スリットの影響を確認する対策予備実験、スリットの閉切り効果および船側の対策を検討する対策本実験の順番で実施した。船体特性試験では、自由動揺試験と規則波中試験から横揺れの基本特性を確認した。再現実験では今回の実験法で現地での現象を再現できるかを確認するために、実船計測結果と水槽実験結果を比較・検証した。対策本実験ではケーソンの対策、船側の対策、対策によるケーソン前面の波高に及ぼす影響を調査した。

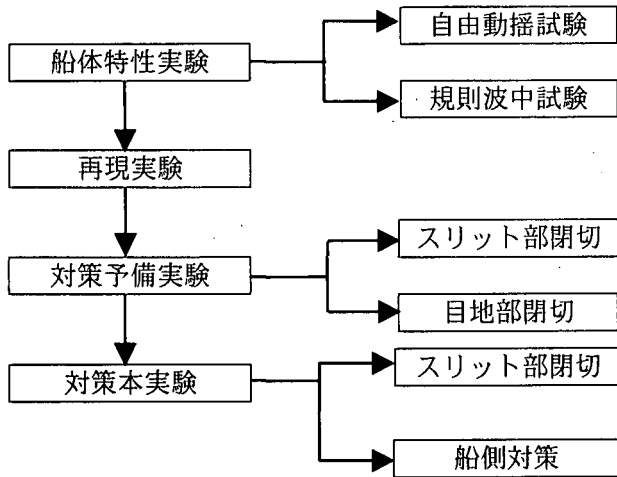


図-5 実験のフロー

(3) 実験波

実験波は図-6の観測地点での計測波から、表-2に示すように荷役障害が発生したものを、有義波高や有義波周期が異なる4つのケースを選択した。現地での計測波は方向分布を持つが、図-6の波向発生分布表より現地波浪をSSWの一方向波とし、観測された周波数スペクトルに対応する一方向不規則波を発生させた。波の山数は統計的にも安定する200波を目処に計測を行った。

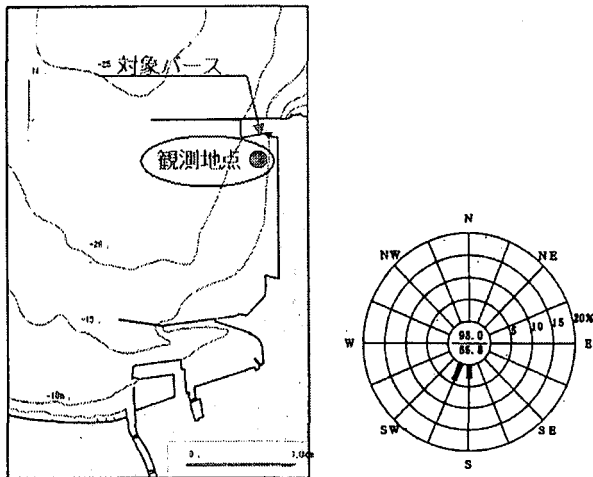


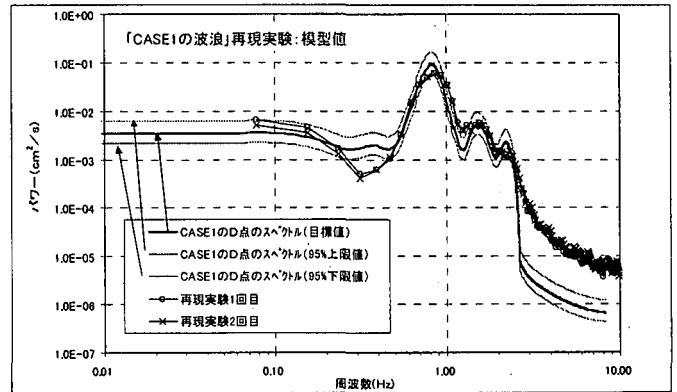
図-6 波向発生分布

表-2 実験波浪（現地観測値より）

再現ケース	バース前面の発生波浪			備考
	波向	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(s)$	
CASE1	SSW	0.414	9.93	障害有
CASE2	SSW	0.291	10.16	障害有
CASE3	SSW	0.166	8.69	障害無
CASE4	SSW	0.289	9.78	障害無

CASE 1は現地波浪計測時に最も大きな荷役障害が発生したケースであり、諸対策の検討には有効であ

るが、船体動揺を同時には計測していない。そこで、CASE 2, CASE 3, CASE 4を用いた再現実験で実験状態の再現性を確認した。図-7にCASE1で用いた波スペクトルを示す。実験のスペクトルは現地での計測スペクトルに対して概ね95%信頼区間内に存在してよく再現されていること、周波数スペクトルのピークが実機で約11秒相当であることがわかる。



$H_{1/3}=0.414m, T_{1/3}=9.93s$ (CASE1の波浪)

図-7 CASE1の周波数スペクトル(現地と模型)

3. 現地の再現実験

(1) 船体特性実験

船体特性実験の結果として表-3に自由動揺試験結果を、図-8に規則波中と不規則波中の実験から得られた横揺れ応答特性を示す。図-8の縦軸は、横揺れ角を、波数 k と波振幅 ζ_w の積で表される波傾斜で無次元化した値である。自由動揺試験結果から係留索の影響で横揺れ固有周期が実船相当で約0.7秒短くなり、うねりの有義波周期10秒に近づくこと、横揺れ応答特性から、波周期8秒を超えると横揺れが大きくなり、横揺れ固有周期で最大となることがわかる。また、規則波中の結果は不規則波中の結果とも一致していることがわかる。

係船時の横揺れ固有周期が短くなるのは、船体形状から一意に定まる船体固有の横揺れ復原力に、横揺に伴う係留索の伸び縮みによる復原力が加わって、横揺れ復原力が増大したことが理由と考えられる。

現地計測で得られた係船時の横揺れスペクトルのピーク周期は11.8秒であり、本自由動揺試験結果と若干異なる。一般に動揺スペクトルのピーク周期は、波周期の影響により固有周期と完全に一致はしないことを考慮すると、本自由動揺試験結果と現地計測結果はほぼ一致していると考えられる。

表-3 自由横揺れ試験結果

	係船時	非係船時
自由横揺れ試験 (s)	12.8	13.5
実船横揺れ周期 (s)	11.8	—

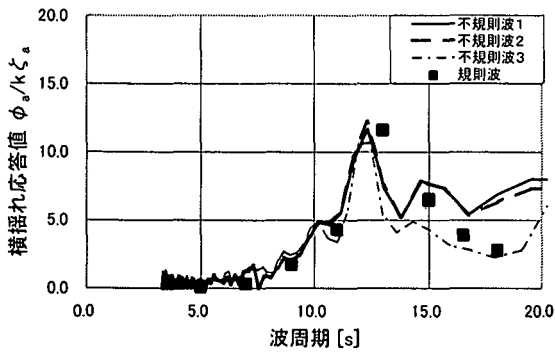


図-8 横揺応答の実験結果

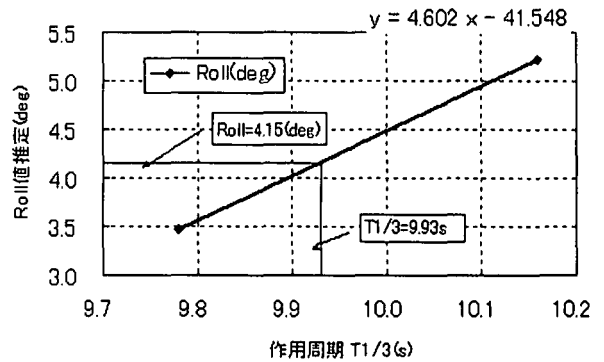


図-10 CASE1の推定横揺角

(2) 再現実験

実験水槽に設置した模型船、係留索およびフェンダーなどの特性が、実機を十分に再現しているかを確認するため、再現実験を実施し、その結果を実船の動揺データと比較した。図-9に船体横揺の実船計測値に対する実験値の比率を示す。全ケースの平均値は102.4%となり、ケーソン、模型船、係留索およびフェンダーの特性は、十分に再現されていることがわかる。

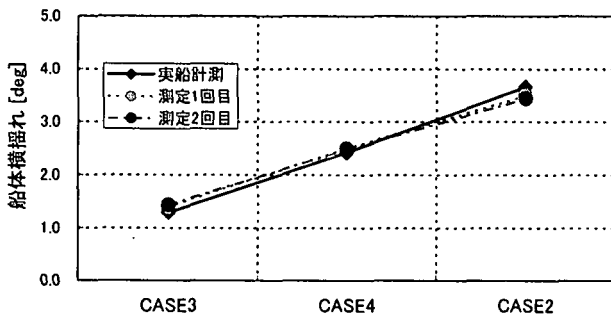


図-9 横揺再現性実験結果

また、対策実験で用いる現地での荷役障害が最も大きいCASE1の状態での横揺れは、図-8の横揺応答の実験結果から、波周期で応答が変化すること、また波周期の狭い範囲でみると応答が線形的に変化することを考慮すると、表-4、図-10より4.15degと推定された。

表-4 CASE1の現地での横揺推定結果

現地波浪および船体動揺実船計測値			
対象波浪	波高 $H_{1/3}$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (S)	動揺値 ROLL(deg)
CASE 1	0.414	9.93	—
CASE 2	0.291	10.16	3.663
CASE 4	0.289	9.78	2.417
CASE 1の波高での推定横揺(ROLL)量			
対象波浪	波高 $H_{1/3}$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (S)	動揺値 ROLL(deg)
CASE 2, 障害有	0.414	10.16	5.21
CASE 4, 障害無	0.414	9.78	3.46

4. 対策実験

(1) 荷役障害の発生メカニズム

荷役障害のメカニズムとして、これまでの検討から、金ヶ崎防波堤で反射された波と船の横揺れ固有周期が近いこと、同調運動が起きていることが明らかとなってきた。また、実験状況から図-11のように船体がケーソンに近づく時はスリットで水が自由に入出入りし、波が岸壁に衝突すると遊水室上部に閉じ込められた空気が圧縮されてスリットから水塊と共に噴出し、船体動揺を誘起していることがわかった。

これより、荷役障害の対策としては、図-12のようにスリットの閉切によってスリットからの噴流が船体を押す力を低減させること、ケーソンと船体の間の水流を悪くして船の付加質量を増加させて波と船体との同調現象を避けることが考えられる。

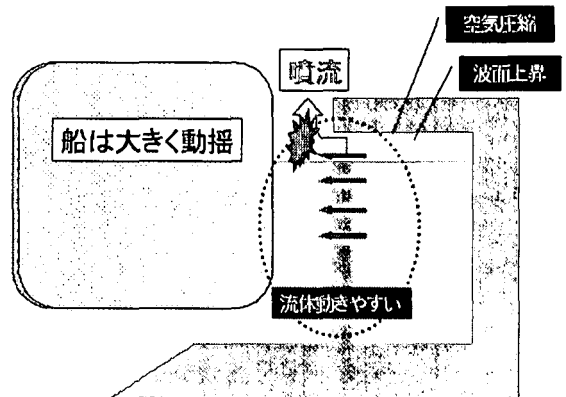


図-11 遊水室内部の空気圧縮状況

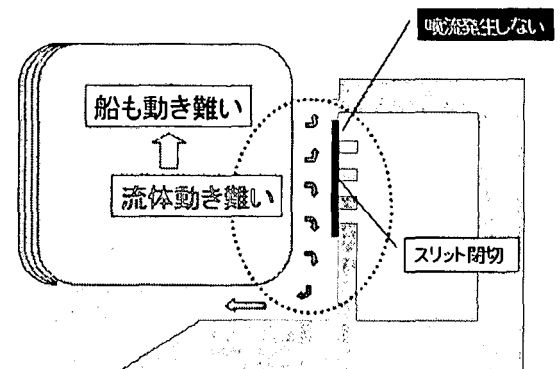


図-12 スリットを閉じた場合の船の動揺

(2) ケーソンの対策

前項で仮定した荷役障害のメカニズムのうち、ケーソンのスリットの影響を検証するため、予備検討を行った。この結果、図-2からも明らかなように船首付近では船体とケーソンの間隔が広がるのでスリットの閉切りの効果は小さいこと、ケーソン間の目地閉切りはケーソン間の水の流れが小さく、効果が小さいことが明らかとなった。これより、最終的に①4函から12函のスリットを全列閉切、②6函から9函のスリットを全列閉切、③6函から9函の下2列閉切、④6函から9函の上2列閉切の4ケースについて具体的な対策を検討し、その結果を図-13に示す。なお、本実験の横揺れ角は小さく、実験誤差もあるので、それぞれ対策前と対策後の横揺れの比で各対策の効果を判定することとした。これより、船体の平行部に相対し、ケーソンと船体が最も近づく6函から9函を全函閉切ることが最も効果があり、約16%の横揺れ低減効果があった。この6函から9函でも上段2列のスリットを閉切ることが最も効果的であることがわかった。ここで、4函から5函の閉切効果が少ないのは、船首に向かって船体が細くなっていること、10函から12函についてはフェリーは船底から水面に向けて船体が切り上がっており、船体がケーソンの影響を受け難いためである。また、6函から9函の上段2列が最も効果があるのは、上段側の方が噴流が大きいためと考えられる。

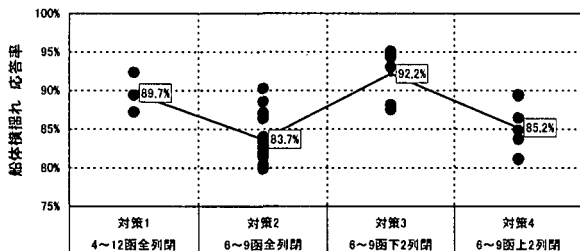


図-13 対策別横揺れ低減効果

これより、ケーソンのスリット閉切りにより、岸壁に係留された船舶の動揺を低減させる効果があることが明らかとなった。しかし、スリットを閉切ることによって、ケーソンからの反射波が大きくなり、港内の他の岸壁で波高が高くなっては意味が無い。そこで、対策2から4のケースについて、船首側、船体中央、船尾側の3つの線上で波高分布を計測したが、ここでは、波高分布に差が現れた船尾側の結果のみを図-14に示す。船が無い状態では岸壁付近で20%、100m沖合で10%程度波高が上昇していること、船が係留されている場合はほとんど変化が無いことがわかる。また、100m沖合での10%の波高の上昇は、波の三次元的な広がりを考慮すると実用上問題ないと考えられる。

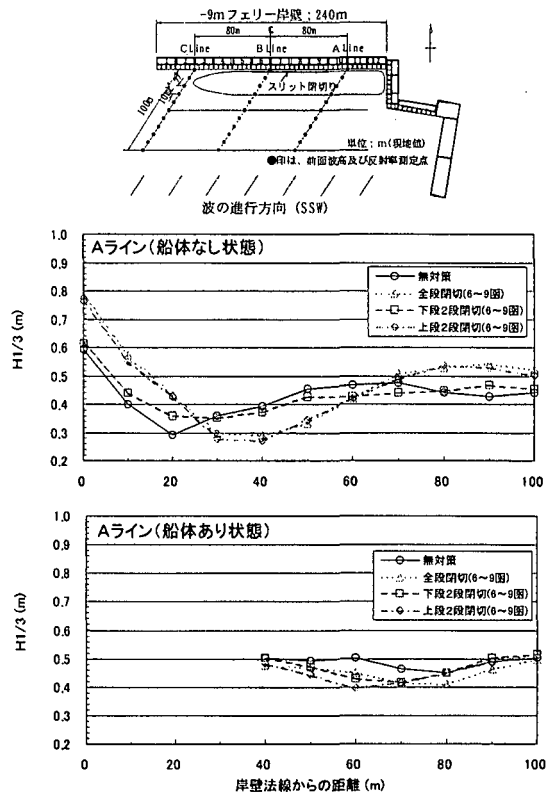


図-14 ケーソン前面での波高分布

(3) 船側の対策

これまでの結果から船体中央部に相対するケーソンのスリットを閉切ることによって、横揺れ応答が16%程度低減できることが明らかとなった。一方、敦賀港に進入するうねりの周期が10秒程度であること、図-8の横揺れ応答から船の横揺れ周期を長くすることができれば、波との同調が避けられることもわかってきた。そこで、船側の対策として、係留索や船の積み付けの影響を検討した。

図-15は、索張力による船体横揺れに及ぼす影響を示す。これより、ケーソン側に対策を施さない場合は係留索を強く張ることで最大14%程度の横揺れ低減効果があるが、ケーソンに対策を施した場合は船の揺れそのものが小さくなるので、係留索の影響はほとんど現れないことが明らかとなった。

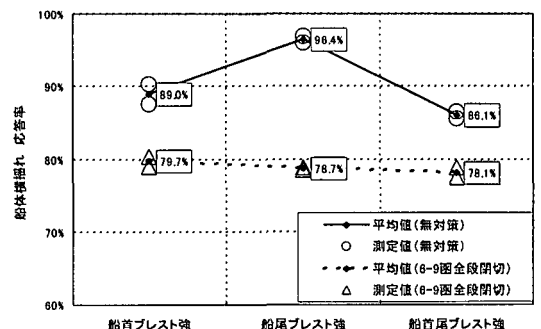


図-15 索張力による船体横揺れの低減効果

次に、船の積み付けの影響を図-16 に示す。ここでは、①荷物を積載する際に重量物を上層に搭載し、重心を高くすることで横揺れ固有周期を長くする方法、②荷物の積出しの際に下層から行い排水量を減少させる方法、③荷物の積出しの際に船の中心線上から先に下ろして、横揺れ慣性モーメントをできるだけ大きくする方法などを想定して検討した。この結果、ケーソン側が無対策でも10%以上の効果があること、ケーソンとの対策を含めると30%弱の低減効果が見込めることが明らかとなった。

この船側の対策は航行時の船の安全性とも影響するので慎重な対応が必要であるが、係船時の横揺れ固有周期を長くする観点からは有効と考えられる。

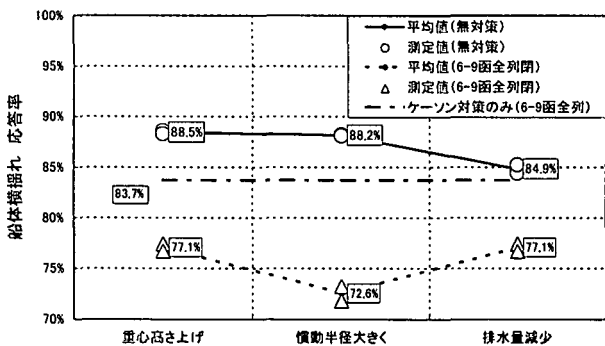


図-16 載荷方法の変更による横揺れの変化

5. 結論

これまで港湾施設の整備は静穏度の観点を中心に行われ、ケーソン等の設計が行われてきたが、本研究では係留された船舶に生じる荷役障害を船体動揺の観点から見直し、ケーソン側の対策、船側の対策を実験的に検討した。これより以下のことが明らかとなった。

- 1) 敦賀港での荷役障害の原因として、港内に進入するうねりと船の横揺れの同調現象であることが確認された。
- 2) 船の船側部にあるケーソンの横スリット開口部を閉切することで、船舶の横揺れ動揺を16%程度低減できる。これは、スリットからの船に当たる噴出流を減らせること、船とケーソンの間の水の動きを悪くすることで、船の見かけの慣性力を大きくできることである。
- 3) ケーソンの横スリット開口部を4函閉切った場合でも、ケーソン前面の波高は一部で10%の増加にとどまり、港内への影響は少ない。
- 4) 船の積み付けにも配慮すると、ケーソンの対策と合わせて、最大で30%程度横揺れを低減することが見込まれた。

なお、今回、敦賀港で生じた荷役障害は港湾整備の過程で生じたものであるが、今回、検討したケーソンのスリットの一部を閉切することは短期的な対策としては経済的にも有効であり、引き続きその効果の検証を進める所存である。

参考文献

- 1) 平石哲也・田所篤博・藤咲秀可：港湾で観測された長周期波の特性，港湾技術研究所報告，第35巻，第3号，1996。
- 2) 上田茂・白石悟・大島弘之・浅野恒平：係留船舶の動揺に基づく荷役許容波高及び稼働率，港湾技術研究所資料，No.779，1994。
- 3) 国土交通省 北陸地方整備局 敦賀港湾工事事務所：平成12年度 敦賀港静穏度調査報告書，2001。
- 4) 国土交通省 北陸地方整備局 敦賀港湾工事事務所：平成13年度 敦賀港静穏度調査報告書，2002。