

# 敦賀港における自動係留装置導入の検討事例と他港での適用性についての考察

小川 秀成\*・田所 篤博\*・大家 隆行\*\*・辻 浩幸\*\*\*・大島 寿治\*\*\*

\* (一財) 沿岸技術研究センター

\*\* パシフィックコンサルタンツ株式会社

\*\*\* (前) 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

我が国の港湾の中長期政策を示したPORT2030では、生産性向上等を目的として「次世代高規格ユニットロードターミナル」の形成が掲げられており、その取組の一つとして船舶の離着岸の迅速化・安全性向上等が期待される自動係留装置の導入が示されている。公共バースにおける国内初の自動係留装置導入として、敦賀港鞠山南地区での導入が検討されており、2022年度に装置導入による効果を検証するための実証試験が実施される計画である。本稿では、実証試験の概要および実証試験に向けて検討した事項を提示するとともに、他港において自動係留装置導入を検討する際の留意事項について考察した。

キーワード：自動係留装置、実証試験計画、船体動揺シミュレーション、荷役限界波高、係留限界風速

## 1. はじめに

我が国の港湾の中長期政策を示したPORT2030では、生産性向上等を目的として「次世代高規格ユニットロードターミナル」の形成が掲げられており、その取組の一つとして船舶の離着岸の迅速化・安全性向上等が期待される自動係留装置（以下、装置とする）の導入が示されている。

装置による係留は従来の係留索による係留方法とは異なり、岸壁に設置した装置のアームを伸縮させ、吸着版の吸着力で船体を係留するものである（図-1）。アームの伸縮や吸着は船・岸壁上等から遠隔で操作でき、数十秒で係留を完了できることから、従来の係留作業の省力化・効率化とともに、係留索の破断による事故等のリスク軽減も期待される。

公共バースにおける国内初の装置導入として、敦賀港鞠山南地区（図-2）での導入が検討されており、2022年度に装置導入による効果を検証するための実証試験が鞠山南 A 岸壁で実施され、本運用を鞠山南 B 岸壁で行う計画である。

本稿では、敦賀港における実証試験の概要および実証試験に向けて検討した事項を提示するとともに、他港において装置導入を検討する際の留意事項について考察した。

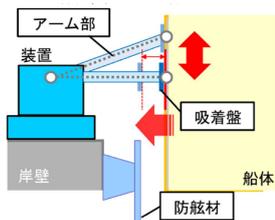


図-1 装置による係留イメージ

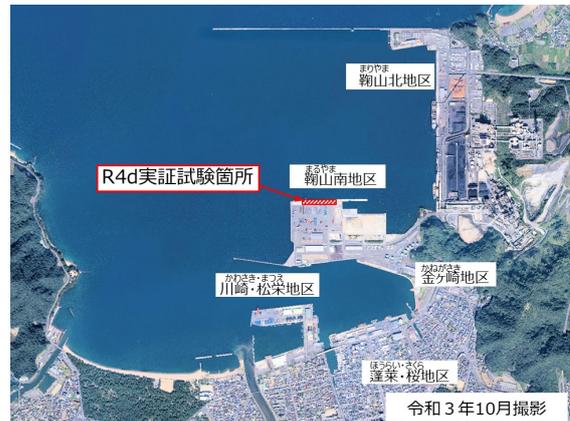


図-2 敦賀港全景

## 2. 敦賀港における実証試験計画の概要

敦賀港鞠山南 B 岸壁において、装置の導入効果の確認及び設計精度向上に資するデータを取得するため、現在敦賀港に就航している船舶により、現地実証試験を行うものである。

### 2.1 対象船舶

実証試験で対象とする船舶は表-1 に示す RORO 船（北海道航路・九州航路）及びフェリーの 3 隻を想定している。

表-1 対象船舶諸元一覧

船名	総トン数 (G.T.)	船長	船幅
RORO 船 (北海道航路)	11,185t	179.90m	27.0m
RORO 船 (九州航路)	9,858t	167.72m	24.0m
フェリー	17,382t	224.5m	26.0m

## 2.2 実施スケジュールおよび測定項目

船社や港運事業者へのヒアリングおよび有識者等への意見照会により、表-2 に示す測定項目により実証試験を行う計画とした。ここで、各期間における測定項目（作業項目）を以下に示す。なお、各測定項目の概要について、2.3 項に記載する。

### (1) 期間 A

装置の効果測定を行う前段階として、以下の作業を実施する。

- ①装置の作動の習熟
- ②装置を用いた係留作業の習熟

### (2) 期間 B (夏季)

気象・海象条件が比較的穏やかな夏季に、以下の測定を実施する。

- ①UAV 動画撮影
- ②陸上ビデオ動画撮影及び動揺量解析
- ③目視観測・記録
- ④動揺量計測

### (3) 期間 C (冬季)

気象・海象条件が厳しい冬季に、以下の測定を実施する。

- ①陸上ビデオ動画撮影及び動揺量解析
- ②動揺量計測

## 2.3 各測定項目の概要

### (1) UAV 動画撮影

実証試験中に UAV により上空から動画撮影を行い、主に船上での作業時間・人員を測定する。

### (2) 陸上ビデオ動画撮影及び動揺量解析

岸壁上にビデオカメラを2基設置し、以下を目的に動画撮影を行う。

①対象船舶の追跡する位置として、船体の前方・後方の2箇所程度を設定し、船体動揺測定の補足として撮影する。

②岸壁上で装置や係留作業状況を撮影し、作業時間・人員を測定する。

また、得られたビデオ映像を基に画像解析を実施し、動揺量を算定する。

### (3) 目視観測・記録

係留索及び装置による係留作業に係る作業時間や人員、その他の情報を記録する調査票を作成し、目視確認にて記録を行う。また、ヒアリングにより装置係留時の荷役作業への影響・使用感を把握する。

### (4) 動揺量計測

船舶に設置した GNSS 受信機、ジャイロセンサー等により船舶の変位・姿勢角を計測する。

## 3. 実証試験に向けて検討した事項

### 3.1 資料収集・整理

検討するにあたり、表-3 に示す資料を収集・整理した。

表-3 収集資料一覧

資料	収集元	資料の活用項目
波浪観測データ	・NOWPHAS ・過年度港内波浪観測成果	・波浪頻度表の作成 ・波浪変形計算結果の妥当性検証 ・荷役稼働率の算定
風観測データ	・気象庁測候所 ・コンテナターミナル 風況観測結果	・荷役限界波高算定時における風条件の設定 ・係留限界風速設定時の参考資料
船舶関連資料 (船舶・係留索)	・船社 ・港内長周期波影響評価 マニュアル	・船体動揺解析における船体・係留索諸元の設定
岸壁設計資料 (係留柱・防舷材)	・過年度設計成果 ・港湾管理者（福井県）	・船体動揺解析における岸壁反射率・係留柱位置・防舷材諸元の設定
自動係留装置 関連資料 (変位・応力特性)	・装置メーカー	・船体動揺解析における装置の係留力設定 ・係留限界風速算定時における各装置に作用する係留力配分の仮定

表-2 各期間における計測項目

対象船舶	測定項目	期間A	期間B	期間C
		(習熟期間)	(係留作業効率化の測定)	(船体動揺量低減効果の測定)
RORO船 (北海道航路)	作業習熟	○		
	作業時間計測		○	
	ビデオ計測		○	○
	UAV計測		○	
	動揺量計測		○	○
RORO船 (九州航路)	作業習熟	○		
	作業時間計測		○	
	ビデオ計測		○	○
	UAV計測		○	
	動揺量計測		○	○
フェリー	作業習熟	○		
	作業時間計測		○	
	ビデオ計測		○	○
	UAV計測		○	
	動揺量計測		○	○

(1) 波浪観測データ

装置の波浪に対する所要基数を算定するために、稼働率の算定に使用する波浪頻度表を作成するとともに、装置を設置する岸壁前面に到達する波浪特性を把握する必要がある。波浪頻度表の作成については、高頻度・長期間で観測された波浪観測データを用いるとともに、波浪特性の把握については、岸壁周辺での波浪観測データを用いることが望ましい。

本検討事例では、敦賀港沖 NOWPHAS の波浪観測データを用いて通年の波浪頻度表を作成し、別途実施した波浪変形計算を基に、泊地付近の波浪頻度表を作成した。また、港内波浪観測データを用いて、上記の波浪変形計算結果及び作成した泊地付近の波浪頻度表の妥当性を検証した。

(2) 風観測データ

装置の風に対する所要基数を算定するために、まず対象海域の風速・風向特性を把握する必要がある。その際、対象海域付近で、できるだけ高頻度・長期間で観測された風観測データが活用できることが望ましい。

本検討事例では、気象庁敦賀測候所（以下、気象庁とする）で観測された風速・風向データを検討に使用した。観測位置を図-3の青丸に示す。ただし、気象庁観測地点は港内から離れているため、観測期間は短い（2020年2月観測開始）ものの、港内に近いコンテナターミナルにおける風観測データを用いて気象庁の観測データを補正し、港内風速・風向を考察した。コンテナターミナルの観測位置を図-3の黄丸で示す。



図-3 風速風向観測箇所

(3) 船舶関連資料

船体動揺解析を行う際、対象船舶の諸元が必要となる。本検討事例では、対象船舶の諸元が確認できる資料や対象船舶で使用されている係留索の荷重・変位特性及び索配置情報を船社等から収集した。

(4) 岸壁設計資料

岸壁設計資料より、施設構造形式（反射率の設定に活用）、係船柱位置、防舷材位置及び反力特性情報を収集

した。

(5) 自動係留装置関連資料

装置により発生する係留力を船体動揺解析でモデル化するため、メーカーカタログ及びヒアリングより、装置の応力・変位特性を収集した。

3.2 波浪に対する所要基数の検討

本検討事例では、装置の波浪に対する所要基数を「装置で係留する対象船舶が、泊地において所要の荷役稼働率を満足するために必要な基数」として定義し、所要基数を算出した。荷役稼働率の算出の手順を簡潔に以下に示す。

- ①波浪観測値と波浪変形計算で算出した波高比を組み合わせ、岸壁前面での波浪頻度表を作成する。
- ②船体動揺解析により、周期8秒及び周期10秒の荷役限界波高を算出する。
- ③波浪頻度表の中で荷役限界波高以上となるデータの割合を「非稼働」としてカウントする。このとき、周期が8秒以下の波浪は②の周期8秒の荷役限界波高を、周期が8秒より大きい波浪は周期10秒の荷役限界波高を基準とする。

鞍山南B岸壁における、RORO船（北海道航路）の稼働率算出結果を例として表-4に示す。ここで、荷役限界波高を算出するために設定する荷役限界動揺量については、表-5に示すPIANCのワーキンググループ24<sup>1)</sup>によって提案されているRORO船の荷役限界動揺量の基準値を用いた。

岸壁稼働率の要求性能を、「現在RORO船（北海道航路）が通常荷役を行っている鞍山北岸壁（岸壁稼働率98.6%）と同等程度の稼働率を満足する」とこととすると、所要基数は4基となる。

表-4 鞍山南B岸壁におけるRORO船（北海道航路）の荷役限界波高及び稼働率

	荷役限界波高 (m)								稼働率 (%)
	周期	SURGE	SWAY	HEAVE	ROLL	PITCH	YAW	最小値	
係留索(10本)	周期8秒	1.38	1.28	4.99	0.62	1.06	1.11	0.62	96.3%
	周期10秒	0.23	0.29	2.28	0.30	0.71	0.25	0.23	
自動係留装置(4基)	周期8秒	0.86	1.28	4.86	0.85	1.08	0.79	0.79	98.7%
	周期10秒	0.33	0.65	2.36	0.30	0.71	0.32	0.30	

表-5 RORO船の荷役限界動揺量一覧

		荷役限界動揺量 (RORO船)
SURGE	(m)	±0.4
SWAY	(m)	+0.6
HEAVE	(m)	±0.4
ROLL	(deg)	±2.0
PITCH	(deg)	±0.5
YAW	(deg)	±0.5

3.3 風に対する所要基数の検討

敦賀港における一連の業務では、装置の風に対する所要基数を「装置で係留する対象船舶を装置で係留してい

る際に、突風が吹いた場合でも、風による外力が装置の許容係留力を超えない」として定義し、所要基数を算出した。なお、本検討事例では、メーカーによる風及び岸壁周辺の流れに対する装置所要基数の検討資料を参考に、所要基数を算定した。

### (1) 設計風速の設定

本検討事例では、風速 15m/s (10 分間平均風速) を設計風速として採用した。ただし、瞬間的に発生する風に対しても係留が可能である必要があるため、以下に示す 2 つの風速補正值のうち、1.21 (10 分間平均風速に対する 30 秒間平均風速の比) を採用し、設計風速を 18.1m/s (15m/s×1.21) として設定した。

- ①10 分間平均風速に対する 30 秒間平均風速の比 (×1.21)
- ②10 分間平均風速に対する最大瞬間風速の比 (突風率, ×1.5)

### (2) モデルの作成

本検討事例では、船体に作用する外力として以下に示す要素を考慮した (イメージを図-4 に示す)。なお、従来の港湾基準に基づく検討においては、②の流れにより発生する抗力については考慮せず係留力を算定するため、流れ抗力を考慮する場合と考慮しない場合の 2 ケースで係留限界風速を算定したが、この点については実際の岸壁沿いに発生する流速を観測した上で、設定を行うのが望ましい。

- ①風抗力 (Surge・Sway 成分)
- ②岸壁沿いの流れにより発生する抗力 (Surge 成分)
- ③風抗力及び流れ抗力により発生する Yaw モーメント

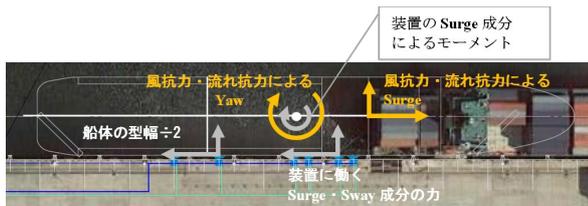


図-4 船体に作用する外力

### (3) 係留装置に作用する外力の分担

図-5 に示す通り、装置を 6 基設置する場合には、Surge 方向及び Sway 方向にそれぞれ 6 基分、計 12 個の係留力 (変数) が発生する。係留限界風速を算出するためには、前項までに整理した外力が作用した際に発生するこれらの係留力を個別に算出する必要があるが、力の釣合式は 3 式 (Surge 方向・Sway 方向・モーメント) しか存在せず、変数に対して方程式の数が不足していることから、このままでは個別の値を算出することができない。このため、本検討事例ではメーカー資料に基づいた仮定を設けることで変数を減らし、外力作用時において各装

置に発生する係留力を算出した。

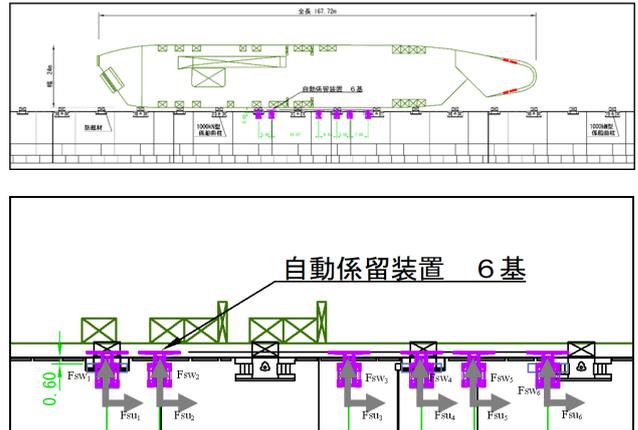


図-5 自動係留装置に発生する係留力 (変数)

### (4) 計算条件設定

船社から船体諸元 (水面上船体正面投影面積, 水面上船体正面投影面積, 水面上船体側面投影面積, 垂線間長及び船幅) を入手し、風抗力の算出に使用した。

### (5) 係留限界風速の算定

本検討事例では、以下の手順で係留限界風速を検討した。

- ①風向を 15° ずつ変更して全方位から風を作用させ、最も装置にとって厳しい条件 (装置の係留力が大きくなる条件) を検討する。
- ②係留限界条件 (装置キャパシティ) は、メーカー資料に基づき設定する。
- ③風速を変更した装置キャパシティの感度分析を実施し、装置キャパシティが 100% となる風速 (= 係留限界風速) を算定する。

風に対する検討の結果、所要基数は 6 基となった。

## 3.4 装置基数の決定

3.2 項及び 3.3 項に示す検討の結果、装置の波浪に対する所要基数は 4 基、風に対する所要基数は 6 基であるため、設置すべき装置の基数は 6 基とした。

## 3.5 岸壁の安定性照査

本検討事例では、装置の配置及び基数決定後、装置設置に伴う上載荷重の増加及び装置による船舶牽引力を考慮して、装置の本運用を予定している鞠山南 B 岸壁の安定性照査を実施した。以下に本検討事例における照査項目を示す。

- ①岸壁本体の安定性照査: 永続状態及び変動状態 (地震時, 装置による船舶牽引時) に対する本体の安定性照査を実施した。

- ②岸壁上部工の安定性照査:装置による船舶牽引力に対する上部工の安定性照査を実施した。
- ③部材照査:本検討事例では、鞍山南B岸壁がスリットケーソン構造であるため、上部工の配筋照査を実施した。

### 3.6 課題

実証試験後に装置の本運用を予定している鞍山南 B 岸壁における、装置所要基数の算定精度及び岸壁の安定性照査精度を向上させるための課題を以下に列挙する。

#### (1) 荷役限界波高の算定に関する課題

本検討事例では、船体動揺解析により係留装置による RORO 船(北海道航路)の荷役限界波高を算定した。ただし、本解析中には装置が持つ PID 制御機構(詳細を以下(a)節に示す)を反映できていないため、実際の装置係留時の荷役限界波高とは異なる可能性がある。

上記の課題を解決するために、まず来年度に実施する実証試験において装置係留時の波高・周期と動揺量の関係を測定する。その後、試験時と同じ外力(波浪・風)条件下での船体動揺解析を実施し、実測値に対する解析モデルの再現性検証をした上で、再現性が不十分であれば、PID 制御機能を反映可能となるように解析モデルの改良を実施する必要がある。

#### (a) PID 制御とは

PID 制御は、入力値の制御を出力値と目標値との偏差、積分値及び微分値の3要素によって行う手法である(制御のイメージを図-6に示す)。

P 制御(比例制御)は、目標値との誤差に比例定数を乗じて出力値を設定するものである。比例定数が大きいほど急速に目標値に近づくが、目標値をオーバーした際に、更に元に戻そうとして逆に戻しすぎてしまうことを繰り返し、値が振動してしまう場合がある。

I 制御(積分制御)は、偏差を時間的に蓄積し、蓄積した量がある大きさになった所で出力を増やし、誤差を無くすように動作させるものである。ただし、PI 制御は応答するのに一定の時間が必要であり、大きな外乱(高波浪の到達等)が生じる場合にすぐに反応できない場合がある。

D 制御(微分制御)は、上記の PI 制御の課題を解決するために、今回の誤差と前回の誤差とを比較し、誤差の大小によって操作量を機敏に反応するようにする動作である。

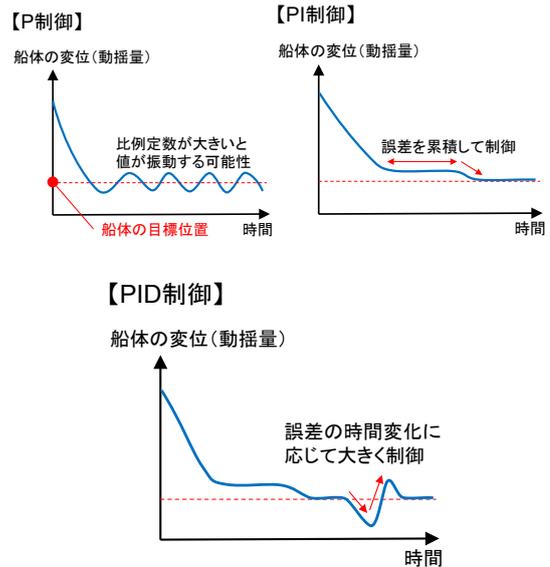


図-6 各種制御のイメージ

#### (2) 係留限界風速の算定に関する課題

本検討事例では、各装置に作用する係留力の分担や岸壁沿いの流速を仮定して係留限界風速を算定しているため、実際の装置係留時の荷役限界波高とは異なる可能性がある。

上記の課題を解決するために、まず岸壁沿いに発生する流速を実証試験時に観測し、その結果を係留限界風速の検討条件に反映する。また、試験時におけるコンテナターミナルでの風観測結果と装置に作用する係留力の関係を整理し、Surge 及び Sway 方向の力の分担仮定や風・流れ抗力算定式を検証し、必要に応じて見直しを行う必要がある。

#### (3) 岸壁の安定性照査に関する課題

本検討事例では、実証実験を行う鞍山南 A 岸壁の装置の配置より、B 岸壁の配置計画を検討し、この配置計画に基づいて岸壁の安定性照査を実施した。

このため、今後配置計画が見直された場合には、岸壁本体の安定性、上部工の部材照査への影響を確認し、危険側と想定される場合には、再度照査を行い、必要に応じて対策案を検討することが望ましい。

## 4. 他港で装置を導入する際の留意事項

### 4.1 岸壁を利用する船舶への吸着の可能性

敦賀港の検討事例では、敦賀港を利用する RORO 船(北海道航路, 九州航路), フェリー及びコンテナ船について装置の船舶への吸着可能性を検討した結果、コンテナ船については船体側面に装置先端部が吸着可能なフラット部が確保できず、実証試験の対象とすることが出来ないことを確認した。

今後、他の港湾において装置の導入の検討にあたっては、

当該岸壁を利用する船舶について、どのような潮位（L. W. L. ～H. W. L.）と船舶喫水（満載状態・空載状態）の組合せにおいても、装置先端部が船体に吸着可能であることをまず確認しておく必要がある。

#### 4.2 岸壁利用を考慮した装置設置の可能性

敦賀港の検討事例では、以下の条件を満足するように装置の設置位置を決定した。

- ① 船体の平行舷（水平に対して垂直かつフラットな範囲）に吸着可能であること。
- ② ギャングウェイ等舷外の装置と抵触しない位置であること。
- ③ 既往係留柱及び係留索と干渉せず、従来の係留方法と併用可能であること。
- ④ 岸壁ケーソンの隔壁または側壁上かつケーソン間に跨らない位置に設置すること。

今後、他の港湾において装置の導入の検討にあたっては、装置導入初期における不測のリスクを低減するために、従来の係留索を用いた係留・荷役作業の妨げにならない位置に装置が設置可能か確認しておくのが望ましい。また、クレーンレールが設置されている岸壁においては、装置がクレーンレールを跨がない位置に設置可能であるか、確認する必要がある。さらに、装置での係留時に船舶が既設付属物と接触しないかを確認することも重要である。

#### 4.3 港湾及び船舶の特性を踏まえた各種検討

- (1) 荷役限界波高の検討時における留意点

- ① 気象海象条件

検討対象箇所周辺の波浪・風観測データを収集・整理し、装置を導入する岸壁に到達する波浪（特に周期・波向）及び風向・風速の特性を踏まえて、船体動揺解析の入力条件設定及び荷役限界波高の算出を行う必要がある。

- ② 船舶諸元

対象船舶諸元及び船舶で使用されている係留索が把握できる資料を収集した上で、適切に動揺解析中の入力値に反映した上で、荷役限界波高の算出を行う必要がある。

- ③ 自動係留装置の特性

装置の変位と作用応力の関係はメーカーによって異なると考えられるため、メーカーへ資料提供依頼・ヒアリングを行い装置の特性を把握した上で、その特性を適切に船体動揺解析の入力値に反映する必要がある。

- (2) 係留限界風速の検討時における留意点

- ① 装置に作用する係留力の算出方法

装置に作用する荷重の算出式はメーカーによって異なる可能性があるため、確認しておく必要がある。

- ② 係留限界風速検討時における安全率の考え方

装置の係留限界力に乗じる安全率はメーカーによって設定値が異なると考えられるため、確認しておく必要がある。一方、外力に乗じる安全率については、導入する装置によらず一定の値を設定すべきであるため、類似の検討事例等から、今後適切な値を定めていく必要がある。

- ③ 装置に作用する係留力の配分仮定

敦賀港の検討事例では、メーカーによる装置の位置に応じた荷重の配分仮定を想定し検討を実施した。メーカーによっては、このような仮定を行っている可能性があるため、それらについても確認した上で、係留限界風速等の検討を行うのが望ましい。

#### 4.4 装置の荷重を考慮した岸壁安定性の照査

敦賀港の検討事例では、装置は常時船舶に吸着する構造であることから、「運用時」に作用する係留力がレベル1地震時にも作用する可能性があるため、レベル1地震時にその係留力を考慮して、岸壁の安定性照査を実施した。

今後、他の港湾において装置導入の検討を行うにあたっては、設置する装置の係留力の発生条件を確認した上で、必要に応じて係留力を考慮した岸壁の安定性照査を行う必要がある。

#### 謝辞

本稿は、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発注の港湾施設の設計等に関する技術支援業務のうち、自動係留装置の設置に関する技術的検討での成果の一部をまとめたものである。

業務にあたっては、自動係留装置技術検討委員会（委員長：高山知司京都大学名誉教授）の各委員、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、関係機関から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) PIANC : Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours, A Practical Guide; Report of Working Group 24 of the Permanent Technical Committee II, 1995.