

現地実証試験を通じた敦賀港における自動係留装置導入の効果について

北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 非会員 ○小林 千紘
北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 会員 千葉 明裕
北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 非会員 山下 裕之

1. はじめに

我が国の港湾の中長期政策であるPORT2030では、持続可能で新たな価値を創造する国内物流体系の構築を目的として「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・荷役効率化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。海外では北欧を中心に多くの導入事例が存在する装置であるが、これまでに我が国の公共バースにおいては導入されていなかった。今回、本州日本海側の中心に位置し、関西・中京地域と北海道を結ぶ国内物流の結節点として重要な役割を担っている福井県敦賀港において、我が国の公共バースでは初となる装置導入が行われた。

本論文では、装置導入の概要及び2023年度までの現地実証試験結果について報告する。

2. 自動係留装置の概要

自動係留装置とは、従来の係留索を用いた係留とは異なり、岸壁に設置した自動係留装置のアームを伸ばし、船体に吸着盤を吸着させ、船体を係留するものである。

敦賀港に設置したCAVOTEC社のMoorMaster™ MM400E 6基は、空気の負圧力を利用する装置である。船体との吸着が完了した後は、アーム部が伸縮し、岸壁の防舷材に引き寄せて船体を固定する。固定完了後は、装置を支点とし、風や波浪などによる船体の動揺をアーム部の伸縮で制御する。

(図-1)

装置は、専用タブレット端末で遠隔操作でき、数十秒で係留を完了できることから、係留作業の効率化や、係留ロープの破断による事故等のリスクの軽減、船舶動揺低減などの効果も期待される。



図-1 自動係留装置の構成

3. 現地実証試験概要

現地実証試験実施箇所は図-2に示す敦賀港鞠山南地区A、B岸壁とし、対象船舶は敦賀港に就航しているRORO船（北海道航路及び九州航路）及びフェリーの3船舶とした。また、実証試験回数は2022年度に15回、2023年度に6回実施した。

以下、実証試験手順について述べる。

- ① RORO船またはフェリー岸壁から、実証試験を実施する鞠山南A・B岸壁へ回航，着岸。
- ② 着岸時作業に係る作業員数・時間をUAVやビデオカメラ等により記録。
- ③ 着岸後，30分程度毎に係留方法をSTEP1（係留索のみ），STEP2（係留索・装置併用），STEP3（装置のみ）と変更し，STEP移行時の装置吸着に要する時間と，各STEP中の動揺量を計測（図-3）。
- ④ 動揺量計測終了後，鞠山南A・B岸壁を離岸し，離岸時作業に係る時間を着岸時と同様に記録。

動揺量計測方法は、RTK-GNSS端末を甲板に6箇所設置，緯度・経度・高度を測定し，船体の重心位置情報に基づいて動揺量・動揺角に変換。



図-2 現地実証試験実施箇所

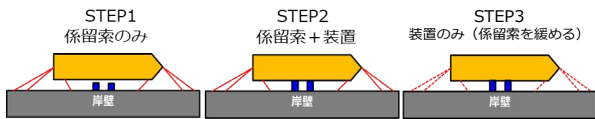


図-3 動揺計測方法

4. 作業効率化効果の検証

船舶離着岸の迅速化向上効果の検証のため、静穏時においてフェリーを対象に係留索を使用しない離着岸試験を実施した。着岸作業については、係留索を使用せずに装置及び防舷材のみで船体を係留させることに成功した。

一方で、荒天時等によっては、係留索を使用せずに船側の推進装置だけで岸壁に船体を係留するのは難しいと考えられる。

また、本試験を実施した鞍山南A・B岸壁のような直線上の岸壁においては、特に、係留索を使用しなければ難しい。

船側にサイドスラスタ等の設備を有するか、位置調整に係る労力が大きくない船尾部を有するL字型の岸壁形状であれば、静穏時においては装置及び防舷材のみによる離着岸が可能と考えられる。

離岸作業については、装置を外した直後も船体動揺は確認されず、スムーズに離岸できることを確認した。

以上に示す試験結果より、通常作業と比較して離着岸作業を大幅に省力化できる可能性があり、生産性向上が期待できると考えられる。また、係留索の破断による作業員の死傷リスクの低減や、災害発生時のクイックリリース効果についても十分に期待できるものと考えられる。

5. 動揺量低減効果の検証

本検証では、現地実証試験において計測したSTEP1（係留索のみ）とSTEP3（自動係留装置のみ）の動揺量の実測値を比較した後、補足的に動揺計算を実施し、実測値との整合を図った上で、装置による動揺量低減効果を検証した。

なお、船舶動揺量の各成分の定義を、図-4に示す。本論文においても、各成分毎に評価する。

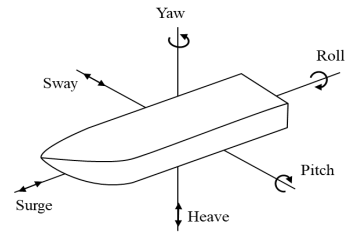


図-4 船舶の動揺6成分

(1) 実測値による検証

装置による動揺量低減効果を検証するため、比較的動揺量が大きかった2022年11月14日及び2023年12月18日のRORO船（北海道航路）における試験結果に対して動揺量を詳細に解析し、STEP1とSTEP3の動揺量の実測値を比較する。

表-1 に、試験条件を示す。事例1, 2の対象船舶は同じRORO船である。いずれの事例も風向き北北西～北の風が吹いており、波向は西北西、ピーク周期は10秒程度の波が観測されている。

表-1 動揺量低減効果試験条件

項目	事例1 (2022/11/14)		事例2 (2023/12/18)	
	船舶	RORO 船		左に同じ
岸壁	鞍山南 A 岸壁		鞍山南 B 岸壁	
係留方法	STEP1	STEP3	STEP1	STEP3
係留索	6本※1	-	8本	-
装置	-	6基	-	5基※2
有義波高	0.19 m	0.17 m	0.16 m	0.19 m
ピーク周期	10.4 s	10.7 s	10.3 s	10.7 s
ピーク波向	WNW	NW	WNW	WNW
平均風速	7.7 m/s	6.2 m/s	3.5 m/s	5.2 m/s
平均風向	NNW	NNW	NNW	N

※1：係留索 2本は不使用、※2：1基は不調のため不使用

表-2 波別解析により得られた動揺量の有義値

計測日	係留方法	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
事例1	STEP1	0.10m	0.04m	0.04m	0.82°	0.07°	0.12°
	STEP2	0.03m	0.03m	0.05m	0.58°	0.07°	0.10°
	STEP3	0.02m	0.03m	0.06m	0.51°	0.08°	0.09°
	STEP2/STEP1	24%	64%	124%	70%	106%	84%
事例2	STEP1	0.05m	0.03m	0.02m	0.68°	0.06°	0.09°
	STEP2	0.03m	0.03m	0.02m	0.26°	0.06°	0.11°
	STEP3	0.02m	0.03m	0.02m	0.40°	0.07°	0.07°
	STEP2/STEP1	63%	88%	88%	37%	113%	119%
	STEP3/STEP1	41%	94%	100%	58%	122%	80%

表-2 は、動揺量の実測値を波別解析して求めた動揺量（両振幅）の有義値の一覧である。まず、水平運動のSurge, Sway成分については、STEP1よりSTEP3の動揺量の方がSurgeで約6~8割、Swayで約1~4割減少した。Yaw成分の動揺量の比率は、約2~3割減少した。

次に、鉛直運動のHeave, Pitch成分については、動揺量の比率は約1~3割増加する傾向にある。これは、装置の吸着部が上下方向に追従し、鉛直方向の拘束力を持たないためと考えられるが、荷役に影響するほど動揺量は大きくない。

最後に横揺れ振動のRoll成分については、動揺量の比率は約4~6割減少する傾向にある。

以上より、装置は水平運動のSurge, Sway成分、横揺れ振動のRoll成分に対し、動揺量低減効果を発揮することが確認できた。敦賀港ではうねり性波浪（周期が比較的長い波）による船舶動揺が荷役障害の主要因であるため、荷役に影響が大きいRoll成分に対して動揺量低減効果が確認できたことは、係留・荷役作業時の安全性や荷役稼働率の向上に対して重要な意味を持つ。

(2) 計算値による検証

船体動揺シミュレーションとは、波浪の波向方向、有義波周期及び有義波高を変化させて船舶の最大動揺量（6成分）を求め、荷役限界波高を算出するものである。実測値による動揺量低減効果の評価は2事例のみの結果に基づくものであるため、動揺計算により補足検証を行った。本検証では、再現計算により再現性を確認した上で、予測計算による装置の荷役限界波高を求める。

a) 再現計算

表-3 に、再現計算条件の概要を示す。事例1, 2の動揺量を対象に再現計算を実施する。表-4 は、事例1, 2の再現計算により得られた動揺量の有義

値と実測値とを比較したものである。

最も荷役障害に影響を与えるRoll成分の誤差は±1割程度であり、Surge成分, Sway成分については誤差がやや大きいものの、絶対値が高々0.05m程度のオーダーであることから、設定した条件により概ね係留索及び装置係留時の動揺量が再現できているものと判断した。

表-3 計算条件の概要（再現計算）

項目	設定値
係留方法	事例1, 2と同じ(表-1)
入射波浪諸元	波高: 表-1の有義波高を反射率で補正. 周期・波向: 表-1のピーク周期・波向
スペクトル型	JONSWAP ($\gamma=10$)
風諸元	表-2の平均風速・風向. 旅客船・カーフェリーの風抗力係数 ²⁾ .
計算時間	造波時間を除いて100周期分, $\Delta t=0.2$ 秒
備考	反射波あり・波浪漂流力あり

表-4 再現計算による計算値と実測値の比較
(動揺量の有義値)

測定日	STEP	項目	動揺量[m, deg]					
			Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
事例1	STEP1	実測値	0.10m	0.04m	0.04m	0.82°	0.07°	0.12°
		計算値	0.06m	0.08m	0.04m	0.81°	0.08°	0.13°
		計算/実測	62%	188%	95%	98%	114%	105%
	STEP3	実測値	0.02m	0.03m	0.06m	0.51°	0.08°	0.09°
		計算値	0.03m	0.04m	0.04m	0.46°	0.07°	0.11°
		計算/実測	117%	135%	64%	90%	92%	120%
事例2	STEP1	実測値	0.05m	0.03m	0.02m	0.68°	0.06°	0.09°
		計算値	0.04m	0.06m	0.03m	0.71°	0.06°	0.05°
		計算/実測	78%	172%	104%	104%	109%	53%
	STEP3	実測値	0.02m	0.03m	0.02m	0.40°	0.07°	0.07°
		計算値	0.01m	0.03m	0.03m	0.37°	0.08°	0.06°
		計算/実測	65%	103%	133%	94%	115%	85%

b) 予測計算

再現計算を基に設定したパラメータを用いて0.10m~0.50m(0.10m間隔)の入射有義波高に対して動揺計算を行い、係留索及び装置で係留した場合の荷役限界動揺量相当となる波高(荷役限界波高)を算出した。係留索は8本、装置6基として、風外力は与えない条件とした。なお、本論文では荷役限界波高の上限値を0.5mとして整理した。

表-5 は、予測計算により求めた荷役限界波高の一覧である。黄色でハッチングした値は、荷役限

界波高が0.5m未満の動揺成分を示す。波向が大きく周期が長いほど、荷役限界波高は小さい。Surge, Sway, Roll成分については、係留索に比べて装置の荷役限界波高の方が大きくなった。また、Heave, Pitch, Yaw成分については、ほとんどのケースで荷役限界波高が同程度であった。この傾向は、実測値で評価した動揺量低減効果と同様である。限られた実測値に基づいて評価した動揺量低減効果の傾向と、広範な周期・波向条件による動揺量計算結果に基づいて評価した傾向が同様であることから、装置によるRORO船に対する動揺量低減効果は、限られた条件下でのみ発揮されるものではなく、汎用的なものであると考えられる。

表-5 予測計算より求めた RORO 船の荷役限界波高の一覧

係留条件	周期 $T_{1/3}$	波向 θ	荷役限界波高[m]						
			Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw	※1
係留索8本	8s	15°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
		30°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
		45°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
		60°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.40
	10s	15°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
		30°	0.50	0.50	0.50	0.37	0.50	0.50	0.50
		45°	0.50	0.50	0.50	0.33	0.50	0.50	0.35
		60°	0.50	0.50	0.50	0.28	0.50	0.50	0.20
	12s	15°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.35
		30°	0.41	0.50	0.50	0.28	0.50	0.48	0.30
		45°	0.34	0.50	0.50	0.20	0.50	0.33	0.25
		60°	0.38	0.41	0.47	0.21	0.50	0.37	0.20
装置6基	8s	15°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		30°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		45°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		60°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
	10s	15°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		30°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		45°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		60°	0.50	0.50	0.44	0.33	0.50	0.50	-
	12s	15°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
		30°	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.44	-
		45°	0.50	0.50	0.50	0.27	0.50	0.35	-
		60°	0.50	0.50	0.47	0.19	0.50	0.35	-

※1：長周期波影響評価マニュアルで提案されている荷役限界波高（ロールオン・ロールオフ船 20,000D.W.T）

6. まとめ

本実証試験における主な結論及び今後の課題は、以下の通りである。

(1) 船が十分な船体制御能力を有するか、位置調整に係る労力が大きくない船尾部を有するL字型の

岸壁係留であれば、静穏時においては装置及び防舷材のみによる離着岸が可能と考えられることから、船舶の離着岸作業を大幅に迅速化できる可能性があることを確認した。

(2) 係留索と比較して、特に水平運動成分（Surge, Sway）や横揺れ成分（Roll）に対し、装置による動揺量低減効果が高いことが示唆された。

(3) 装置を外した直後も船体の動揺は確認されず、スムーズに離岸できることを確認したことから、災害発生時のクイックリリース効果についても十分に期待できるものと考えられる。

(4) 今後の課題として、実際の荷役作業時における貨物量や船体重心位置の変化に応じた動揺量や係留力は未計測である。また、強風・高波浪作業時における装置による係留の安全性については十分に検証できていない。今後は、荷役作業時及び強風・高波浪作業時における船体動揺量の継続調査を実施して、本装置の導入効果や船体動揺解析の精度向上を図りたい。

謝辞：現地実証試験にあたり、近海郵船株式会社、新日本海フェリー株式会社、敦賀海陸運輸株式会社にご協力頂いた。また、装置導入効果の取りまとめに際し、高山知司京都大学名誉教授、上田茂鳥取大学名誉教授及び自動係留装置技術検討委員会の委員の方々より貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 上田茂：係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究，港湾技研資料，No. 504，pp. 29 - 30，1985.
- 2) 上田茂，白石悟，浅野恒平，大島弘之：新しい風抗力係数の計算式の提案および係留船舶の動揺への影響の検討，港湾技研資料 No. 760，pp. 42 -44，1993.