ニューマティックケーソン係船装置による船体係留に関する実験的研究

Experimental Study on Motions of a Ship Moored by "Pneumatic Caisson Mooring System"

吉田明徳¹・松尾雄太²・山城 賢³

Akinori YOSHIDA, Yuta MATSUO and Masaru YAMASHIRO

"A pneumatic caisson mooring system", which is completely different from the conventional ship mooring, has been devised: a caisson, which is set at the sea bottom in front of the quay wall, starts to move upward, touches the ship's bottom and continuously lifts the ship upward. After loading and/or unloading, the caisson starts to move downward and, at some point, the ship separates from the caisson and floats freely. In order to investigate the response of the ship hull in these transient states, wave tank experiments were conducted. The markers, attached to the ship hull and the caisson, were recorded on video in motion, and their trajectories were analyzed. It was found that the ship moves upward at almost the same speed as the caisson just before contacting with it, and this always results in the ship's smooth landing on the caisson.

1. はじめに

船体を浮遊状態のまま係留索で岸壁に繋ぐという大昔から変わらない係留方法を、今日の大型船舶にもそのまま適用し、外郭防波堤の整備によって静穏化を図るという方法で長周期動揺に対処することは難しい。船舶の大型化と常時荷役可能な港湾の整備を見据えると、長周期動揺対策は緊急に解決すべき問題である。著者らは、(1) 大型船舶の船型は船底がフラットな矩形の断面形状を有していること (日本船舶海洋工学会誌, 2011~2012), (2) 長周期波の波浪外力自体はそれほど大きくはないこと ((財) 沿岸技術研究センター, 2004), の2点に着目し、従来の発想を転換する新しい係留方法として、空気圧等によって上昇と下降が可能なケーソンにより船体を若干持ち上げ、浮力変化で生じる荷重によって長周期波に抵抗し、完全な静止係留を実現する「ニューマティックケーソン係船装置」を考案した (図-1)。しかし、ケーソンが上昇し船体との距離が小さくなると、船舶工学で制限水路影響 (丸尾, 1948) と呼ばれる現象 (船底とケーソン面との流水速度が速くなりベルヌーイの定理によって船体が引かれて思わぬ動きをする現象) によって、ケーソンと船体が間歇的に接触反発を繰り返す振動応答を誘発したり、傾斜した船体が浅いほうに横滑りする現象が生じるなどが考えられる。本研究は船体が浮遊状態からケーソン上に安定して定置されるまで (およびその逆) の遷移期間における船体・ケーソン・波浪の動的相互干渉の様子を実験的に把握することを目的とする。

図-1 ニューマティックケーソン係船装置模式図

2. 実験の内容

実験は図-2に示すように反射波吸収式造波装置を有する二次元造波水路を用いておこなった。ケーソン係船装置は、モーターで螺旋ネジを切った鋼棒を回転させ、これをガイドとしてステンレスで作製したボックス状のケーソンを上昇、下降させる装置を作製して用いた (図-2)。船体 (浮体) 模型の寸法は、実験水槽の大きさを勘案して縮尺を1/45に取り、船舶幅を40 m (模型寸法90 cm) とした。模型はアクリル板を用いて幅90 cm、高さ45 cm、奥行58 cm (水路幅60 cm) の箱状浮体を作製し内部に水を注水して喫水調整して用いた。水路側壁に面する浮体模型側板には前後に自在ベアリングを埋め込んで滑らかに動くことを確認した。岸壁前面の水深を37 cm (現地換算17 m) とし、満載喫水33 cm (現地換算15 m) の場合を主に、一部干載喫水16 cm (7.2 m) についてもおこなった。ケーソン上昇下降速度は2.5 mm/s (現地換算1.6 cm/s) ~ 10.0 mm/s (6.4 cm/s) を2.5 mm/s きざみで4通り変化させた。港内波浪の無波浪時と有波浪時について行ない、波浪周期は、1.19秒 (現地換

1 正会員	工博	九州大学特任教授 大学院工学研究院工学系国際交流支援室 室長
2 学生会員		九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻
3 正会員	博 (工)	九州大学助教 大学院工学研究院附属アジア防災研究センター

図-2 実験水槽とケーソン装置

算8秒), 1.50秒(10秒), 3.0秒(20秒)の3ケース, 各周期ごとに波高をほぼ0.5 cm刻みで4通りに変化させた(0.8 cm ~ 3.5 cm)。

まず測定時の手順について概説する。浮体模型を岸壁から一定の位置(3 cm)に保持し水路内の擾乱がおさまったのを確認後, 浮体を自由浮遊状態にしてビデオカメラをスタートさせ, モーターのスイッチを入れてケーソンの上昇を開始させる。ケーソン上昇の影響を受けて浮体も移動を始め, 一定時間経過後にケーソンの上面に着底し, その後ケーソン上で浮体が完全に停止したことを目視で確認してスイッチを切りケーソンを止める。ケーソンと浮体の側面それぞれに径1cmのマーカーを取り付け, それらの動きを水槽側面からビデオカメラで撮影した。モーションキャプチャーを用いて撮影したマーカーの位置をビデオ画面上での座標値として読み取り, 浮体の鉛直および水平位置の変位とケーソンの鉛直変位について, ビデオ画像のサンプリング間隔(約0.033秒)の時系列を得た。また, それらの時系列を用いて浮体底面隅角点(左右)とケーソン上面間の距離(最短距離)の変化の時系列を算定した。なお, ビデオ画像の傾きの補正を, 水槽側壁の静水線の上に90 cm離して取った2点の固定マーカーを基準にしておこなった。港内の有波浪時を想定して造波する場合には, 造波板と浮体間の距離, および造波する波の群速度を考慮して, ほぼ波が到達する直前にケーソンを駆動させた。ケーソン下降時も同様の手順で測定した。

3. 実験結果と考察

(1) 波無し条件

図-3と図-4は波無し時のケーソン上昇時と下降時の例で, 図-3の上昇時を見ると, 浮体の鉛直変動はケーソンスタート直後にわずかに上方に移動するが, 再び初期位置でほぼ静止し, その後ケーソンが近づいてくると(浮

図-3 ケーソンと浮体の変位 (波無し, 上昇時)

図-4 ケーソンと浮体の変位 (波無し, 下降時)

図-5 ケーソン上に着底時の浮体上昇量

図-6 ケーソンと浮体の変位（波有り，上昇時）

図-7 水平動揺の平均位置と周期成分（波有り，上昇時）

体－ケーソン間の距離が小さくなると）緩やかに上昇を始めケーソンとの距離が縮まるとともに浮体の上昇スピードが増大し，着底直前にはほぼケーソンの上昇速度に達し滑らかにケーソン上に着底する．なお図-3と図-4の凡例“(浮-ケ)間距離”は，オレンジ色が右側の浮体底面隅各部，ブルー色が左側の隅各部とケーソン上面との最短距離を意味している．図-5中の赤丸で示すのは着底時における浮体の静止位置からの上昇量で，ケーソンの速度にほぼ比例している．着底後はケーソンの上昇とともに上昇し鉛直方向の自由動揺は止まるが，水平動揺は鉛直動揺に幾分遅れて停止し，ケーソン上に位置されることが見て取れる．図-4のケーソン下降時を見ると，ケーソンのスタートとともに浮体も下降を始め，静止時の釣り合い位置を過ぎてさらに下降を続け，ある時点でケーソン上から離脱する（浮体－ケーソン間の距離が増大を

図-9 (a) 浮体の鉛直動揺波高の変動（上昇時）

図-9 (b) 浮体の水平動揺波高の変動（上昇時）

始める）。ただし，離脱後も下降を続けその後反転して上昇し静水面付近で動揺を続けることがわかる．またケーソンから離脱後，水平方向にはほぼ一様に沖方向（負値の方向）に移動することがわかる．図-5中の青四角で示すのはケーソンから離脱後の浮体の下降量でケーソンの下降速度に対して二次曲線的に変化する．図-3と図-4は例として上昇速度 $V=10.0$ mm/sと下降速度 $V=7.5$ mm/sの場合を示したが，これらの様相は上昇速度にかかわらず全て同様であった．

(2) 波有り条件

図-6は波有り時のケーソン上昇時の例で，入射波のもとで浮体が動揺（鉛直，水平，回転）するため浮体の鉛直変位，水平変位および浮体とケーソン間の距離が入射波の周期で周期的に変動している．図-6の例ではケーソンのスタートとほぼ同時に浮体が波によって動揺を始め

図-8 浮体の鉛直・水平動揺波高の変動 (上昇時)

図-10 ケーソン上に着底時の浮体上昇量

入射波の波高に応じた動揺を行うが、ケーソンが浮体に近づくとともに動揺の振幅が小さくなり、着底時には鉛直動揺は0となっていることが見て取れる。しかし、水平動揺は着底後も継続しており、一定時間が経過した後に停止している。浮体の鉛直変位と水平変位を、それぞれ浮体の平均位置と周期動揺成分に分解し (図-7にその例を示す)、周期動揺成分についてゼロアップクロス法により各波ごとに波高を読み取って、浮体とケーソン間距離に対する波高 (入射波高で無次元) 変動を調べた結果を、上昇速度 $V=2.5$ mm/s の場合について図-8に示している。

上段に示す鉛直動揺より、いずれの場合にもケーソンと浮体間の距離が小さくなると動揺波高も一様に減少し、最後に0となって着底することがわかる。着底する前に動揺によって浮体の一方の隅角点がケーソン上面に触れ、その反動で平均位置が移動するなどの変動は実験を行ったすべてのケースで見られなかった。一方、図-8下段に示す水平動揺の波高変化を見ると、周期によって幾分異なるもののケーソンと浮体間の距離が小さくなっても動揺の波高は減少することはなく、しかも距離が0になっても動揺を続け、停止するまでに時間を要することがわかる。これは浮体がケーソン上に着底しても水平波力が作用しているためで、上昇によりケーソンに作用する浮体の自重増大に伴う摩擦力の増大と、水平波力の減少とがあいまって急激に停止状態が生ずる様子が観察された。図-8に示す波高変動の様子はケーソンの上昇速度が違って同様で、図-9に周期 $T=1.50$ 秒で入射波の波高 15.2 mm の場合について、上昇速度をパラメーターにとった結果を示している。図-10は波有りの場合における着底時の浮体上昇量で、図中には波無しの場合のデータ (図-5中の赤丸) も併記している。入射波高の違いによってバラツキはあるものの、波無しの場合とはほぼ同様の値を示しケーソン速度に比例して増大する。図-11は着底後に水平変動が停止するまでの経過時間を示している。当然ながらケーソン

図-11 着底から停止までの経過時間

図-12 停止までの浮体上昇量

ンの上昇速度が遅いほど停止までの経過時間が大きく入射波高による変動も大きいですが、速度が大きくなると波高や周期によらず小さくなる。ケーソンがスタートしてから最終的に浮体がケーソン上で停止するまでの上昇量を図-12に示す。ケーソンの上昇速度によって変動するものの入射波高が大きいほど大きくなる傾向にあり、港内波

浪が存在する場合には、船体がケーソン上で完全に停止するまでの上昇量は、主に水平波力の大小に大きく左右されることがわかる。

4. あとがき

全く新しい係船装置を提案し、水理実験によって流体力学的な可能性の検討をおこなった。その結果、懸念したような制限水路影響等の問題は生じず、常にめらかなケーソン上への定置が実現されることがわかった。このケーソン上へのスムーズな着底は、浮体とケーソン間の流体が緩衝材的な機能を果たすことによって実現される。ただし、水平動揺は浮体とケーソン間の摩擦力が作用する水平波力を超えるまで着底後も継続する。ケーソン上面に摩擦係数の大きな材質を付加するなどの工夫をすることによって摩擦力を増大させ、より早く船体を定置させることも可能であろう。なお、本実験は流体力学的な観点から係船装置としての可能性を見るためにおこなった。詳細な(ケーソン・浮体・波)間の相互干渉の検討は、ケーソンの上昇速度、ケーソン上面の摩擦係数、喫水、重量、重心位置、慣性能率などの浮体条件、港内波浪の条件、岸壁防舷材など多くの要素が関わってくることから、数値シミュレーションによる検討が必要で今後の検討課題である。

謝辞：本研究の遂行に関して、九州大学工学部4年生若林信孝君（平成23年度卒業；現(株)不動テトラ）、および九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻技術職員児玉充由氏の援助を得た。なお、本研究はJSPS科研費22560516の助成を受けた。

参考文献

- 財団法人沿岸技術研究センター（2004）：港内長周期波影響評価マニュアル，沿岸開発技術ライブラリー，No.21，86p.
- 日本船舶工学会（2011～2012）：シリーズ新造船紹介，KANRIN（日本船舶工学会誌），第34号～第45号
- 丸尾 孟（1948）：浅水影響に関する一考察，造船協会論文集，第84号，pp.1-15.