

リフトバージによるケーソン進水工法 に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON A METHOD OF CAISSON LAUNCHING BY THE SUBMERSIBLE LIFT BARGE

堀沢真人¹・大中 晋²・中屋行雄³・慎 燦益⁴
川上 治男⁵・廣井康伸⁶

Makoto HORISAWA, Susumu ONAKA, Yukio NAKAYA, Chan Ik SHIN
Haruo KAWAKAMI, Yasunobu HIROI

¹正会員 東亜建設工業(株) 土木本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

²正会員 工修 東亜建設工業(株) 土木本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

³正会員 東亜建設工業(株) 土木本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

⁴工博 長崎総合科学大学教授 船舶工学科 (〒851-0193 長崎市網場町536)

⁵深田サルベージ建設(株) (〒231-0005 横浜市中区本町1-8)

⁶長崎総合科学大学大学院工学研究科 (〒851-0193 長崎市網場町536)

Hydraulic tests were conducted on the characteristics of motion of a buoyant caisson put on a semi-submersible lift barge to confirm the validity of a new caisson transporting and launching method by using a semi-submersible lift barge. It was found that the motion of the barge greatly decreases when it is semi-submerged, and that the motion of the buoyant caisson on the deck is influenced by the wave direction against the barge and the location of the caisson on the deck. Using these results, a safe launching method under wavy conditions was presented.

Key Words: ship motion, caisson motion, hydraulic test, lift barge

1. はじめに

防波堤や護岸に用いられるケーソンは、専用の製作ヤードを持たない場所で建設する場合、最寄りの既設ヤードで製作したものを海上運搬する方法や、フローティングドックにより製作・進水する方法で施工されるのが一般的である。しかし、これらの方法ではケーソン曳航時の安全性の問題、係留泊地確保の問題、等が生じる。そこで、半潜水式のリフトバージを用いた新たなケーソン運搬・進水工法を提案した。これは、周辺ヤードで製作したケーソンをバージごと施工地点まで曳航し、ケーソンを進水させる工法である。波浪中でケーソンを進水させる場合、バージおよびケーソンの両者の動揺が生じ、バージのデッキ面との接触により、ケーソンを破損する恐れが考えられる。マウンド上におけるケーソンの波浪中挙動に関する研究については、これまでいくつか行われている¹⁾。一方、波浪中で動揺しているバージ上におけるケーソンの動揺特性を扱った事例は見られない。

そこで本研究は、バージ上でのケーソン進水時の状況を水理実験により再現し、波浪中でのバージおよびケーソンの動揺特性を把握するとともに、最も安全性の高い進水方法を見出すことを目的とする。

2. 本工法の概要

図-1は、本工法のイメージを図示したものである。既設ヤードで製作されたケーソンを半潜水式のリフトバージに搭載後(a)、据付地点まで曳航し(b)、到着後、ケーソンが浮上するまでバージを沈降させ(c)、その後、曳船によりケーソンを引き出す(d)工法である。本工法の特徴として、以下の点が挙げられる。

- ・長距離の間、ケーソンを曳航する必要がなく、安全な運搬が可能である。
- ・そのため、専用のケーソンヤードを持たない地点においても、周辺の既設ヤードを利用したケーソン製作が可能となる。

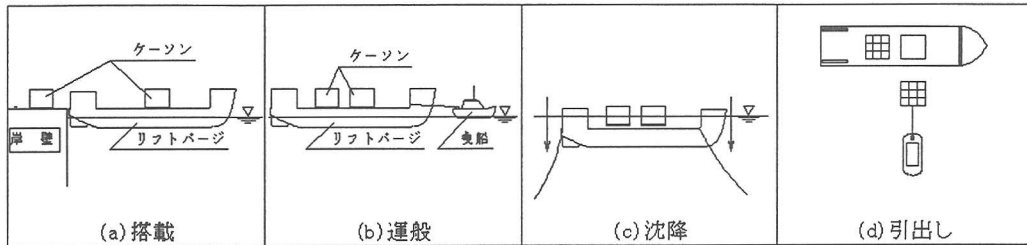


図-1 リフトバージによるケーソン運搬・進水工法のイメージ

3. 実験内容

実験は、長さ60m、幅4m、水深2.3mの船舶海洋試験水槽に、表-1に示す縮尺1/75のリフトバージおよびケーソン模型を用いて行った。図-2に示すように、半潜水状態としたバージ上にケーソンを浮遊させることにより、ケーソン進水時の状況を再現した。ここで、ケーソン底部とバージデッキ面との余裕高（クリアランス）については、現地換算で1mとした。なお両模型は、波による運動を拘束しない程度の弱いバネを用いて係留した。リフトバージは、写真-1、2に示すように、それぞれ船側方向（ $\chi=90^\circ$ とする）、および船首方向（ $\chi=0^\circ$ とする）から波が作用するように係留した。またケーソンは、引出し前の状態として、バージのデッキ上にある状態（写真-1）と、引出し途中の状態として、ケーソン断面の半分がデッキ面にかかった状態（写真-2）との2タイプで実験を行った。ここでケーソンの置き方は、縦置き（ケーソンフーチング部が

水槽の側面側となる方向）および横置き（同、岸沖側となる方向）の2とおりで行った。実験は規則波および不規則波で行い、波高については規則波については現地換算で1mと2m、不規則波の場合は $H_{1/3}=1.3\text{m}$ とし、周期については数ケース（同5～20s）で行った。バージおよびケーソンの動揺計測には、2次元動態計測装置（カラートラッカー）を用いた。これは、動揺計測対象物にターゲットとしてのマーカーを設置し、これをCCDカメラにより追跡することにより、対象物のリアルタイムの二次元動的な位置座標を計測するものである。本実験では水槽の側面側にカメラを設置することにより、リフトバージの運動としては、写真-1に示す $\chi=90^\circ$ の場合は、Roll（横揺）、Sway（左右揺）、Heave（上下揺）の3成分が、また写真-2の $\chi=0^\circ$ の場合は、Pitch（縦揺）、Surge（前後揺）、Heaveの3成分が計測される。

4. 実験結果

(1) リフトバージの動揺特性

表-1 模型諸元

		現地	実験(S=1/75)
リフトバージ	全長	138m	184cm
	全幅	36m	48cm
	浮上時喫水	6.5m	8.6cm
	半潜水時喫水	16.7m	22.2cm
	浮上時排水量	26680t	63.2kg
	半潜水時排水量	40610t	96.3kg
ケーソン	長さ	15.8m	21.0cm
	幅	12.4m	16.5cm
	高さ	13.5m	18.0cm
	喫水	7.0m	9.3cm
	排水量	878t	2.08kg

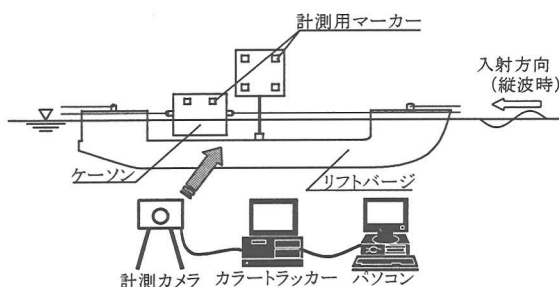


図-2 実験概要

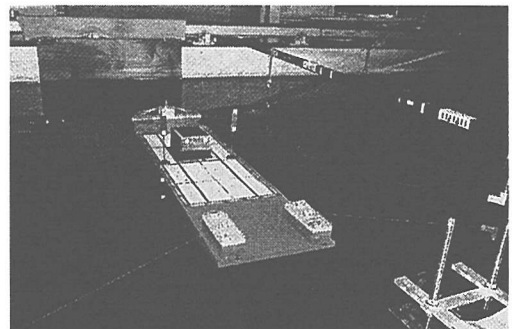


写真-1 実験状況（ $\chi=90^\circ$ ，デッキ上）

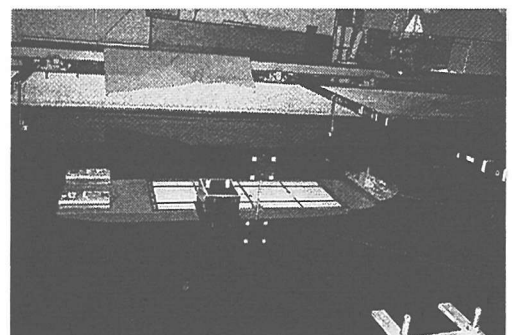


写真-2 実験状況（ $\chi=0^\circ$ ，引出途中）

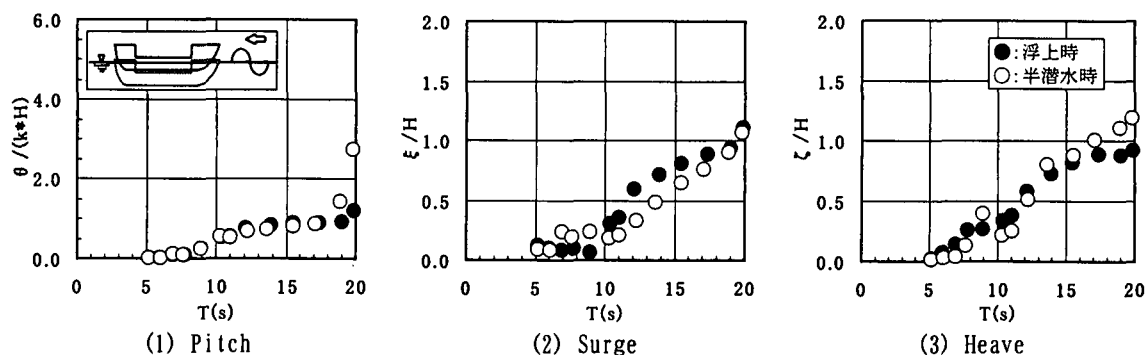


図-3 バージの応答特性 ($\chi = 0^\circ$, $H = 1\text{ m}$)

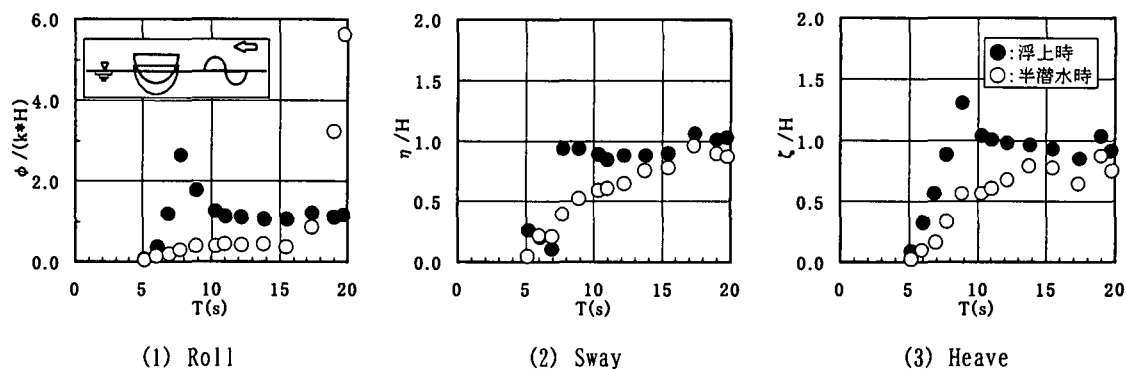


図-4 バージの応答特性 ($\chi = 90^\circ$, $H = 1\text{ m}$)

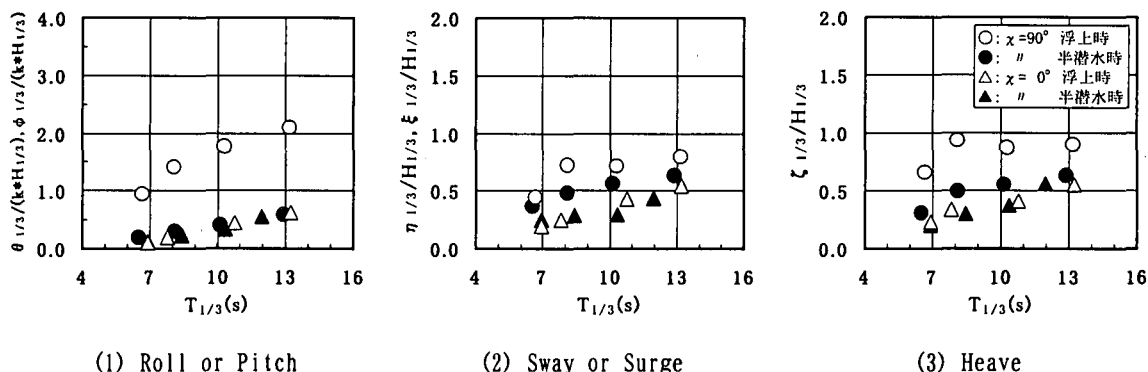


図-5 不規則波に対するバーズの動揺統計量 ($H_{1/3} = 1.3\text{ m}$)

はじめに、リフトバーズの動揺特性について示す。リフトバーズは、ケーソン運搬時には浮上状態、引出時には半潜水状態と、作業状況に応じて喫水が変わる。図-3は、 $\chi = 0^\circ$ 、波高1mにおける浮上状態、および半潜水状態のバーズのPitch, Surge, およびHeaveに対する応答特性を示したものである。ここで縦軸は、Pitchについては波形勾配で、SurgeおよびHeaveについては入射波高で無次元化している。なお、それぞれの動揺量は全振幅を用いている。また、横軸の周期は現地換算値である。これより $\chi = 0^\circ$ の場合、Surgeに多少の違いが見られ、周期の長いところで、浮上状態では半潜水状態に比べて2～3割程度の動揺量の増加が見られる。一方Pitchについては、周期20s付近で、半潜水状態の場合に急激な動揺量の増加が見られるに対し、浮上状態ではそのような増加が見られない。これは、喫水の違いにより付加質量および重心傾心間距離が変

化し、これに伴い、固有周期も変化するためと考えられる。またHeaveについては、喫水の違いによる動揺量の顕著な違いは見られない。つぎに図-4は、 $\chi = 90^\circ$ におけるRoll, Sway, およびHeaveに対する応答特性を示したものである。これより、 $\chi = 0^\circ$ の場合に比べて喫水の違いによる動揺特性の明瞭な違いが見られ、いずれの運動についても、浮上状態の結果が半潜水状態に比べて動揺量の顕著な増加が見られる。特に周期8～10s付近で、浮上状態の結果はいずれの運動についても著しく動揺量が増加しているのに対し、半潜水状態ではそのような増加傾向が見られず、むしろ図-3に示す $\chi = 0^\circ$ の結果にほぼ近い特性が見られる。なお、これらの結果は波高1mの結果のみ示したが、波高2mの場合についても、同調周期付近を除いてほぼ同様の応答特性が得られた。これより、今回の実験条件においては、バーズの運動については、波高に関してほぼ

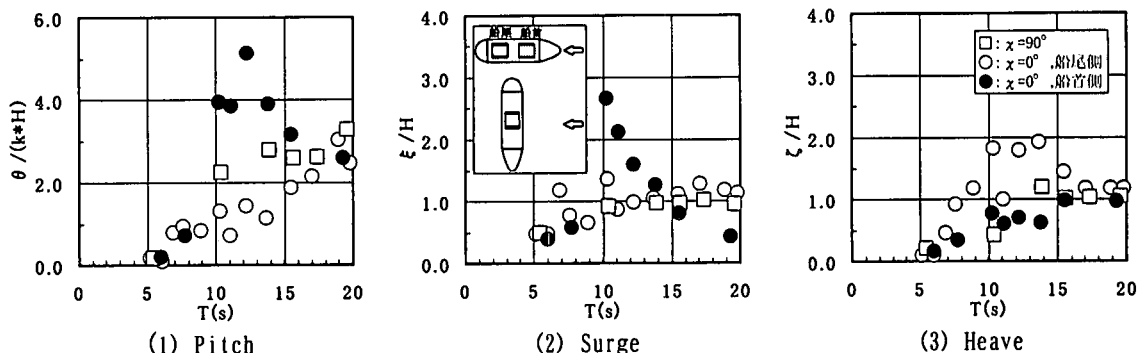


図-6 バージの向きの違いによるケーソン応答特性の比較 ($H=1\text{ m}$)

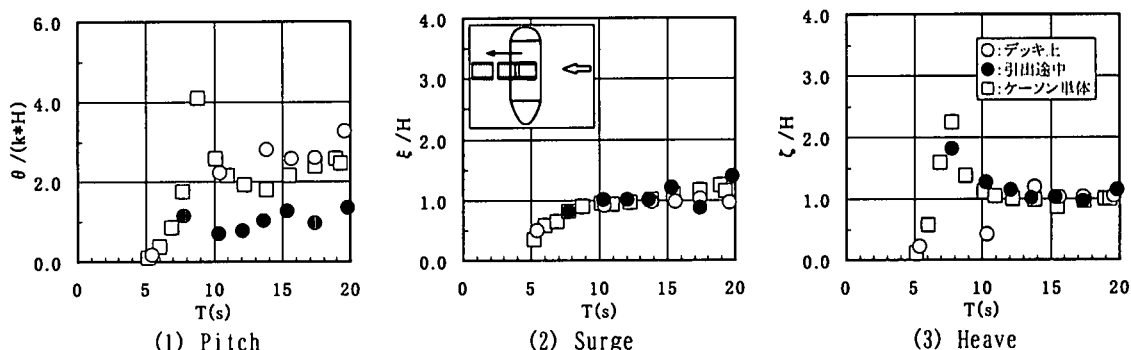


図-7 引出し過程の違いによるケーソン応答特性の比較 ($\chi=90^\circ$, $H=1\text{ m}$)

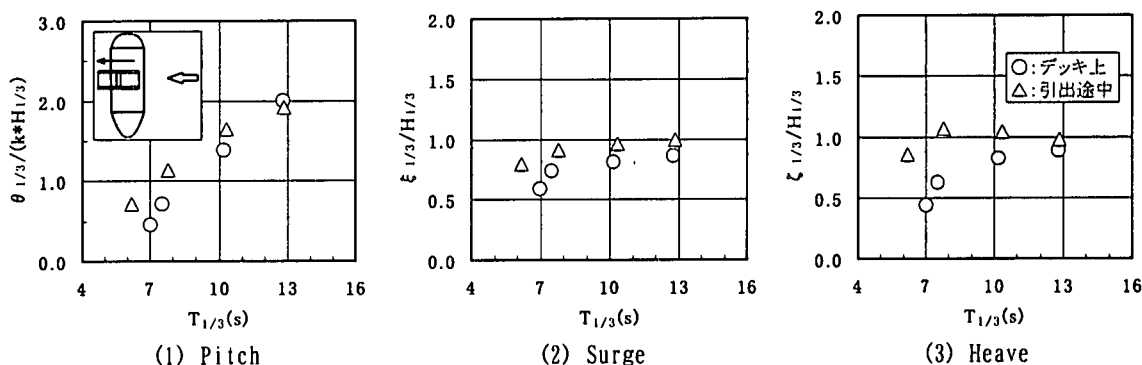


図-8 不規則波に対するケーソンの動揺統計量 ($\chi=90^\circ$, $H_{1/3}=1.3\text{ m}$)

線形であるといえる。

つぎに、 $H_{1/3}=1.3\text{ m}$ に対する不規則波実験より得られた動揺統計量について示したものが図-5である。ここで統計量としては、それぞれの動揺の全振幅に対する有義値を用いている。これより応答特性と同様、 $\chi=0^\circ$ の場合は浮上状態、半潜水状態の違いは見られない。一方 $\chi=90^\circ$ では、両者の違いは顕著となり、いずれの運動も浮上状態の結果が著しく増加している。また半潜水状態では波の作用方向の違いによる動揺量の顕著な違いは見られない。

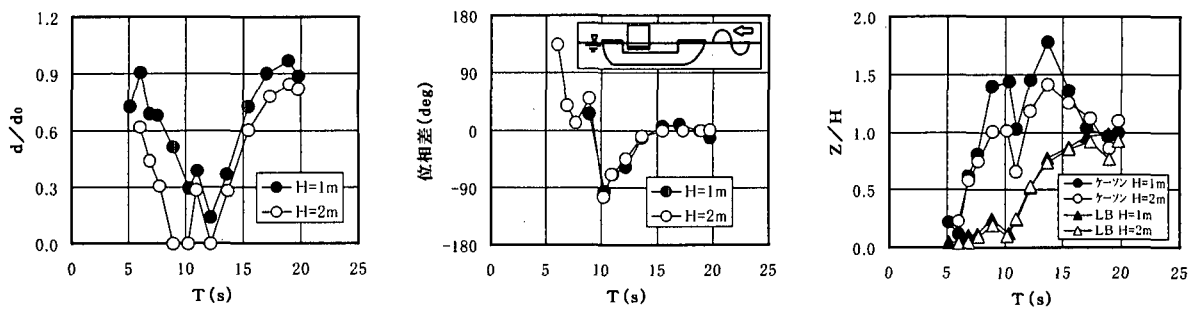
以上の結果より、運搬時の浮上状態においては、 $\chi=90^\circ$ の場合に比べて $\chi=0^\circ$ の場合の方がバージの動揺量は小さくなる。一方進水時の半潜水状態においては、 $\chi=0^\circ$ 、 90° の場合とも動揺量は小さく、またその特性も両者であまり変わらないことがわかった。

(2) 進水時のケーソン動揺特性

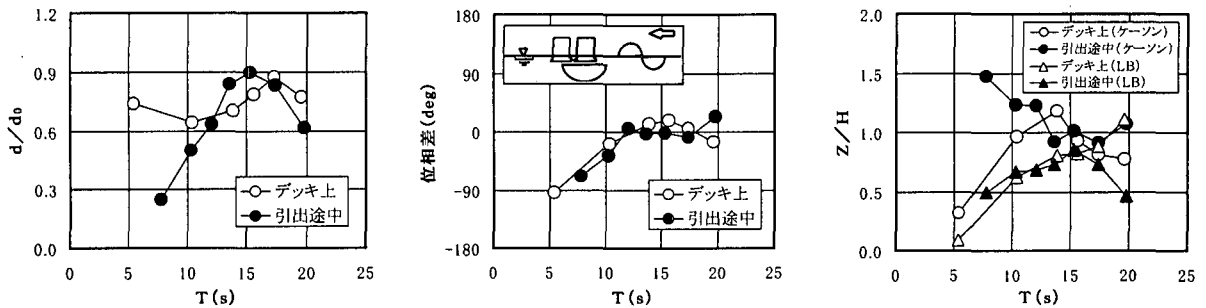
つぎに、進水時におけるケーソンの動揺特性について示す。リフトバージ上でのケーソンの動揺は、波に対するバージの向き、デッキ上でのケーソン搭載位置、向き等の影響を受けると考えられる。また、ケーソンがバージ上にある場合、引出し途中（ケーソンの一部がバージにかかった状態）、さらに引出し後（ケーソン単体の状態）といった、引出し過程の違いによっても動揺特性は異なると考えられる。そこで、ここではバージの向きの違い、およびケーソンの引出し過程の違いに着目して比較を行った。

a) バージの向きの違いによる比較

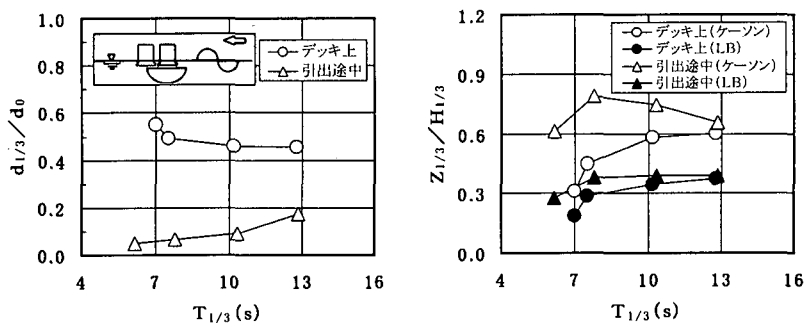
図-6は、 $H=1\text{ m}$ の場合の、バージの向きの違いに対するケーソンの応答特性を示したものである。図中の□印は $\chi=90^\circ$ 、○印は $\chi=0^\circ$ でケーソン



(1) 余裕高 (2) 位相差 (3) 鉛直変位振幅
図-9 余裕高, 位相差および鉛直変位振幅の応答特性 ($\chi = 0^\circ$)



(1) 余裕高 (2) 位相差 (3) 鉛直変位振幅
図-10 余裕高, 位相差および鉛直変位振幅の応答特性 ($\chi = 90^\circ$, $H = 1\text{m}$)



(1) 余裕高 (2) 鉛直変位振幅
図-11 不規則波に対する余裕高および鉛直変位振幅 ($\chi = 90^\circ$, $H_{1/3} = 1.3\text{m}$)

搭載位置が船尾側の結果を, ●印は船首側の結果を示す. なおケーソンの搭載方向としては, 縦置き (ケーソンのフーチング部が水槽側面側となる方向) とした. これより, $\chi = 0^\circ$ の場合, ケーソンの搭載位置により動揺特性は大きく異なっている. この原因として, ケーソン搭載位置の違いにより, バージの動揺との位相関係が異なること, およびバージの船首部分からの回折波等の影響により, 波の場が船首側と船尾側とで異なることが考えられる. これに対し $\chi = 90^\circ$ の場合は, バージの動揺との位相関係, およびバージ上の波の場ともに, ケーソン搭載位置が異なってもバージ上ではほぼ一様である. その結果, どの場所にケーソンを搭載しても, $\chi = 0^\circ$ のときに見られるような, ケーソンの動揺特性の顕著な違いは生じないと考えられる.

b) 引出し過程の違いによる比較

つぎに, 引出し前のケーソンがデッキ上にある状態, 引出し途中の状態, および引出し後のケーソン

単体の状態での比較を行う. 図-7は, $H = 1\text{m}$, $\chi = 90^\circ$ の場合における, ケーソンのPitch, Surge およびHeaveの応答特性を示したものである. これより, Pitchについては引出し後のケーソン単体状態の場合には, 9 s 付近に明瞭なピークが存在するのに対し, デッキ上, 引出し途中とも, そのようなピークは見られない. Surgeについては, 引出し前後での顕著な違いは見られない. またHeaveについては, ケーソン単体状態では8 s 付近に動揺のピークが存在するのに対し, デッキ上にある場合では, そのようなピークは見られない. また引出し途中の結果はケーソン単体の結果に近い. なお, $\chi = 0^\circ$ の場合についても, ほぼ同様の傾向が見られたが, 引出し途中の場合に, 波の進行方向と直交する方向での回転運動が非常に顕著となり, デッキ上にある場合に比べて激しい動揺が生じた. このような回転運動は, 特に周期が短いほど顕著となり, これにより, 周期15s以下ではケーソン底部がバージデッキ

面に激しく衝突する状況が見られた。これは $\chi = 0^\circ$ の場合、波の進行方向と直交する方向で、デッキ面の有無によりケーソンの付加質量が変わることや、波の場がデッキ面の外側と内側とで急激に変化することによるものと考えられる。

つぎに図-8は、ケーソンがデッキ上および引出し途中の状態における、不規則波に対する動揺統計量を示したものである。これより、Pitch, Heaveについて $T_{1/3} = 10\text{s}$ 以下で、引出し途中の結果がデッキ上にある場合に比べて動揺量の増加が見られる。しかしながら、周期が長くなるにつれて、その差は小さくなっていく。

以上の結果より、ケーソンの動揺は、バージデッキ上にある場合よりも、引出し途中の方が大きく、より危険な状態となることがわかった。特に $\chi = 0^\circ$ の場合は、波の進行方向と直角方向の回転運動が加わり、 $\chi = 90^\circ$ の場合に比べて、より激しい動揺となることがわかった。

c) ケーソンとデッキ面との衝突の可能性

ケーソン進水時において、最も危惧されるのは、ケーソンおよびリフトバージの波浪中の動揺により、両者が衝突し、その結果、ケーソン底部が破損することである。そこでつぎに、ケーソン底部とデッキ面との余裕高（クリアランス）について検討した。図-9は、 $\chi = 0^\circ$ における $H = 1\text{m}$ および 2m のケーソン下端中央部における余裕高（ d とする）、両者の位相差および鉛直変位振幅の応答特性を示したものである。ここで d_0 は初期状態における余裕高（ $= 1\text{m}$ ）を示す。これより位相差には明瞭な周波数特性が見られ、位相差が最も大きいところで余裕高は小さくなり、位相差が0の場合は、鉛直動揺振幅の減少とともに余裕高は大きくなる。またケーソン鉛直変位は、波高の大きい方が、粘性抵抗の影響と考えられる振幅の減少が見られる。このように余裕高は、ケーソン及びリフトバージ各々の鉛直方向の動揺振幅とともに、両者の位相差に支配される。つぎに $\chi = 90^\circ$ 、 $H = 1\text{m}$ に対し、ケーソンがデッキ上にある場合と引出し途中の場合とを比較したものが図-10である。これより余裕高は、周期の短いところで、引出し途中の方がデッキ上の場合に比べて小さくなっている。これは、ケーソンの鉛直変位が、引出し途中の方がデッキ上の結果に比べて顕著に増加していることに対応する。なお、 $\chi = 90^\circ$ の場合の位相差については、両者ともほぼ同様の特性となった。また、同じ $\chi = 90^\circ$ の場合の、 $H_{1/3} = 1.3\text{m}$ の不規則波に対する引出し前後の結果を示したものが図-11である。なお、この場合の余裕高、鉛直変位振幅としては有義値を用いている。不規則波の場合、両者の位相はほぼランダムであると見なせるため、余裕高は各々の鉛直変位振幅のみに依存すると考えられる。これより、ケーソンの鉛直変位は引出し途中の方が、デッキ上にある場合に比べて大きくなっている。その結果、余裕高は小さくなり、より接触しやすい状況となることがわかる。

5. おわりに

本研究で得られた結論はつぎのとおりである。

- 1) リフトバージの波浪中での挙動は、喫水の違いや波の入射方向の違いにより異なる。波が船横から作用する $\chi = 90^\circ$ の場合、バージが浮上状態の場合には比較的動揺量が大きかったものが、半潜水状態では格段に低下する。一方、波が船首から作用する $\chi = 0^\circ$ の場合は、 $\chi = 90^\circ$ のときに見られたような浮上時、半潜水時での動揺特性の顕著な違いは見られず、両者とも比較的動揺量が小さい。
- 2) 進水時におけるケーソンの挙動は、波に対するバージの向き、ケーソン搭載位置、搭載方向の違いによる影響を受ける。特に $\chi = 0^\circ$ の場合は、ケーソンの搭載位置の違いにより、リフトバージの動揺変動との位相が異なることや、船首からの回折波によりデッキ上での波の場が場所的に異なること、などにより動揺特性が大きく変化する。また引出し途中では、ケーソンの付加質量や作用する波の急激な変化により、波の進行方向と直角方向での顕著な回転運動が生じる。これに対し $\chi = 90^\circ$ の場合は、このような現象は生じない。
- 3) ケーソン底面とバージデッキ面との接触の可能性は、引出し前のデッキ上にある場合に比べて、引出し途中の方が高くなる。また $\chi = 0^\circ$ においては、これに加えて波と直交する方向での顕著な回転運動により、接触の危険性がより高くなる。

以上の結果より、ケーソン運搬時は、バージの船首から波を受ける方向で曳航し、進水時においては、バージの船横から波が作用するように係留し、波の進行方向に引き出す方法が、より安全であることが示された。

謝辞：本研究の水理実験は、深田サルバージ建設(株)の高島栄一氏、および研究当時、長崎総合科学大学船舶工学科4年生の赤島 豊、青野豪紀、越智裕也の諸氏らが中心となって実施したものである。ここに記して、感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 堀沢真人、佐藤典之、大橋裕寿、赤村重紀、坂間茂、吉倉敬治：ケーソン沈設過程の波浪中挙動、海岸工学論文集、Vol. 43, pp. 1001-1005, 1996。
- 2) 石崎崇志、荒木英二、藤原隆一、倉田克彦、永田修一、吉田尚史、田中 洋：ケーソンの曳航・据付時の動揺および索張力、海岸工学論文集、Vol. 46, pp. 841-845, 1999。