

リフトバージによるケーソン進水時の波浪中挙動に関する研究

堀 沢 真 人* ・大 中 晋**・中 屋 行 雄***
川 上 治 男****・慎 燦 益*****

1. は じ め に

防波堤等のケーソンを陸上のヤードで製作する場合、それを進水させる方法として、起重機船で吊り下ろす方法と進水専用バージを用いる方法がある。前者の方法では、起重機船の吊り能力によってケーソン重量が制限されるが、専用バージを用いる方法では 10,000 t を超えるようなケーソンでも進水可能である。近年、港湾は大水深域に建設されるようになってきており、ケーソンはさらに大型化するものと考えられ、今後は後者の方法が主流になるものと考えられる。ここでは、進水用バージとして半潜水式バージ（リフトバージ）を用いる場合の進水時におけるバージおよびケーソンの波浪中動揺特性について検討する。波浪中でケーソンを進水させる場合、バージとケーソンの両者は相互干渉を受けながら動揺し、ケーソン底面がバージのデッキ面と接触して、最悪の場合ケーソンが損傷することも考えられる。

堀沢ら（1996, 1997）は、ケーソン底面とマウンド面との距離（ボトムクリアランス、以下 BC）によるケーソンの動揺特性の変化を水理模型実験、現地計測および数値計算によって検討している。それにより、BC によりケーソンの動揺特性は大きく変化し、特に BC が極めて小さい状態では動揺計算にあたりマウンドとの接触を考慮することが必要であることを明らかにするとともに、マウンドとの接触の影響をバネで置き換えた計算モデルを提示している。また、石崎ら（1999）も BC によってケーソンの動揺特性が変化することを現地計測により確認している。

リフトバージによるケーソンの進水作業においても、バージの存在が、進水時のケーソンの動揺に影響を及ぼすと考えられる。この場合、バージも動揺しているため、現象はさらに複雑となると考えられる。しかしこれまで、このような状態におけるバージ及びケーソンの波浪中挙動に関する研究はほとんど行われておらず、現場での進

水作業は経験的手法に頼らざるを得なかった。そこで本研究では、リフトバージからケーソンを進水させる状態における両者の動揺特性、特にバージデッキ面が進水時のケーソン動揺に及ぼす影響について、水理実験および数値計算により明らかにすることを目的とする。

2. 模 型 実 験

（1） 供 試 模 型

実験には、縮尺 1/75 の矩形ケーソンおよびリフトバージを用いた。各模型諸元は、表-1 に示すとおりであり、重量、重心位置等が実機に対応するように、おもりおよびバラスト水で調整を行った。

表-1 模型諸元

		リフトバージ		ケーソン	
		現地 scale	実験 scale	現地 scale	実験 scale
長さ	$L(m)$	138.0	1.840	15.75	0.210
幅	$B(m)$	36.0	0.480	12.38	0.165
喫水	$d(m)$	6.5	0.086	7.00	0.093
排水量	$W(t)$	29700	0.070	1364	0.003
重心高さ	$KG(m)$	4.8	0.064	4.5	0.060
roll 固有周期	$T\phi(s)$	7.2	7.2	13.0	13.0
roll 非線形減減係数	b	0.03	0.03	0.018	0.018

（2） 実 験 方 法

実験は、造波装置の付いた船舶海洋試験水槽（長さ 60 m, 幅 4 m, 水深 2.3 m）において実施した。図-1 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。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、それぞれ右舷方向（横波時）、および船首方向（縦波時）から波が作用するように係留した。またケーソン配置は、バージのデッキ上にある状態と、引出し途中としてケーソン断面の半分がデッキ面にかかった状態との 2 タイプとし、さらにケーソンの向きを縦波状態と横波状態の 2 通りとした。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の場合、現地換算で 1 m と 2 m, 不規則波の場合は $H_{1/3}=1.3 m$ とし、周期については数ケース（同 5~20 s）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、

* 正会員 東亜建設工業(株)土木本部設計部
** 正会員 工 修 東亜建設工業(株)土木本部設計部
*** 正会員 東亜建設工業(株)土木本部設計部
**** 深田サルバー建設(株)
***** 工博 長崎総合科学大学教授 船舶工学科

計測することができる。

3. リフトバージの動揺特性

(1) 浮上時

浮上時におけるリフトバージの規則波中実験結果を、縦波時について図-2に、横波時について図-3に示す。ここで、横軸は波周期 T であり、縦軸は動揺全振幅を波高 H あるいは最大波傾斜 kH (k : 波数) で無次元化して表示した。また、ここには二次元流体力を二次元特異点分布法によって求めるストリップ法と三次元特異点分布法の二通りの計算結果も示した。計算では、Rollのみ自由動揺実験より得られた粘性減衰力を考慮した。これより、縦波時にはストリップ法、三次元特異点分布法とも実験結果と極めてよく一致しており、横波時には両者による計算結果と実験結果は概ね一致している。このことは、このような幅広浅喫水船(船長・幅比=3.8, 幅・喫水比=5.6)に対しても、通常船舶の動揺計算で多用されるストリップ法によって推定可能であることを示している。

また、ここには、現地波高で1mと2mの実験結果を示しているが、RollおよびHeaveの同調点付近を除き、どの動揺モードも無次元値に変動はなく、非線形性は認められない。

(2) 半潜水時

半潜水時におけるリフトバージの規則波中実験結果を、縦波時について図-4に、横波時について図-5に示

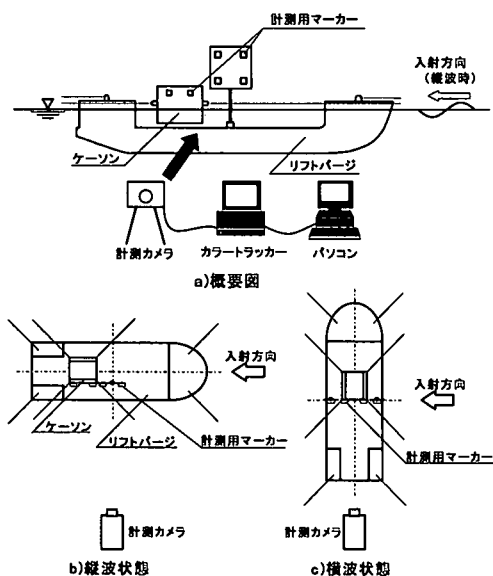


図-1 実験概要

動揺計測対象物にターゲットとしてマーカーを設置し、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、横波時は、バージおよびケーソンのRoll(横揺), Sway(左右揺), Heave(上下揺)の3成分を、縦波時には、Pitch(縦揺), Surge(前後揺), Heaveの3成分を

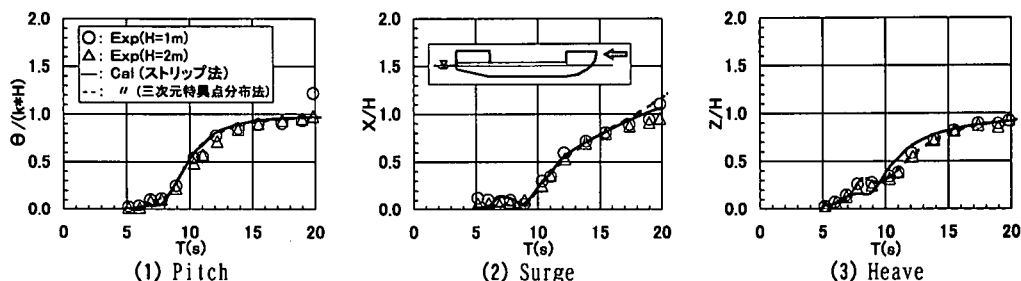


図-2 リフトバージの動揺特性(縦波, 浮上時)

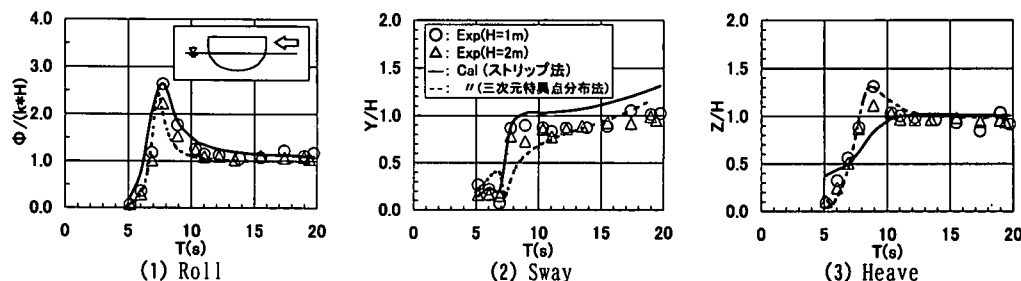


図-3 リフトバージの動揺特性(横波, 浮上時)

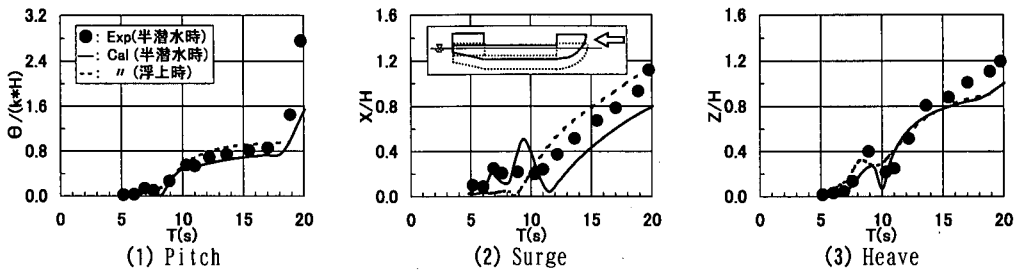


図-4 リフトバージの動揺特性 (縦波, 半潜水時)

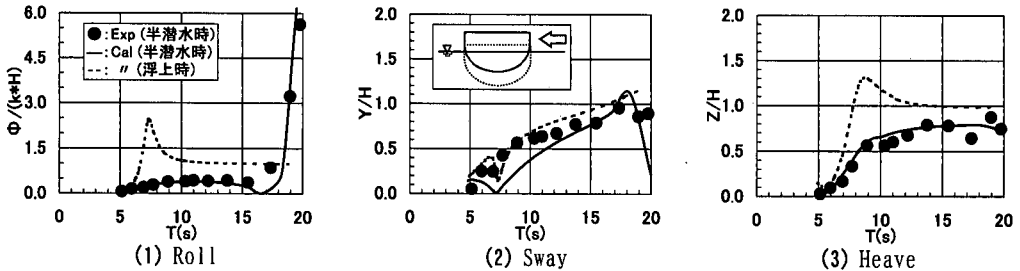


図-5 リフトバージの動揺特性 (横波, 半潜水時)

す。ここで、横軸および縦軸は図-2および図-3と同様である。また、三次元特異点分布法による浮上状態および半潜水状態の計算結果も示した。計算では、Rollのみ粘性減衰力を考慮している。これより、縦波時では、Surgeで浮上状態と半潜水状態の動揺特性に若干の違いがみられるが、その他の動揺は喫水状態によってほとんど変わらない結果となっていることがわかる。一方、横波時では、Swayについては浮上時と半潜水時で顕著な差異はないが、RollおよびHeaveでは浮上状態に比較して半潜水状態の動揺が非常に小さくなっている。Rollの動揺減少は、船体の主要部分が没水しているために付加質量が増大し、さらに水線面積の減少に伴いメタセンタ高さGMが減少して、固有周期が約3倍と長くなっていることに起因する。また、Heaveについても付加質量の増大、復元力係数の減少に起因していると考えられる。

なお、半潜水時においても、縦波時、横波時とも計算結果と実験結果の対応は良好であり、粘性減衰力を実験的に求めれば、このような半潜水状態の動揺特性を三次元特異点分布法によって推定可能であることがわかる。

4. リフトバージ上のケーソンの動揺特性

半潜水状態のバージ上における現地波高1mの場合のケーソンの動揺特性を図-6および図-7に示す。ここでは、各モードの動揺特性とともに、実験結果から得たケーソン位置におけるバージのHeaveとケーソンのHeaveとの動揺の位相差も示した。横軸は何れも波周期であり、縦軸は無次元動揺振幅あるいは位相差である。

なお、これら全ての状態において、ケーソンとバージデッキ面の接触はなく、またバージの動揺はケーソンの有無によって変化はみられなかった。

動揺特性の図には、領域分割法における無限級数項を省略した伊藤・千葉(1972)の方法による計算結果も示した。バージ上の計算では、バージのデッキ面を海底面(現地換算で $h=8\text{m}$)としている。また、計算にあたり、Rollについてはケーソンの自由動揺実験から求めた固有周期および粘性減衰力係数を考慮した。Heaveについても、自由動揺実験から得た固有周期によって流体力を補正した。これは二次元の計算であるが、堀沢ら(1996)はマウンド上に浮遊した三次元のケーソンに真横から波が入射する場合の水理実験により、この計算法によっても十分な精度で推定できることを示している。図-6および7から、ケーソン単体の場合については、Surge、Heaveとも計算結果と実験結果の対応は良好であり、この計算法の妥当性が確認された。

図-6は、ケーソンに対して縦波時の場合であるが、図中に示す①から③のようにバージに対する波入射方向とバージに対するケーソン位置を変えた三つの状態およびバージがないケーソン単体の動揺の実験結果を示している。

ケーソンがバージ上にある状態では、Surge、Heaveとも、バージ上のケーソン位置により動揺特性が異なっている。ただし、Surgeについては、状態①および③の結果はケーソン単体の場合とほぼ等しい。状態②のみ異なった傾向を示しているが、これは、ケーソン前面にバージ

の大きな船首部分があり、それによる波の回折が影響していると考えられる。

Heave については状態②および③が同程度の動揺となっているが、状態①はそれらとは異なった傾向となっている。ただし、周期が長い領域ではケーソンとバージはほぼ同位相で動揺し、状態①から③のどの状態においてもケーソン単体の動揺特性に漸近する傾向を示している。なお、どの状態も、10 秒以上の波周期ではバージデッキ面を海底面とした計算結果とは異なった傾向となっている。

図-7 はケーソンに対して横波時の場合であるが、図中に示す①および②のようにバージに対する波入射方向を変えた二つの状態およびバージがないケーソン単体の動揺の実験結果を示している。ケーソンがバージ上にある状態では、Sway, Heave とも、状態①と②で差異はない。

Sway についてはケーソン単体の場合とほぼ等しく、ケーソン単体の計算結果とも概ね一致している。

Heave については周期 10 秒付近までは、バージデッキ面を海底面とした計算結果と概ね一致しているが、それより長い周期では計算結果が過大となっている。これは、図-5 に示すように波周期が 10 秒付近からバージの Heave が大きくなるため、それがケーソンの動揺に影響を及ぼすためと考えられる。また、図-7(3) に示すように、状態①、②とも周期が長い領域ではケーソンとバージはほぼ同位相で動揺するが、そのような状態では、ケー

ソン単体の動揺特性に漸近する傾向を示す。

以上から、バージに対する入射波向やケーソン位置の違いによりケーソンの動揺は異なり、バージデッキ面を海底面とした計算は、波周期の短い範囲では実験結果と概ね良好な対応を示すが、波周期が長くなりバージの動揺が大きくなると、実験結果を説明できないことがわかった。ただし、Surge あるいは Sway では、バージ船首構造等の回折波の影響がない場合、Heave ではバージとケーソンが同位相で動揺するような状態においては、バージが存在しない状態での計算によって推定できる。

バージ上でのケーソンの動揺を精度よく評価するためには、三次元的な影響や両者の連成流体力を考慮する必要があるといえる。

5. 引出途中のケーソンの動揺特性

半潜水状態のバージ上からケーソンを引き出す途中の状態におけるケーソンの動揺特性を図-8 に示す。これは、現地換算波高 1 m, バージに対し横波、ケーソンに対して縦波となる状態での実験結果である。ここでは、比較のため、バージがない状態（ケーソン単体）とバージデッキ上での実験結果も示した。なお、動揺特性とともに、実験結果から得たケーソン位置におけるバージの Heave とケーソンの Heave との動揺の位相差も示した。

これより、引き出し途中の Surge, Heave は、ケーソン単体、バージ上の各状態とほとんど差異はなく、しか

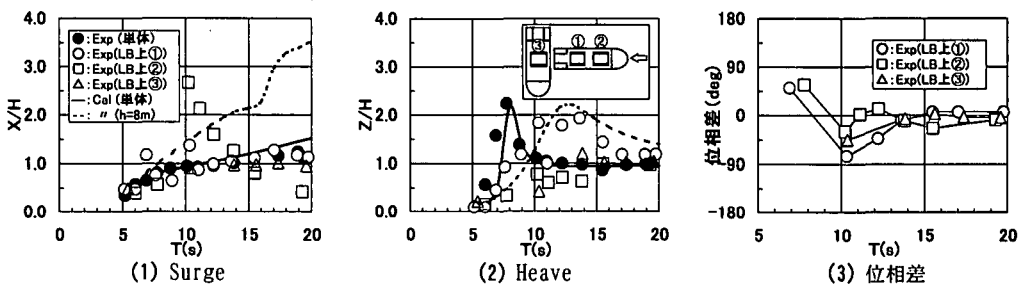


図-6 ケーソンの動揺特性および位相差（縦波時）

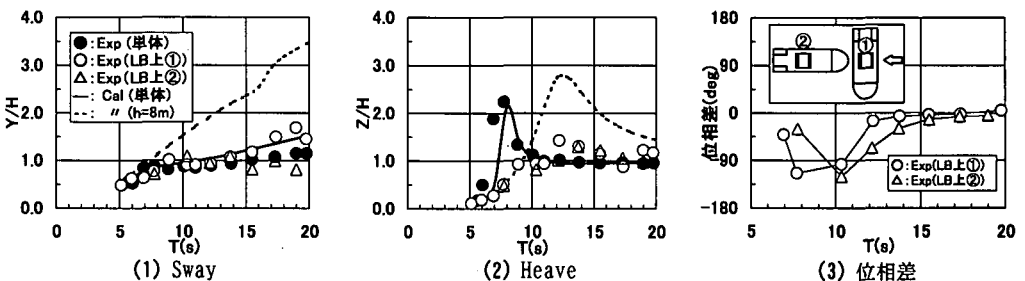


図-7 ケーソンの動揺特性および位相差（横波時）

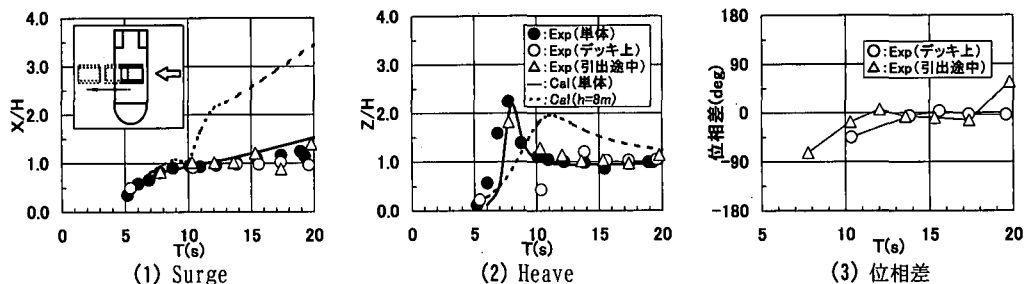


図-8 引出途中のケーソン動揺特性および位相差 (縦波時)

もバージがない状態での計算結果に概ね一致していることがわかる。また、位相特性も引き出し途中とデッキ上の場合では、概ね同じような傾向となっている。

6. おわりに

リフトバージからケーソンを進水させる状態における両者の動揺特性を水理模型実験によって明らかにするとともに、ケーソン単体およびバージデッキ面を海底面とした動揺計算結果との比較から、バージデッキ面がケーソン動揺に及ぼす影響について考察した。本研究で得られた主要な知見を以下に示す。

① リフトバージの浮上時および半潜水時における動揺特性は、Roll において粘性減衰力を考慮すれば、三次元特異点分布法によって精度よく計算できる。また、浮上時については、ストリップ法によっても推定できる。

② 半潜水状態のバージ上のケーソンの動揺は、入射波向やケーソン位置の違いにより異なる。また、バージデッキ面を海底面とした計算は、波周期が長くなりバージの動揺が大きくなると、実験結果を説明できない。よって、バージ上でのケーソンの動揺を精度よく評価するためには、三次元的な影響や両者の連成流体力を考慮する必要がある。

③ Surge あるいは Sway では、バージ船首構造等の回折波の影響がない場合、Heave ではバージとケーソン

が同位相で動揺するような状態においては、バージが存在しない状態での計算によって推定できる。

④ 半潜水状態のバージからケーソンを引き出す途中の動揺は、バージがない場合の計算によって推定できる。

謝辞：本研究の水理実験は、深田サルベージ建設㈱の高島栄一氏、および研究当時、長崎総合科学大学大学院工学研究科の廣井康伸氏、同船舶工学科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

- 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 (1999): 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, 第46巻, pp. 841-845.
- 伊藤喜行・千葉 茂 (1972): 浮防波堤の水理に関する近似理論と応用, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 第2号, pp. 137-166.
- 慎 燦益・大竹弘一・川上治男 (1986): 幅広浅吃水船の波浪中の運動について, 西部造船会会報, 第72号, pp. 177-186.
- 堀沢真人・佐藤典之・大橋裕寿・赤村重紀・坂間 茂・吉倉敬治 (1996): ケーソン沈設過程の波浪中挙動, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1001-1005.
- 堀沢真人・佐藤典之・坂間 茂・矢口真光・滑川正倫 (1997): ケーソン据付時の動揺及び索張力に関する現地調査, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 429-434.