

施工計画における係留設計への浮体動揺解析の適用

大成建設(株)	正会員	○小俣	哲平
大成建設(株)	正会員	織田	幸伸
大成建設(浮)	正会員	本田	隆英
大成建設(株)	正会員	橋本	貴之

1. 目的

海洋構造物の施工計画においては、作業船や浮体構造物の係留設計が必要となる。特に、重量物の揚重作業や高精度の位置決めが必要な作業では、定常力による係留設計だけではなく動揺解析による最適係留計画が求められる。浮体構造物の動揺解析は、これまで船舶分野や外洋での石油掘削、パイプライン等の分野で活用されてきた。近年、これらの解析ツールの汎用性が高まっており、沿岸域の海洋土木工事での活用も進みつつある。ここでは、係留構造物の動揺解析ツールである OrcaFlex, OrcaWave を取り上げ、これらの解析ツールの活用方法について検討した 2 つの事例について報告する。

2. 重量物の揚重作業における作業船と吊荷の動揺

(1) 解析背景

作業船による吊荷作業を対象に、その解析手法について検討した。洋上での作業船を使用した施工計画においては、作業限界波高だけでなく、作業船及び吊り荷の動揺量を対象として評価することで、より正確な稼働率の評価が可能と考えられる。この際、吊荷が重量物の場合、吊荷の動揺が作業船の動揺に影響する。大坪ら¹⁾は、作業船と細長物体の吊り荷を対象とした連成運動評価を、実験及び数値解析により検討し、吊り荷が半没することによる作業船の固有周期の変化等を報告している。本研究では、吊荷として大口径杭を対象に、船体と吊荷の相互作用を考慮した連成解析を実施し、その解析精度を水理実験により検証した。

(2) 解析概要

図-1 に作業船と杭（着床式洋上風力基礎のモノパイル杭を想定）の解析モデルを示す。同図には船体の動揺方向の定義も併記した。作業船は実際の起伏式起重機船を参考にモデル化し、4点吊りとした。なお、別途実施した模型実験²⁾の結果との比較のため、模型スケール（実機の 1/75 縮尺）での解析とした。8本の係留索によるカテナリー係留とし、想定される施工時の初期張力（模型スケール）を各係留索に設定した。水深は 40 cm とし、波として波高 2.7 cm の規則波を船尾方向から作用させた。杭模型は、直径 127 mm、杭長 1,175 mm、重量 4.67 kg であり、吊り状態として気中状態と半没水状態の 2 ケースを解析した。また、船体及び杭の動揺には、重量、重心、慣性モーメント、及び各部材の物性の諸元が影響するため、実機をなるべく忠実にモデル化した。さらに、吊り荷の動揺は、船体の動揺がブームと吊り治具を通じて吊り荷に伝わることで誘発されるため、図-2 に示す通り、治具の可動方向なども含め、吊り索、フック、吊り枠、吊り治具と詳細に分割し、モデル化した。

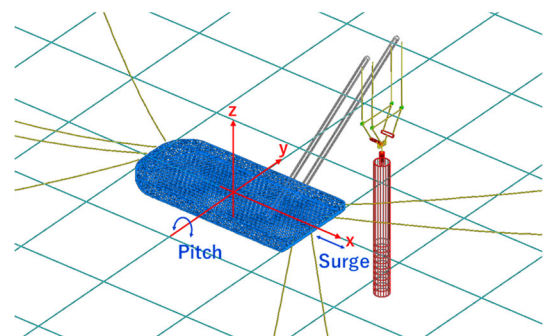


図-1 作業船解析モデル

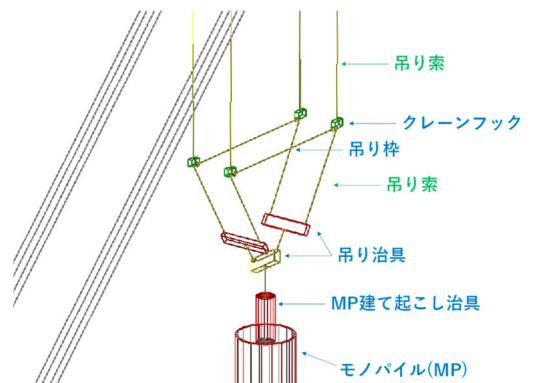


図-2 吊り治具詳細

キーワード 数値解析, 大径杭, 吊り荷動揺, 護岸係留, 浮体構造物

連絡先 〒245-0051 大成建設株式会社 技術センター TEL 080-1305-7437

(3) 解析結果

a) 動揺の特性

動揺解析の結果について、杭が気中にある状態と杭が半没水の状態の解析ケースにおいて、杭上端部が最も変位した瞬間の状態を図-3 に示す。同図より、杭上端部の動揺量は杭が気中にある状態よりも半没水状態にある方が大きいことが確認できる。複数の波周期に対して解析を行ったが、この動揺特性は作用波の周期に関わらず同様であった。また、杭の動揺の様子を観察すると、杭が気中及び半没水のどちらの状態においても、杭の上端と下端が逆位相で変動する回転運動の動揺モードであり、吊り治具付近でくの字の折れ曲がるような運動であった。一般に、吊荷を水中に没水させることで動揺は小さくなると考えられるが、ここでは半没水状態の方が動揺が大きくなった。図-4 に示すように、半没水状態になると回転中心が下方（水面付近）に移動し、水の抵抗により杭下部の運動が制限されるため、その分杭の上部の動揺が大きくなったと考えられる。加えて、半没水状態では吊り索長が長く、杭上端の変位可能範囲が大きくなることも杭の動揺量が大きくなった要因と考えられる。実施工において、杭の降下に伴い吊り索が長くなる際は、水の抵抗により杭全体の動揺は小さくなると予想されるが、実際は杭上部の動揺量が大きくなることに注意が必要である。ただし、杭の没水長が長くなると水面下の杭に作用する水の抵抗力の作用範囲が徐々に大きくなるため、ある程度の没水長からは杭上部の動揺量は減少していく傾向になると推察される。

b) 実験結果の再現解析

船体の動揺と杭上端部の変動について、解析結果と別途実施した水理模型実験の実験結果との比較を図-5 に示す。周期 1.5 s の規則波を作用させたケースの結果であり、杭が気中状態と半没水状態の時系列結果を示している。杭上端部の変動量の解析結果はやや過大評価であるものの、気中状態と半没水状態の両ケースとも解析は概ね良好に実験結果を再現している。また、船体の Pitch 動揺は気中状態よりも半没水状態の方が大きい。これは、半没水状態の方が杭の動揺量が大きいためであり、船体の動揺が吊り荷の影響を受けていることが分かる。

3. 護岸に係留された浮体構造物の動揺

(1) 解析背景

港内に護岸係留された浮体の動揺解析を実施した。護岸係留された浮体の動揺や作用波力の検討では、護岸での反射を考慮する必要がある。これを数値解析する方法として護岸を直接モデル化する方法が考えられるが、その場合十分長い護岸延長を考慮する必要があり、解析負荷が大きくなる。これに対し、係留浮体を対象とした解析では、護岸モデルを必要としない鏡像モデルを用いるのが一般的である³⁾。これは、護岸に対し、解析対象浮体と対称な形状、運動をする仮想のモデルを同時に解析することで、護岸による波の反射を考慮する解析手法である。本検討では、これら2つの解析手法を適用し、これらの解析特性について検討した。また水理実験により解析精度について検証した。

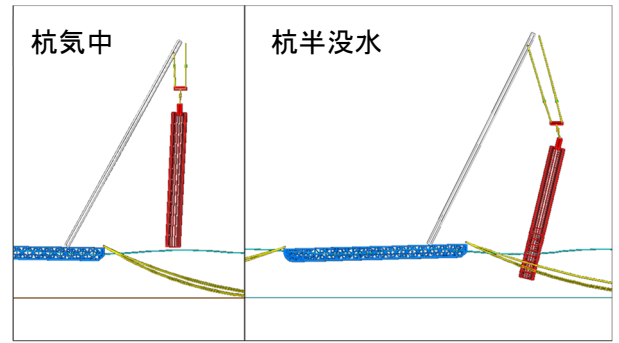


図-3 没水・半没水位状態の杭の動揺

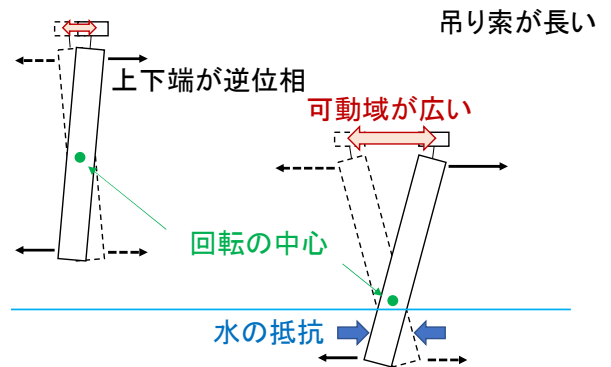


図-4 杭の動揺特性の説明図

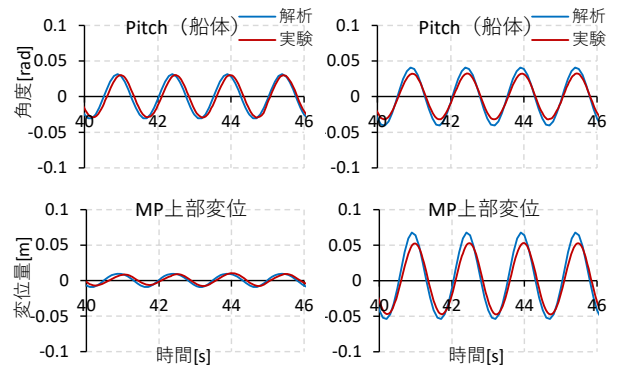


図-5 船体及び杭上端部動揺の時系列結果

(左：気中状態，右：半没水状態)

(2) 解析概要

解析に使用した鏡像モデル及び護岸を直接モデル化したモデル（以下護岸モデルと称す）を図-6に示す。別途実施の水理模型実験⁴⁾との比較検証のため、模型スケール（実機の1/50程度を想定）での解析とした。水深は0.3mとし、浮体構造物を護岸前面（離隔0.1mまたは0.2m）に配置し、規則波を作用させた。浮体構造物は、バージ型浮体（幅0.9m、長さ0.9m、高さ0.2m）と、4本の円筒（カラム）から構成される浮体式洋上風力基礎のセミサブ型浮体（センターカラム径0.3m、サイドカラム径0.35m、高さ0.71m）の2種類を解析対象とした。喫水は、バージ型浮体は0.1m、セミサブ型浮体は0.2mとした。護岸は作用波が越流しない十分な高さとした。

鏡像による解析の条件として、図-7に示すように、入射波に対し護岸での完全反射を仮定した波を護岸側からも同時に入射させた。これにより、護岸での波の反射を再現でき、また無限延長の護岸を仮定したことになる。解析では、護岸モデルと鏡像モデルの比較の他、護岸モデルにおける護岸延長を変更したケースも実施した。

(3) 解析結果

a) 護岸延長の影響

護岸モデルにおける護岸の延長が浮体作用波力へ及ぼす影響を確認するため、バージ型浮体を対象に、護岸モデルによる解析と鏡像モデルによる解析を比較する数値実験を、OrcaWaveを用いて実施した。図-8に、浮体単体（護岸なし）、護岸あり（護岸延長9m、18m）、鏡像モデルの4ケースについて、浮体に働くSurge（浮体岸沖方向）、Heave（浮体鉛直方向）方向の波力の解析結果を示す。ここでの解析は、浮体が固定された状態の解析である。解析結果は、波周期に対する、浮体の単位波高あたりの波力（LoadRAO）で整理した。同図より、浮体単体と比較すると、鏡像モデル、護岸モデルともに、Surge方向の周期1s~2s、Heave方向の2秒以上で、波力が大きくなっている。このことから、護岸の存在により波力が大きくなる場合があることが示唆され、実施工では注意が必要となる。また、護岸9m、18mのケースでは、周期に対する応答に規則的な変動が見られ、特に護岸延長が長いケースほど短い間隔の変動となっている。一方、無限長の護岸に相当する鏡像モデルでは、上記のような変動は発生していない。

ここで、Heave方向の結果に示す山谷の4点（図中○△）の波周期について、護岸前面での単位波高あたりの圧力振幅の空間分布を図-9に示す。図中には、対象としたバージ型浮体（幅0.9m）の範囲も示した。圧力振幅の分布は、護岸中央（0m位置）に対し対称に分布しており、延長方向に変動している。圧力は水位に相当するため、図-8中のHeave方向の波力の変動の山となる時（図中○）は、護岸中央の水位振幅が大きく、谷となる時（図中△）は水位振幅が小さくなっていることが分かる。そして、護岸延長9mの分布は、護岸端部（±0.45m位置）において、圧力（水位）振幅が小さくなっていることから、波高の空間分布の節となっていると推察される。図-8で護岸9mのケースに示した変動の谷となる周期である1.55s、2.7sの波の波

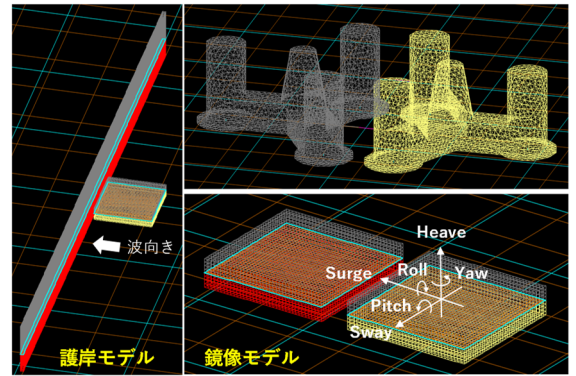


図-6 護岸前面浮体の解析モデル

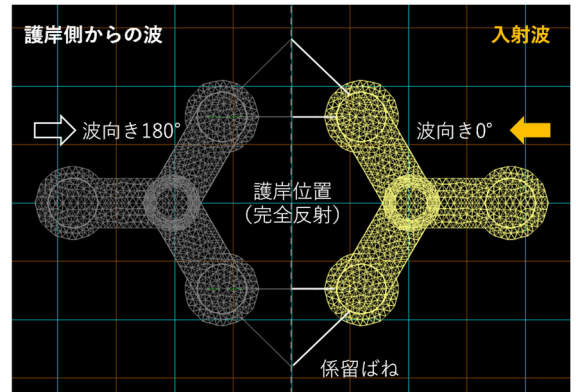


図-7 鏡像モデルの解析方法

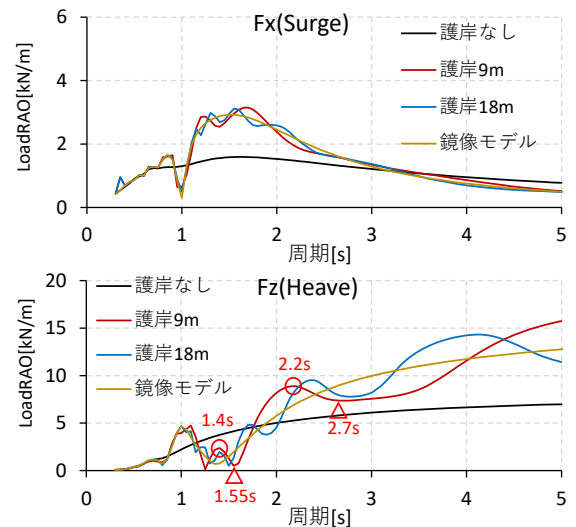


図-8 護岸影響の数値実験（バージ型浮体）

長は、それぞれ 2.43 m, 4.5 m であり、その概ね 4 倍, 2 倍が護岸の長さとなっている。一方、変動の山となる周期である 1.4 s, 2.2 s の波の波長は、それぞれ 2.15 m, 3.61 m であり、概ね 5 倍, 3 倍となっている。これらのことから、**図-8** 中の護岸モデルの Heave の結果に見られた波力の変動は、護岸延長に応じたモードの定在波が発達したことが要因と考えられる。ただし、この定在波の浮体への影響は、浮体と護岸との離岸距離に依存し、離岸距離が大きいほど影響は小さいと考えられる。護岸に係留された浮体構造物に働く波力検討において、有限長の護岸モデルを使用し、規則波に代表させた解析を実施する場合には、定在波影響が発生することに注意する必要がある。

b) 実験結果の再現解析

図-10 に、波周期 1.7 s のケースについて、セミサブ型浮体の実験と解析の時系列結果を示す。セミサブ型浮体は、防舷材を介し護岸に押し合てるように係留索によって緊張係留された状態を検討ケースとした。変位は護岸側をプラス、沖側をマイナスと定義しているが、同図より、解析は実験を概ね再現できていることが分かる。Surge 動揺については、岸向きよりも沖向きの変動の方が大きく、沖向きの変動波形はなだらかなのに対し、岸向きの変動が尖鋭化している。また、解析よりも実験の方が、より先鋭化していることが分かる。実験では、防舷材を緩衝材付きの鋼棒によって模擬したが、解析では、防舷材を単純ばねによりモデル化している。このため、護岸方向の防舷材衝突時の変動特性の再現性が十分でなく、再現精度が低下したと考えられる。今後は、防舷材部のダンパー効果のモデル化の見直し等を行い、解析精度の向上を図る予定である。

4. まとめ

係留構造物の動揺解析ツールを使用し、①作業船と吊荷の動揺、②護岸係留された浮体の動揺の解析を実施した。両者とも、別途実施した水理模型実験の結果を概ね良好に再現できることが確認された。

①の解析結果から、作業船動揺時、吊り荷が杭のような長尺物の場合、上下端逆位相の回転運動をすることが示された。また、吊り杭上部の運動は吊り荷の状態によって変化し、杭が気中にある状態より半没水にある状態の方が動揺が大きくなる場合があることが確認された。②の解析結果より、鏡像モデルによる解析は、護岸を直接モデル化する手法よりも解析負荷を低減できるとともに、解析精度の面でも優位性があることが確認された。今後は、両解析手法の精度を向上させ、実務への展開を図っていく。

参考文献

- 1) 大坪和久：洋上・海底施設作業船と吊荷の波浪中連成運動評価，海上技術安全研究所報告，21 巻，別冊（令和 3 年度），第 21 回研究発表会，講演集，2021。
- 2) 小俣哲平，織田幸伸，本田隆英，橋本貴之，福原哲：大径杭の吊り荷動揺に関する水理実験と再現解析，大成建設技術センター報，第 56 号，2023。
- 3) 増田光一，大澤弘敬，片山昌一郎：岸壁に直接係留された浮体の動揺特性と係留力及び荷役稼働に関する研究，海岸工学論文集，43 巻，pp. 986-990，1996。
- 4) 小俣哲平，織田幸伸，本田隆英，橋本貴之：護岸係留された浮体構造物の解析手法に関する一考察，土木学会論文集，Vol.80，No.18，（印刷中），2024。

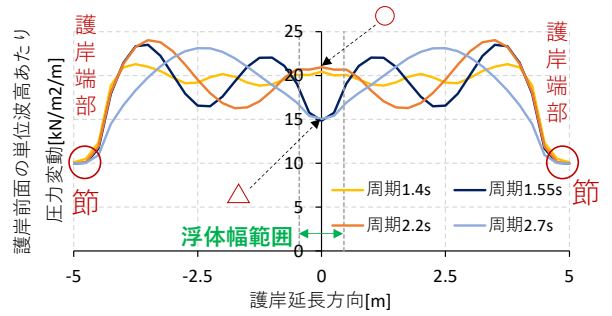


図-9 護岸前面の圧力変動分布(護岸 9m)

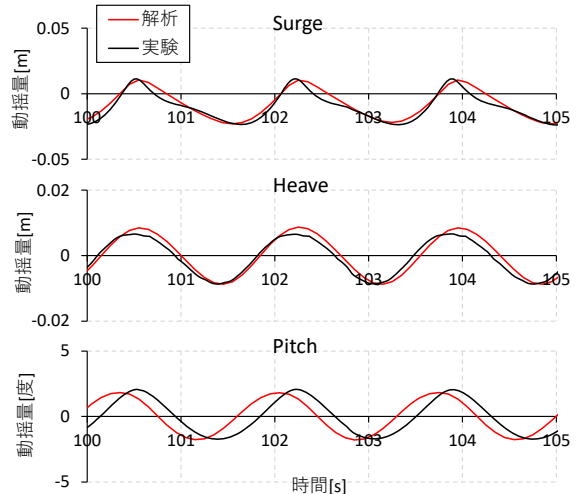


図-10 セミサブ型浮体の実験と解析の時系列比較 (波周期 1.7 s)