

新ロンチングバージ “POSH MOGAMI”の計画と設計

～14,000トン級のジャケット施工に向けて～

Planning and Design of new Launching Barge “POSH MOGAMI”
～For installation of 14,000MT class jacket substructure of offshore platform～

鳥井 正志* Tadashi TORII
海外海洋事業部
海洋設計技術部
設備企画技術室 室長
博士(工学)

鈴木三樹雄 Mikio SUZUKI
海洋鋼構造部
海洋鋼構造設計第二室マネジャー

堀越 健次 Kenji HORIKOSHI
海外海洋事業部
海洋設計技術部 部長

抄 録

新日鉄住金エンジニアリング(株)は、海洋石油・ガス施設建設事業において、近年の東南アジアマーケットにおける海洋プラットフォーム設置水深の増深や搭載プラントの大重量化に伴うジャケットの大型化に対応し、最大14,000トン級ジャケットの運搬・進水工事の専用機能を備えたジャケットのロンチングバージを建造し、2012年12月に供用を開始した。本報では、新バージの計画と設計について報告する。

Abstract

The development of offshore oil and gas is now moving to the deeper water area. The required size and weight of the offshore structure are significantly increased accordingly. In order to accommodate this market requirement, Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., Ltd., as a reputable offshore construction company, just designed and constructed a new launching barge “POSH MOGAMI” of which capacity is up to 14,000 ton of steel jacket weight. This paper presents the technical aspects which were duly studied during the planning and design phase for the new launching barge.

1 緒言

海底石油・ガスの生産に用いられる海洋施設は、海底下の石油・ガス田から原油・ガスを掘削・生産・精製する施設等の海洋プラットフォーム、およびそれらを連結するパイプラインで構成される。新日鉄住金エンジニアリング(株)では、1960年代(当時、新日本製鐵(株)から海底石油・ガス生産施設の製作・建設事業に取り組み、国内では新潟県阿賀沖ガス田等、海外ではタイ・シャム湾鉦区、インド・ボンベイ(現ムンバイ)沖鉦区等を中心に、実績を積み

重ねて来た。これらの海洋プラットフォームは従来水深100m、下部の支持構造(ジャケット)重量数千トン程度が大多数であったが、近年のエネルギー需要の逼迫により開発海域が拡大し、水深と構造物重量が増大している。当社では、この動向を踏まえ、最大14,000トン級ジャケットの運搬・進水工事の専用機能を備えたジャケットのロンチングバージ“POSH MOGAMI”を建造し、2013年6月にマレーシアにおける最初の工事を成功させ、その機能と能力を検証した。本報では、この新バージの計画と設計について報告する。

* 〒141-8604 東京都品川区大崎1-5-1 大崎センタービル Tel : 03-6665-3127



図1-1 ジャケットロンチング状況(写真)
Fig. 1-1 Launching of Jacket (photo)

2 ロンチングバージの概要

2.1 海洋プラットフォームの建設方法

海洋プラットフォーム(図2-1)は、海面上に設置される各種生産プラント(上載施設)と、それを支持する下部構造物(鋼管トラス構造のジャケットと鋼管杭)で構成される。ジャケットは設置場所の水深と上載施設の寸法・重量により設計され、通常千トン程度から数万トンにもなる。大型・大重量化すると、施工技術や施工設備も高難度・大容量化し建設費も増大するため、海洋プラットフォームは水深200m程度までの海域に多く採用されている。

海洋プラットフォームの建設方法は、図2-2に示すように、まず下部工のジャケットおよび上載施設を陸上ヤードで製作し、バージ(台船)に搭載して設置海域まで海上輸送する。現地工事は、ジャケットの据付では海上クレーンで直接吊り上げて設置する工法または、構造物の重量がクレーン吊り能力を

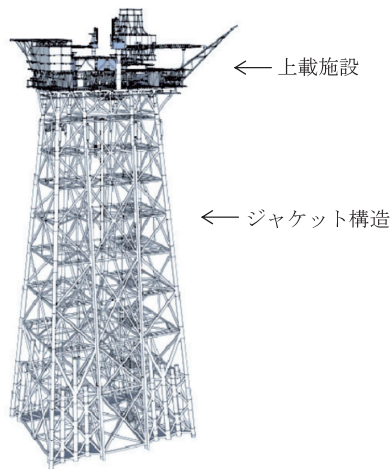


図2-1 海洋プラットフォーム
Fig. 2-1 Offshore platform

を超える場合、輸送バージから海中へ進水させる“ロンチング工法”を採用する。その後、進水させたジャケットをクレーン等で立て起こして着底させ、レグを通して鋼管杭で海底地盤に固定する。海洋プラットフォームは、固定されたジャケットの上に、上載施設を搭載・固定して完成する。

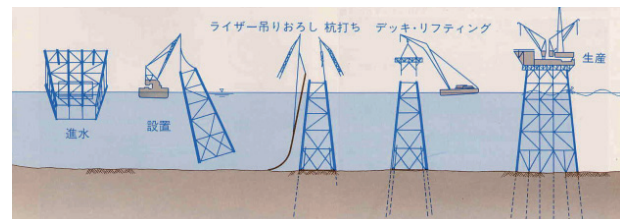
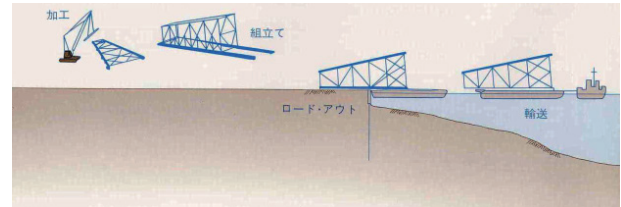


図2-2 海洋プラットフォームの建設フロー
Fig. 2-2 Construction flow of offshore platform

2.2 対象マーケットと能力設定

当社の主要マーケットである東南アジア海域では、旧来、水深100m程度までの浅海域鉦区の開発が盛んに行われて来た。当社では起重機兼海底配管敷設船「くろしお」、および「第二くろしお」を保有すると共に、3,000トン級ジャケットの輸送とロンチングに使用する“ロンチングバージ”として「あがの」を保有し、多くの海洋プラットフォーム建設を手掛けて来た。しかし、鉦区が徐々に大水深域へ展開され、また搭載設備施設が増加するのに伴い、ジャケットの寸法、重量も増大し、保有設備では対応出来ない物件が増加してきたため、将来のマーケットに対応するロンチングバージを建造することにした。また、その能力設定においては、今後東南アジア海域で計画されている海洋プラットフォームの寸法、重量(水深、海象条件、用途に相関)を考慮し、海洋プラットフォーム設置水深約160m、重量14,000トンを最大級ジャケットとして設定した。これは当該マーケットで計画されているジャケットのほぼ全てをカバーするものである(図2-3)。

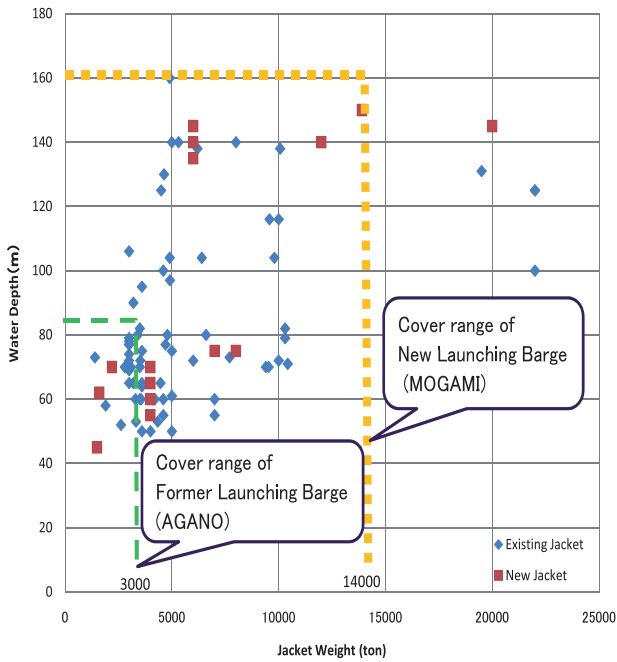
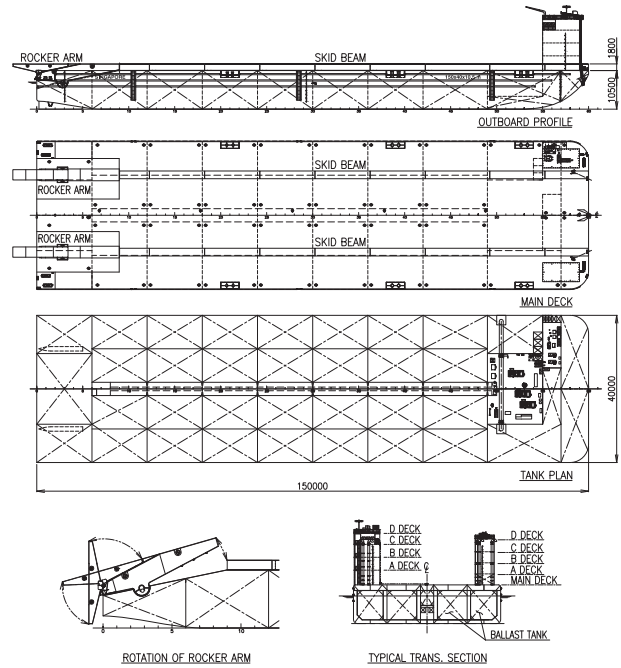


図2-3 東南アジア鉞区のジャケット重量・水深分布
Fig. 2-3 Distribution map of jacket weight and water depth in South East Asia field

2.3 ロンチングバージの要求機能

ロンチングバージにはその目的から次の機能設備(機装)を具備することが求められる。①スキッドビーム(船体の甲板にジャケット等貨物を滑動させるためのレール)、②ロッカーアーム(海中へ進水させる際の滑り台となるヒンジ機能付きの梁)、③スキッピングシステム(貨物を移動させるための押し/引き装置)。建造したロンチングバージの一般図と諸元を図2-4に示す。



バージ諸元

Flag	Singapore
Class Notation	ABS +A1, Barge
Class Description	Deck Cargo and Launch Barge
Service Limit	Unrestricted Ocean Service
Year of Built	December, 2012
Dimension	150m (Length) × 40m (Breadth) × 10.5m (Depth)
Max. Draft	7.5m
Displacement	42,000 mt
Deadweight	30,600 mt
Jacket Launching Capacity	Max. 14,000 mt

図2-4 ロンチングバージ一般図と諸元
Fig. 2-4 General drawing and dimension of launching barge

3 船体とロンチング設備構造の設計

3.1 ロンチングバージの設計フロー

船体およびロンチング設備構造の設計フローを図3-1に示す。次節以降で各項目の詳細について述べる。

3.2 船体の設計

ロンチングバージの最大進水能力は船体寸法で決定される。船体寸法を設計する上で重要な性能要件は、①ジャケットの安全な進水が可能なこと、②船体の縦強度が確保されていること、③船体の安定性が確保されていることの3点である。いずれの要件

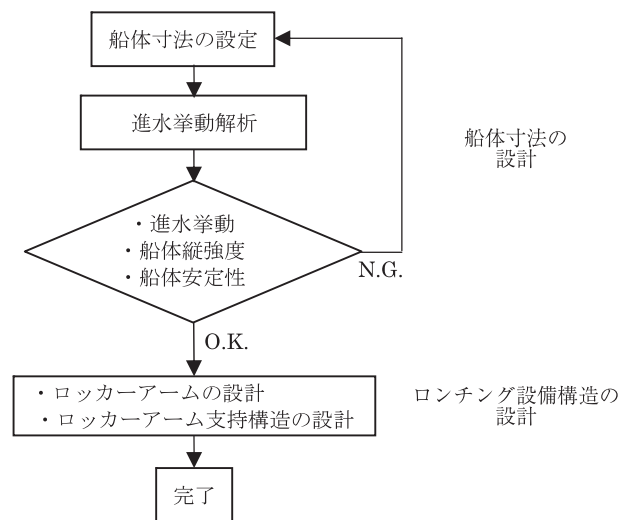


図3-1 ロンチングバージの設計フロー
Fig. 3-1 Design flow chart of launching barge

も、シミュレーション解析や実験等で進水挙動を正確に把握することが必要不可欠である。

(1) 進水挙動解析

1) 進水作業の流れ

挙動解析について述べる前に、進水作業の流れと、バージおよびジャケットの挙動イメージについて概説する。進水作業の流れを図3-2に示す。進水作業がスタートすると、まず、バージ内部にバラスト注水してバージを傾斜させる。次に、油圧ジャッキでジャケットを押し出し、ジャケットとバージ間の静止摩擦が切られるとジャケットが滑り出し、徐々に速度を上げながら船尾側に移動する(a)。それに伴って船体がさらに傾斜して船首が浮き上がる(b)。そして、船尾のロッカーアームが回転してジャケットが海中に進水していく(c)。

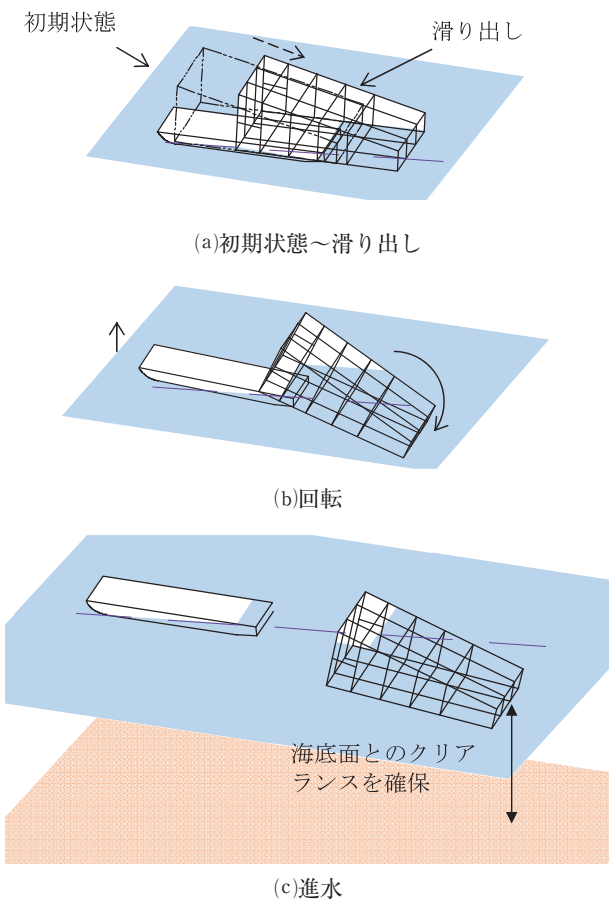


図3-2 進水作業フロー
Fig. 3-2 Launching work flow

このように、ジャケットの進水はバージとジャケットが浮力や摩擦力の影響を相互に受けながら時々刻々と姿勢を変える複雑な動的現象であり、安

全な進水を行うためにはこの一連の挙動を正確に解析し、適切な設備設定と施工計画を立案する必要がある。また、海外における大型海洋プラットフォーム建設プロジェクトでは、顧客の要求事項である第三者検定機関の承認を得るためにジャケットとバージの連成を考慮した挙動解析およびモデル実験を実施することが標準となっている。

2) 進水挙動の定式化

当社は進水挙動解析プログラムを独自に開発し、これまで海外を中心に数多くのプロジェクトで利用してきた。挙動定式化の基礎となるバージおよびジャケットの剛体運動方程式はそれぞれ以下の式で表される。

$$m_B \ddot{X}_{wB} = F_B + R_J \tag{1}$$

$$[I_B] \dot{\omega}_B + \omega_B ([I_B] \omega_B) = M_B + RM_J \tag{2}$$

$$m_J \ddot{X}_{wJ} = F_J + R_B \tag{3}$$

$$[I_J] \dot{\omega}_J + \omega_J ([I_J] \omega_J) = M_J + RM_B \tag{4}$$

ここに、

- m : 質量
- X_w : 重心位置ベクトル
- $[I]$: 慣性テンソル
- ω : 角速度
- F : 流体力等
- R : 拘束反力
- M : 流体力によるモーメント等
- RM : 拘束反力モーメント

なお、添字の B および J は、それぞれバージおよびジャケットを示す。

(1)~(4)式において、外力項である流体力や拘束反力はバージおよびジャケットの位置と姿勢によって決定される非線形の外力成分となるため、Newmark β 法などによる逐次非線形解析が必要となる。

なお、当社開発のプログラムは大型ジャケットを対象としたモデル実験(図3-3)により、解析手法、シミュレーション精度、船体動揺による付加質量、ジャケットに作用する抗力係数などが検証されている。

3) 挙動解析結果

挙動解析プログラムを用いてジャケットとバージの挙動と、次項に示す縦強度および安定性に対する感度分析を行い、安全な進水が可能となる船体寸法を150m 長×40m 幅×10.5m 深に決定した。挙動解

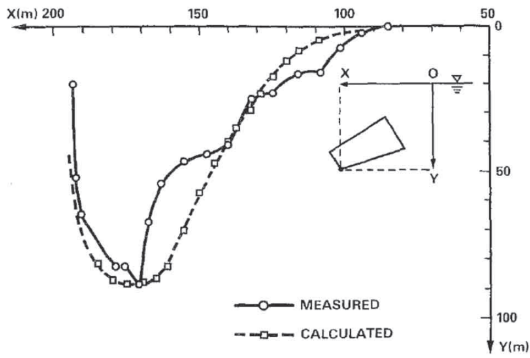
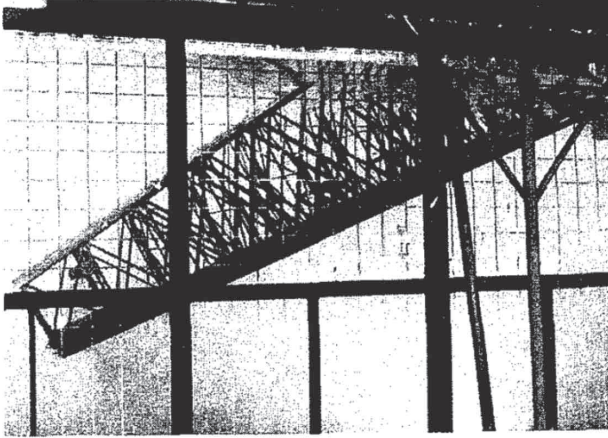


図3-3 ロンチングのモデル実験
Fig. 3-3 Launching model test

析に用いたジャケットの積付図を図3-4に、解析結果を図3-5に示す。バージ、ジャケッとも急激な挙動変化は見られず、ジャケッはスムーズに進水し海底面とのクリアランスも十分確保されていることがわかる。

(2) 船体縦強度

ロンチングバージのような特殊船の縦強度は一般鋼船を対象としたABSやNKなど船級協会の鋼船規則では規定されておらず、一般鋼船と同等の縦強度を満足するだけでは強度が不足する可能性が高い。そこで、鋼船規則による縦強度の照査とは別に、大型ジャケッ進水時を想定したバージの縦強度の照査を実施した。

大型ジャケッ進水時のバージは進水直前にジャケッ重量が船尾に集中することにより大きく縦傾斜して船首が海面上に露出する。即ち、バージは片持ち梁の状態となって大きな縦曲げモーメントとせん断力が発生する。縦強度の照査においては、先ず挙動解析プログラムで浮力の弾性ばねで支持された

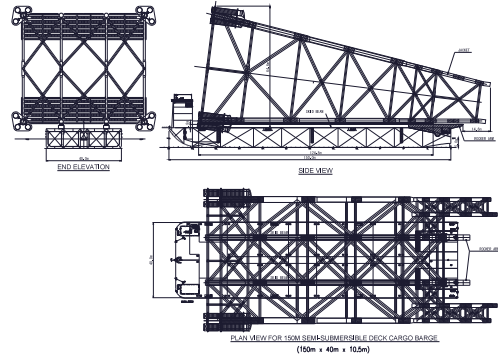


図3-4 14,000トンジャケッ積付図
Fig. 3-4 Stowage plan for 14,000 ton jacket

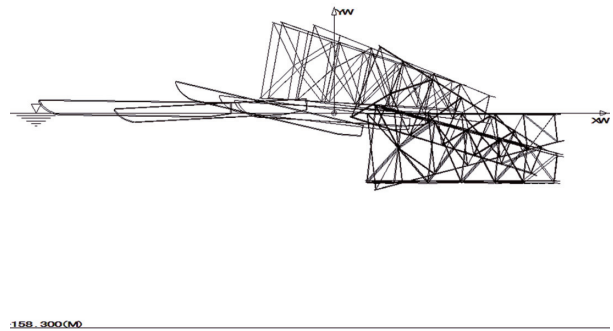


図3-5 挙動解析結果
Fig. 3-5 Behavior analysis results

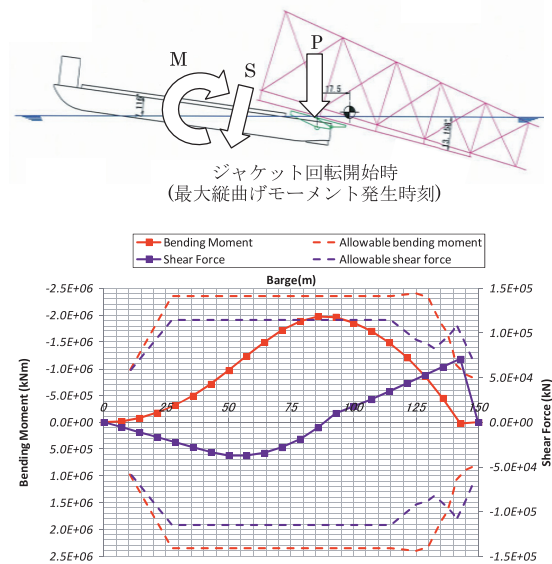


図3-6 縦曲げモーメントおよびせん断力
Fig. 3-6 Longitudinal bending moment and Shear force

40m 幅×10.5m 深の箱型断面の梁として時々刻々と変化する船体の姿勢に応じた発生断面力を算定した。次に、縦曲げモーメントは船体上下のデッキプレートおよびボトムプレートで、せん断力は船体長手方向の隔壁および側壁で受け持つものとして強度照査を行った。上下のプレートには適切なピッチとサイズの補強梁を配置することより圧縮応力による座屈を防止している。

強度照査の結果、本バージの縦強度は、等分布荷重を搭載する一般的な鋼船に比べ1.3倍程度の断面性能となった。つまり、ロンチングバージの縦強度は、鋼船規則で規定される強度を満足するだけでは不十分であり、上述のように進水状況を精緻に再現した解析または実験により発生断面力を評価した上で決定する必要がある。

(3) 大傾斜時の船体安定性

大型ジャケット進水時は、バージが縦方向に大きく傾斜する。傾きがある限界を超えると船体が横荷重に対して不安定となり、細いレールの上を滑って長手方向に自走していくべきジャケットが横方向に滑ってレールを脱線し大きな事故に結びつく可能性がある。このような危険性を回避するため、ジャケット進水中は常にバージが安定することを確認しなければならない。本バージにおいては、上述の挙動解析により GM(重心 G と傾心 M の距離。G よりも M が上方にあるときを正とする) を算定しジャケット進水中の全時刻で GM>0 となり、バージが安定することを確認した。図3-7に GM の時刻歴を示す。GM の最小値はジャケットの重量が船尾に集中するジャケット回転開始時である。

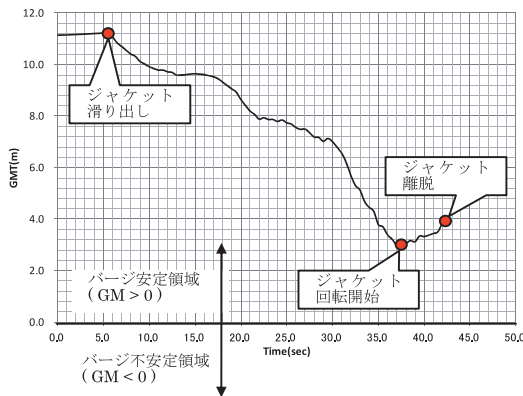


図3-7 ロンチング中の GM の時刻歴
Fig. 3-7 Time history of GM during launching phase

また、バージに初期トリムを付け復元力が低下したロンチング直前の状態で、横からの風荷重によりバージが転倒することも懸念されるため、風荷重による転倒モーメントに対しバージが十分な復元モーメントを有していることを確認している(これを動的安定性と呼ぶ)。

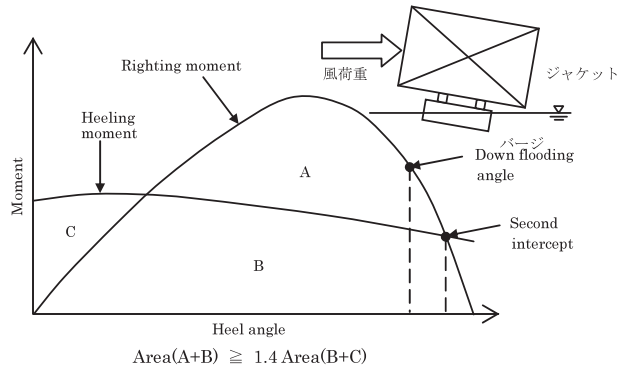


図3-8 動的安定性の照査
Fig. 3-8 Dynamic stability check

3.3 ロッカーアームと支持構造の設計

(1) ロッカーアーム形状の選定

ロッカーアームは船尾に配置された回転機構を有する梁であり、バージ上を滑り落ちるジャケットは進水直前にこの上に載り、回転しながら海水中に進水していく。

ロッカーアームは、シングルロッカーアームとダブルロッカーアームに大別される(図3-9)。シングルロッカーアームはヒンジ点の一つで構造はシンプルだが、一箇所で90°回転するためジャケットの進水深度が深くなりジャケットが海底面に衝突する懸念がある。一方、ダブルロッカーアームは2つのヒンジ点を持ち、シングルに比べ構造は複雑だが、ヒンジの回転角をバージ部分で抑制しながら2箇所で回転することで進水の軌跡が緩やかになりジャケットの進水深度を浅くできる。本バージでは多様なジャケットへの適応力を確保するため、より進水深度を浅くできるダブルロッカーアームを採用した。

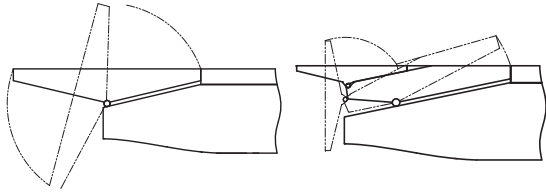


図3-9 シングルロッカーアーム(左)とダブルロッカーアーム(右)
Fig. 3-9 Single rocker arm and double rocker arm

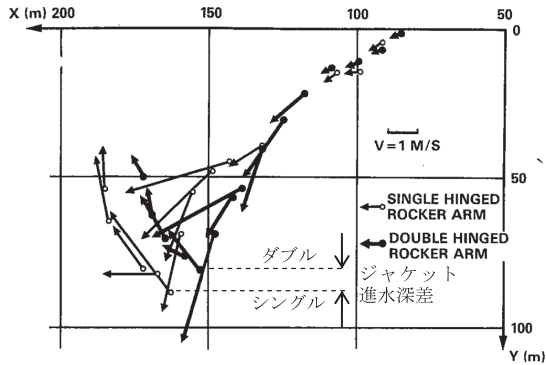


Fig. 11 - Comparison of velocity vectors of different rocker arms.

図3-10 ロッカーアームの違いによるジャケットのロンチング軌跡と進水速度の比較
Fig. 3-10 Comparison of velocity vectors of different rocker arms

(2) ロッカーアームと支持構造の構造設計

7,000トン(=14,000トン÷左右2箇所)もの大荷重を支持する1次ロッカーアームのヒンジ部においては、通常のピン構造ではピン径が大きくなりすぎて製作上の問題があるため、船体側に半円型の溝を設け、その中にロッカーアーム下に設置した半円筒を落とし込むことで回転できる円筒構造とした(図3-11)。ロッカーアーム下の円筒部分から船体の板構造に荷重を確実に伝達できるよう、荷重伝達機能に応じた支圧強度および座屈強度の検討を行うとともに、FEM解析にて局部応力が許容値内であることを確認した(図3-12(a))。さらに、円筒断面の変形により回転が拘束されないように円筒内部に補強を施し剛性を高めた。船体側も補強材と隔壁の追加によって船体内を補強しFEM解析で局部応力を確認した(図3-12(b))。

なお、2次ロッカーアームのヒンジ部は、2次ロッカーアームが回転する進水終盤ではジャケットの大部分が水没して浮力が作用し設計荷重が3,000トン程度となるため、通常のピン構造としている。

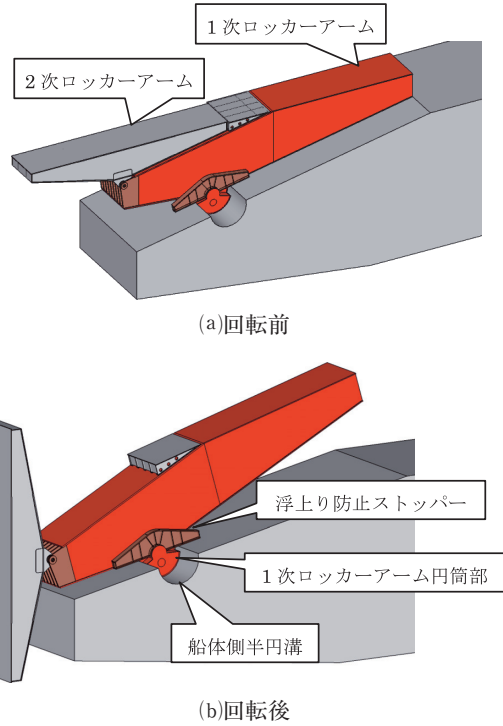
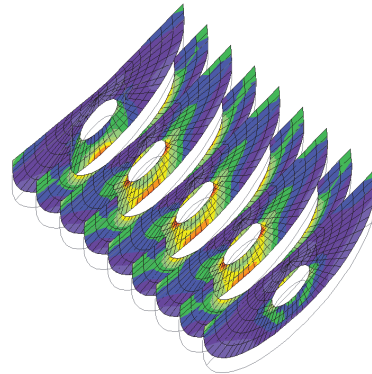
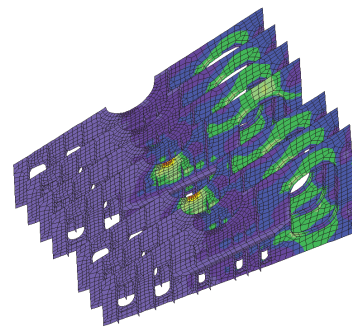


図3-11 ロッカーアームの回転機構
Fig. 3-11 Rotation mechanism of rocker arm



(a) 1次ロッカーアーム円筒内部



(b) 船体内補強部

図3-12 ロッカーアーム支持構造のFEM解析結果(ミゼス応力)
Fig. 3-12 FEM results of rocker arm support structure (Von-Mises stress)

4 スキiddingシステム

バージ上の14,000トンの大重量ジャケットを滑動し進水させるためには、図4-1に示すようなジャケット端部に大型油圧ジャッキを配置して、ジャケットを滑動させる2条のレール(スキッドビーム)のスキiddingシステムが必要である。また、油圧ジャッキは、ジャケットが自走するまで押し続けられよう移動可能なスキッド搭載型のジャッキシステムを採用した。

4.1 スキッドビーム

14,000トンの大きなジャケットの鉛直荷重を確実に船体に伝達するため、スキッドビームは船体の隔壁および補強梁を支点とした箱型断面の連続梁とし、船体側の強度にも配慮して部材サイズを決定した。設計荷重となるジャケット反力は、3次元骨組み解析によりジャケットの剛性を加味して評価した。また、ジャケットをより安全に進水させるた

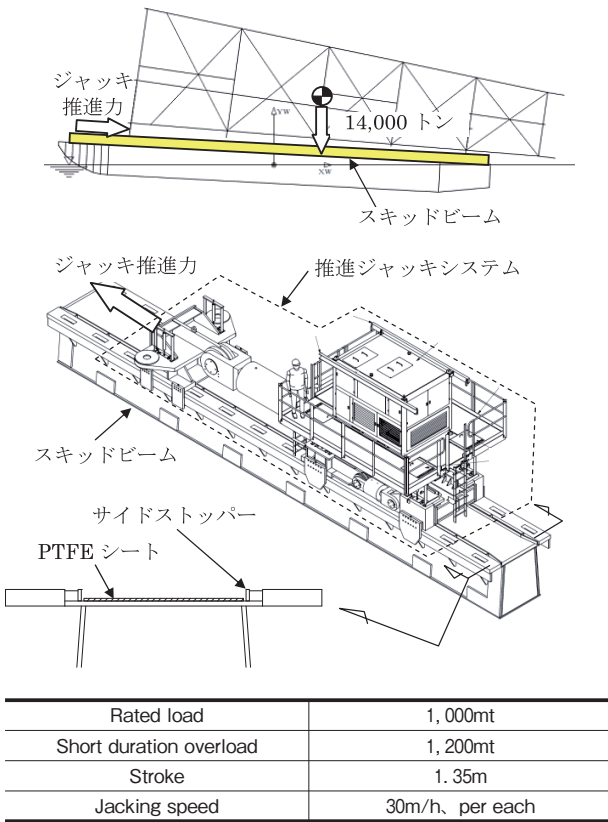


図4-1 スキッドビームとジャッキシステム
Fig. 4-1 Skid beam and jack system

め、図4-1に示すようにスキッドビーム上面にPTFEシートを敷設して摩擦抵抗を低減させるとともに、脱線防止のためのサイドストッパーを配置している。

4.2 ジャッキシステム

油圧ジャッキの能力は、搭載されたジャケットの静止摩擦を切る能力を最大として設計した。ジャケット重量を14,000トン、静摩擦係数を0.15、進水時のバージ初期トリムを3度とし、ジャケット重心の偏心や余裕を考慮して定格1,000トン(短期過負出力1,200トン)の反力ジャッキとした。

油圧ジャッキの移動には、反力ピンとスキッドビームに設けたスロットを利用し、ジャッキの伸縮を繰り返すことでスキッドビーム上を移動できるピン・クロー方式(図4-2)を採用した。

ジャッキ反力はジャッキ後方に接続させた反力フレームを介して反力ピン4箇所均等に分散させ、各箇所の反力を低減させることで構造を簡素化させた。

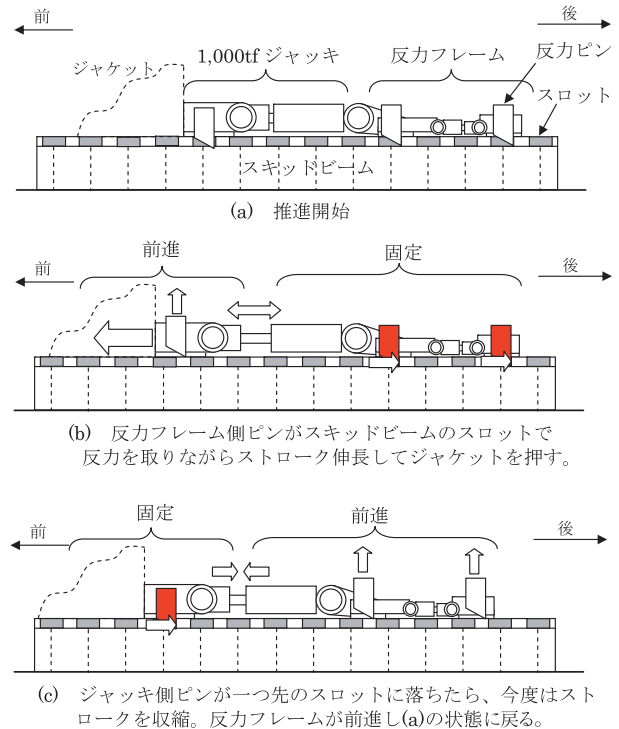


図4-2 ピン・クロー方式の推進原理
Fig. 4-2 Driving process of pin claw jack

5 結言

本ロンチングバージの計画と設計において、

- (1) 東南アジアを中心とした海洋プラットフォーム建設プロジェクトの最新マーケット動向を踏まえ、ほぼ全案件に対応可能なロンチングバージ諸元を選定した。
- (2) 設計最大重量のジャケット(設置水深160m、重量14,000トン)に対して、当社の海洋プラットフォーム建設に関する保有技術を駆使することにより、ジャケットの進水挙動解析、安定性解析、応力解析等を行い、安全な船体およびロンチング設備機構を設計した。

本ロンチングバージは2012年に竣工し、東南アジア海域での当社の施工対応能力が飛躍的に拡大した。