原 著 論 文

大水深掘削における掘削装置の臨界使用条件評価の研究(その 1)*

林 廣一**・片山 進**・水口保彦**・村田哲夫**

(昭和58年 7 月19日受理)

The Study of Environmental Conditions evaluated by the Riser and Mooring
Analysis in Deep Water for Floating Drilling Vessels (Part 1)

By

Hiroichi HAYASHI, Susumu KATAYAMA, Yasuhiko MIZUGUCHI and
Tetsuo MURATA

Abstract: For safe and effective deepwater operations, one of the most important studies is to know the behavior of the riser pipe in maintaining the flexible joint angle and riser stress within operating limits which will be affected and varied by the environmental forces.

This paper is aimed to establish the analytical methods and operating procedures for riser and mooring systems in deepwater operation in consideration of such significant factor.

The analytical methods for riser and mooring systems in this study are determined by purposefully arranged equations currently common for computer aided analysis. In this part 1 of the study, theoretical discussions have been mainly described and verified by comparison with presently available published papers as the results of the engineering companies analysis which have been carried out for Japanese Government Stratigraphical Drilling Projects.

1. 緒 言

大水深における掘削に際しては、海洋の激烈に変化する多様な外力の要因を適確に捉えて適切な船位調整、マリンライザの張力調整を行うことが非常に重要となってきた。水深が増大することによって外力は更に増加し、マリンライザの挙動も係留も複雑な要素が加わるために多様な様相を呈することとなり、掘削作業を効率よく安全に遂行するためには、マリンライザの挙動及び係留に関する十分な事前検討が必要であり、これなくしてはもはや大水深の稼働は不可能といっても過言ではない。

最近のこのような状況を反映して種々論文が発表されているが未だ確立した方法は見出されず、各々の独立した研究がなされている状況であった。

本研究はマリンライザの挙動及び係留に関する解析方法を確立し、その方法を第 5 白龍の掘削計画に応用し、その臨界条件を決定するとともに機器技術及び運転方法の確立を目的としたものである。

2. 研究の概要

マリンライザは図 1 に示されたように掘削装置と海底上に設置された BOP を結ぶ唯一の経路であり、この中を通して凡ゆる掘削作業は実施されている。ライザパイプは掘削装置からライザテンションによって吊下げられており、フレキシブルジョイントを介して BOP と接続されている。ライザシステムについては参考文献(1)を参照されたい。

ライザパイプはそれ自体潮流及び波の外力と泥水比重及びパイプ自重によって撓み、ライザパイプに曲げ応力とライザアングルを生ずる。ライザアングル*に注目し、

* 第48回石油技術協会総会さく井部門シンポジウム「海洋掘削技術の進歩」講演(昭和58年 6 月 2 日)

** 日本海洋掘削機

* ライザアングル: ライザ下端で、ライザパイプと鉛直線のなす角度

図1 Marine riser conception

これを改善するにはライザテンションにて引張ればライザアングルは小さくなる。しかし、張力を唯大きくすれば軸力が大きくなり結果として合成応力が増加することとなり、ある張力以上に引張ることが不可能である。

又、ライザパイプにかかる外力はそのまま船体を動かそうとする力となり、係留されている海底の BOP との間で水平方向にずれ（以降オフセットと呼ぶ）を生じ、このため、ライザパイプは自己の撓みの他に角度をもつことになる。

したがってライザパイプは外力が大きくなるとその角度を増していき、掘削作業が安全に遂行できるかどうかの限界を超えてしまうことになりライザシステムに損傷を与える可能性がある²⁷⁾。

以上の観点から本研究では、マリンライザ及び係留を外力との関係において解析し、掘削作業を実施する際の臨界使用条件として外力を捉えること及びこの時使用される装置、機器の検討を行うことを目的とし、同時に、構築された論理を検証することとする。

本研究に必要なプログラムの概略は図2に示す。

図2 Flow chart of study

2.1 マリンライザの挙動に関して

マリンライザ挙動を知るために2次元及び3次元の静解析プログラムを開発しオフセット、張力、潮流、波、泥水比重等をパラメータとして解析した。この解析によってマリンライザ挙動の限界条件であるライザアングル及びライザ応力をあらかじめ知り得て、外力条件の限界値を把握することが可能となった。

しかしながら静解析は、全ての外力を定常外力として捉えるために解析は安全側のみに実施され、より厳しい状況下では解析結果からは掘削不可能という結果が導き出されることもあり実用的ではなかった。この点を考慮できる解析としては動解析が有効で、時刻歴応答による2次元動解析を開発した。これによって変動する外力に対する動的変位を知ることができるので、限界値は静解析に比較して大きくなる。

動解析には時刻歴応答解析と周波数応答解析があり、それぞれの特徴をもっているが本研究では何れの解析にも対応できるようになっている。

一方、これまでの静及び動解析は掘削状態だけに有効な解析であったので、掘削状態に入るまでの段階及び非常時マリンライザを切り離れた状態での解析を行っておく必要がある。これはいわゆる BOP 降下及びエマージェンシディスコネクト*と呼ばれるケースであるが、従来の解法に加えてこの状態での解析を可能とする解法を開発した。

2.2 係留に関して

多点係留された船体の3次元挙動解析についての解法はまだ確立されておらず、一般には1係留索についてのカタナリ**解法又は有限要素法による解析を実施し、多点係留について幾何学的に発展させる場合が多い。

しかしながら実的な掘削装置の係留状態は単に幾何学的解法では解析できず、特に大水深稼働では各係留索が非対称であり、又、アンカポイントでの水深も違うために3次元の係留解析が必要である。3次元係留解析にはカタナリ解に代表される解析の方法と有限要素法に代表される数値的方法がありそれぞれの特徴をもっている。本研究では目的に適うカタナリ解法を採用し、水深の違うアンカポイントをもつ非対称係留索について3次元解析することによって種々の外力による限界条件を決定した。

2.3 総合解析に関して

個々に解析されたマリンライザ挙動、係留挙動の解析結果から、それぞれ外力の限界条件が決定され、臨界使

* エマージェンシディスコネクト：外力が大きくなりランザアングルが増加し9°以上になる場合に、マリンライザを BOP から切り離すこと

** カテナリ：係留索が海中で描く曲線

用条件として一応の評価ができ、200m以深の大水深稼働にも応用された。これら2つの挙動は、相互に関連をもっていることから、相互に関連させた解析法を確立すれば互いに補完しあう更に効率の良い、高い臨界使用条件が得られることから第一段階としてマリライザ及び係留を結合した総合解析を行った。

更に研究の最終段階として、臨界使用条件をより精度を高めて評価すれば条件が高まることになり、かつ安全な作業に連なることから統計処理された海象気象データとしての外力条件をベースにして予測稼働率（ダウンタイム解析）の概念を導入した。本解析によって、ライザ挙動の支配的要因であるライザアングル、ライザ応力を係留による船体移動の面から抑え、最終的には統計処理された外力条件での船体運動、係留挙動、マリライザ挙動を予測稼働率として評価し、又稼働率が高くなるライザ張力及びワーキングテンションを決定するとともにこの時の外力の組み合わせを最適臨界使用条件として設定できるようにした。

2.4 装置・機器技術の検討

最適臨界使用条件が決定されても、装置・機器の各要素技術がこれらの条件下でその性能を十分にかつ安全に発揮されなければならない。このため、次の要素について検討した。

- (1) フレキシブル ジョイント
- (2) ライザパイプ
- (3) ライザテンションシステム
- (4) エコーフロート
- (5) エコーフェアリング
- (6) フィルアップバルブ
- (7) ガイドライン テンション
- (8) インストルメンティッド ライザー ジョイント (IRJ)
- (9) アンカー ディプロイメント

3. 理 論

本研究が目的としている内容に関する解析は、マリライザ挙動、係留挙動、又、これらを結合した総合解析まで含めて確立された解法はなく、種々の論文にその理論及び実施例の概念が示されているに過ぎない。したがって本研究では全て基本概念を作りあげ、同時に最適理論を確立して数学モデルを作成した。この数学モデルに基づいて計算プログラムを作成し、計算精度などの実用性の確認を行った。それぞれの研究理論の概要は次の通りである。

3.1 マリライザ挙動静解析

静解析の基本式は

$$\frac{d^2}{dz^2} \left\{ EI(z) \frac{d^2 y}{dz^2} \right\} - T(z) \frac{d^2 y}{dz^2} + \omega(z) \frac{dy}{dz} = f(z)$$

ただし、 $EI(z)$: 曲げ剛性

$T(z)$: 張力（引張力を正とする）

$\omega(z)$: 単位長さ当たりの重量

（水中部は水中重量）

$f(z)$: 単位長さ当たりの水平外力

$y(z)$: 変位量

z : 長さのパラメータ

外力はモリソンの式を用い、潮流、波を考慮する。

$$f(z) = \frac{1}{2} \rho C_D D u |u| + \frac{\pi}{4} \rho C_M D^2 \dot{u}$$

ただし、 ρ : 海水密度

D : ライザパイプ外径

u : 波、潮流による水粒子の速度

$\dot{u}$: 波による水粒子の加速度

C_D : 抗力係数

C_M : 見掛け質量係数（質量係数）

これらの基本式をもとにして有限要素法により解析するプログラムを開発した。

本プログラムの特徴は

- (1) 3次元梁要素の非線形項を考慮する
- (2) 大変形による座標変換行列を使用
- (3) 有限回転変位計算を行う
- (4) ニュートン・ラプソン法による繰り返し収束計算を行う

又、ライザパイプの上端、下端の支持条件は構造が安定である限り任意であり、オフセット方向、波方向、潮流方向を各々独立に入力することもできる。更に波種類としては微小振幅浅水波の他にストークス5次近似式をとりあつかうことができる。

3.2 マリライザ挙動動解析

動解析は時刻歴応答解析と周波数応答解析の2通りの解析方法がある。

3.2.1 時刻歴応答解析

基本式は

$$\frac{\partial}{\partial z^2} \left\{ EI \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right\} - T \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} + \omega \frac{\partial y}{\partial z} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = f(z, t)$$

ただし、 m : 単位長さ当たりの質量（流体力学的付加質量を含める）

t : 時間のパラメータ

$f(z, t)$: 単位長さ当たりの水平外力

その他は前と同じ

この時の外力の式は

$$f(z, t) = \frac{1}{2} \rho C_D D u |u| + \frac{\pi}{4} \rho C_M D^2 \dot{u}$$

図3 Marine riser components & principal excitations

$$u = v + v_c - \frac{\partial y}{\partial t}$$

ただし, v : 波による水粒子速度

v_c : 潮流による水粒子速度

$\partial y / \partial t$: ライザパイプの動揺による速度

u : 相対速度

$\dot{u}$: 相対加速度

その他は前と同じ

時刻歴応答解析はこの基本式を基にして

- (1) 2次元梁要素の幾何剛性を考慮。
- (2) ニュートン・ラプソン法により繰返し計算を行う。
- (3) ウィルソンの θ 法による時刻歴応答計算を行う。

この解法も又, ライザパイプの上端, 下端の支持条件は構造が安定である限り任意であり, 定常外力としてはライザ張力オフセット量, 潮流が考慮され, 動的変動外力としては波圧力, オフセット量(船体動揺分も含む)を取り扱うことができる。

なお波種類としては微小振幅浅水波を取り扱う。

3.2.2 マリンライザ周波数応答解析

周波数応答解析の基本式は, 3.2.1の時刻歴応答解析の基本式と同じ。

外力の式は

$$f(z, t) = \frac{\pi}{4} \rho C_M D^2 \dot{v} - \frac{\pi}{4} \rho (C_M - 1) D^2 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$+ \frac{1}{2} \rho D C_D u |u|$$

又波による水粒子の速度は

$$v = v_0(z) e^{i\omega t}$$

同様に変位量

$$y = y_0(z) e^{i\omega t} + y_c(z)$$

ただし, v_0 : 波による水粒子の速度の振幅

v_c : 潮流による水粒子の速度

y_0 : 波によるライザの変位量の振幅

y_c : 潮流によるライザの変位量

ω : 波の角速度

ここで非線形項を

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho D C_D u |u| &= \frac{1}{2} \rho D C_D \{ (v_0 - i\omega y_0) e^{i\omega t} + v_c \} \\ &\times | (v_0 - i\omega y_0) e^{i\omega t} + v_c | \\ &\doteq \frac{1}{2} \rho D C_D \{ B_1 (v_0 - i\omega y_0) e^{i\omega t} + B_2 v_c \} \end{aligned}$$

と線形化する。

周波数応答解析はこの基本式を元にして

- (1) 2次元梁要素の幾何剛性を考慮する
- (2) 非周期項に関してはニュートン・ラプソン法により繰返し収束計算を行う(大変形)
- (3) 周期項に関しては最小自乗近似による修正線形化法を行う。

この解法もライザパイプの上端, 下端の支持条件は構造が安定である限り任意であり, 定常外力としてライザ張力, オフセット量, 潮流が考慮され, 変動外力として波を取り扱うことができる。

なお, 波は微小振幅浅水波を取り扱う。

3.3 マリンライザ挙動2次元静・動ディスコネクト時解析

本解析では次の3ケースについて考慮し, (1)と(3)については下端がBOPと接続している場合とディスコネクト時の2つの状態が計算できる。

- (1) ライザパイプのみの静的大変形解析(ガイドラインなし)
- (2) ライザパイプとガイドワイヤとの連成を考慮したディスコネクト時の静的大変形解析
- (3) ライザパイプのみのディスコネクト時の波と潮流による時刻歴過渡応答解析(ガイドラインなし)

解析に用いた基本式は静解析, 時刻歴動解析の基本式と同じである。

本プログラムの特徴は

- (1) 2次元梁, トラス要素の幾何剛性を考慮する。
- (2) 大変形による座標変換行列を使用する。
- (3) 静解析についてはニュートン・ラプソン法による繰返し収束計算を行う。

- (4) ガイドワイヤ付静解析では BOP スタックとの支持点でライザパイプとガイドワイヤとの水平力の釣合計算を行う。
- (5) 動解析ではウィルソンの θ 法による時刻歴計算を行う。

この解法は定常外力としてはライザ張力、オフセット量、潮流、ガイドワイヤ張力が考慮され、動的変動外力としては波圧力、オフセット量（船体動揺による分）を取り扱うことができる。なお、波種類は微小振幅浅水波を取り扱う。

3.4 係留解析

係留索を有限要素法で解く方法とカテナリ特性を用いて解く方法とがあるが、諸検討の結果、計算効率を重視する（多ケースの繰り返し計算を実施し、係留方法の変更を容易にする）必要があるためカテナリ特性を用いて解く方法を採用した。

カテナリ特性の基本式は

$$T_A = T_H + \omega \tilde{H}$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{T_H}{\omega \tilde{H} + T_H} \right)$$

$$\tilde{S} = \frac{T_H}{\omega} \tan \theta$$

$$\tilde{L} = \frac{T_H}{\omega} \sinh^{-1} \frac{\omega \tilde{S}}{T_H}$$

ただし、 T_A : 索張力

T_H : 索張力水平分力

ω : 索単位長さ水中重量

$\tilde{H}$: 水深

θ : 索上端持ち上がり角度

$\tilde{S}$: 索持ち上り長さ

$\tilde{L}$: 索持ち上り部分の水平距離

本プログラムは各アンカポイントにて水深の異なる 3 次元係留パターンを解析するものでチェーン、ワイヤ（索の伸びを考慮）、チェーンとワイヤの複合システム、シンカ（中間シンカも可）、中間ブイ（ブイ浮力が過剰であっても可）を考慮できる。

また次のような解法上の特徴をもつ。

- (1) 複合カテナリの計算はニュートン・ラプソン法で求める。
- (2) 初期釣合張力決定問題は *rms* 規準（又はウィーナ規準）により解く。
- (3) バージの船首回転角は繰り返し計算で求める。
- (4) 張力、水平張力および水平方向変位の相互変換はカテナリ曲線の 2 次補間により行う。
- (5) バージ座標から基準座標への変換は座標変換行列による。

- (6) 初期オフセットの決定、過剰浮力によるカテナリの計算はバイセクション法を用いる。

3.5 係留とマリライザ挙動の総合解析

本プログラムは先に述べた 3 次元ライザ静解析、ライザパイプのみのデスコネクト時静解析及び係留解析の各プログラムを組み合わせる次の 2 種の解析を行うものである。

- (1) 適正ワーキングテンションと適正ライザ張力の組み合わせを求める。
- (2) ディスコネクト時及びライザをリエントリするための係留索のスラック量*を求める。

計算に使用される基本式は先に説明してあるのでここでは解析の手順を説明する。

適正ワーキングテンションと適正ライザ張力の組み合わせを求める場合、まず、ワーキングテンションを次のように定義する。係留索方向への船体移動量がバージ水深の 5% 生じた時に索張力が破断強度の $\frac{1}{3}$ に達するような初期張力をワーキングテンションとする。この時の関係を図 4 に示す。各パラメータの意味は 3.4 の係留解析の式の説明と同じである。

図 4 Working tension

図 5 Relation of riser tension (RT) and working tension (WT)

* スラック量：係留索の繰り出し、又は巻上げによりカテナリの形状を変え、索張力を変化させたり、船体に作用する力の釣合を変化させること

このワーキングテンションのもとに与えられた外力を全方向からかけて最悪方向を求める。この求められた最悪方向に対して着目し、外力をかけ係留索のワーキングテンションを変えてオフセットと最大索張力を求める。この関係を図5の右半分に示す。

次に与えられた外力条件下においてライザ張力をパラメータとして、ライザアングル、ライザ応力及びフレキシブルジョイント張力が全て基準値に入るようなオフセットを求める。

以上の手順よりオフセットを媒介として図5の関係が得られており、索張力に対応するワーキングテンション WT が求められる。またこの時対応する曲線よりオフセットが求まり、この値に対応するライザ張力 RT が得られる。

このようにしてある外力条件のもとで与えられた基準値を満足するワーキングテンションとライザ張力の関係が求まる。

一方、ディスコネクトした後、リエントリのためのスラック量を求める解析は次のような手順で行う。

初期釣合状態の索張力 T^0 及び与えられた外力 F による移動量 δ_F 、移動後の釣合い張力 T_D を係留解析より求める。次にライザディスコネクト解析によりライザ下端の水平変位 δ_R を求める。坑井芯をあらかじめ与え、外力 F による移動後のバージ位置から坑井芯までの変位を δ_W とすると初期釣合い位置から坑井芯までは $\vec{\delta}_F + \vec{\delta}_W$ で表され、一方ライザ下端の変位は $\vec{\delta}_F + \vec{\delta}_R$ で表される。したがって坑井芯位置にライザ下端を合わせるためにはスラック操作によってバージを移動させる必要がある。

図6から、この移動量を δ とすると

$$\begin{aligned}\vec{\delta}_F + \vec{\delta}_R + \vec{\delta} &= \vec{\delta}_F + \vec{\delta}_W \\ \therefore \vec{\delta} &= \vec{\delta}_W - \vec{\delta}_R\end{aligned}$$

係留解析によって $\vec{\delta}$ に対応する各係留索のスラック量を計算し求める。

3.6 係留, マリンライザ挙動及び船体動揺の総合解析

3.6.1 臨界曲面

3.5で述べたプログラムは与えられた外力(波, 風, 潮流)のもとで基準値内に収まるライザ張力, ワーキングテンションの組み合わせを求めるものであったが, 本解析では, 与えられたライザ張力, ワーキングテンションのもとで, 船体動揺も含めた基準値以内に収まる外力(波, 風, 潮流)の組み合わせを臨界曲面として求め, 更に気象海象頻度分布データより予測稼働率を算定するものである。

本解析ではライザ解析として周波数応答解析を用いる。全体の解析手順を以下に説明する。

概略フローチャートを図7に示す。

外力方向は指定方向又は同時同方向として全方向の4, 8, 16分割のいずれかを選択する。次に外力値の風, 波, 潮流のうち2つを固定し1つだけ値を変えて限界外力となる値を求める。

外力の値は仮定した外力条件のもとで係留計算を行い, その結果得られたオフセットを用いてライザ計算を行い, 仮定した外力条件が臨界値か否かを判定し, 臨界値でなければ外力条件を上げて同じ計算を行うといった反復計算を行う。この方法は次の通りである。

- (1) 各点において変化させる外力値を初期量だけ作用させて係留計算及びライザ計算を行う。
- (2) 係留計算及びライザ計算の結果より次の5つの安全率を求める。
 - ライザアングル安全率
 - ライザ応力安全率
 - 下端フレキシブルジョイント張力安全率
 - 上端フレキシブルジョイント張力安全率
 - 索張力安全率

このようにして求められたある外力方向に対する臨界使用条件は図8のような1つの曲面上の点として考えられる。

また船体の動揺応答特性と実際の波高, 波周期の関係よりサージ, スウェイ, ヒープ, ピッチ, ロール, ヨーが基準値内に収まる各制限波高値を求め, そのうち最小の波高を船体動揺により定まる波高とする。

係留, ライザより定まる曲面と船体動揺から定まる波高の双方を満足する領域として臨界曲面が決定される。

平面への表現として, 得られた臨界曲面を2成分を軸とし残りの1成分をパラメータとした平面曲線で表示すると図9のように表せる。

3.6.2 予測稼働率

ワーキングテンション, ライザ張力が一定のとき, あ

図7 Outline of total analysis

図8 Environmental force envelope (limited by allowable maximum wave height of the rig)

る方向に対して臨界曲面が定まる。このとき、予測稼働率 p は次式で求められる。

$$p = \frac{\int_0^{X_{LIM}} h_1(x) dx \int_0^{Y(x)} h_2(y) dy \int_0^{Z(x,y)} h_3(z) dz}{\int_0^\infty h_1(x) dx \int_0^\infty h_2(y) dy \int_0^\infty h_3(z) dz}$$

$$\text{ただし, } \int_0^\infty h_1(x) dx = 1$$

$$\int_0^\infty h_2(y) dy = 1$$

$$\int_0^\infty h_3(z) dz = 1$$

また $Y(x)$ は x に従属する曲面内の最大値

$Z(x, y)$ は x, y に従属する曲面内の最大値

をいう (図10)。

こうして得られた方向ごとの予測稼働率 p を各外力方向毎に計算し、外力方向毎の発生頻度を考慮してワーキングテンション、ライザ張力が一定のときのあるコンディションにおける全体予測稼働率を算定する。

4. 検証の方法

解析結果の妥当性が証明されなければ、上記の方法の

図9 Environmental force envelope (projected)

図10 Relation of environmental force envelope and frequency distribution curve

有効性は皆無といえるので、本研究では次のような検証方法を採用した。

- (1) 文献の結果との比較
- (2) 他社の結果との比較

4.1 文献の結果との比較

ライザ挙動解析に関する論文は現在まで多数発表されているが、解析の方法が主であり、実際に検証の目的で比較するには解析用データが不足しており有効な検証が行えないものがほとんどである。解析の方法論による違いによる誤差もあり、更に直接大きく影響を与える波、潮流の取り扱い方法及び支持条件の差なども誤差を生ずる場合が多い。

API BUL 2J²⁹⁾で、静解析、動解析の両者について解析入力条件が明示され、又、8社の解析結果が一覧表にして示されているので比較するには非常に有効である。

API モデルのデータを用いた本方法による計算結果は
 静解析：ほとんど一致する。

動解析：ほとんどのケースにおいてプロファイル
 図との比較ではその範囲に入っている

が、個々の節点での比較では数点2～の
 %位ずれているケースがある。

静解析、動解析において変位は良く一致するが、応力は小さめに出る節点がある。これは支持条件の定数の扱い方に若干差があることも理由として考えられる。本研究の解析方法は実用上十分な精度をもっており、信頼に足るものと考えられる。

4.2 他社の結果との比較

4.1で考察した通り、文献による比較はその仮定条件、解析の方法等の不明確さによる誤差が考えられるので、他社に同一データ解析を依頼することによって、より精度の高い検証が行える。

解析を依頼した先は

- VETCO 社
- TRITON 社
- EARL & WRIGHT 社

の3者であり、TRITON 社への依頼は国の基礎試験官古島沖に関して、EARL & WRIGHT 社へは御前崎沖の検討のために実施された。

4.2.2 VETCO 社

VETCO 社が Exxon Production Research Co., の開発した静解析2次元のプログラムによる計算サービスを行っているので、同じ条件で計算を依頼し結果を比較した。この結果は、最大誤差0.5%で、極めて良く一致している。

4.2.2 TRITON 社

国の基礎試験官古島沖のケースについての解析結果との比較検討を行った。

(1) 係留解析について

係留解析を行う場合の風荷重、潮流力、船体動揺量の算定が遙かに大きいために解析結果が違っている。解析手法確認のため、TRITON 社と同じ大きさの量を用いて計算すると、その結果は実用的な誤差範囲に入っており、解析方法は明確でないが問題ないと思われる。

(2) 把駐力について

把駐力の算定については TRITON 社は把駐力係数法を採用しており、ANHOP*で計算された把駐力より約30%位高い把駐力が得られている。

又、TRITON 社はアンカのフルーク角度の把駐力への影響を考慮している。砂質においては $30^{\circ}\sim 34^{\circ}$ のフルーク角度で把駐力が最大になるとしている。

一方、本研究に用いられた20 t アンカ KC-RIG-5 の縮尺モデルによる把駐性能試験では砂質においてフルーク角度 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$ の時が最大となっている。実機には 40° を採用している。両者の検討を行う場合には、フルーク角度の影響を考慮することとした。

(3) ライザー解析

解析条件を TRITON 社と同一にして解析を行った結果、ライザアングルが大きめに、ライザ応力は小さめな値が得られたが、この差はモデル化等のプログラムの違いを考慮すればその差は小さくなく、結果は良く一致すると考えられる。

以上のように TRITON 社との比較をした場合、係留解析についてはその手法が不明であるので明確にできないが問題ないと思われる。

把駐力についてはフルーク角度の影響を考慮する必要性が示された。しかし、この問題は土質及びアンカ形状による影響が大きいため簡単に断定できない側面はあるものの、今後更に検討していかねばならない。

又、ライザ解析については解析方法としては余り違いがなく、良く一致するといえる。

4.2.3 EARL & WRIGHT 社

EARL & WRIGHT 社への解析依頼は2度実施され、最初の解析は400m～500m水深での稼働を仮定して係留及びライザ解析の比較検討を行った。2回目の依頼は国の基礎試験御前崎沖について更に詳しい解析を依頼した。

(1) 外力について

外力及び船体動揺の評価方法については、概略一致しているが、潮流のプロファイル、波漂流力では異なっていた。

潮流プロファイルに関しては、従来 $1/7$ 乗則で表層潮流からプロファイルを決出し計算に用いられていたが、EARL & WRIGHT 社はプロファイルが不明で表層流のみが知られている場合、台形分布を用いることを標準としている。すなわち、海面下のある水深までは表層流の水粒子運動を考慮し、それ以下は一定潮流とする考え方である。

一方、実測されたデータの処理については御前崎沖の事前調査データを示し処理を依頼したところ、実際には

実測データからプロファイルを決定するのは非常に困難なので、最大流速を発生時間、流向を無視しプロットすることによってプロファイルを決定している。このプロファイルは台形としている。

このように潮流プロファイルは実測されたデータから解析用インプットに変換する方法も今後いろいろ検討する必要がある。

又、波漂流力については明確な定義がなかったが EARL & WRIGHT 社は API RP 2P の草稿段階からこの制定に参加していたため非常に明確な形で波漂流力の算定をしている。したがって本研究も RP が発行される前段階から、波漂流力をプログラムに組み入れることができた。

(2) 係留解析について

ヘッディングの決定、把駐力、スラック方法など本研究の決定方法と若干の相違がみられたが基本的な違いではない。

係留索の計算において EARL & WRIGHT 社はチェーンの伸びを考慮しているので本研究の方が索張力は大きく表れるが、解析結果に及ぼす影響は少ない。

又、EARL & WRIGHT 社の初期張力の決定の詳細は不明であるが、両者の値はほぼ一致している。

(3) アンカーディプロイメント*

EARL & WRIGHT 社は触底させない方法を考えているのに対し、本研究ではワークボートの装置の能力から別の方法を採用せざるを得ず、これらの何れが良いかは速断できない。しかし、今後はアンカーディプロイメントの方法の確立を含め、EARL & WRIGHT 社の方法も十分検討していく必要がある。

(4) ライザ解析について

EARL & WRIGHT 社のライザ張力の決定方法が不明であるが本研究の値とはほぼ同値である。ただし、ライザに対する波力の考え方では EARL & WRIGHT 社はノーマル³⁰⁾及びリミティッド・ドリリングモード³⁰⁾では波力を無視しており、逆にサスペンディッドモード³⁰⁾では波力による影響を波の大きさとは関係なく一律にライザアングル 3° として評価し、ライザアングル 6° になる潮流を求めている。

以上のような差異がみうけられるにもかかわらず、両者の解析結果は実用的範囲内で良い一致を示しており、解析手法の精度の確認ができた。なお今後、有義波高ではなく長期波漂流力を考慮した船体動揺値算定方法及びアンカーディプロイメントの確立及び解析方法について更に検討を加えてゆく必要性が考えられる。

* アンカーディプロイメント：ワークボートでアンカーを打つ場合の、総合検討及び操作方法の全てをいう。

* 本論文その2参照

文 献

- 1) G.W. MORGAN and J.W. PERET: Applied Mechanics of Marine Riser System Part 1, *Petroleum Engineer*, p. 36~48, OCT, 1974.
- 2) DITTO, Part 2, *Petroleum Engineer*, p. 68~74, NOV, 1974.
- 3) ———, Part 3, *Petroleum Engineer*, p. 52~65, DEC, 1974.
- 4) ———, Part 4, *Petroleum Engineer*, p. 52~60, JAN, 1975.
- 5) ———, Part 5, *Petroleum Engineer*, p. 10~17, FEB, 1975.
- 6) ———, Part 6, *Petroleum Engineer*, p. 52~67, MAR, 1975.
- 7) ———, Part 7, *Petroleum Engineer*, p. 88~97, APR, 1975.
- 8) ———, Part 8, *Petroleum Engineer*, p. 96~108, MAY, 1975.
- 9) ———, Part 9, *Petroleum Engineer*, p. 50~60, JUL, 1975.
- 10) ———, Part 10, *Petroleum Engineer*, p. 58~68, AUG, 1975.
- 11) ———, Part 11, *Petroleum Engineer*, p. 72~91, OCT, 1975.
- 12) ———, Part 12, *Petroleum Engineer*, p. 51~64, JAN, 1976.
- 13) ———, Part 13, *Petroleum Engineer*, p. 72~84, MAY, 1976.
- 14) J.C. BOTKE: An analysis of the Dynamics of Marine Riser, Delco Electronics, 1976.
- 15) C.G. Gosse and G.L. Barksdale: The Marine Riser—A Procedure for analysis, OTC, 1770, 1973.
- 16) T.C. TUCKER and J.P. MURTHA: Nondeterministic Analysis of a marine riser, OTC 1770, 1973.
- 17) B.G. BURKE: An Analysis of Marine Risers for Deep Water, OTC, 1771, 1973.
- 18) E. GNONE, P. SIGNORELLI and V. GUILIANS: Three-dimensional Static and Dynamic Analysis of Deep-Water Sealines and Risers, OTC, 2326, 1975.
- 19) R.M. SEXTON and L.K. AGBEZUGE: Random Wave and Vessel Motion Effects on Drilling Riser Dynamics, OTC, 2650, 1976.
- 20) L.W. WATKINS and M.J. HOWARD: Buoyancy Materials for Offshore Riser Pipe, OTC, 2654, 1976.
- 21) 林 廣一, 重松英一郎: マリンライザについて, 石油技術協会誌, Vol. 40, No. 7, 1975.
- 22) DNV: Rules for the Construction and Classification of Mobile Offshore units 1975.
- 23) BV: Rules and Regulations for the Construction and Classification of Offshore Platforms 1975.
- 24) ABS: Rules for Building and Classing Offshore Mobile Drilling Units 1973.
- 25) API: API Recommended Practice for Planning, Designing, and Construction Fixed Offshore Platforms, RP 2A, 1977.
- 26) 土木学会: 水理公式集, 昭46.
- 27) 田中彰一, 浜野英信, 永倉文雄: マリンライザの挙動の計算例, 石油技術協会誌, Vol. 40, No. 6, 1975.
- 28) R. GRANT and D. PATTERSON: Riser Fairing for Reduced Drag and Vortex Supression, OTC, 2921, 1977.
- 29) API: Bulletin on Comparison of Marine Drilling Riser Analyses, API, BUL, 2J, 1977.
- 30) API: API, RP, 2Q, API Recommended Practice for Design and Operation of Marine Drilling Riser system.
- 31) API: API, RP, 2P, API Recommended Practice for the Analysis of Spread Mooring Systems for Floating Drilling Units.