大水深ライザーのアンチリコイル制御に関する研究

正員 鈴木 英之 正員 田 中 進

Basic Research on an Anti-Recoil System of a Deepsea Riser

by Member Hideyuki Suzuki, Member Susumu Tanaka

Summary

When a drilling riser is operated, tension is applied to maintain configuration of the riser and protect it from collapse. In the emergency condition, for example drift off or drive off of drilling vessel, the riser is disconnected at top of the BOP which is placed on the sea floor. When disconnected, the riser starts to lift and recoil, and if the tension is not properly reduced the riser hits the vessel and destroy both the vessel and riser. If the tension is reduced too fast, riser can not reach the vessel and riser drops on to the sea floor and destroyed. An anti-recoil system is necessary to protect the riser and vessel from destruction and make the catching successful.

In this research response prediction system of disconnected riser is developed considering coupled response of riser and dynamic response of internal and external fluid. Vessel heave motion prediction system is also developed. An algorithm is developed to search catching timing from the both predictions of riser motion and vessel heave motion. To achieve successful catching, the catching timing must satisfy catching condition of no relative displacement, velocity and acceleration. Once the catching timing is found, riser disconnection timing is determined from the predicted riser motion. Feedback control is employed at the final stage of catching to adjust and absorb modeling errors and prediction errors and secure successful catching. Effectiveness of the developed algorithm is verified by simulation calculation.

1. はじめに

海洋石油や天然ガスの開発あるいは地球地殻の探査では、地層を安定させながら、海底下の深部まで掘削する必要がある。このため、ライザーを用いた泥水循環システムによる掘削が行われている。現在、海洋掘削の世界記録は水深 2300 m である。このような掘削に伴う問題の一つに、稼働中の掘削船が潮流に流されたり、位置保持システムの異常により暴走し、目標位置から離れてしまう問題がある。このような場合には、ライザーを海底部分で緊急に切り離し、ライザーと掘削船を破壊から護る必要がある。

ライザーは非常に細長い構造物であり、形状と姿勢を保ち、破壊から守るために通常張力が加えられているが、切

り離し後もこの張力を維持するとライザーは水面に向かって上昇してくる。これを放置すれば、ライザーは掘削船に衝突してライザー、船体ともに破壊してしまう。また、張力低減が早いとライザーを海底に落してしまい破壊させてしまう。これを防止するためにライザーに張力を加えるテンションナーをコントロールすることにより上昇速度を制御し、ライザーを船体に衝突させることなく捕捉、確保するアンチリコイルが必要になる。これまではテンションナー制御用の油圧系をあらかじめ調整しておき、定められた手順により操作し、ライザーの上昇速度と張力を落としていく方法がとられてきたが、あらかじめ調整を済ませておいたプログラムに沿って実行するため、予測できない浮体動揺などには対処が難しく、合理化の余地がある。⁽³⁾

本研究は、掘削水深が大水深に向かいつつあり、ライザーの挙動が複雑になる現状を考慮して、より合理的なアンチリコイル手法の基礎的検討を行った。

東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻
(株)三井造船昭島研究所

原稿受理 平成 11 年 7 月 5 日

秋季講演会において講演 平成 11 年 11 月 18, 19 日

2. アンチリコイルシステムの構想及び概要

緊急に切り離されたライザーは Fig. 1 に示すように、ライザー下端から泥水が流れ出しながら掘削船に向かって上昇してくる。一方、これを捕える浮体は動揺しておりこのような状況にあってもライザーを浮体に衝突させず、かつ落下させないように捕える必要がある。また、この際にテンショナーのワイヤーに弛緩が生じると、再度張力が印加される際にスナップ荷重が生じ破壊に至る可能性があり、これを防止することが必要となる。また、上昇するライザーに圧縮力が生じないようにすることもライザーを座屈とこれに続く破壊から守るために必要である。一連の操作をライザー上端と船体間の距離に相当する 10 m 程度以内、すなわちテレスコピックジョイントの可動範囲内に収めなければならない。

ライザーが破壊されないように捕捉されるために、次の条件を満たすことが求められる。

- 1) ライザーを捕える時点でライザーと船体の相対変位、相対速度、相対加速度がゼロとなる
- 2) アンチリコイルの過程を通じてライザーに過大な圧縮力が発生しない
- 3) テンショナーワイヤーにスラックを生じさせない
- 4) 浮体にライザーを衝突させない
- 5) ライザーを海底に落としたり BOP に衝突させない。

本研究では次のようにアンチリコイルアルゴリズムを考えた。下端で切り離したライザーが内部の泥水を流出させながら上昇してくるので、ライザーの上昇挙動を求める。次に、浮体の動揺を予測し、両者の予測結果から上昇してくるライザーと浮体の動揺が上記条件を満たす切り離しタイミングを探るというものである。このため、次の項目について検討を行った。

- 1) 浮体ヒープ運動を予測するプログラムを作成した。これは DARMA (Deterministic Auto Regressive Mean Average) で浮体運動を表現し、このパラメータを逐次型最小自乗法により推定するものである。
- 2) 泥水を考慮したライザー挙動シミュレーション法を開発した。緊急切り離し時には、ライザー内部の泥水が海水中に流れ出しながらいザーは上昇してくる。そのため、泥水の挙動を考慮したシミュレーション手法の開発を行った。これにより切り離し後のライザーの上昇運動を計算する。
- 3) 現在から将来にわたる浮体の運動予測結果と、将来にある時点において切り離したライザーの上昇挙動を比較して、捕捉条件を満たす時点を探り、その捕捉時刻に対応する切り離し時刻を求め、その時刻が来たら切り離しを実行するものである。

Anti-Recoil of Disconnected Riser

Fig. 1 Disconnection of riser.

ライザー計算モデル

基準：平衡状態

力学モデル

Fig. 2 Analysis model for riser dynamics.

アンチリコイルアルゴリズムの概念を図にしたものを Fig. 19 に示す。

3. ライザー上昇挙動計算プログラム

ライザーの挙動を予測するために、有限要素法によるラ

ライザー挙動解析プログラムを作成した。このプログラムでは、Fig. 2 に示すように、ライザーを棒要素によりモデル化した。また、泥水についても圧縮性を考慮して、棒要素によりモデル化した。ライザー下端から出た泥水は直ちに海水中に拡散してライザー管内の泥水質量は減少し、泥水柱下端に作用する圧力はライザー下端の水圧に一致するものとした。ライザーと泥水の連成は相対運動にともなう摩擦力を通じて行われるものとしている。ライザー内径に比べて変位が大きく、流れは定常状態に達しているとみなして、相対速度の自乗に比例する摩擦力を考慮した。泥水内には摩擦力に等価な圧力損失が生じる。外部流体とライザー管の間についても相対速度の自乗に比例する摩擦力を考慮した。今回の検討では、全長 2500 m のライザーを 20 要素 21 節点に分割して検討した。モデル化の要点を次に示す。

- ① ライザー管から出たマッドについては、速やかに海水に拡散する。
- ② マッドカラムが下方に変位し、ライザー管から流出すると、この重量だけマッドカラムを押し上げる力が減少するので、これをばねと考える。
- ③ マッドの流れは運動中も定常状態にあると考える。
- ④ ライザーが上に変位するとその分マッドがライザーから出て海水と入れ替わり重量が減少して、マッドを押し下げる力が減るので、これもばねと考える。
- ⑤ ライザー及びマッドカラムが上に変位すると、それぞれの下端面に作用している、両者を持ち上げようとする水圧による力が減少するので、下端面が下向きに引張られる。これもばねと考える。

得られた運動方程式は Newmark β 法によって時間積分して応答を求めた。計算では時間増分を 0.01 秒とした。今回計算に用いたライザーのデータを Table 1 以下に示す。外部流体とライザー間の摩擦力の評価には次式を用いた

$$f_0 = \frac{1}{2} \rho_w u_0^2 C_d \pi D$$

ここに、 D はライザー外径、 ρ_w は海水の密度、 u_0 はライザーと外部海水との相対速度、 C_d は抗力係数である。泥水とライザー間の摩擦力の評価には次式を用いた

$$f_i = \frac{1}{2D} \lambda \rho_m u_i^2 A$$

ここに、 λ は摩擦係数、 ρ_m は泥水の密度、 u_i は泥水とライザーの相対速度、 A は泥水断面積である。この式はダルシー・ワイズバッハの式を摩擦抗力に直したものである。

3.1 ライザーの周波数応答特性

ライザー挙動解析プログラムを用いてライザーの基本応答特性として、ライザー上端に単位振幅の正弦波の強制振

動を加えライザー下端部変位の周波数応答を求めた。泥水の効果に注目して以下の 5 ケースについて計算を実行した。計算では Table 1 に示した値を標準値として用いている。

- ① 内部流体粘度ゼロ、外部流体標準粘度、ライザー重量は標準
- ② 内部・外部ともに標準の粘度、ライザー重量は標準
- ③ 内部流体粘度ゼロ、外部流体標準粘度、ライザー重量に泥水重量 50% 付加
- ④ 内部流体粘度ゼロ、外部流体標準粘度、ライザー重量に泥水重量 100% 付加
- ⑤ 内部流体粘度 10 倍、外部流体標準粘度、ライザー重量は標準

以上のケースについて計算を行った結果を Fig. 3 に示す。最低次のピーク周波数を求めるとそれぞれ次のようになった。

周波数	3.8 rad/sec
周波数	3.8 rad/sec
周波数	3.3 rad/sec
周波数	2.9 rad/sec
周波数	3.6 rad/sec

泥水の粘性を考慮することにより、周波数応答のピーク高

Table 1 Riser data for calculation.

ライザー総質量	1750 t
ライザー水中重量	750 t
ライザー/マッドカラム全長	2500 m
ライザー内径	0.368 m
ライザー外径	0.417 m
ライザーヤング率	2.1×10^{11} Pa
マッド体積弾性率	2.1×10^9 Pa
海水密度	1.025×10^3 kg/m ³
マッド密度	1.100×10^3 kg/m ³
ライザー/海水間摩擦係数	0.010
ライザー/マッド間摩擦係数	0.030
張力(上端引張り力)	10.7×10^6 N

Fig. 3 Frequency response of riser.

さかなり押さえられていることがわかる。また、内部流体の粘度が大きい場合にはピーク周波数が小さくなる傾向にあるので、内部流体をライザーに対する付加質量とみなす近似が成り立つが、今回計算に用いた程度の粘性ではその量は小さい。

3.2 ライザーの上昇特性

切り離れたライザーに張力を加え続けると、ライザーは上昇を続け、浮体に衝突してしまうので、適切に張力を下げる必要がある。そこで、いくつかの張力低減パターンを用意し、この中から、ライザーに過大な圧縮力を発生させずかつ捕捉に望ましい高さまで上昇するものを抽出した。浮体動揺の予測から浮体は最大で2m程度下がってくることが分かる。したがって、テレスコピックジョイントのストロークから、ライザー捕捉のためにはライザーは8.5~10m程度上昇して下降することが求められる。そこで、張力低減パターンとして以下のようなケースについて

計算を行ったライザーの上昇挙動を Fig. 4~17 に示す。各ケースについてライザーの上昇挙動、張力低減の様子、ライザーの節点間に生じる伸びを張力および圧縮力の指標として示した。

Case 1: 直線的に 8.36 秒間で張力を 0 にする

$$f = 10.7 \times 10^6 - 1.28 \times 10^6 t$$

Case 2: 直線的に 9.55 秒間で張力を 0 にする

$$f = 10.7 \times 10^6 - 1.12 \times 10^6 t$$

Case 3: 直線的に 11.15 秒間で張力を 0 にする

$$f = 10.7 \times 10^6 - 0.96 \times 10^6 t$$

Case 4: 上に凸な 2 次関数で張力を減少させる

$$f = 10.7 \times 10^6 - 10.7 \times 10^4 t^2$$

Case 5: 下に凸な 2 次関数で張力を減少させる

$$f = 3.302 \times 10^4 (t - 18)^2$$

Case 6: コサインカーブで張力を減少させる

Fig. 4 Displacement of riser top and riser tension (Case 1).

Fig. 6 Displacement of riser top and riser tension (Case 2).

Fig. 5 Elongation of riser (Node 4-5, Node 9-10, Node 14-15; Case 1).

Fig. 7 Elongation of riser (Node 4-5, Node 9-10, Node 14-15; Case 2).

Fig. 8 Displacement of riser top and riser tension (Case 3).

Fig. 11 Elongation of riser (Node 4-5, Node 9-10, Node 14-15; Case 4).

Fig. 9 Elongation of riser (Node 4-5, Node 9-10, Node 14-15; Case 3).

Fig. 12 Displacement of riser top and riser tension (Case 5).

Fig. 10 Displacement of riser top and riser tension (Case 4).

Fig. 13 Elongation of riser (Node 4-5, Node 9-10, Node 14-15; Case 5).

Fig. 14 Displacement of riser top and riser tension (Case 6).

Fig. 16 Displacement of riser top and riser tension (Case 7).

Fig. 15 Elongation of riser (Node 4-5, Node 9-10, Node 14-15; Case 6).

Fig. 17 Elongation of riser (Node 4-5, Node 9-10, Node 14-15; Case 7).

$$f = 5.35 \times 10^6 \left\{ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{7.5}t\right) \right\}$$

Case 7: 3次関数で張力を減少させる

$$f = 5.07 \times 10^4 t^3 - 0.57 \times 10^6 t^2 + 10.7 \times 10^6$$

切り離したライザーは下端からは泥水を流れ落しながら上昇してくる。計算モデルでは、ライザーを20分割しており、図に示す節点4-5、9-10、14-15間の伸びはライザー上部、中間、下部に生じている軸力を示しており、負の値はライザーに圧縮力が生じていることを示している。短時間圧縮力が発生することは問題無いものの、定常的に圧縮力を示すようになるとライザーに座屈が生じて破壊につながるのを避けなければならない。いずれのケースにおいても切り離した後時刻15秒あたりから圧縮力が生じている。ライザー上端の変位量が望ましいものとなり、ライザーに生じる圧縮力が十分に小さいとの観点から判断すると初期段階で早めに張力を低減するCase 5が最も望ましいこと

が分かる。そこで、アンチリコイルにはCase 5の張力低減パターンを使うこととした。

4. 浮体動揺予測プログラム

アンチリコイルではライザーが切り離されてから浮体まで上昇してくるまでに数秒程度の時間を要する。切り離しのタイミングを探るためには、10秒程度先までの動揺予測を行う必要がある。このため、浮体のヒープ運動を表現する数値モデルとして確定論的自己回帰モデルDARMA (Deterministic Auto-Regressive Moving Average) を用いた。次に示すのはdステップ先の予測をするためのモデルである。

$$\begin{aligned} y(t) &= \theta_1 y(t-d) + \theta_2 y(t-d-1) + \dots \\ &\quad + \theta_n y(t-d-n+1) \\ &= \phi(t-d)^T \theta \end{aligned}$$

ここに、 $y(t)$ は時刻 t における信号値、 $\phi(t)$ は時刻 t か

ら n ステップ前までの信号値からなるベクトル, θ はパラメータ。さらに, このモデルのパラメータ推定をリアルタイムで行い, 動揺の予測を行うため, 逐次型最小二乗法アルゴリズムを用いた。このアルゴリズムによりパラメータは時々刻々改善してゆくが, 過去の値を全て使っていることになるので, 定期的のリセットが必要になる。

$$\begin{aligned}\hat{y}(t) &= \phi(t-d)^T \hat{\theta}(t-1) \\ \hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) + P(t-d) \phi(t-d) \\ &\quad [y(t) - \phi(t-d)^T \hat{\theta}(t-1)] \\ P(t-d) &= P(t-d-1) \\ &\quad - \frac{P(t-d-1) \phi(t-d) \phi^T(t-d) P(t-d-1)}{1 + \phi^T(t-d) P(t-d-1) \phi(t-d)}\end{aligned}$$

ここに, $\hat{y}(t)$ は動揺予測値, $\hat{\theta}(t)$ はパラメータの推定値である。

この動揺予測アルゴリズムの性能を確認するために, 半潜式海洋構造物 ZANE BARNES が次式で表わされる ISSC スペクトルで表わされる波浪中にある場合について予測計算を実行した。

$$S_I(\omega) = 0.11 \omega_1^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^{-5} \exp \left\{ -0.44 \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^{-4} \right\} H_s^2$$

ここに, $\omega_1 = 2\pi/T_1$ であり T_1 は平均波周期, H_s は有義波高。Fig. 18 に示す予測結果では 1 ステップ 0.01 秒として計算を実行している。20 秒以前は予測計算立ち上げの部分でここは無視する。実線は実際の値であり, 細線はそれぞれ 2 秒, 4 秒, 6 秒, 8 秒前に予測した値であり, 予測結果は良好であるが, 予測時刻と予測先時刻が離れるにしたがって精度は低下している。本結果に関してはリセット行わずに計算を進めており, 過去の値を全て用いて予測を行った結果となっている。

5. 切り離しタイミング決定アルゴリズム

ライザーに負担を掛けない望ましい切り離し方式とその場合の上昇挙動が得られた。また, 浮体動揺予測アルゴリズムによって浮体動揺が予測されている。これらに基づいて望ましい切り離しタイミングを探るアルゴリズムを図にしたものを Fig. 19 に示す。このアルゴリズムは現時点から将来のある時刻に切り離したライザーの上昇挙動とあらかじめ予測された浮体運動が, 先に掲げた条件を満たすかどうかを切り離しタイミングを変えながら探し, 望ましい切り離しタイミングを探るものである。条件を満たす切り離しタイミングが複数得られる場合には, 動揺予測のより正確な, 最も切り離しタイミングの早い時刻を選ぶものである。

6. ライザー捕捉直前制御フィードバック制御

本アンチリコイル法の主たる部分はあらかじめ決められた手順従って張力を低減されたライザーの上昇挙動と, 予測された浮体運動のすり合せにより, ライザー切り離しタイ

Fig. 18 Predicted heave motion of vessel.

Fig. 19 Determination of riser disconnection timing.

ミングを探り捕捉することにある。しかしながら, ライザーの上昇挙動, 浮体動揺予測ともにモデル化誤差や予測誤差を含むため, 望ましい捕捉特性が得られない可能性がある。そこで, ライザー捕捉直前にライザーと浮体運動の相対運動に対してフィードバック制御を行い, 予測誤差を吸収して捕捉を滑らかに行う機能を付加した。具体的には浮体側とライザー上端の間にバネとダッシュポットに相当するフィードバック制御を行った。

フィードバック制御については試行計算を行った結果, 浮体とライザー上端の距離が 3 m まで近づいたところから機能させ, さらに, 距離が 0.5 m になった時点で機能を停止するものが望ましい結果となることが分かった。このとき, 変位に比例する制御力は変位 1 m に対して 25 tf 程度の力に設定して調整した。

7. アンチリコイル計算結果

ライザー管に過剰な圧縮力を生じさせず, かつ動揺予測

Fig. 20 Flowchart of anti-recoil system.

が可能な時間内にライザーが上昇してくる切り離し方式の中から、浮体の動揺の大きさを考慮してライザーの捕捉に望ましい高さまで上昇してくる Case 5 を選び計算に用いた。アンチリコイルシステムの全体フローチャートを Fig. 20 に示す。今回選んだ切り離し方式では、ライザーは 6 秒以内に十分に上がり下降に入るものである。Fig. 21 にフィードバック制御を行った場合のライザー上端の運動と浮体の捕捉点の運動を示す。14.5 秒の時点でライザー捕捉に成功している。なお、ライザー上端の運動を示す線と浮体の捕捉点の運動を示す線が若干交差しているが、これはライザー捕捉機構の可動範囲を考慮して、捕捉を確実にするために設定したものであり、許容範囲に収ま

Fig. 21 Simulated results of anti-recoil with feed back control.

っている。補足時の相対速度は 0.15~0.20 m/sec 程度であり補足作業の一つの目安である 0.50 m/sec 以内に収まっている。

8. 結 論

本研究では、ライザーを用いた大水深掘削において、緊急時にライザーを下端で切り離す際に生じるリコイルを管理して、上昇してきたライザーを破壊さず浮体で捕捉する手法の開発を行った。

逐次型最小自乗法を用いた動揺予測システムと、管内流体の挙動を考慮したライザー上昇挙動予測プログラムを開発した。その上で、ライザーに負担をかけない張力減少パターンを見出した。さらに、浮体動揺予測とライザー運動から滑らかにライザーを捕捉するタイミングを見付け出し、切り離しタイミングを決定するアルゴリズムを開発した。さらに、捕捉直前にフィードバック制御を導入することにより滑らかな捕捉を確実にものとした。以上の結果に基づいてシミュレーション計算を実施し、手法の有効性を確認した。

最後に本研究の一部は平成 10 年度東京大学工学部船舶海洋工学科の卒業論文の課題として野尻裕貴によって実施された。¹⁾

参 考 文 献

- 1) 野尻裕貴, “大水深ライザーの応答制御法の開発—アンチリコイル時の破壊防止—”, 東京大学工学部船舶海洋工学科 平成 10 年度卒業論文.
- 2) G. C. Goodwin and K. S. Sin, “Adaptive Filtering Prediction and Control”, Prentice-Hall, 1984.
- 3) R. D. Young, C. J. Hook, G. Karlsen and J. E. Miller, “Analysis and Design of Anti-Recoil System for Emergency Disconnect of a Deepwater Riser: Case Study”, OTC 6891, 1992.