講 演
 Lecture

圧密の激しい貯留層内部およびキャップロックでおきるライナー、ケーシングおよびスクリーン破壊問題に対する坑井モニタリング*

森 田 信 男**

(Received July 9, 2010 ; accepted November 2, 2010)

Analysis and monitoring of casing, liner and screen failure induced within and around geo-pressured compacting reservoirs

Nobuo Morita

Abstract : Thick and porous reservoirs induce significant compaction, resulting in screen and casing failures within the reservoir section and inducing casing tensile/shear failures in the cap rock section. Designing these wells based on the conventional API specification requires excessively high grade and heavy duty casing, resulting in low hydrocarbon productivity with a high cost. "Ultimate tubular string design concept" must be introduced to develop these fields within commercial feasibility. However, these concepts require reliable well monitoring to prevent accidents. Furthermore, well monitoring helps to improve modification of completion equipment to enhance productivity and to reduce downtime. This presentation provides a field example how a highly compacting reservoir has induced casing and screen failure and how the wells have been monitored to prevent accidents.

Keywords : Casing failure, Geopressured, Compacting reservoirs

1. はじめに

層が厚く孔隙率が高い貯留層の油・ガス生産においては、貯留層圧力が減圧すると激しい圧密を起こす。圧密のため貯留層内部ではケーシングがバックリングを起こし、またキャップロック内ではケーシングが伸び引っ張り破壊を起こす。内部に設置されたスクリーンは外部から激しい圧縮を受けるとスクリーンメッシュとベースパイプの接合部ではがれ出砂防止の機能を失う。

圧密の著しい貯留層の開発ではスクリーンの破壊、ケーシングの破壊が起きるとその後出砂が起これば海上生産設備を破壊する。大きなチョーク・石灰岩貯留層では孔隙率が大きい場合圧密が激しくケーシングの破壊がみられる。国内の操業ではメタンハイドレート貯留層は圧密が激しいことが予測される。このような貯留層を開発するには極限設計という概念が必要である。極限設計とは従来のような API 規格に基づいたケーシング、スクリーンの降伏強度設計ではなく、API 規格で指定した降伏強度の 5-10 倍程度の伸縮までも耐えるような設計法である。上に記した貯留

層では API 規格内で設計しようとする超ハイグレイド、超重量の鋼管が必要となる。超重量の鋼管を使用すると生産性は低下し、また経済採算性がとれない。このような場合には鋼管の降伏強度を超えても岩盤自体に強度があるので岩盤自体に荷重を担わせ、坑内の圧壊・破壊を操業に支障をきたさない程度に収めていく極限設計が大切となる。

これらの貯留層の操業には異常が起きる前に坑底圧力測定、出砂レート測定、管内侵食測定で異常を検知し、生産レートをモニターすることが事故を未然に防ぐ大事な要素となっている。圧力測定、出砂測定は坑内の数点で行われ、異常があったらバルブをシャットインする。この講演ではキャップロック内でどのようなメカニズムでケーシングが激しい破壊を起こすかの解析と、破壊を探知・モニターする方法を説明する。

2. 対象貯留層の特徴・地質概要

Magnolia Field は現在 32,600 stbd, 100 MMscfd の生産量を持つフィールドで、メキシコ湾中央海水深度 4,673 ft のオフショアに位置し、テンションリグプラットフォームで生産されている。

この地域にはいくつかの同様な貯留層が存在し、図 2 の地震探索図が示すように貯留層が岩塩ドームの上層部に位置する。

貯留層は 100-400 ft と厚く、しかし図 3 に示すように断

*平成 22 年 6 月 10 日、平成 22 年度石油技術協会春季講演会開発・生産シンポジウム「坑井モニタリング技術とデータ活用法」で講演
 This Paper was presented at the 2010 JAPT Development and Production Technology Symposium entitled "Well surveillance and data interpretation for reservoir management" held in Fukuoka, Japan, June 10, 2010.

** 早稲田大学 Waseda University

Magnolia Location

図1 Magnolia Reservoir の海洋マップ

図2 Magnolia 地域の地震探査

図3 断層で分断された貯留層

図4 坑内計測およびモニター機器

層で分断されておりそれぞれのセクションは密閉され圧力減退によるコミュニケーションはない。それぞれの貯留層コンパートメントは幅が1,250–2,500 ftであり、厚さと幅の比が250:1,800という貯留層としては異常なほど厚さに対して幅が小さい。

このように層厚が幅に対して異常に大きな貯留層では通常考えられない問題が起きる。貯留層が、箱に圧力をかけたように天井部がたわみキャップロックが貯留層内部に引きずり込まれたような形になる。このような現象をルーフ効果（Roof effect）と呼び、天井部のキャップロックの垂直応力が非常に減少する。またキャップロック内の水平地圧もある程度変化する。したがってキャップロック内でも垂直歪みは引張り歪みになり水平歪みは圧縮歪みとなる。ルーフ効果に対して一般の圧密は一軸圧密（Uniaxial compaction）と呼ばれ、層厚が幅に対して非常に小さいので貯留層が垂直方向に均質に圧密を起こし、したがって横方向の歪み成分は零となる。キャップロックは貯留層の圧密とともに重力のため垂直に移動するだけで横方向の歪みは零、縦方向の歪みは海面まで徐々に小さな歪みを起こすだけである。キャップロック内の地圧変化は無視できるほど小さい。貯留層内の圧密はルーフ効果があると屋根が支えるので一軸圧密の場合より多少小さくなる。この貯留層は孔隙率が30%もあるため圧密が激しく、したがって貯留層内、キャップロックで多種の生産障害を引き起こす。

3. 坑井モニタリング

この貯留層は当初から圧密が激しく、生産障害を引き起こすことが予測されたため坑内およびプラットフォーム上にはいくつかの計測装置が設置され異常をモニターしてき

図5 A4の坑底圧力、オイル生産レート、およびGOR

た。計測装置は一般に使用されている信頼性が高い装置で、斬新な計測装置はない。次の計測装置が装備されている。

- ・ ガス、油、水流量計
- ・ 圧力計、温度計（坑内の数点、プラットフォーム上数か所）
- ・ 出砂計

図4は坑内図で、計測装置は15,000 ftの坑底、5,000 ftの坑内安全バルブの上層部、およびウェルヘッドに取り付けられている。

出砂計はプラットフォーム上のフローラインのエルボウ下部に取り付けられている。坑井は出砂が予測されていたのでスクリーン付きのフラック & パックで仕上げられているが、スクリーンが侵食で破れることを予測して出砂計測装置が設置されている。これらのデータは図5に示されているように連続的に取られているが詳細は守秘義務があるので公開できない。坑井において問題が生じた際、坑内で次のような計測がなされた。

- ・ 深度ごとの流量測定
- ・ Multi-filler によるケーシング径の測定
- ・ ケーシングジョイントの長さ変化の測定

4. 生産障害

3割の坑井で次のような生産障害があらわれた。障害には2つの形態がみられた。

Case A：ドローダウンは2,000–3,000 psi程度であるが坑底圧が6,000–3,000 psiになると突然出砂がみられた。砂が坑内を満たし坑内をシャットダウンした後の坑底圧力はその時のガス層圧になる。

Case B：ドローダウンは2,000–3,000 psi程度であるが坑底圧が6,000–3,000 psiになると突然出砂がみられた。砂が坑内を満たし坑内をシャットダウンした後の坑底圧力は生産開始時のガス層圧になる。

Case Aの生産障害は激しい圧密を引き起こしている油ガス層でよくみられる現象で圧密でスクリーンが圧縮されるにつれてメッシュとベースパイプの接合部分が破れ、グラベルパックが流れ出し、フォーメーションサンドが流れ出る障害である。しかしCase Bの障害は坑井をシャットダウンした後に坑底圧が元の貯留層圧に戻るという非常に

図 6A 一軸圧密を引き起こしている貯留層周辺の地圧変化

図 6B ルーフ効果のある貯留層周辺の地圧変化

図 7 キャップロック内の応力変化

不思議な現象で、このような現象は世界ではまれである。

5. 現象の解析

貯留層周辺の圧密後の地圧変化について一軸圧密の場合 (Case A) とルーフ効果のある場合 (Case B) の違いを解析する。図 6A および 6B が結果である。一軸圧密の場合は貯留層内の地圧は激しく変化するがキャップロック内の地圧は垂直・水平地圧ともそれほど変化はない。しかしルーフ効果のある圧密後の地圧変化は貯留層周辺に大きな変化をもたらす。特に垂直地圧の減少は激しい。地圧が減少するとはキャップロックが垂直方向に引っ張り歪みを引き起こしている。

Case A

$R=10,000$ ft, Depth = 10,000 ft, Reservoir thickness = 250 ft
 $Er=240$ kpsi, $\nu_c=0.3$, $\nu_r=0.2$, Gr/Gc=0.1,
 Reservoir depletion = 3,000 psi

Case B

$R=1,600$ ft, Depth = 10,000 ft, Reservoir thickness = 250 ft
 $Er=240$ kpsi, $\nu_c=0.3$, $\nu_r=0.2$, Gr/Gc=0.1,
 Reservoir depletion = 3,000 psi

図 7 は Case B のようなルーフ効果がある場合に貯留層岩石のヤング率を変化させた場合の地圧変化を計算した結果である。垂直応力は引張り側に大きく変化し、水平地圧は変化が複雑である。

いまこの貯留層で断層で密閉された 1 つの貯留層セクションについて解析を行う。図 8A および 8B は圧密 8 kpsi, ドローダウン 2 kpsi 後の地圧および地層の伸び縮み

図 8A 圧密後の地圧

図 8B 圧密後の地層の歪み

図 9A キャップロック内に薄いガス層があった場合の地圧変化

図 9B キャップロック内に薄いガス層があった場合の地層の歪み

図10 ケーシング・スクリーンの破壊

を計算した結果である。

断層で密閉された1つの貯留層セクションの貯留層条件：

貯留層深度， $D = 16,100$ ft

貯留層厚， $h = 200$ ft

貯留層ヤング率， $E_r = 2A$ 砂層

上部キャップロックヤング率， $E_c = 500$ kpsi

下部キャップロックのヤング率， $E_c = 800$ kpsi

貯留砂層のポアソン比， $\nu_r = 0.36$

坑井半径， $R_w = 0.3542$ ft

貯留層半径， $R = 2500$ ft

排油半径， $R_d = 800$ ft

減退圧 = 8 kpsi

ドロウダウン = 2 kpsi

この貯留層の他の貯留層と異なる点は (A) この貯留層は深度が深いにも関わらず周辺が密封状態であった為孔隙圧が地圧に近く、その差は 500–1,500 psi 程度しかなかった、(B) したがって貯留層が圧密を起こすとキャップロックがルーフ効果で引っ張り気味となり垂直地圧が孔隙地圧にさらに近付く。図 8A に示す地圧計算ではキャップロック内の垂直地圧は孔隙圧にほぼ近いものになっている。また図 8B の地層の歪みでは貯留層内では 6.5% の垂直歪みを起こしキャップロック内では 0.3% の引っ張り歪みを起こしている。

この貯留層では貯留層から 1,000 ft 上部までルーフ効果により引っ張り歪みが引き起こされている。図 8B はキャップロックが均質である場合のキャップロックの歪みであ

る。しかしキャップロック内に薄いガス層がある場合はどうであろうか。キャップロック内に薄いガス層を挟みそれが引っ張り気味になると、その薄いガス層内では有効力が零に近づくとも岩石のヤング率は周辺のヤング率の 1/10 程度にまで下がり引っ張り歪みも周辺の 10 倍程度に大きくなる。図 9B は歪みの計算結果であるがキャップロック内の薄いガス層では層の縦歪みが 5% 程度まで上昇している。

キャップロック内に圧密を受けていない高圧薄層が存在する場合の貯留層条件：

薄層の貯留層からの距離， $d_1 = 100$ and 200 ft

貯留層深度， $D = 16,100$ ft

貯留層厚， $h = 100, 200,$ and 300 ft

貯留層ヤング率， $E_r = 2A, 2B,$ および 3A 砂層

上部キャップロックヤング率， $E_c = 500, 750,$ および 1,000 kpsi

下部キャップロックのヤング率， $E_c = 800, 1,200,$ および 1,600 kpsi

貯留砂層のポアソン比， $\nu_r = 0.36$

坑井半径， $R = 0.3542$ ft

排油半径， $R_d = 800$ ft

減退圧 = 5, 7, and 9 kpsi

ドロウダウン = 0 and 3 kpsi

坑井周辺の地層が図 9B のように引っ張り状態になるとケーシングはキャップロック内で引っ張り破壊を起こし、また貯留層セクションではケーシングがバックリングを起こしスクリーンも破れる。パーフォレーションを打っていない上部の薄いガス層部でケーシングが引っ張り破壊すると、高圧ガスがチュービングとケーシングのアニュラス部のグラベル内を流れスクリーン上部に大きな圧力がかかる。また坑底圧力と上部ガス層との高圧力差のために上部スクリーンが破壊する。

6. 対処法および結論

極限設計では歪みを鋼管の降伏値の 10 倍程度まで許容して設計を行うといってもそれは究極の場合で、なるべくなら API 規格の数倍程度にとどめるのが望ましい。それには次の方法で歪みを緩和する。

- 図 8A–9B で坑井の傾斜角を増加すると坑井軸方向の伸縮は低下する。高傾斜にすると圧密によるケーシング、スクリーンの伸縮を緩和することが可能である。
- 鋼管はグレイドを上げると降伏強度は増加するが一般にもろくなり小さな歪みで破壊する傾向にある。極限設計では最終的には荷重を地層岩石に担わせて坑内破壊を防ぐ概念であるので、降伏強度を上げることよりケーシングの歪み強度を上げることが大事となる。すなわち大きく伸縮しても形を保つ設計法が求められる。
- 極限設計ではある程度破壊が起こることが予測されるので、坑内モニターが万全である必要がある。坑

内・プラットフォーム上に、圧力・温度・流量計、出砂計測装置を装備する必要がある。現在開発中のファイバーによる連続圧力・温度計測装置、圧密測定ファイバーなどは将来多用されるであろうと考えられる。

- (D) 坑内モニターは事故を未然に防ぐだけでなく、坑内で起きつつある異常を感知するのに必要で、その解析結果から坑内の改修、操業方法の見直しが行われ、生産完了まで事故を未然に防ぎ安全操業につなげていくことが可能である。

SI 単位換算係数

$$\text{psi} \times 6.894757 \text{ E} + 3 = \text{Pa}$$

$$\text{ft} \times 3.048 \text{ E} - 01 = \text{m}$$

$$\text{stbd} \times 1.589874 \text{ E} - 01 = \text{m}^3$$

引 用 文 献

- Calwarf, G., Burton, R. C., Eaton, L. F., Hodge, R. M. and Blake, K., 2009 : Lessons Learned on Sand-Control Failure and Subsequent Workover at Magnolia Deepwater Development. *SPE Drilling & Completion Journal* (March 2009), 144–156.
- Morita, N. and Fuh, G. F., 2009 : Parametric Analysis of Stress Reduction in the Caprock Above Compacting Reservoirs. *SPE Drilling & Completion Journal* (December 2009), 659–670.
- Procyk, A. D., Jamieson, D. P., Miller, J. A., Burton, R. C., Hodge, R. M., and Morita, N., 2009 : Completion Design for a Highly Compacting Deepwater Field. *SPE Drilling and Completion Journal* (December 2009), 642–658.