

高圧縮・高外圧・曲げ環境下での耐リーク特性に優れた油井管用特殊ねじ継手「KSBEAR」の開発*

川崎製鉄技報
34 (2002) 1, 21-28

Development of Premium Joint “KSBEAR” Bearable to High Compression, High External Pressure and Bending



高野 順
Jun Takano

知多製造所
商品技術部商品技術室
主査(主席掛長)



山口 正男
Masao Yamaguchi

知多製造所
商品技術部商品技術室
主査(課長補)



國重 秀範
Hidenori Kunishige

川鉄情報システム(株)
中部事業所
技術グループ

要旨

苛酷化する油井管の使用環境において、油井管の接続には耐リーク性に優れた、メタルトゥメタルシールを有する特殊ねじ継ぎ手の使用が一般化している。しかし、既存の特殊ねじ継ぎ手では性能面で対応困難な油井設計事例が増加している。特に圧縮、外圧、曲げ環境下での耐リーク性能の高い油井管特殊ねじ継ぎ手が強く望まれていた。川崎製鉄では、このような顧客の要求に応えるべく、従来の特殊ねじ継ぎ手の性能を大幅に超える、「KSBEAR」を開発した。新しいねじ形状の設計コンセプトによって、API クラス I を大幅に上回る性能を達成した。

Synopsis:

For the connection of oil well tubes used in an increasingly severer environment, special screw joints equipped with metal-to-metal seals, excellent in resistance to leakage, are generally used. However, there are increasing in number, stricter oil well designs whereto screw joints of conventional properties have become inapplicable any longer. Under the circumstance, oil well screw joints, having anti-leakage property, bearable specifically in an environment of the burdens of compression, external pressure and bending have become strongly demanded. To satisfy the above-mentioned demands of customers, Kawasaki Steel has developed “KSBEAR”, substantially exceeding the properties of conventional tubular joints. Through the unique and advanced designing concept of a new screw thread, the development of a screw joint outstandingly surpassing the level of API class 1 has been achieved.

1 緒 言

近年、油井開発および生産における採算性が重視されている。さらに、オイルメジャーの合併などが行われ、その結果コスト競争が激化している。これらにともない、油井の高深度化、傾斜井¹⁾や水平井の増加が進み、油井管の接続に用いられるねじ継ぎ手の使用環境も苛酷化している。

油井管特殊ねじ継ぎ手の評価方法は、API RP (American Petroleum Institute Recommended Practice) 5C5 に規定されている。最もランクの高いクラス I においても、試験条件は 40%PBYS (pipe body yield strength) の圧縮までであり、曲げ状態でのリーク試験は規定されていない²⁾。ところが最近石油会社が独自に規定している試験の中には、実際の使用環境を考慮し、80%PBYS の高圧縮や、39.4°/30m の曲げ (半径 43.7m に相当) を付加した厳しい条件が追加されるようになっている。このような試験条件では既存の油井管ねじ継ぎ手では対応が困難となっている。さらに、地球環境保護

の観点からガス井比率が増加しつつあり、耐リーク性能がより重要視される傾向にあることから、市場では既存の性能を大幅に超えた特殊ねじ継ぎ手が強く望まれている。川崎製鉄は、このような市場の要求にこたえるべく、API クラス I レベルを大幅に超える、高圧縮・曲げ・外圧リーク特性に優れた油井管用特殊ねじ継ぎ手、「KSBEAR」を開発した。本報告では、KSBEAR ねじの概要、FEA (finite element analysis) を用いた性能評価、ねじ性能評価試験方法と結果、生産技術について述べる。

2 油井管ねじ継ぎ手に求められる性能

2.1 油井における耐リーク性能

油井管を坑内へ降下する過程、また降下後の生産時に管およびねじ継ぎ手はさまざまな力を受ける。坑内への降下過程および降下後には、ねじ継ぎ手には管自重による引張り応力が作用する。また、坑壁からは外圧、管内側からは生産流体による内圧がかかる。

さらに、Fig. 1 に示す水平油井では、湾曲部において、内側では圧縮、外側では引張りの力が働く。さらに管が坑壁に接触したとき

* 平成13年9月20日原稿受付

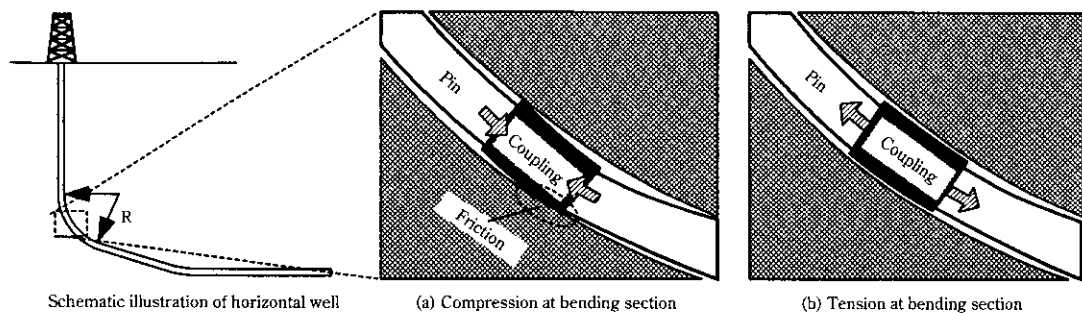


Fig. 1 Force to thread joint in well

に発生する摩擦により圧縮を受ける。一方、坑壁との摩擦から開放された際には再び引張りの力を受ける。したがって、油井での使用環境におけるねじ継ぎ手には、下の条件での耐リーク性能が求められる。

- (1) 圧縮・引張り
- (2) 外圧・内圧
- (3) 曲げ
- (4) (1)～(3)の複合荷重

2.2 ねじ接続の作業性

油井管を坑内へ降下する過程において周辺装置などにトラブルが発生した場合、管をリグへ引き上げるためにねじを緩める必要が生ずる。また、再度降下する際は再度ねじの締付けを行う。したがって、ねじ継ぎ手には、複数回の締付けに対する耐ゴーリング（焼付き）性能が求められる。近年、環境汚染防止の観点から、鉛などの重金属を含有しないグリーンドープ（環境保護型潤滑剤）が適用され始めており、従来にも増して耐ゴーリング性能が重要視されている。

さらに、降下作業の所要時間短縮のため、ねじの噛み違いの発生防止や作業効率性が求められている。

ねじ接続作業において求められる性能は以下のとおりである。

- (1) 耐ゴーリング（焼付き）性能
- (2) ねじ締付け作業の高効率

3 KSBEAR の特徴

KSBEAR の形状を Fig. 2 に、デザインの特徴を Table 1 に示す。

3.1 フックねじの採用

一般的な油井管特殊ねじ継ぎ手に用いられているモディファイドバットレスねじの形状を Fig. 3 に示す。モディファイドバットレスねじでは、継ぎ手に引張り、曲げ、外圧が作用した際に、ピンねじとカップリングねじが互いに管径方向に離れようとする力が生ずる。KSBEAR ではフックねじを採用することにより、引張り、外圧、曲げが作用した際にピンねじとカップリングねじが管径方向に離れようとする力を大幅に減少させるようにした。

3.2 スタビングフランク間隔の最適化

ピンとカップリングを締付けていく過程でガイドとなる面をスタビングフランクと呼び、締付けられた状態で接触する面をロードフランクと呼ぶ。ピンとカップリングを締付けた状態でスタビングフランク同士には隙間が空いている。圧縮が作用した際には、ピンとカップリングのロードフランクが離れる。90%PBYS の高圧縮が作用した際のねじの状態を FEA により検証した結果を Fig. 4 に示

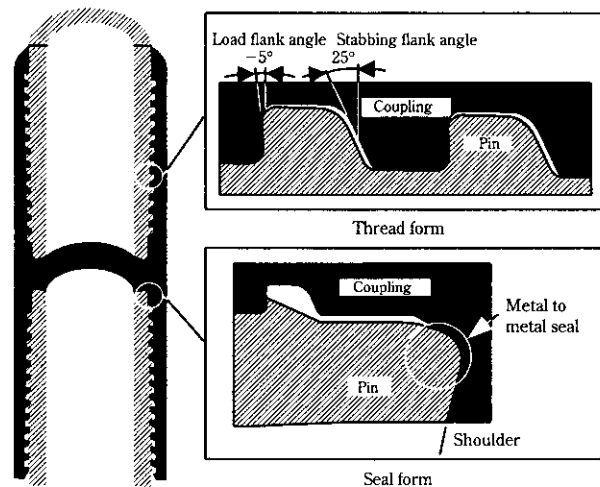


Fig. 2 KSBEAR design

Table 1 Design features and resulting improvement

Design feature	Resulting improvement
Negative load flank angle on thread	Increased tensile capacity
	Increased bending capacity
	Increased external pressure capacity
Optimized gap between stabbing flanks on pin and coupling threads	Increased resistance to compression loads
Different corner radius on load flanks on pin and coupling threads	Increased resistance to galling
Different load flank angles on pin and coupling threads	Increased external pressure capacity
	Increased resistance to galling
25° angle on thread stabbing flank	Fast make-up and increased resistance to cross threading

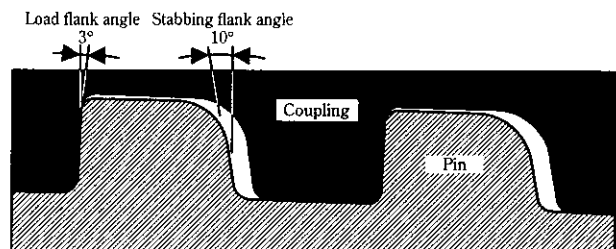


Fig. 3 Form of modified buttress thread

す。この結果から、KSBEAR はスタビングフランク同士が接触することにより、圧縮応力を緩和していることがわかる。モディファイドバットレスねじでは、ピンねじとカップリングねじのスタビングフランクの間隔が広いため、例えば 90%PBYS の高圧縮が作用し

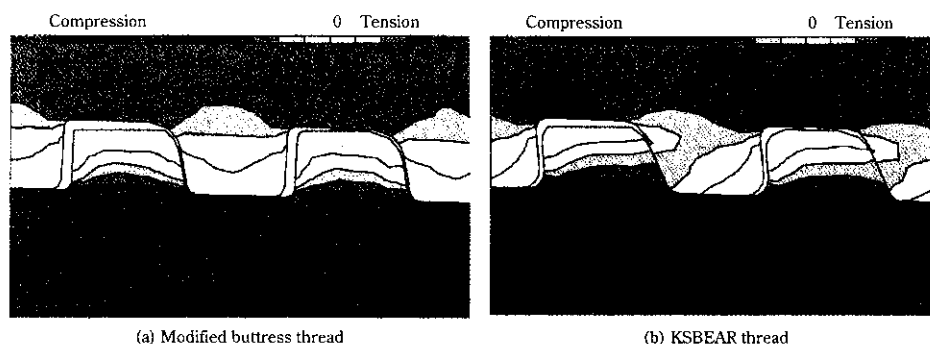


Fig. 4 Axial stress distribution by FEA at 90% PBYS compression (13 Cr-80 7" × 29.0 lb/ft)

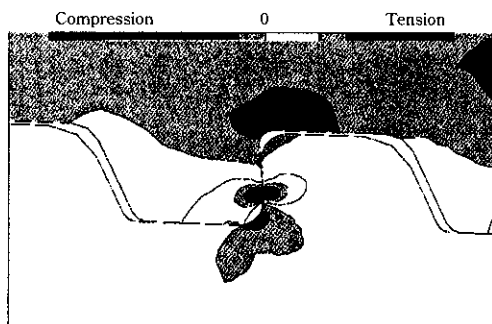


Fig. 5 Axial stress distribution by FEA at make-up (KSBEAR)

た際でもスタビングフランクは接触しない。したがって、パイプ軸方向に作用した応力はすべてシール部とトルクショルダーで受けることになり、シール部およびショルダー部に塑性変形が発生する。その後、引張り応力を受けた際にシール面圧が低下し、リークが発生する。一方、KSBEAR ではスタビングフランクの間隔を最適化し、高圧縮荷重を受けた際にスタビングフランクを接触させる。スタビングフランクにて全圧縮荷重の約 19% (80 ksi 7" × 32.0 lb/ft) における計算例) を受けることによって、シール部およびショルダー部への荷重を軽減し、ショルダー部およびシール部の塑性変形を大幅に抑制させる。その結果、圧縮後の引張り荷重下における耐リーク性能が大幅に向上した。

3.3 ピンねじのロードフランクコーナ円弧の最適化

3.1 節で述べたように、フックねじは耐リーク性能面で有利である。ところが、ねじの締付け時に、ゴーリングが発生しやすい欠点があった。ゴーリングが発生しやすい箇所は応力が集中するピンねじのロードフランク上部である。KSBEAR では、ゴーリング発生を防止するためにピンねじロードフランク上方のコーナ円弧を大きくすることにより応力を分散させた。その結果耐ゴーリング性能が向上した。

3.4 ピンとカップリングのロードフランク角度の最適化

3.3 節で述べたように、フックねじは、ピンのねじ山の上部に応力が集中した場合、その部分が破損しやすい。KSBEAR では、カップリングに対するピンのロードフランク角度を変更した。Fig. 5 に示す FEA による応力分布のように、最も強度の高いピンねじ下部に応力を集中させ、耐ゴーリング性能をさらに向上させた。

3.5 25° のスタビング角度

油井でのねじ接続では、まず、吊り上げていたピンを下ろし、カ

ップリング内に挿入する。このとき、ねじの噛み違いが生ずると作業性が大きく低下してしまう。KSBEAR では、バットレスモディファイねじでは 10° であったスタビング角度を 25° とし、ねじ接続時の作業性を高めた。

4 FEA モデルの構築

FEA は、物理試験におけるねじ継ぎ手の弾塑性変形量やシール部の接触面圧を定量的に把握するための有効な手段である。しかし、高圧縮・曲げ・高外圧など、これまでに経験のない過酷な条件での物理試験には、従来の FEA モデルでは十分に対応できない。そこで、以下の 2 つのモデルを構築した。

4.1 連続締付けモデル

リーク試験は、複数回数に及ぶ締付けの後に実施される。そのため、締付け・緩めを連続して行った時の管軸方向および径方向の歪量の変化を知る必要がある。ところが、従来モデルでは単一の締付けの解析しかできなかった。今回開発したモデルでは Fig. 6 に示すように、カップリングのある領域に熱歪を与えてパイプ軸方向に伸縮させることにより、ねじの締付け・緩めをモデル化した。締付け回数による軸方向歪と円周方向歪における FEA による計算値と実測値との比較を Fig. 7 に示す。また、比較位置を Fig. 8 に示す。新しい FEA モデルによる計算値と実測値はほぼ一致しており、このモデルの精度が高いことがわかる。

4.2 曲げモデル

曲げ試験を解析するための FEA は従来ほとんど類例がなかった。曲げ荷重は非軸対称荷重であるため、通常の軸対象モデルでは計算不可能である。曲げを解析するにはモデルの 3 次元化が必要だが、モデル構築の負荷が大きく、計算時間が長いという点で、3 次元での計算は実用的でない。そこで、今回、非線型の非軸対称変形を許す軸対称要素を用いることにより、軸対称モデルのままで 3 次元の解析が可能な曲げモデルを構築した。この要素は周方向に独立した節点を持ち、各節点で力の釣り合い式から節点変位が算出される。任意の点の変位は次の式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} u_r \\ u_z \\ u_\theta \end{Bmatrix} = \sum_{m=1}^M H^m(g, h) \left(\sum_{p=1}^{p+1} R^p(\theta) \begin{Bmatrix} u_r^{mp} \\ u_z^{mp} \\ 0 \end{Bmatrix} + \sum_{p=1}^P \sin p\theta \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_\theta^{mp} \end{Bmatrix} \right) \dots (1)$$

ここで、 u_r^{mp} 、 u_z^{mp} 、 u_θ^{mp} は、それぞれ、 $\theta = \frac{\pi(p-1)}{P}$ での半径方向、軸方向、周方向の変位成分、 $H^m(g, h)$ は $\theta = 0$ での $r-z$ 面内挿関数、 $R^p(\theta)$ は周方向への内挿関数、 M は要素内節点数、 P は周方向に持つ節平面数である。

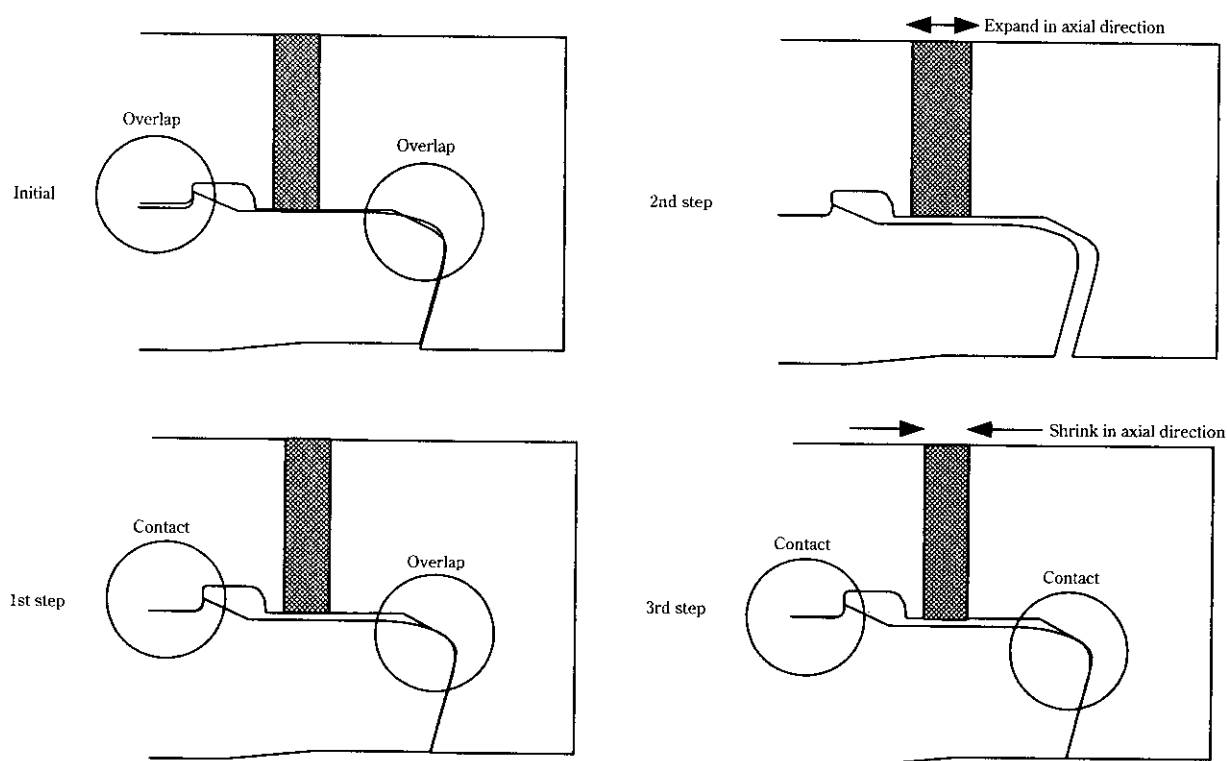


Fig. 6 Make-up model in FEA model

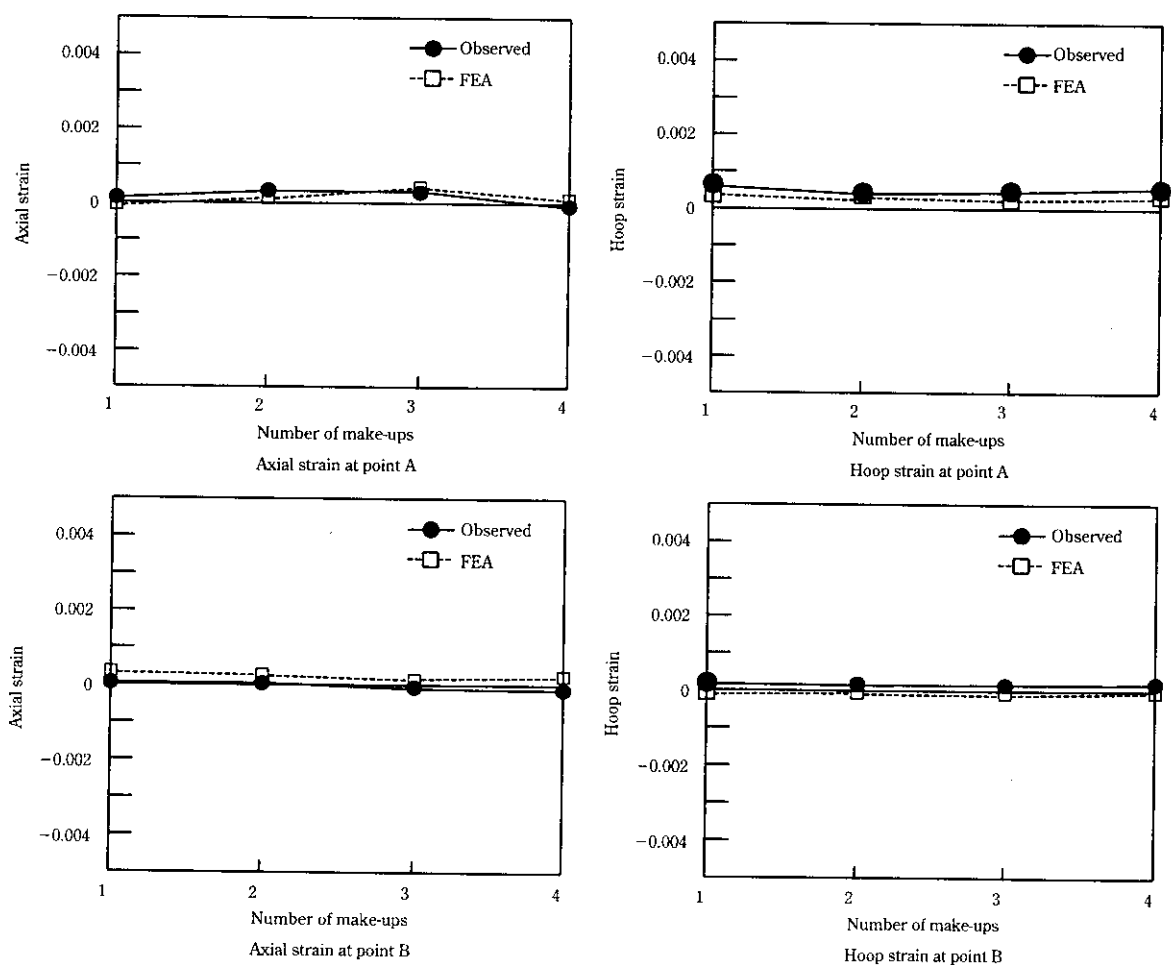


Fig. 7 Change in strain by number of make-ups

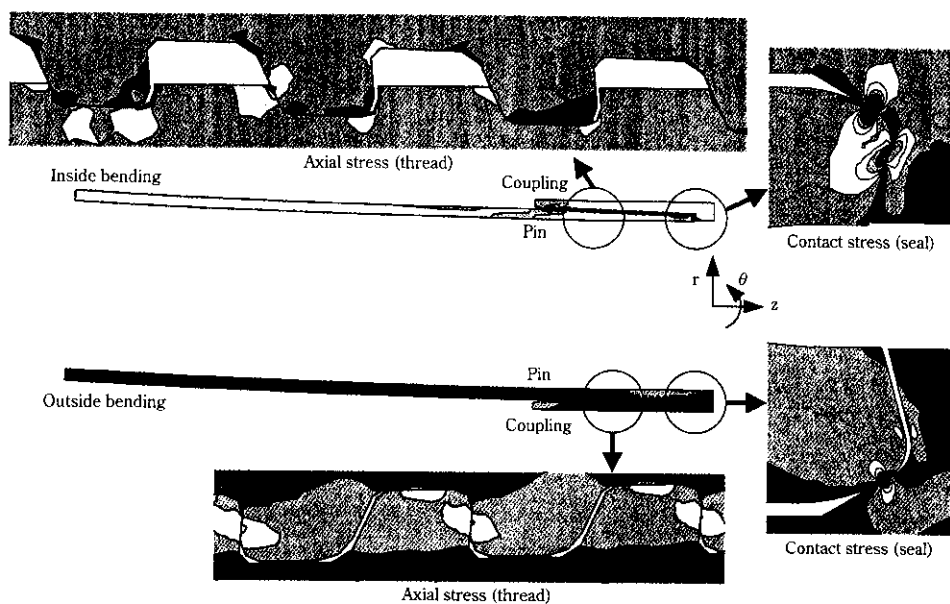


Fig. 9 FEA for 39.4°/30 m bending (80 ksi 5-1/2" × 17.0 lb/ft)

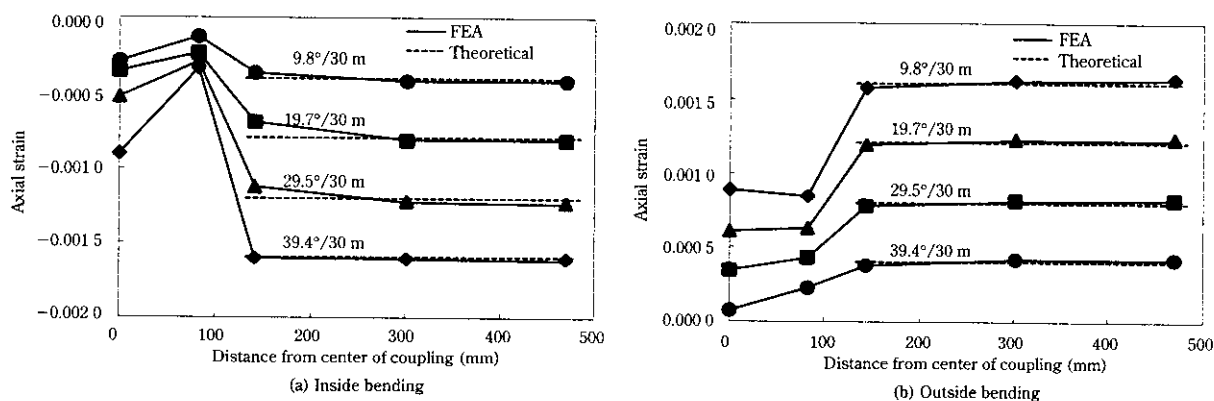


Fig. 10 Axial strain at bending (80 ksi 5-1/2" × 17.0 lb/ft)

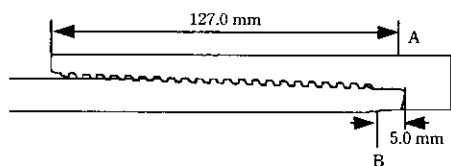


Fig. 8 Evaluated point for stress at make-up

曲げ荷重は、曲げ量に相当する曲げモーメントをピン端部に与えた。計算結果を Fig. 9 に示す。今回構築した曲げモデルと理論値の比較を Fig. 10 に示す。新しく構築した FEA モデルによる計算値と理論値はよく一致している。

5 KSBEAR ねじ性能評価試験

油井管用ねじ継手の評価方法として API RP 5C5 が規定されている。最近の傾向として、曲げ試験、高圧縮側の試験が追加要求されることが多い。

あるオイルメジャーにより要求のあった評価試験方法の例と、KSBEAR による試験実施結果について述べる。

5.1 試験方法

対象試験材のグレード・サイズと試験体の組合せを Table 2 に示

す。また、試験手順を Table 3 に示す。この試験の特徴は以下の通りである。

- (1) グリンドープ（環境保護型潤滑剤）のねじ締付けへの適用
- (2) 19.7°/30 m の曲げ試験
- (3) 80%PBYS の圧縮試験（API RP 5C5 クラス I では 40%）
- (4) 100 回の熱サイクル試験
- (5) 圧縮と曲げの同時荷重、引張りと曲げの同時荷重
- (6) リーク試験終了後の締付け試験の実施

5.2 試験結果

上記の各試験においてリークの発生は検出されなかった。また、試験終了後にねじ部およびシール部を観察した結果、ゴーリングは見られなかった。KSBEAR は Fig. 11 に示すように、80%PBYS の圧縮という従来にない厳しい試験においてもリークが発生せず、安定した性能がみられた。また、Fig. 12 に示す FEA による解析でも、接触面圧がシール部にたち、リークが発生しないことが確認できた。

また、80 ksi 2-7/8" × 6.4 lb/ft において実施した外圧破壊試験において、管が圧潰した状態のサンプルを Photo 1 に示す。一般的なモディファイドバットレスねじでは管径方向への拘束力がなため、ピンとカップリングのねじが離れやすい。一方、KSBEAR では管がコラプスにより変形しても、ピンとカップリングのねじが離

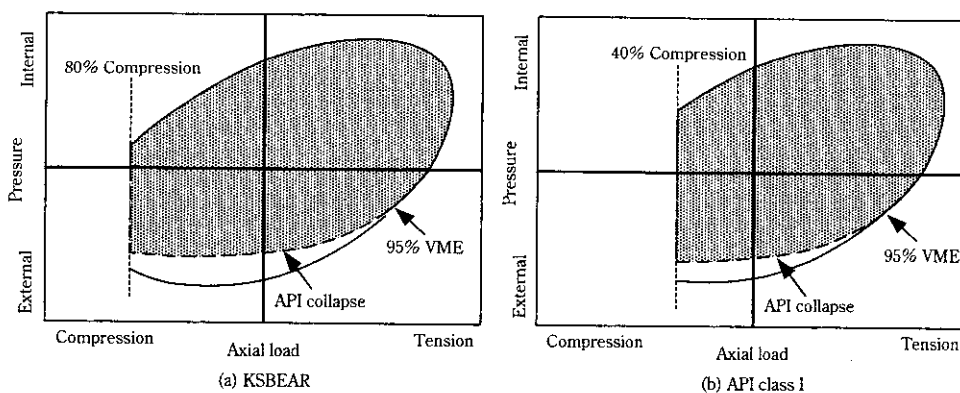


Fig. 11 Performance of KSBEAR

Table 2 Grade, size and interference of specimen

Grade	Size	Interference*			
13CR-80	5-1/2" × 23.0 lb/ft	H/H	H/L	L/H	L/L
13CR-80	7" × 29.0 lb/ft	H/H	H/L	L/H	L/L
13CR-80	7" × 35.0 lb/ft	H/H	H/L	L/H	L/L

*Thread/Seal
H: High, L: Low

Table 3 Test procedure

Step	Condition
1 Initial make-up and breaks	1st to 3rd make-up at maximum tubing torque 4th make-up (half of specimens at minimum tubing torque, half of specimens at maximum torque)
2 Bake-out	24 h at 180°C
3 Thermal cycling under tension and internal pressure	Based on 95%VME 40 to 180°C 50 cycles
4 Combined load internal pressure	Based on 95%VME Tension: 95%PBYS Compression: 80%PBYS Tension and compression with 19.7°/30 m bending
5 Combined load and external pressure	Based on 95%VME Tension: 95%PBYS Compression: 80%PBYS
6 Thermal cycling under tension and internal pressure	Based on 95%VME 40 to 180°C 50 cycles
7 Final make-up and breaks	Continue 5th make-up to 10th make-up at maximum tubing torque

れにくく、シール部が十分に緊密性を保持するため、リークの発生はなかった。KSBEARの外圧作用時の耐リーク性が高いことがわかる。

6 実使用例

1999年11月に実施された HPI-13CR-110 3-1/2" × 9.2 lb/ft 249 本による 3 099 m の降下作業は、15.7 h という非常に短い時間で完了した。締付け作業および降下時のトラブルは皆無であった。スタビリング性が優れ、ゴーリングなどのトラブルがないことの効果であるといえる。

2001 年秋には、KO-80S 5-1/2" × 17.0 lb/ft において、39.4°/30 m

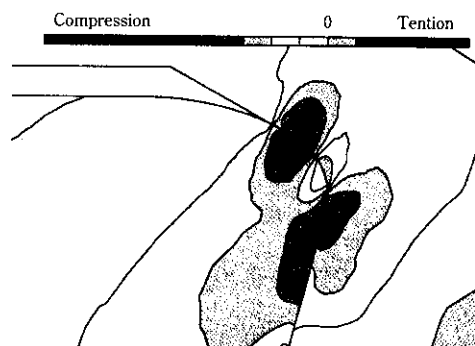


Fig. 12 Seal contact stress under 80% PBYS compression and collapse pressure

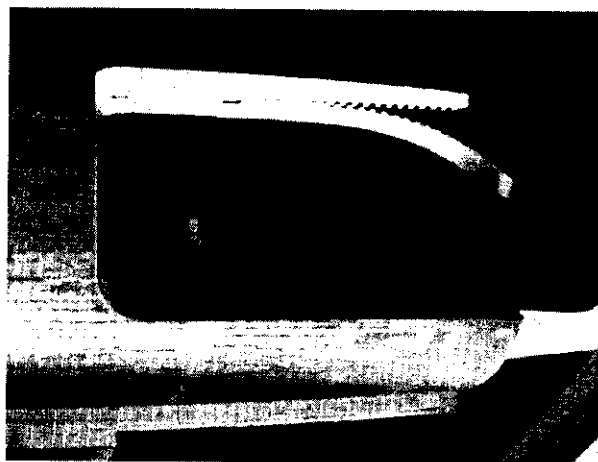


Photo 1 An example of collapsed connection (80 ksi 2-7/8" × 6.4 lb/ft)

の曲げ状況下でのフィールドテストが実施される予定である。

7 生産技術

KSBEAR は知多製造所 9-5/8"NC ねじ切りライン³⁾にて生産を行っている。当ラインは、ピンねじ切り、カップリング締付けから検尺・秤量、印字、結束までの一貫製造ラインである。当ラインの KSBEAR 生産技術の特徴について述べる。

7.1 ツール回転型 NC ねじ切り機によるねじ加工

ねじ切り機は、パイプ回転型とツール回転型に大別される。両者

Table 4 Comparison of threading between pipe-rotating type and tool-rotating threading machine

	Pipe-rotating type threading machine	Tool-rotating type threading machine
Schematic illustration		
Chaser arrangement and chaser form		
Cutting order		

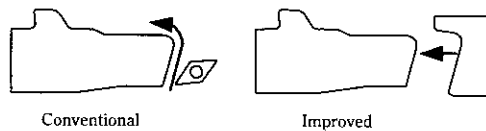


Fig. 13 Cutting method of seal portion

のねじ切り方法の比較を Table 4 に示す。通常用いられているパイプ回転型ねじ切り機では、1 枚のチェザーを用いる。切削中のパイプの周囲には広い空間があるため、切粉排出性に優れている。しかし、所定の切込み量ずつねじ切削を行うため、ねじ切削に必要な時間は長く、生産性は低い。また、KSBEAR のようなフックねじに対しては、各切込み時に、半径方向 (X 軸方向) に加え、管軸方向 (Z 軸方向) にねじ切削軌跡をシフトさせる必要がある。

一方、当ラインに導入されているツール回転型ねじ切り機では、パイプの周囲に配した 4 枚のチェザーによりねじを切削する。各チェザーの 3 つの山は、位相を 1/4 周ずらしてあり、さらに切削順に山高さと山幅を大きくしている。最終山が仕上げ刃である。チェザーを回転させながらねじ軸方向へツールブロックを移動させることにより、ねじ切削が完了する。ツール回転型ねじ切り機では、複雑な切削方法が必要なフックねじであっても、短時間でねじ加工が可能である。しかし、複数の刃物が同時に切削をおこなうため、切粉排出性が悪く、チェザーのチッピング (欠け) が発生しやすい。しかし、川崎製鉄ではツールブロックの形状改善などにより、この問題を解決した。

7.2 総型バイトによるシール部加工

シール部は、一般的にポイントカット方式で加工されるが、当ラインのねじ切り機では、ピンねじのシール部加工に総型バイトを用いている。ポイントカット方式と総型バイトによるシール部加工の比較を Fig. 13 に示す。高品質な表面性状が要求されるシール部の加工は、ポイントカット方式では、切削送り速度を小さくする必要があり、加工時間が長い。一方、総型バイトによる加工では、高精

度なシール形状が確保でき、また、加工時間を大幅に短縮することができる。

7.3 光学式ねじ要素検査装置による全自動ねじ検査

当ラインでは、光学式全自動ねじ検査装置が適用されている。本装置の構成を Fig. 14 に示す。本装置の特徴は、光学系による非接触方式によりねじ形状を認識する点である。また、一般の接触型ねじ要素ゲージとの測定値の整合性をとるため、光学系により得られたねじ形状と既存ゲージの測定子との接触をシミュレートする、バーチャルプローブ方式を採用している。本装置は測定所要時間が短く、ライン生産性を低下させることなく、全数測定対応が可能である。

8 結 言

過酷な油井環境に対応できる油井管用特殊ねじ継手として、従来とは異なる新しい着眼点から KSBEAR の開発に取り組んだ。その結果、以下の成果が得られた。

- (1) スタピングフランク間隔の適正化により、高圧縮荷重時のシール部の塑性変形を抑制することができた。
- (2) ロードフランクコーナの円弧の大きさを変更することにより、ゴーリングが発生しやすいというフックねじの欠点を解消することができた。
- (3) ピンとカップリングのそれぞれのロードフランク角度を最適化し、耐ゴーリング性能をさらに向上することができた。
- (4) 連続した複数回の締付けを解析する FEA モデルを構築した。
- (5) 曲げを解析する FEA モデルを構築した。
- (6) ねじ評価試験として、80%PBYS の圧縮と 19.4°/30 m の曲げの状況でもリークが発生せず、API RP 5C5 クラス I を大幅に上回る性能を有していることが確認できた。
- (7) 複雑な切削方法が必要なフックねじを、ツール回転型ねじ切り機により短時間で切削する技術を開発した。

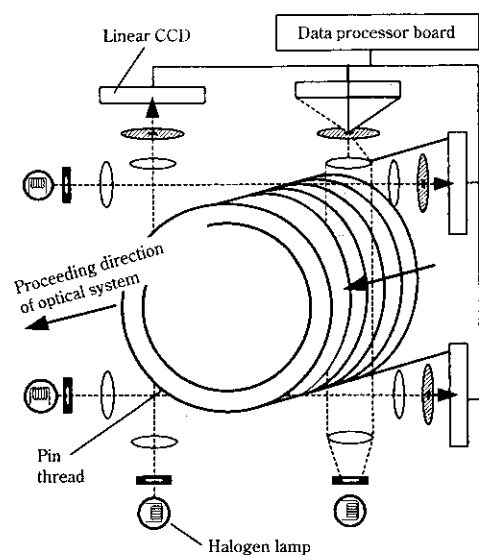


Fig. 14 Schematic illustration of optical gauging system

参考文献

- 1) 石油公団・石油開発技術センター：「石油鉱業の技術講座」，(1983)，269，[石油経済ジャーナル社]
- 2) American Petroleum Institute: "Recommended Practice for Evaluation Procedures for Casing and Tubing Connections"，(1996)，45
- 3) 島本 健，高野 順，高橋一成：川崎製鉄技報，29(1997)2，71