
有限要素法による油井管用プレミアムジョイント“FOX”の特性解析

Stress Analysis of Premium Threaded Connection "FOX" by Finite Element Method

山本 健一(Ken-ichi Yamamoto) 小林 邦彦(Kunihiko Kobayashi) 間口 龍郎
(Tatsuro Maguchi) 上野 雄夫(Katsuo Ueno)

要旨：

油井管用プレミアムジョイント“FOX”の最大の特長は、ピッチチェンジ法という新しい概念を導入しているところにある。これは、ネジピッチを途中で変更することにより歯にかかる接触面圧分布を均一化させ、継手性能の向上を図ることを目的としている。FOXの開発において有効な手段となった有限要素法による応力解析は、締め付け時および軸力負荷時の継手の状態を精度よくシミュレートしている。解析結果から、耐ゴーリング性、耐リーク性、強度などの性能はピッチチェンジにより改善されることが明らかになった。また、ピッチチェンジ量をFOXの最適値から変化させた場合の性能についても示した。

Synopsis：

The principal feature of the premium threaded connection "FOX" is the introduction of pitch change concept to the thread design. The thread pitch of a connection is changed at two locations, hence the maximum contact pressure at the load flank of the tooth is reduced, and the uniform contact pressure distribution along the threads is obtained in the made-up and/or tensile loaded state compared with conventional premium threaded connections. The FOX design was developed mainly by the finite element analysis (FEA) which sufficiently simulated the actual behaviors of the made-up and/or tensile loaded connection. Results of FEA prove that joint characteristics such as anti-galling, leak tightness, and joint strength are greatly improved through the uniform contact pressure distribution along the threads. Furthermore, changes in joint characteristics with the amount of pitch changes are also analyzed and discussed.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

有限要素法による油井管用プレミアムジョイント “FOX” の特性解析*

川崎製鉄技報
21 (1989) 3, 202-207

Stress Analysis of Premium Threaded Connection “FOX” by Finite Element Method



山本 健一
Ken-ichi Yamamoto
鉄鋼研究所 鋼材研究
部 鋼管研究室 主任研
究員(掛長)



小林 邦彦
Kunihiko Kobayashi
鉄鋼研究所 鋼材研究
部 鋼管研究室 室長(部
長補)



岡口 龍郎
Tatsuro Maguchi
知多製造所 技術生産
管理部 技術管理室 主
査(部長補)



上野 雄夫
Katsuo Ueno
Products Manager,
Engineering Dept.,
Kawasaki Thermal
Systems Inc.

1 緒 言

資源の枯渇に伴い、石油、ガス井の開発は、より高温高圧環境のもとで進められるようになってきており、油井管に要求される特性も一段と厳しくなっている。油井管用継手としては、従来より API (American Petroleum Institute) 規格のラウンドネジやバットレスネジなどのネジ継手が広く使用されているが、高温高圧下での耐リーク性、継手強度の面で問題が生じており、API ネジより優れた特性を示すプレミアムジョイントに対する需要が増加している。

このような背景のもと、川崎製鉄は、1983年、英国の Hunting 社と共同で油井管用プレミアムジョイント“FOX”の開発に着手した。現在までに実施されてきた耐ゴーリング性、耐リーク性、継手強度などに関する試験により、FOX の継手性能の優れているこ

要旨

油井管用プレミアムジョイント“FOX”の最大の特長は、ピッチチェンジ法という新しい概念を導入しているところにある。これは、ネジピッチを途中で変更することにより歯にかかる接触面圧分布を均一化させ、継手性能の向上を図ることを目的としている。

FOX の開発において有効な手段となった有限要素法による応力解析は、締め付け時および軸力負荷時の継手の状態を精度よくシミュレートしている。解析結果から、耐ゴーリング性、耐リーク性、強度などの性能はピッチチェンジにより改善されることが明らかになった。また、ピッチチェンジ量を FOX の最適値から変化させた場合の性能についても示した。

Synopsis:

The principal feature of the premium threaded connection “FOX” is the introduction of pitch change concept to the thread design. The thread pitch of a connection is changed at two locations, hence the maximum contact pressure at the load flank of the tooth is reduced, and the uniform contact pressure distribution along the threads is obtained in the made-up and/or tensile loaded state compared with conventional premium threaded connections.

The FOX design was developed mainly by the finite element analysis (FEA) which sufficiently simulated the actual behaviors of the made-up and/or tensile loaded connection. Results of FEA prove that joint characteristics such as anti-galling, leak tightness, and joint strength are greatly improved through the uniform contact pressure distribution along the threads. Furthermore, changes in joint characteristics with the amount of pitch changes are also analysed and discussed.

とが確認されている。本報告では、まず、FOX ジョイントに新しく導入されたピッチチェンジの概念を具体化していくうえで有効な手段となった有限要素法による継手の応力解析方法を紹介するとともに、解析結果の妥当性について述べる。さらに、ピッチチェンジ量を FOX の最適値から変化させた場合の応力解析を行い、ネジ部にかかる接触面圧、シール部での応力などについて、比較検討した結果を述べる。

2 FOX の特長

FOX ジョイントを模式的に Fig. 1 に示す。その特長を要約すると、以下の3点となる。

(1) ネジ部

ネジ形状はバットレスタイプである。耐ゴーリング性、耐リ

* 平成元年4月18日原稿受付

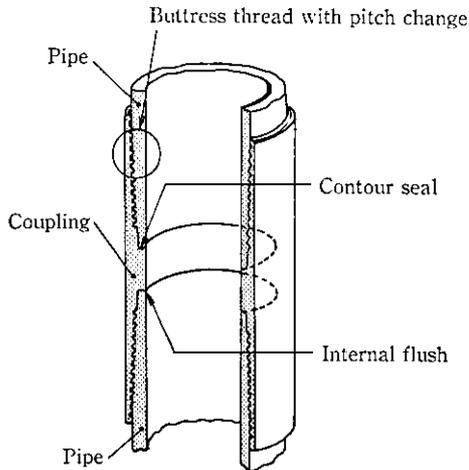


Fig. 1 Features of FOX joint

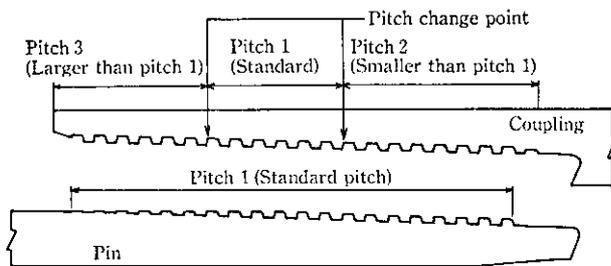


Fig. 2 Pitch change style in FOX joint

ーク性、継手強度に優れた特性が得られるように、ネジのピッチが途中で変更されている¹⁾。

(2) シール部

シール部は、曲線で連続的に結合された形状 (contour seal デザイン) となっており、耐リーク性、耐ゴーリング性に優れている²⁾。

(3) 継手内面

内面フラッシュタイプであり、流体の流れを均一化することにより耐エロージョン性を向上させる。

なかでも、最大の特長は、ネジのピッチを途中で変更するピッチチェンジ法を採用していることにある³⁾。これは、他のプレミアムジョイントに見られない新しい概念である。Fig. 2に、FOXのピッチチェンジ形式を示す。ピンのピッチは一定である。カップリングには、ピッチチェンジ点が2箇所設定されており、中間部のピッチはピンと同等とし、Fig. 2の右手、カップリング中心寄りではピンのピッチより小さく、Fig. 2の左手、端面寄りでは大きくなっている。ピッチを変更することは、ピンネジとカップリングネジのロードフラックと呼ばれる荷重伝達面間のギャップを、継手特性の点から見て最適な状態に制御することを意味する。

Fig. 3に、一例として締め付け状態でそれぞれの歯にかかる接触面圧分布の計算結果を示す。ピッチチェンジなしの場合、ピン先端側の歯にかかる面圧が最大となり、中央寄りで接触面圧は著しく減少する。すなわち、接触がごく一部の歯に集中することを意味する。ピッチ変更により、ピーク面圧の低減が図られるとともに、接触面圧がより均一化されていることがわかる。これは、継手締め付け時のネジ部でのゴーリング発生防止に対し有効である。詳細については第4章で述べるが、ピッチチェンジ法の採用により、FOX

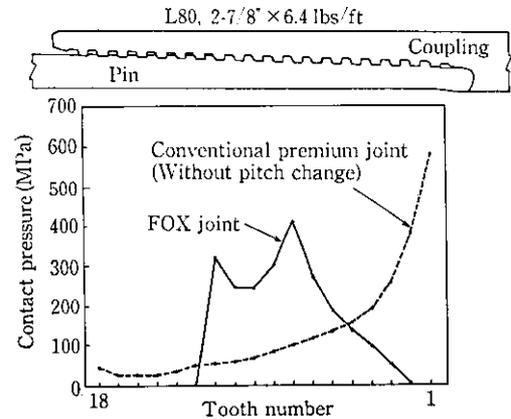


Fig. 3 Distributions of contact pressure at load flank in made-up connections

は他のプレミアムジョイントに比べ、耐ゴーリング性、耐リーク性、継手強度に優れた継手となっている⁴⁾。

3 有限要素解析

ピッチチェンジの導入にあたっては、その有無が継手の諸特性に及ぼす影響を定量的に把握する必要があるため、検討の手段として有限要素法による応力解析が重要な位置を占めてきた。本章では、FOXジョイントの応力解析方法を紹介し、解析と実験を比較検討した結果を述べる。

3.1 解析方法

ネジ継手の応力解析を行うにあたっての最大の課題は、解析の対象とする継手を、いかに速く、精度よくモデル化できるかということにある。さらに、FOXでは、前章で述べたようにネジのピッチが途中でごく微量だけ変更されているため、高精度の座標入力値が要求される。また、ネジ継手分野の場合、以下に示す点がすべて重畳されているため、解析時間が増加するのが特徴である。

- (1) 弾塑性問題である。
- (2) 接触/非接触を扱う非線形問題である。
- (3) 接触/非接触を判定するための要素の数が多。

FOXジョイントの弾塑性応力解析フローを以下に示す。

3.1.1 メッシュ作成プログラム

あらゆる外径、肉厚に対し、FOXのメッシュを短時間で作成するための専用プログラムである。ピンとカップリングそれぞれの代表寸法値を入力データとして与えることにより、シール部、ネジ部のメッシュは、自動的に作成される。節点の座標値は高精度で求められ、微妙な寸法変化が継手特性に及ぼす影響を解析するためのメッシュデータを容易に得ることができる。また、接触/非接触を判定するためのピンとカップリングの節点も自動的に定義される。

Fig. 4に、2-7/8"×6.4 lbs/ft (外径 73.03 mm, 肉厚 5.51 mm) のFOXチュービングと9-5/8"×47.0 lbs/ft (外径 244.48 mm, 肉厚 11.99 mm) のFOXケーシングのメッシュ作成例を示す。4角形8節点要素とした。シール部とネジ部のメッシュ寸法は、応力やひずみ分布を精度よく解析できるよう考慮されている。

3.1.2 弾塑性応力解析

構造解析用汎用プログラムMARCにより解析を行っている。使用している要素は、8節点軸対称要素と接触/摩擦要素の2種類である。当プログラムにより、2種類の非線形問題を扱っている。

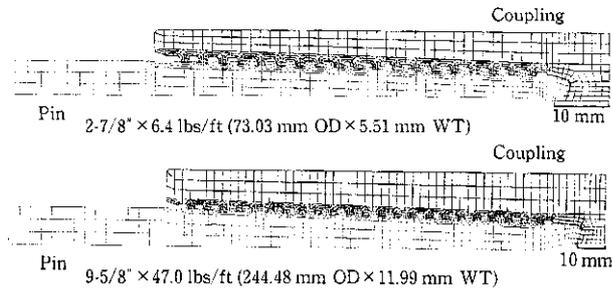


Fig. 4 Mesh diagrams of FOX joints

1つは、材料非線形であり、材料の挙動はひずみ増分理論、Von Misesの降伏条件および等方硬化則に基づくものとしている。他は、幾何学非線形であり、ピンとカップリングのシール部、ネジ部での接触/非接触を判定するため、接触/摩擦要素（ギャップ要素）を使用している。ピンとカップリング間の荷重の伝達は、この要素を介してなされる。

3.1.3 解析結果の出力

弾塑性有限要素解析により得られた応力分布、ひずみ分布、変位図などは、汎用ポストプロセッサにより出力される。

3.2 解析値の精度検証

3.2.1 条件

MARCによる応力解析値が、実際の継手の応力状態を精度よくシミュレートしているかどうかを、Table 1に示す3種類の継手を用いて調べた。項目は、トルクとターンの関係、締め付けトルクとピン先端内面の応力の関係、継手に軸力が負荷された時のカップリング外面およびピン先端内面の応力分布である。各部の応力は、カップリング外面とピン内面に貼付した2軸ひずみゲージによる測定値から求めた。

使用した材料は、API Spec. 5CT L80であり、計算には、引張試験より求めた応力-ひずみ関係を用いた。ピンとカップリング間の摩擦係数は、すべて0.06一定とした。

Table 1 FOX joints used for experiment and FEA

Dimensions	2-7/8" × 6.4 lbs/ft (73.03 mmOD, 5.51 mmWT) 3-1/2" × 9.2 lbs/ft (88.90 mmOD, 6.45 mmWT) 9-5/8" × 47.0 lbs/ft (244.48 mmOD, 11.99 mmWT)
Material	L80, carbon steel
Items	Make-up and break-out test Full scale tensile test

Note OD: Outside diameter
WT: Wall thickness

3.2.2 検証結果

FOX締め付け時のトルクとターンの関係をFig. 5に示す。最初、トルクはターン数とともにゆるやかに増加するが、ピン先端とカップリングのトルクショルダーが図中Abutment位置で接触を開始してからは、トルクは急激に増加する。計算により求めたAbutment以降のトルクとターンの関係を図中に示すが、実際の挙動を精度よくシミュレートできていることがわかる。

Fig. 6に、締め付け時のピン内面の応力変化を示す。シール部に近いピン先端から10mm位置での軸方向、円周方向応力は、トルクの増加とともに増加し、シール部を中心とした圧縮応力場形成

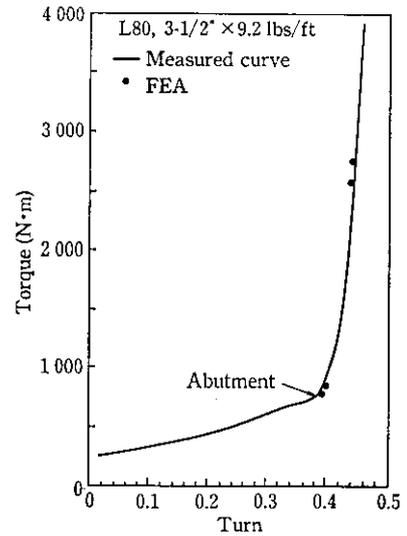


Fig. 5 Torque-turn curve of FOX joint

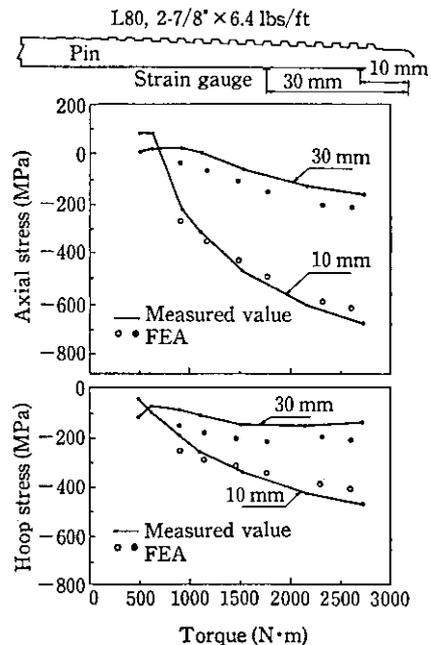


Fig. 6 Changes of pin stresses during make-up

の影響を強く受けている。この場合も、実測値と計算値はよく一致している。

Fig. 7に、締め付け後および継手に軸力が負荷されたときの、カップリング外面の応力分布を示す。軸方向応力は、カップリング中心より30mm位置から70mm位置の間で複雑に変化する。これは、締め付け時にシール部寄りの複数の歯でトルクショルダー部の反力を負担しているため、カップリングがFig. 8で誇張して示されたような不均一変形をすることに起因している。軸力負荷時に継手に発生する複雑な応力についても、実測値と計算値はよく一致していることがわかる。

本節では、特定サイズ、特定荷重状態のみの比較結果を示したが、チュービングからケーシングに至るまで広範囲にわたって解析値と実測値が一致していることが確認されている。以上、本有限要素解析により、FOXジョイントの締め付け状態および外力負荷状態を精度よくシミュレートできることが明らかになった。

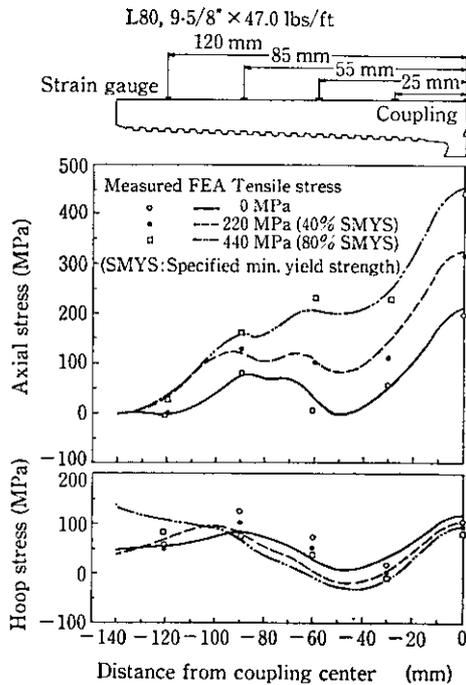


Fig. 7 Stress distributions on outside surface of made-up and tensile loaded coupling

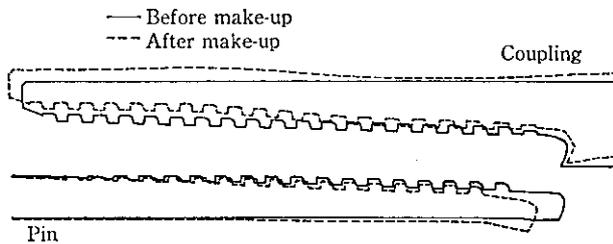


Fig. 8 Deformation of pin and coupling due to make-up (FEA)

4 FOX の特性解析

4.1 ピッチチェンジ量の影響

FOX ジョイントの最大の特長は、前述のようにネジのピッチを途中でごく微量だけ変更するピッチチェンジ法の採用により、締め付け時あるいは軸力負荷時の歯にかかる接触面圧をより均一化することにある。Fig. 2 に示した2箇所のピッチチェンジ点のうち、カップリング中心寄りのピッチチェンジは、主として、耐リーク性、耐ゴーリング性向上に寄与しており、カップリング端面寄りのピッチチェンジは、継手強度の向上に寄与している。

本節では、ピッチチェンジ量が継手特性に及ぼす影響を、以下に示す3点から検討し、ピッチチェンジ法採用の効果と最適ピッチチェンジ量について考察する。

- (1) ネジ部接触面圧
- (2) ピン先端部の応力分布
- (3) シール部の応力分布

4.1.1 解析条件

Table 2 に、解析の対象としたモデルを示す。2-7/8"×6.4 lbs/ft (外径 73.03 mm, 肉厚 5.51 mm) チュービングとした。API 規格 L-80 で、規格最小降伏強さ (SMYS) をもつ材料とした。カップリング中心寄りと端面寄りのピッチの変更量は、現在 FOX に採用されている標準値、標準値の 1/2 倍および 2 倍の 3 水準とし、比較

Table 2 Conditions of FEA on the joints of API L80 carbon steel (2-7/8"×6.4 lb/ft, yield strength 552 MPa)

Joint type	Amount of pitch change
1	2×PC
2	1×PC
3	1/2×PC
4	0 (without pitch change)

Note PC: Standard amount of pitch change of FOX joint

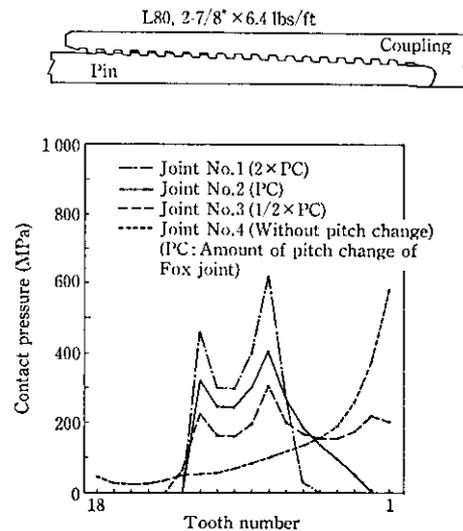


Fig. 9 Distributions of contact pressure at load flank in made-up connections

のため、他のプレミアムジョイントに相当する一定ピッチの継手についても解析を行った。

4.1.2 ネジ部接触面圧

Fig. 9 に、締め付け状態でのネジ部接触面圧分布を示す。ピッチチェンジなしの場合、第2章で述べたように、カップリング中心寄りの複数の歯で、シールに要する荷重を負担している。ピッチ変更により、カップリング中心寄りのピンネジとカップリングネジのロードフラック間隔が広がってくるため、接触面圧分布は著しく変化する。ピーク面圧の低減、接触面圧の均一化の点から、ジョイント No. 2, 3 が優れている。ピッチチェンジ量が過大だと、ピッチチェンジ点を含む複数の歯に荷重が集中するため、逆効果となる。

降伏強さの 80% に相当する軸力を負荷した時、個々の歯にかかる接触面圧分布を Fig. 10 に示す。軸力負荷により、カップリング端面寄りの歯にかかる面圧が増加する。ピッチチェンジなしあるいはジョイント No. 3 程度の変更では、ピーク面圧は著しく高くなる。歯の根元を中心に、数パーセントの塑性ひずみが生じていることも解析より明らかになった。

以上、耐ゴーリング性に関係する締め付け時の接触面圧の均一化の点からは、ピッチチェンジ量を、標準値の 1/2 倍から標準値の範囲に、継手強度に関係する軸力負荷時の接触面圧の均一化の点からは、標準値からその 2 倍程度の範囲にとることが効果ある。

4.1.3 ピン先端部応力分布

締め付け後降伏強さの 80% に相当する軸力を負荷したとき、ピン先端部に働く軸方向応力の分布を、Fig. 11 に示す。圧縮応力の絶対値が大きく、しかも作用領域が広いほど、ピン先端部に蓄積されるひずみエネルギーは増加するため熱衝撃などの外的変動に対し

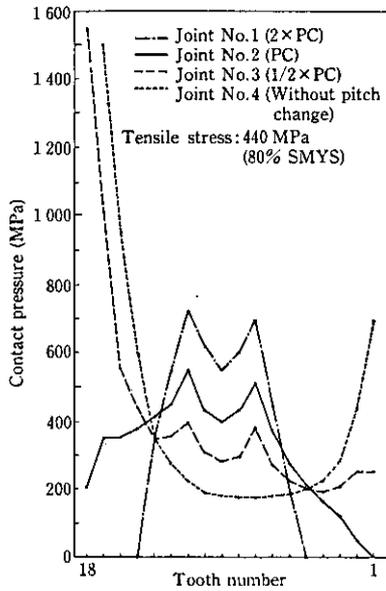


Fig. 10 Distributions of contact pressure at load flank in made-up and tensile loaded connections

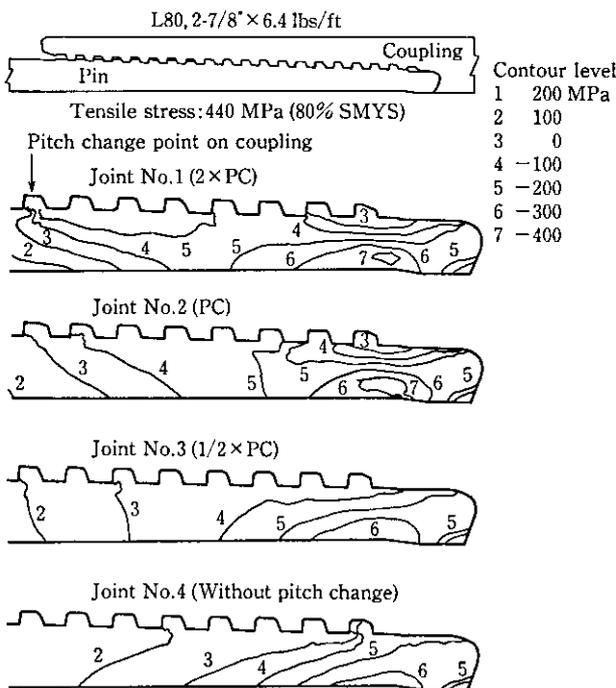


Fig. 11 Axial stress distributions in made-up and tensile loaded pins

て有利であり、耐リーク性に対する継手の信頼性は向上する。ピッチチェンジなしの場合は圧縮応力作用領域は狭く、ひずみエネルギーの蓄積も少ない。同図から明らかなように、ピッチチェンジ量の増加とともに圧縮応力作用領域は広がり、圧縮応力レベルも向上している。しかし、標準値を超えてピッチチェンジ量を増加させても、圧縮応力作用領域はほとんど変化しない。これは、Fig. 10で示したように、ピッチチェンジ点付近の歯が荷重された軸力のかなりの割合を負担してしまうため、ピン先端とピッチチェンジ点間の圧縮応力が急激に減少していくためと考えられる。

以上、耐リーク性に対する信頼性の点から見ても、ピッチチェンジは有効であり、とくに標準値からその2倍の範囲にあれば、最も

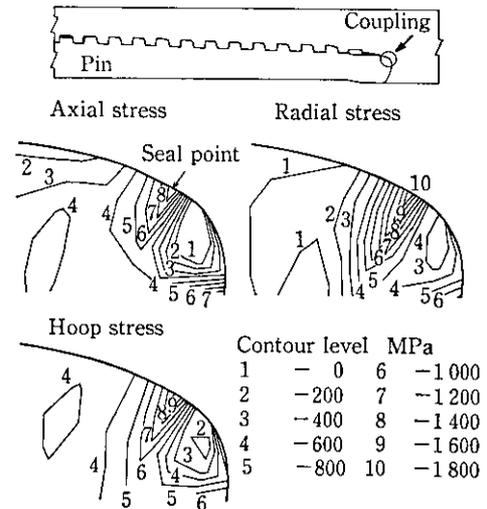


Fig. 12 Stress distributions at sealing area of made-up pin

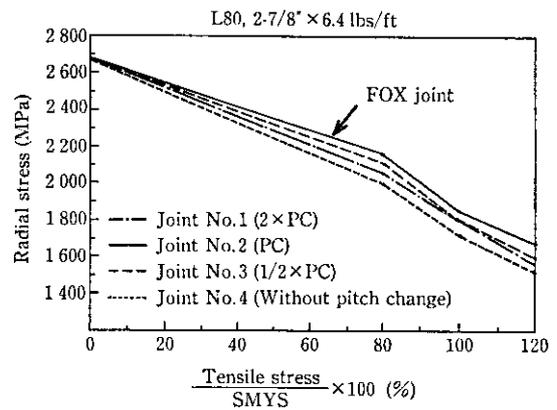


Fig. 13 Comparison of radial stresses at seal point of made-up and tensile loaded connections

効果を発揮する。

4.1.4 シール部面圧

Fig. 12に、FOXジョイントのシール部での応力分布出力例を示す。シール点において、各応力成分は最大値を示し、非常に高いシール応力が得られる。シール部を中心に耐リーク性を確保するために必要な最低限の塑性ひずみは生じるものの、contour sealデザインであり、各応力成分のバランスが保たれているため、巨視的には弾性限内の応力状態となっている。

一例として、Fig. 13に、軸力負荷時のシール点での半径方向応力の変化を示す。いずれの継手も高いシール応力を維持しているが、とくに標準ピッチチェンジ量をもつジョイントが、軸力負荷時でも、より高いシール応力を維持していることがわかる。これは、同ジョイントが、軸力負荷時に最も多くの歯でシール荷重を負担しているため、ピン先端部での圧縮応力の低下が少なくなることに起因している。

以上の解析により、つぎの2点を明らかにした。

- (1) 独自の概念であるピッチチェンジ法の採用により、ネジ面にかかる接触面圧は均一化される。このため、他のプレミアムジョイントに比べ、FOXは、耐ゴロリング性、耐リーク性、継手強度などの点で有利である。
- (2) FOXには、最適ピッチチェンジ量が採用されており、最高

の継手性能が発揮されるよう設計されている。

4.2 継手強度の検討

継手強度を決定するうえで、カップリング外径の選定は、最重要項目である。従来より、継手効率は、最大引張負荷が作用するカップリング部の断面積と、パイプ断面積の比で定義されている。しかしながら、軸力負荷時の両部分の応力状態は、パイプ部が単軸引張り状態に近いのに対し、カップリング部は複雑な3軸応力状態となっているため、塑性変形に対する感受性が異なり、実際の継手効率は、上記の単純計算値とは当然異なったものとなっている。

本節では、有限要素法解析により継手効率の推定の可否を検討した結果について述べる。

4.2.1 継手引張試験

Table 3 に、実管引張試験条件と結果を示す。API 規格 L-80, 2-7/8"×6.4 lbs/ft (外径 73.03 mm, 肉厚 5.51 mm) であり、カップリング外径は上に述べた方法により継手効率が約 100% となるよう

Table 3 Full scale tensile test data on the joints of API L80 carbon steel (2-7/8"×6.4 lb/ft, special clearance coupling)

Run No.	Make-up torque (Nm)	Location of failure
1	2 440	Pipe body
2	2 440	Pipe body



Photo 1 Appearances of FOX joints after tensile test to failure (L80, 2-7/8"×6.4 lb/ft)

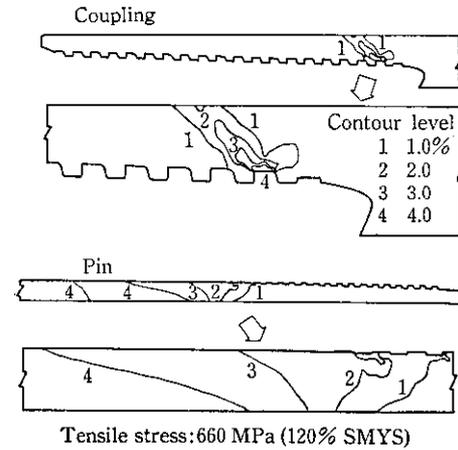


Fig. 14 Equivalent plastic strain distributions in pin and coupling of made-up and tensile loaded connection

設定した。Photo 1 から明らかなように、2本ともパイプ部分から破断しており、カップリングは健全な状態であった。つまり、実際の継手効率は、100% 以上あったといえる。

4.2.2 応力解析

弾塑性解析により、軸力負荷時の応力と塑性ひずみ分布の状態を求めた。降伏強さの120%に相当する軸力を負荷した時の相当塑性ひずみ分布を、Fig. 14 に示す。応力状態の差により、パイプ部の塑性ひずみ量および塑性変形領域が、カップリング部に比べ非常に大きいことがわかる。パイプ部から破断することが示唆される。

本解析を適用することにより、継手強度の推定が可能であることが明らかになった。

5 結 言

弾塑性有限要素法により、FOX ジョイントに導入されているピッチチェンジと継手特性の関係について解析し、以下の結論を得た。

- (1) 本解析方法は、締め付け時および軸力負荷時の継手の変形挙動を十分精度よくシミュレートしており、継手デザインの検討に対し有効である。さらに、継手強度、軸力負荷時の継手破断位置の検討にも適用可能である。
- (2) ネジのピッチチェンジにより、継手のネジ面にかかるピーク面圧は低減され、より均一な接触面圧分布状態が得られる。ネジにかかる負荷が分散されるため、耐ゴロリング性、耐リーク性、継手強度は著しく改善される。
- (3) ピッチチェンジにより、ピン先端部に蓄積される圧縮ひずみエネルギーは増加し、耐リーク性に対する継手の信頼性は向上する。
- (4) FOX ジョイントは、最適化されたピッチチェンジ量が採用されており、他のプレミアムジョイントに比べ優れた性能が発揮されるよう設計されている。

参 考 文 献

- 1) 川崎製鉄(株): 特開昭60-69385
- 2) 川崎製鉄(株): 特開昭60-260792
- 3) K. Ueno, G. C. Dearden, J. K. Duxbury, and T. Maguchi: "New Concept for Load Transfer in Threaded Connections", OTC 5248, Preprint of the 18th Annual OTC, Houston(USA), May (1986), 221
- 4) Y. Hirano, T. Maguchi, K. Kobayashi, K. Yamamoto, K. Ueno, and J. Duxbury: "Development of Premium Threaded Connection 'FOX'", Kawasaki Steel Technical Report, No. 19 (1988), 23