



受賞技術-6

変形性能に優れた高強度鋼管の開発

Development of High Strength Linepipe with Excellent Deformability

JFEスチール(株) スチール研究所 鋼材研究部
主任研究員

石川信行

Nobuyuki Ishikawa

JFEスチール(株) スチール研究所*1
主席研究員

鈴木信久

Nobuhisa Suzuki

1 はじめに

大規模な地震や凍土地帯で発生する地盤の大変形に対してパイプラインの安全性を確保するために「ひずみベース設計」の開発とその適用が進んでいる。「ひずみベース設計」では、埋設鋼管の局部座屈性能を評価、予測する技術と、それに対応した変形性能に優れた鋼管が必要である。従来から、鋼管の局部座屈性能を向上させる一般的な方法は管厚を増加させることであると認識されているが、管厚を増加させればパイプラインの建設費用が増加することは周知である。材料特性を改良することにより、鋼管の変形性能を向上させることが可能ならば、建設費用の増加を最小限に抑えながら、地震地帯や凍土地帯におけるパイプラインの安全性を確保することができる。また、近年のパイプラインの長距離化、高圧化に対応して、より高強度の鋼管の適用が求められており¹⁾、API-X80 (降伏強度550MPa以上) 等の高強度パイプラインのひずみベース設計とそれに対応した鋼管の開発が強く求められている。

本開発では、最初に材料特性を考慮した鋼管の局部座屈ひずみの定式化やFEM解析により鋼管の変形挙動を評価し、実管を用いた大型曲げ実験により検証するとともに、必要な材料特性を明確にした。次に、局部座屈性能を高めるための材料特性と鋼材のミクロ組織の関係を解明することにより材質の最適化を行い、そして最新の厚鋼板製造技術を活用して、高強度でかつ高変形能の鋼管の大量製造技術を確立した。本稿ではその開発の概要について紹介する。

2 鋼管の局部座屈性能と材料特性

鋼管の局部座屈特性は鋼管の形状や操業圧力または変形モードによって複雑に変化するだけでなく、鋼管の材料特性の影響を大きく受ける。はじめに、軸圧縮を受ける鋼管の限界座屈ひずみから概説する²⁾。限界圧縮ひずみは応力ひずみ曲線にべき乗硬化則を用いると (1) 式で示される。

$$\varepsilon_{cr} = \frac{4}{3} \sqrt{n} \frac{t}{D} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ε_{cr} ：限界圧縮ひずみ、 t ：管厚、 D ：平均管径、 n ：硬化指数である。X65以下の鋼管について $n=0.11$ とし安全率1.25を考慮すると $\varepsilon_{cr}=35t/D$ (%)が得られる。これが、高圧ガス導管耐震設計指針³⁾の圧縮許容ひずみを表す式(ガス耐震式)である。これに対して鋼管の変形性能をより適切に推定するためには、以下に示す解析解⁴⁾を適用することができる。

$$\left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_0}\right)^N = -\frac{1}{2\alpha} \left(1 + \frac{1}{N}\right) + \frac{4}{3\alpha\sqrt{N}} \frac{E}{\sigma_0} \frac{t}{D} \dots\dots\dots (2)$$

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_0}\right) + \frac{\alpha\sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_0}\right)^N \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ε ：公称ひずみ、 σ ：公称応力、 E ：ヤング率、 α 、 σ_0 、 N ：Ramberg-Osgoodの式の定数、 σ_{cr} ：限界圧縮応力、 ε_{cr} ：限界圧縮ひずみである。

表1にAPI材(X60、X70、X80)の代表的な引張特性を示す。これらはどれも規格最小値であり、一様伸びは6%とした。これらのAPI材について得られたR-Oパラメータを(2)式と(3)式に代入して得られた限界圧縮ひずみ曲線を図1に示

* 平成22年度文部科学大臣表彰科学技術賞開発部門受賞テーマ

*1 現 JFEテクノリサーチ(株)

す⁴⁾。3本の曲線を比較すると、X60の限界圧縮ひずみはX80よりも大きい。X60とガス耐震式の曲線を比較すると、D/tが40よりも大きい範囲で両者は一致している。一方、X70およびX80の曲線はガス耐震式よりも小さい。この計算例は、応力ひずみ曲線をSMYSとSMTSで定義した特別の条件であるが、軸圧縮を受けるX80の変形性能に関する課題を的確に抽出している。

変形性能に関する上記の課題を解決するためには、高変形性能を有する材料の開発と同時に、鋼管の変形挙動を理解し必要な材質指針を明確化することが重要である。次に、鋼管の圧縮座屈性能と材料の引張変形特性の関係を解析した結果を示す。表2に、種々のX80の引張特性を示す。規格最小値で定義した材料特性をX80-SM、降伏比 (Y/T) を0.85～0.75の範囲で変化させた材料をX80-A、B、Cと表す。これらの鋼管の圧縮限界座屈ひずみを式 (2) (3) から求めた結果を図2に示す⁵⁾。ガス耐震式はX80-SMよりも上側にあり、X80-Aとほぼ重なっている。また、X80-BとX80-Cはガス耐震式よりも上側にある。したがって、降伏比を低減させることにより、

表1 API下限強度材の引張特性

API 5L Grade	SMYS (MPa)	SMTS (MPa)	Y/T	R-O parameters	
				α	N
X60	413	517	0.80	1.48	18.99
X70	482	565	0.86	1.13	27.13
X80	552	620	0.89	0.86	37

※SMYS：規格下限降伏強度、SMTS：規格下限引張強度

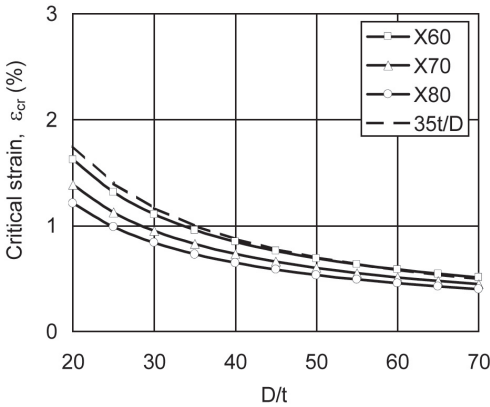


図1 軸圧縮での限界座屈ひずみとD/tの関係⁴⁾

表2 各種X80鋼管の引張特性

API 5L Grade	SMYS (MPa)	SMTS (MPa)	Y/T	R-O parameters	
				α	N
X80-SM	552	620	0.89	0.86	37.0
X80-A	552	650	0.85	0.86	19.0
X80-B	552	690	0.80	0.86	12.0
X80-C	552	736	0.75	0.86	9.0

管厚を増加させることなく、鋼管に要求される圧縮変形性能を向上させることが可能である。つまり、製造可能な範囲で材料特性を変化させることにより、耐震設計で要求される鋼管の変形性能を向上させることができる。

一方、曲げ変形における限界圧縮ひずみを求める解析解はなく曲げ座屈実験データに基づいて幾つかの実験式が提案されているのが現状である⁴⁾。そのため、曲げ変形を受ける鋼管の限界座屈歪を正確に予測するためにはFEM解析の利用が不可欠となっている。

次に、FEMによる曲げ変形解析の一例を紹介する。外径762mm、管厚15.6mm、長さ4000mmのX80鋼管を4節点シェル要素でモデル化し、モーメントアームを介して曲げ変形を加える解析を行った^{6,7)}。このとき、鋼管の幾何学的初期不整として、外径 (OD)、管厚 (WT)、軸方向不陸 (BL) (図3) を実際の鋼管で測定し、それぞれを考慮したFEMモデルを作成した。曲げ変形のFEM解析で得られた曲げ角度 (θ_e) と曲げモーメント (M) の関係を図4に示す。同一サイズのX80鋼管を用いた曲げ実験結果も合わせて示した。なお、FEM、実験のいずれも12MPaの内圧を負荷した条件で行った。初期不整を考慮しないFEM結果は実験データと限界変形まではよく一致しているが、それ以降も変形が増加し限界ひずみを過大に評価している。一方、幾何学的初期不整を考慮することにより限界変形量が実験値に近づき、(BL + WT) 不整と

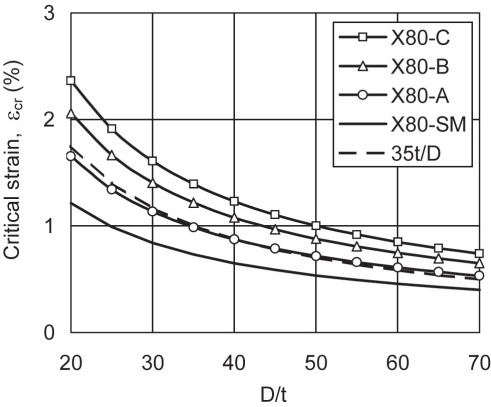


図2 各種X80鋼管の限界座屈ひずみとD/tの関係⁴⁾

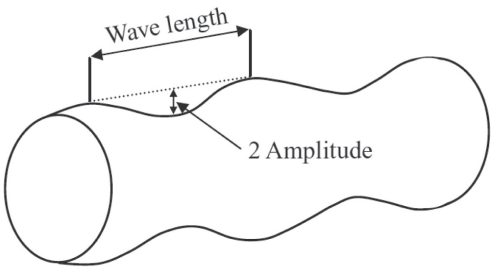


図3 鋼管の軸方向不陸

(OD + WT + BL) 不整を考慮した場合に同一の結果が得られた。また、座屈波形の発生状況について計算と実験結果の比較を図5に示す。座屈波形は鋼管の外側面で試験体中心から125mm左側に発生しており、実験結果とほぼ同一である。

このように適切な解析モデルを適用することによって、FEM解析により極めて精度良く鋼管の曲げ変形挙動を予測することが可能となる。次に、引張特性の異なる2種類のX80鋼管を用いた曲げ変形解析結果を行った。表3に解析に用いた鋼管の引張特性と限界圧縮ひずみの計算結果を示す。ここで、 f_D は設計係数で内圧による周方向応力と規格下限降伏応力の比である。限界圧縮ひずみは座屈波形を中心として管軸方向に分布する圧縮ひずみを平均管径の2倍の標点距離内で平均化したものである。より降伏比の低いX80鋼管の限界圧縮ひずみは設計係数0.0で1.87%、0.72で2.82%となっており設計係数に従って増加している。しかし、一般的なX80鋼管の限界圧縮ひずみはいずれの条件も低い値である。よって、これら2種類の鋼管の局部座屈に対する安全性を考えた場合、一般的な耐震性能が要求される場合には両者ともに採用可能であるが、1.5%程度の平均限界曲げひずみが要求さ

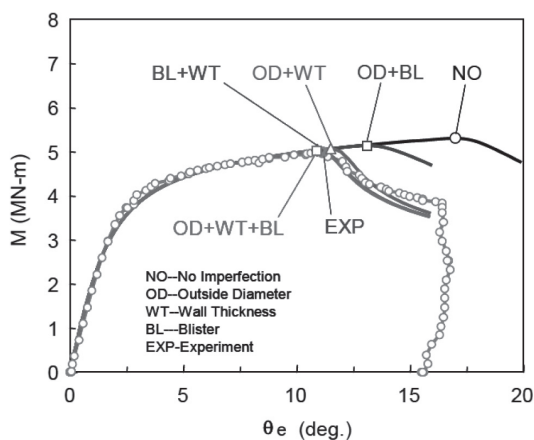


図4 X80鋼管の曲げ変形のFEMと実験結果の比較

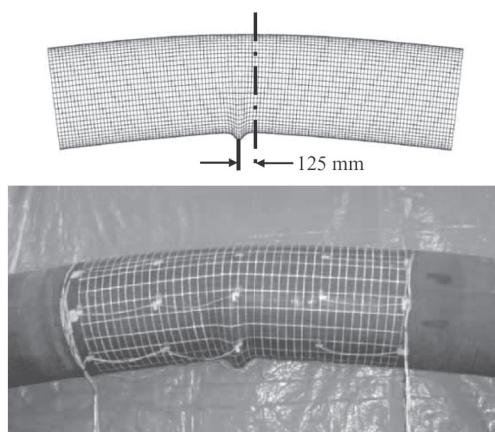


図5 座屈波形の発生状況（上：FEA、下：実験）

れる地域においてはより降伏比の低い高変形能のX80が選択される。

以上のように、地震等の地盤変動による変形に対して埋設パイプラインの安全性を確保するためには、敷設される鋼管が高い耐座屈性能を有していることが必要であり、材料としては表2のX80-Cや表3のHigh strainX80で代表されるような高変形能の鋼管が要求される⁸⁾。また、材料特性としては加工硬化性能 (n 値) が重要であるが、加工硬化性能を表す指標として、図6に示す応力比 σ_r (ある歪範囲での応力の上昇率) を適用することができる。ここで重要な点は、座屈が発生するひずみ領域に応じて評価するひずみ範囲を設定することであり⁹⁾、実際の埋設パイプラインの材料要求性能としても適用されている^{10,11)}。

3 変形能向上のための組織制御技術

本章では、高い加工硬化性能を得るための鋼材の材質制御方法とそれに基づき開発された高変形鋼管について紹介する。

連続降伏型でかつ高 n 値の応力歪曲線を得るための最適なミクロ組織形態を探索するために、実験のみならずFEM等の解析的手法による検討も行われている。図7に単位セルモデルというFEMモデルによって解析した、応力歪曲線に及ぼすベイナイト分率の影響を示す¹²⁾。フェライト相そのものは降伏棚を有しているが、ベイナイトを含んだ二相組織とすることで連続降伏型の応力ひずみ曲線が得られる。また、図8はMicromechanics による二相組織鋼の解析結果であり、第二相

表3 X80鋼管の材料特性と限界圧縮ひずみ

X80 pipes	Tensile properties			Critical compressive strain (%)			
	YS (MPa)	TS (MPa)	Y/T (%)	$f_D = 0$	0.4	0.6	0.72
High strain	535	696	77	1.87	2.00	2.41	2.82
Conventional	552	619	89	1.14	1.30	1.74	2.27

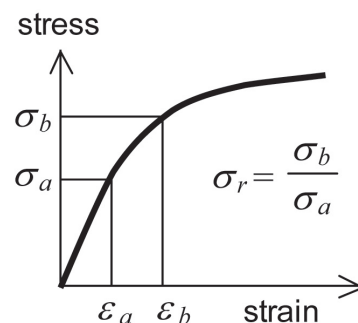


図6 応力比

の体積分率の増加または強度上昇によって n 値が上昇する¹³⁾。
上記に示されたフェライトーベイナイト二相組織は、鋼板製造プロセスにおける加速冷却温度を高精度に制御することにより得られる。図9に高変形能を有する鋼管のマイクロ組織を示す¹⁴⁾。同様の組織制御技術により製造した各種グレードの鋼管の応力-歪曲線を図10に示す。いずれの鋼管も低降伏比で従来鋼管の応力歪曲線と比べると一様伸び性能も大きく向上していることがわかる。上述のようなフェライトーベイナイト組織の高変形能ラインパイプの他に、鋼板製造において加速冷却直後にオンライン熱処理を適用した新しいプ

ロセス¹⁵⁾ (HOP ; Heat treatment On-line Process) によりベイナイトーMA (島状マルテンサイト) 組織を得ることが可能である¹⁶⁾。これは、加速冷却後の加熱処理によって未変態オーステナイトへの炭素濃縮を促進されることにより、微細で粒状のMAが得られることによる。オンライン熱処理を適用したX80グレードの高変形鋼管のマイクロ組織を図11に示す¹⁷⁾。体積分率で8%程度のMAがあり、マトリクスはベイナイト組織となっている。図12にベイナイトーMA型高変形

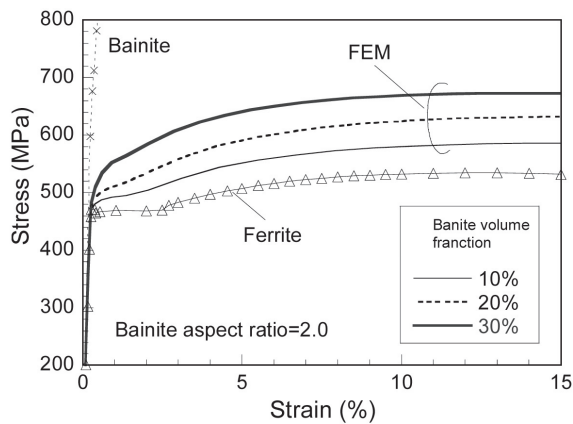


図7 応力ひずみ曲線に及ぼすベイナイト分率の影響¹³⁾

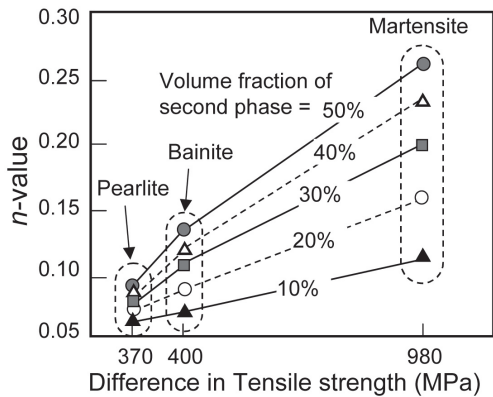


図8 n 値に及ぼす硬質第2相の影響¹³⁾

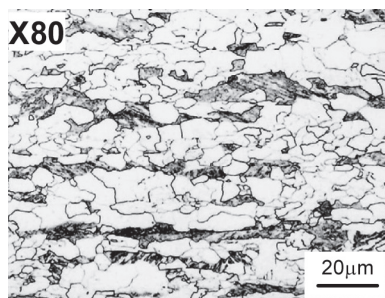


図9 F-B型高変形鋼管のマイクロ組織の例¹⁴⁾

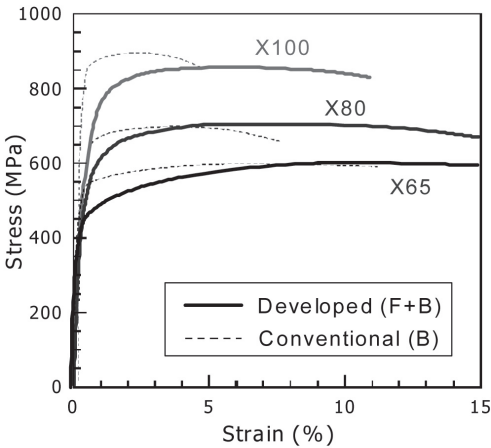


図10 F-B型高変形鋼管の応力ひずみ曲線¹⁴⁾

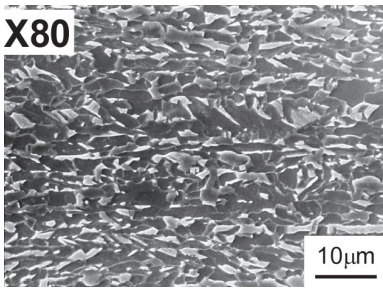


図11 B-MA型高変形鋼管のマイクロ組織の例¹⁷⁾

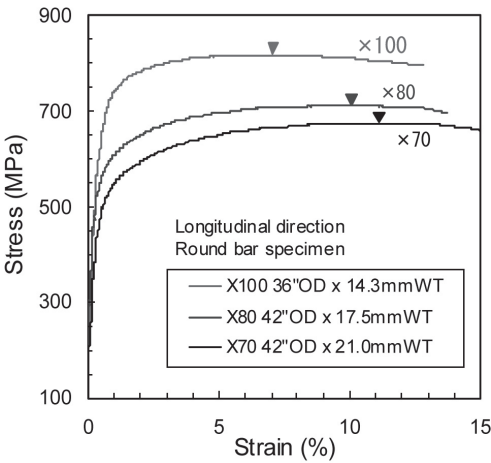


図12 B-MA型高変形鋼管の応力ひずみ曲線¹⁷⁾

鋼管の管軸方向応力歪曲線を示す。前述のフェライトーベイナイト型の高変形鋼管と同等以上の高い一様伸びが得られている。これらの複相組織を有する鋼管は軸圧縮及び曲げ実験により従来材と比べ高い耐座屈性能が得られることが実証されている^{16,17)}。

4 まとめ

本開発により、ひずみベース設計に適合できる高強度鋼管をはじめて工業化することができた。これにより、国内では天然ガスパイプラインの地震時における安全性の向上、カナダ、ロシア、中国では、ひずみベース設計に基づいた地震地帯と凍土地帯における長大天然ガスパイプラインプロジェクトの実現に寄与している^{10,11)}。

参考文献

- 1) 鈴木信久, 伊木聡, 正村克身 : JFE技報, 17 (2007) , 14.
- 2) A.Glover : Proc. Pipe Dreamers' Conference on Application and Evaluation of High-Grade Linepipes in Hostile Environments, (2002)
- 3) 日本ガス協会 : 高圧ガス導管耐震設計指針, (2004) , JGA 指-206-03.
- 4) N.Suzuki and M.Toyoda : Proc. 21st Int. Conf. OMAE, (2002) , OMAE2002-28253.
- 5) T.Zimmerman : Proc. Pipeline Technology, 5 (1995) , 365.
- 6) N.Suzuki, N.Ishikawa, M.Okatsu, J.Shimamura, S.Endo and J.Kondo : Proc. 6th Int. Pipeline Conf., (2006) , IPC2006-10070.
- 7) 鈴木信久, 近藤丈, 嶋村純二 : JFE技報, 17 (2007) , 31.
- 8) 鈴木信久, 加藤昭彦, 吉川正樹, 栗原正好, 遠藤茂 : NKK技報, 167 (1999) , 44.
- 9) N.Suzuki, J.Kondo, M.Okatsu and S.Igi : Proc. 18th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. (2008) , 111.
- 10) N.Ishikawa, M.Okatsu, J.Shimamura, S.Endo, R.Muraoka, J.Kondo and N.Suzuki : Proc. 7th Int. Pipeline Conf., (2008) , IPC2008-64506.
- 11) R.Muraoka, J.Kondo, L.Ji, H.Chen, Y.Feng, N.Ishikawa, M.Okatsu, S.Igi, N.Suzuki and K.Masamura : Proc. 8th Int. Pipeline Conf. (2010) , IPC2010-31556.
- 12) 石川信行, 遠藤茂, 栗原正好 : CAMP-ISIJ, 14 (2000) , 573.
- 13) T.Huper, S.Endo, N.Ishikawa and K.Osawa : ISIJ Int., 39 (1999) , 288.
- 14) N.Ishikawa, M.Okatsu, S.Endo and J.Kondo : Proc. 6th Int. Pipeline Conf. (2006) , IPC2006-10240.
- 15) 藤林晃夫, 小俣一夫 : JFE技報, 5 (2004) , 8.
- 16) M.Okatsu, T.Shinmiya, N.Ishikawa, S.Endo and J.Kondo : Proc. 24th Int. Conf. On OMAE, (2005) , OMAE2005-67146
- 17) N.Ishikawa, M.Okatsu, J.Shimamura, S.Endo, N.Shikanai, R.Muraoka, J.Kondo and N.Suzuki : Proc. 7th Int. Pipeline Conf. (2008) , IPC2008-64507.

(2011年1月20日受付)