

高強度ラインパイプの変形性能

Strain Capacity of High-Strength Line Pipes

鈴木 信久 SUZUKI Nobuhisa JFE 技研 主席研究員(部長)・工博
近藤 丈 KONDO Joe JFE スチール 西日本製鉄所 鋼材商品技術部溶接管室長
嶋村 純二 SHIMAMURA Junji JFE スチール スチール研究所 厚板形鋼研究部 主任研究員(係長)

要旨

変形性能に優れた高変形ラインパイプの座屈特性を示すため、外径 762 mm の X80 ラインパイプを用いて圧縮座屈実験と曲げ座屈実験を行った。各々 2 本の座屈実験を行った結果、圧縮変形に対する限界圧縮ひずみは 0.90% と 0.78% であった。曲げ変形に対する限界圧縮ひずみは、標点距離が管外径の 2 倍の場合に 2.40% と 2.15%、管外径と等しい場合に 2.67% と 2.28% であった。X80 高変形ラインパイプの優れた変形性能は、地震地帯や凍土地帯におけるパイプラインプロジェクトの要求性能を満足し、パイプラインの安全性を確保するために効果的である。

Abstract:

Two compression and two bending tests using X80 high-strain line pipes with 30 inches (762 mm) in outside diameter were conducted to investigate its compression capacity and bending capacity. The compression test revealed that the pipes had the critical compressive strain of 0.90 and 0.78% and the bending test clarified that the 2OD (two times outside diameter) average critical compressive strains were 2.40 and 2.15% and the 1OD average were 2.67 and 2.28%, respectively. The test results proved that X80 high-strain linepipes satisfy requirements from pipeline projects and ensure pipeline integrity in seismic and permafrost areas.

1. 概要

海外の長距離・超高圧ガスパイプラインプロジェクトでは、高強度ラインパイプを適用してコストダウンを図る検討が進められている¹⁾。このようなパイプラインが、地震地帯や凍土地帯に敷設される場合、高強度ラインパイプには十分な変形性能が要求される。高強度ラインパイプの変形性能は減少することが一般的に認識されているが、高変形ラインパイプ(以下、高変形 LP)は、高強度でも圧縮および曲げ変形性能に優れたラインパイプである^{2~4)}。

高変形 LP の変形性能を調べるため、圧縮座屈実験と曲げ座屈実験を行った。試験体は、外径 762 mm、管厚 15.6 mm の API 5L X80 で、圧縮および曲げで各々 2 本の座屈実験を行った。本報告では、実管の座屈実験の結果を示すと同時に、圧縮座屈に関する解析解と実験結果を比較する。さらに、FEA (finite element analysis: 有限要素解析)の結果と実験結果を比較するとともに、パイプの初期不整が変形性能に及ぼす影響を明らかにする。

2. 圧縮座屈実験と曲げ座屈実験の概要

2.1 圧縮座屈実験装置と試験体

圧縮座屈実験には 140 MN のプレスを使用した。圧縮座屈実験装置を **Photo 1** に示す。圧縮座屈実験には試験体



Photo 1 Compression test apparatus

Table 1 Dimensions and tensile properties of test pipes

Pipe No.	Dimensions			Longitudinal tensile properties			
	OD (mm)	WT (mm)	OD/WT	YS (MPa)	TS (MPa)	Y/T (%)	uEL (%)
C-1	762	15.6	49	524	684	77	8
C-2				565	704	80	8

OD: Outside diameter, WT: Wall thickness, YS: Yield strength, TS: Tensile strength, YS/TS: Yield ratio, uEL: Uniform elongation

C-1, C-2 と二本のパイプを使用し、内圧を負荷しないで実験を行った。試験体 C-1 と C-2 の全長は 1840 mm で、Table 1 に示すように、外径 (OD) は 762 mm、管厚 (WT) は 15.6 mm、管厚管径比 (OD/WT) は 49 である。また、Table 1 には軸方向の材料特性も示す。

2.2 曲げ座屈実験装置と試験体

実験装置を Photo 2 に示す。実験装置は、試験体、袖管、モーメントアーム、油圧ジャッキ、固定フレームで構成されている。試験体 B-1 と B-2 は外径 762 mm、管厚 15.6 mm、管長 4000 mm である。モーメントアームは長さ 1830 mm、スパンは 5810 mm である。試験体には内圧 12 MPa を負荷しているが、試験体両端のキャップにも内圧が作用するため、試験体には引張曲げ変形が作用する。試験体の寸法と軸方向の材料特性を Table 2 に示す。曲げ試験体は圧縮試験体と同じ寸法である。

2.3 幾何学的初期不整

試験体の幾何学的初期不整を Table 3 に示す。この幾何



Photo 2 Bending test apparatus

Table 2 Dimensions and tensile properties of test pipes

Pipe number	Dimensions			Longitudinal tensile properties			
	OD (mm)	WT (mm)	OD/WT	YS (MPa)	TS (MPa)	Y/T (%)	uEL (%)
B-1	762	15.6	49	535	696	77	8
B-2				672	782	86	8

OD: Outside diameter, WT: Wall thickness, YS: Yield strength, TS: Tensile strength, YS/TS: Yield ratio, uEL: Uniform elongation

Table 3 Geometric imperfections of the test pipes

Geometric imperfections	Test pipe		
	C-1, B-1	C-2, B-2	
OD (Outside diameter) (mm)	Min.	761.6	760.0
	Max.	763.0	761.9
WT (Wall thickness) (mm)	Min.	15.52	15.59
	Max.	15.90	15.66
BL (Longitudinal blister)	Wave length (mm)	740-800	740-800
	Amplitude (mm)	0.5	0.5

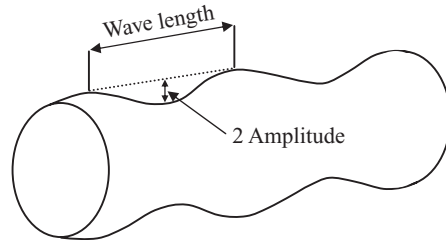


Fig. 1 Definition of longitudinal blister

学的初期不整は、Photo 1 および 2 に示す試験体の格子線および格子点で計測した、パイプの外径、管厚、軸方向不陸である。軸方向不陸の説明を Fig. 1 に示す。以下に示す図では、各初期不整を OD 不整、WT 不整および BL 不整と表す。

3. 高変形 LP の圧縮変形性能

3.1 圧縮座屈実験の結果

圧縮試験体 C-1 と C-2 の実験結果を Fig. 2 と 3 に示す。Fig. 2 に示すように、試験体 C-1 の限界圧縮応力は 568 MPa、限界圧縮ひずみは 0.90% であった。また、Fig. 3 に示すように、試験体 C-2 の限界圧縮応力は 579 MPa、限界圧縮ひずみは 0.78% であった。実験結果が示すように、試験体 C-1 の圧縮限界ひずみは C-2 よりも大きくなっている。これは、C-1 の降伏比が C-2 よりも低いためである。試験体 C-2 は C-1 よりも降伏応力が高いため、限界圧縮応力が大きい。

3.2 実験結果と解析解の比較

材料の応力ひずみ関係を Ramberg-Osgood 式⁵⁾ (以下、R-O 式) で表し、薄肉円筒シェルの圧縮限界ひずみに関する解析解⁶⁾ が次式のように得られている。

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

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_0}\right) + \frac{\alpha\sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_0}\right)^N \dots\dots\dots (2)$$

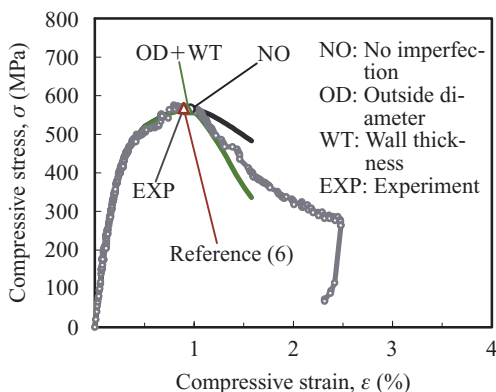


Fig. 2 Compressive deformation of Pipe C-1

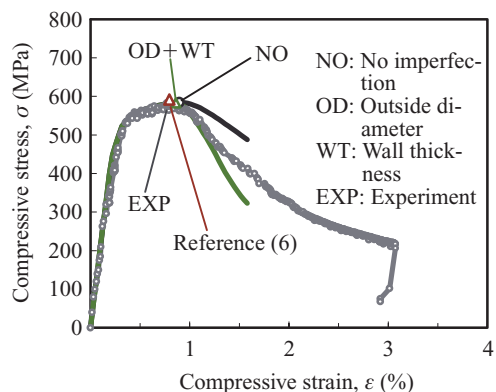


Fig. 3 Compressive deformation of Pipe C-2

ここに、 E はヤング率、 α と σ_0 と N は R-O パラメータ、 σ_{cr} は限界圧縮応力、 ϵ_{cr} は限界圧縮ひずみである。

試験体 C-1, C-2 の R-O パラメータと材料定数を **Table 4** に示す。これらを上記解析解に代入すると、試験体 C-1 の限界圧縮応力は 569 MPa、限界圧縮ひずみは 0.93% となる。試験体 C-2 は、592 MPa、0.80% となる。Fig. 2, 3 に示すように、この計算結果は実験データとよく一致している。

3.3 実験結果と有限要素解析結果の比較

初期不整を考慮せず、試験体 C-1, C-2 の圧縮座屈挙動を解析した。試験体を 4 節点シェル要素でモデル化し、メッシュは円周方向に 40 mm、管軸方向に 25 mm とした。試験体 C-1, C-2 に関する計算結果を Fig. 2 と 3 に示す。

Fig. 2, 3 に示すように、最大荷重点までは FEA の結果と実験結果はよく一致している。初期不整を考慮しない FEA によると、試験体 C-1 の限界圧縮応力は 562 MPa、限

界圧縮ひずみは 0.88% であり、試験体 C-2 では 581 MPa および 0.80% であった。これらの計算結果はいずれも実験結果に近いことから、初期不整を考慮しない FEA でも、試験体の限界圧縮応力と限界圧縮ひずみは、精度よく推定することが可能と考えられる。

試験体 C-1 と C-2 について、(OD + WT) 不整を考慮した FEA の計算結果を Fig. 2 と Fig. 3 に示す。図に示すように、(OD + WT) 不整を考慮した計算結果は、限界圧縮応力までは実験結果とよく一致している。また、試験体 C-1 の限界圧縮応力は 561 MPa、限界圧縮ひずみは 0.87% であり、試験体 C-2 では 580 MPa および 0.80% であった。さらに、最大圧縮応力以降、(OD + WT) 不整を考慮した結果は、初期不整を考慮した結果よりも早く減少している。

以上の結果を要約すると、幾何学的初期不整は、圧縮変形を受けるパイプの限界圧縮応力および限界圧縮ひずみにはほとんど影響を及ぼさない。つまり、圧縮変形を受けるパイプの座屈波形が成長する際、管端で半径方向への変形を拘束する境界条件の影響がより顕著であり、幾何学的初期不整の影響は明確に表れない。

3.4 座屈波形の比較

Photo 3 に試験体 C-1 の座屈後の変形挙動を示すが、座屈波形は試験体の下端付近に発生している。この変形状況は試験体 C-2 も同様であった。

FEA で得られた試験体 C-1 の座屈波形を **Fig. 4** に示す。左側の図が初期不整を考慮しない計算結果で、右側の図が (OD + WT) 不整を考慮した計算結果である。いずれも、平均圧縮軸ひずみは 2.1% である。初期不整を考慮しない場合、座屈波形は試験体の上下両端に発生しているが、(OD + WT) 不整を考慮した場合、座屈波形は試験体の下端に発生している。初期不整を考慮した座屈波形は **Photo 3** に示す試験体の座屈波形とよく似ている。



Photo 3 Shell wrinkle after a compression test

Table 4 Ramberg-Osgood parameters for the test pipes

Pipe number	R-O parameters				
	E (GPa)	ϵ_0 (%)	σ_0 (MPa)	α	N
C-1	206	0.5	524	0.965	11.82
C-2	210	0.5	565	0.858	17.28

E: Young's modulus, ϵ_0 : 0.5% strain, σ_0 : Stress at ϵ_0 , α, N : R-O parameters

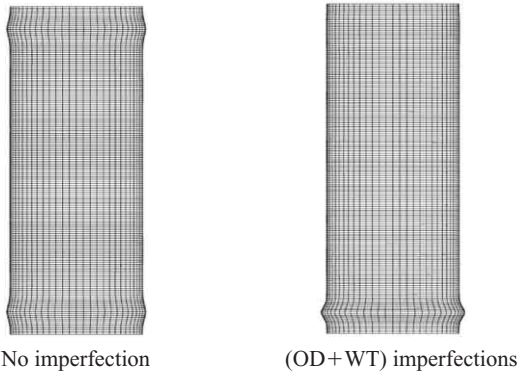


Fig. 4 Effect of geometric imperfections on shell wrinkling

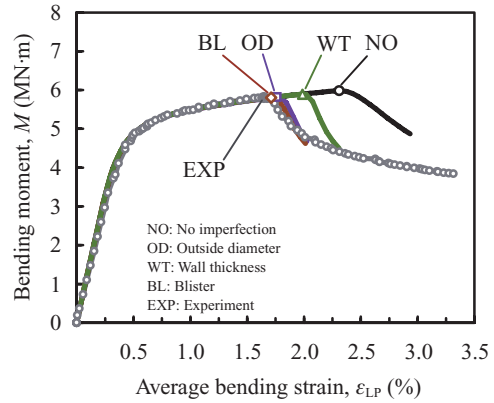


Fig. 7 Moment vs. average bending strain of Pipe B-2

4. 高変形 LP の曲げ変形性能

4.1 曲げ座屈実験の結果

試験体 B-1 の曲げモーメントと平均曲げひずみの関係を Fig. 5 と 6 に示す。試験体 B-2 については、Fig. 7 と 8 に示す。各図とも、横軸の平均曲げひずみは、試験体全長の相対回転角から求めた値であり、試験体全長に対する平均的な曲げひずみを表している。

図に示すように、試験体 B-1 の限界曲げモーメントは 5.08 MN·m、平均限界曲げひずみは 1.85% であった。また、

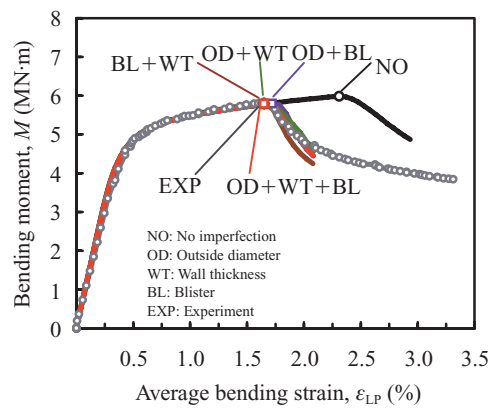


Fig. 8 Moment vs. average bending strain of Pipe B-2

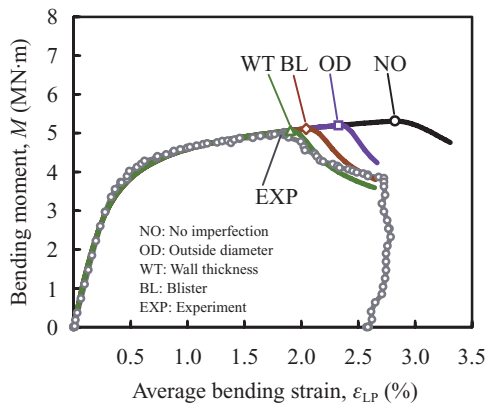


Fig. 5 Moment vs. average bending strain of Pipe B-1

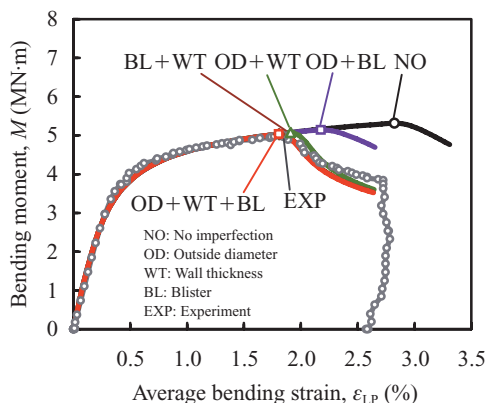


Fig. 6 Moment vs. average bending strain of Pipe B-1

試験体 B-2 の限界曲げモーメントは 5.80 MN·m、平均限界曲げひずみは 1.65% であった。試験体 B-1 の限界曲げモーメントは B-2 よりも 22% 小さく、B-1 の平均限界曲げひずみは B-2 よりも 20% 大きくなっている。

4.2 曲げ座屈実験の有限要素解析

試験体 B-1 と B-2 は、圧縮試験体と同様、4 節点シェル要素でモデル化した。分割要素は圧縮試験体と同様で、実験装置の袖管は 4 節点シェル要素、モーメントアームはビーム要素でモデル化した。

4.2.1 試験体 B-1 の有限要素解析

試験体 B-1 について、単一の初期不整を考慮した FEA の結果を Fig. 5 に示す。図の縦軸が曲げモーメント、横軸が平均曲げひずみである。同図には、試験体 B-1 の実験結果を比較のためにプロットしてある。図に示すように、初期不整を考慮しない限界曲げモーメントと平均限界曲げひずみはいずれも最大値を示している。

初期不整を考慮しない FEA の結果は、実験データと限界変形まではよく一致しているが、限界変形以降も変形が増加し、最終的には限界平均ひずみを過大に評価している。単一の初期不整を考慮した他の計算結果も同様な傾向を示しているが、OD 不整、BL 不整、WT 不整の順に限界平均曲げひずみの推定精度は向上している。

試験体 B-1 について、複数の初期不整を組み合わせた計算結果を Fig. 6 に示す。図の横軸と縦軸は Fig. 5 と同様で、比較のため、試験体 B-1 の実験結果をプロットしてある。結果を比較すると、(OD + WT) 不整を考慮した結果は実験結果よりも大きくなっている。(BL + WT) 不整と (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、この計算結果は実験結果と比較して安全側の値である。

4.2.2 試験体 B-2 の有限要素解析

試験体 B-2 について、単一の初期不整を考慮した計算結果を Fig. 7 に示す。図の縦軸と横軸は上述の試験体 B-1 の場合と同様であり、比較のために実験結果もプロットしてある。初期不整を考慮しない計算結果は Fig. 5 と同様な傾向を示しており、他の計算結果とも重なっている。単独の初期不整を考慮した限界平均曲げひずみは、WT 不整、OD 不整、BL 不整の順に推定精度が向上している。

試験体 B-2 と B-1 の計算結果における相違点は、WT 不整を考慮した結果に表れている。つまり、B-2 の WT 不整は B-1 よりも小さいため、WT 不整を考慮した限界平均曲げひずみは、初期不整を考慮しない結果に近く、B-1 の計算結果よりも大きいことである。

試験体 B-2 で、複数の初期不整を考慮した曲げモーメントと平均曲げひずみの関係を Fig. 8 に示す。(OD + WT) 不整を考慮した平均限界曲げひずみは、実験結果よりもやや大きい。また、(BL + WT) 不整あるいは (OD + WT + BL) 不整を考慮した平均限界曲げひずみは等しく、実験データに近い値が得られた。上述のように、試験体 B-2 に WT 不整を考慮した場合、WT 不整が小さいため、計算結果には、実験結果に対して大きな相対誤差が発生した。ところが図に示すように、WT 不整と他の初期不整を組み合わせたところ、計算結果は実験結果に近い値であった。

4.3 座屈波形の比較

試験体 B-1 の座屈波形の成長状況を Photo 4 に示す。座屈波形は外面に生成しており、座屈波形の頂部は試験体中心から 125 mm 左側に発生している。

試験体 B-1 について、初期不整を考慮しない座屈波形を Fig. 9、(OD + WT) 不整を考慮した座屈波形を Fig. 10 に

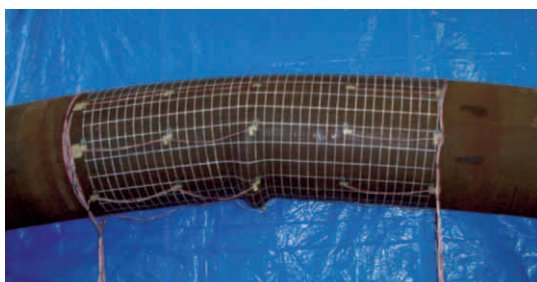


Photo 4 Shell wrinkle of Pipe B-1

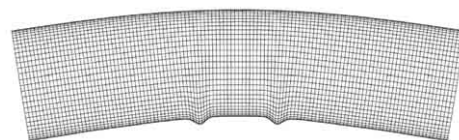


Fig.9 Shell wrinkles with no geometric imperfection

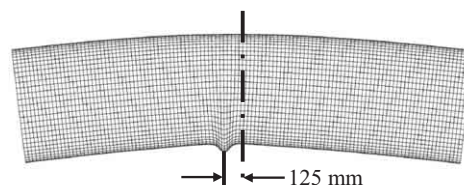


Fig.10 Shell wrinkle with the OD+WT imperfections

示す。初期不整を考慮しない場合には 2 山、(OD + WT) 不整を考慮した場合には 1 山の座屈波形が発生している。(OD + WT) 不整を考慮した座屈波形は、Photo 4 に示す曲げ座屈実験で確認された座屈波形と形状も発生位置もほぼ同一である。

4.4 平均限界圧縮ひずみ

4.2 節では、座屈実験に基づく X80 高変形 LP の変形性能を平均限界曲げひずみで表した。ここでは視点を変え、圧縮ひずみの平均値である平均限界圧縮ひずみを用いて変形性能を示す。Fig. 11 に試験体 B-1 の座屈波形が発生した直近の断面における、軸方向曲げひずみ (bending strain)、圧縮ひずみ (compressive strain) および引張ひずみ (tensile strain) の関係を示す。

標点距離を試験体の全長 (L_p) として定義した平均限界圧縮ひずみを ϵ_{crLp} と表す。また、標点距離を平均管径 (D) の 2 倍 ($2D$)、管外径 ($1D$) とした平均限界圧縮ひずみをそれぞれ ϵ_{cr2D} 、 ϵ_{crD} と表す。

試験体 B-1 について、曲げ実験で得られた平均限界圧縮ひずみ (ϵ_{crLp} 、 ϵ_{cr2D} 、 ϵ_{crD}) は 1.91%、2.40% および 2.67% であった。FEA では、(OD + WT + BL) 不整を考慮した場合に最も安全側に高精度な結果が得られており、それぞれの限界平均圧縮ひずみは 2.01%、2.28%、2.40% であっ

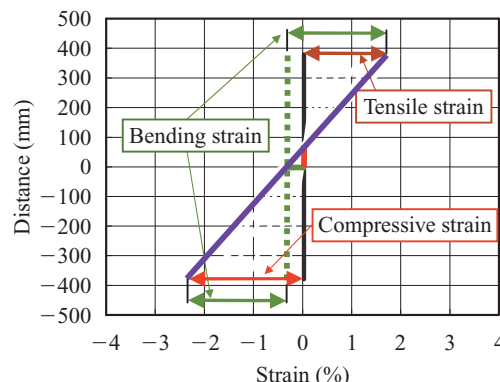


Fig.11 Longitudinal strain distribution in a pipe section

た。この結果から分かるように、標点距離が短くなるにしたがって平均限界ひずみは増加している。

試験体 B-2 について、曲げ実験で得られた平均限界圧縮ひずみ (ε_{cr1p} , ε_{cr2D} , ε_{crD}) は 1.85%, 2.15%, 2.21% であった。また、(OD + WT + BL) 不整を考慮した平均限界圧縮ひずみは 1.84%, 2.12%, 2.21% であった。試験体 B-1 同様、標点距離が短くなるにしたがって、平均限界圧縮ひずみは増加している。さらに、試験体 B-2 の YS/TS は B-1 よりも大きいので、B-2 の平均限界圧縮ひずみは B-1 よりも小さい。

試験体 B-1 および B-2 に関する FEA の計算結果を要約すると、WT 不整を含む複数の初期不整を考慮することによって、パイプの曲げ変形特性を精度良く推定することができる。精度良く推定するための初期不整の組み合わせは、(OD + WT) 不整、(WT + BL) 不整、および (OD + WT + BL) 不整である。

5. 結論

X80 グレード高変形 LP の変形性能を調べるため、外径 762 mm、管厚 15.6 mm の試験体による圧縮座屈実験と曲げ座屈実験を行った。

試験体 C-1 と C-2 を用いた圧縮座屈実験および FEA の結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 試験体 C-1 と C-2 の限界圧縮ひずみはそれぞれ、0.90% と 0.78% であった。
- (2) 解析解と FEA で推定した限界圧縮応力と限界圧縮ひずみは、実験結果とよく一致した。
- (3) 幾何学的初期不整はパイプの圧縮変形性能に影響しないが、座屈波形や後座屈挙動には影響する。

試験体 B-1 と B-2 を用いた曲げ座屈実験および FEA の結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 試験体 B-1 および B-2 の平均限界曲げひずみ (2OD 平均) は 2.40% と 2.15% であった。
- (2) 試験体の曲げ変形性能および後座屈挙動に及ぼす幾何

学的初期不整の影響は顕著であった。

- (3) 幾何学的初期不整の組み合わせ、たとえば (OD + WT) 不整、(BL + WT) 不整あるいは (OD + WT + BL) 不整を FEA に考慮することにより、パイプの最大曲げモーメントと平均限界ひずみを精度よく推定することができる。

以上のように、高変形 LP は圧縮変形性能と曲げ変形性能に優れており、地震地帯や凍土地帯でパイプラインの安全性を確保するために有効である。

参考文献

- 1) Glover, A. Application of Gade 550 (X80) and Grade 690 (X100) in Arctic Climates. Proc. of Pipe Dreamers' Conference on Application and Evaluation of High-Grade Linepipes in Hostile Environments. 2002.
- 2) Suzuki, N.; Endo, S.; Yoshikawa, M.; Toyoda, M. Effect of Strain-hardening Exponent on Inelastic Local Buckling Strength and Mechanical Properties of Linepipes. Proc. of the 20th OMAE. 2001, paper no. OMAE2001/MAT 3104.
- 3) Suzuki, N.; Glover, A.; Zhou, J.; Toyoda, M. Bending Capacity of High Strength Line Pipe. Proc. of the 4th Int. Conf. on Pipeline Technology. 2004, vol. 3, p. 1361-1374.
- 4) Suzuki, N.; Kondo, J.; Endo, S.; Ishikawa, N.; Okatsu, M.; Shimamura, J. Effect of Geometric Imperfection on Bending Capacity of X80 Linepipe. Proc. of the 6th Int. Pipeline Conf. 2006, paper no. IPC2006-10070.
- 5) Ramberg, W.; Osgood, W. R. Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters. NACA. TN. 902, 1943.
- 6) Suzuki, N.; Toyoda, M. Critical Compressive Strain of Linepipes Related to Work-Hardening Parameters. Proc. of the 21st Int. Conf. on Offshore Mechanics and Engineering. 2002, paper no. OMAE2002-28253.



鈴木 信久



近藤 丈



嶋村 純二