耐震ラインパイプの開発

遠藤 茂¹⁾ 栗原正好²⁾ 鈴木信久³⁾
加藤昭彦⁴⁾ 吉川正樹⁴⁾

1. 緒 言

埋設されたパイプラインの耐震強度に関しては、引張変形と局部座屈強度を検証する必要があることが現行のガスパイプライン耐震設計指針などに示されている⁽¹⁾⁽²⁾。この耐震設計指針では、繰り返し発生する地盤振動に対して直管ならびに異形管の許容ひずみを1%としているが、直管については管径(D)および管厚(t)から求められる限界座屈ひずみ($\epsilon_b = 35t/D(\%)$)が1%以下の場合には ϵ_b をパイプライン設計の許容ひずみとすることが規定されている。また、実際の座屈試験により求めた ϵ_b を用いることも可能とされている。上式から分かるように座屈ひずみは管厚に比例し管径に反比例する。現在広く用いられているラインパイプでは D/t が40前後であり座屈ひずみは1%以上となる。しかし、API-X80(降伏強さ 551 MPa 以上)などの高強度ラインパイプを適用し管厚の低減を図る場合、座屈強度が低下し座屈ひずみを許容ひずみとして用いなければならなくなる。したがって、高強度ラインパイプの耐座屈特性を向上させることにより、より大きな許容ひずみをパイプライン設計に用いることが可能となる。このような背景に鑑み、ラインパイプに用いられる実鋼管の単軸圧縮試験を行い、耐座屈性と材料特性組織などとの関係を調べ、現行設計指針に比べて1.5倍前後の座屈ひずみを有する高強度耐震ラインパイプを開発した。本報告では、耐座屈性能と材料特性との関係、開発したラインパイプの機械的性能、耐座屈特性などについて紹介する。

2. 鋼管の耐座屈性

鋼管の単軸圧縮時の耐座屈性に及ぼす材料特性、特に、加工硬化能などの影響を調べるため、表1にその鋼管長手方向の引張特性と組織の特徴を示した鋼管を用いて圧縮試験を行った。表1には鋼管サイズも併せて示した。いずれも、UOE プロセスの実製造ラインにより製造した鋼管である。鋼管の強度はAPI-X60 から X80 グレードに相当している。

単軸圧縮試験後の鋼管の外観を図1に示す。全ての供試鋼

表1 供試鋼管のサイズならびに長手方向引張特性。

符号	鋼管寸法, mm				降伏強さ MPa	引張強さ MPa	降伏比 %	n 値	*
	外径	管厚	長さ	径厚比					
A	610	15.1	1830	40	504	574	88	0.07	F-P
B	610	15.4	1830	40	442	518	85	0.07	
C	917	19.0	1830	48	519	582	89	—	B
D	711	19.0	1830	44	523	752	70	0.14	F-B

*: ミクロ組織 F: フェライト, P: パーライト, B: ベイナイト

図1 単軸圧縮試験後の鋼管外観。

* NKK

総合材料技術研究所: 1)主任研究員 2)主幹研究員
エンジニアリング研究所: 3)室長 4)主任研究員
High Strength Linepipe Having Superior Buckling Resistance
Shigeru Endo, Masayoshi Kurihara, Nobuhisa Suzuki, Akihiko
Kato and Masaki Yoshikawa(NKK Corporation)
1999年10月29日受理

管において図1と同様に、いわゆる提灯型の座屈形態の発生が認められた。

また、供試鋼管の応力-ひずみ曲線において、鋼管Cでは降伏棚を有する応力-ひずみ曲線であり(Lüders elongation type)、それ以外の鋼管は連続降伏型(Round-house type)の応力-ひずみ曲線であった。鋼管Cにおける降伏棚の長さはひずみ量で1.5%程度となっている。また、表1の加工硬化指数(以下 n 値)はひずみ範囲1%から4%における応力-ひずみ曲線を式(1)で近似して求めた値である。

$$\sigma = A \cdot \varepsilon^n \quad (1)$$

A : 定数 σ : 真応力 ε : 真ひずみ, n : n 値

D/t を横軸として整理した圧縮試験で得られた限界座屈ひずみを図2に示す。図2中には、100 mm Φ のミニモデル鋼管により得られた座屈試験結果とガスラインパイプの耐震設計指針に示されている D/t と限界座屈ひずみの関係も併せて示した。図中括弧内の数字は n 値を示している。 n 値が高い鋼管が大きな限界座屈ひずみを示し、 n 値が0.14の鋼管Dでは1.5%前後の限界座屈ひずみが得られた。また、鋼管Cのように鋼管の D/t が40前後以上で降伏棚を有する場合、限界座屈ひずみは1%未満の低いとなった。

単軸圧縮試験結果を異なるひずみ範囲で求めた n 値で整理し図3に示す。近似式を得るひずみ範囲によって n 値は変化するが、一様伸び(uEl)まではほぼ全範囲で求めた n 値よりも、ひずみ範囲1%から4%で求めた n 値の方が限界座屈ひずみとの相関関係がよいことが認められた。本試験で得られた単軸圧縮時の限界座屈ひずみは数%のひずみ領域であり、1%から4%程度の低ひずみ範囲での加工硬化特性が限界座屈ひずみと良い相関を示したと考えられる。

鋼管AならびにBのマイクロ組織はフェライトとパーライトの混合組織、CとDのマイクロ組織はそれぞれベイナイト、フェライト-ベイナイト組織となっていた。このフェライト-ベイナイトの2相組織鋼は、特に低ひずみ領域において大きな n 値を示し⁽³⁾、鋼管Dは引張強さが750 MPaと高いにもかかわらず0.14と高い n 値を示した。

耐座屈特性と鋼の機械的性質マイクロ組織などの特徴をまとめて以下に示す。

図2 単軸圧縮試験での限界座屈ひずみと管径管厚比の関係。

図3 限界座屈ひずみに及ぼす加工硬化指数の影響。

- (1) ひずみ範囲で1%から4%で求めた n 値の増加に伴って鋼管の限界座屈ひずみは増加する。
- (2) 管径管厚比大きな領域において、降伏棚を有しない鋼管に比べて、降伏棚を有する鋼管は低い座屈ひずみを示す。
- (3) フェライト+ベイナイト2相組織鋼は低ひずみ領域で大きな n 値を有し、高い限界座屈ひずみを示す。

3. 開発耐震ラインパイプ

(1) 開発ラインパイプの特徴

前章の結果に基づいて、マイクロ組織をフェライト-ベイナイト2相組織とし、 n 値を0.15前後まで上昇させ、降伏棚を消失させたラインパイプをUOEプロセスにより製造した。フェライト-ベイナイト2相組織を得るため、鋼板の製造には加速冷却プロセスを適用した。開発ラインパイプはAPI (America 石油協会)規格のグレードX65ならびにX80に相当する強度を有している。

(2) 機械的性質

開発ラインパイプのサイズならびに機械的性質を表2に示

表2 開発鋼管のサイズならびに機械的性質。

符号	鋼管寸法, mm			降伏強さ MPa	引張強さ MPa	n 値
	外径	管厚	径厚比			
E(X65)	711	16.0	44	468	645	0.16
F(X80)	711	17.8	40	557	772	0.19

シャルピー		DWTT		円周溶接部	
エネルギー -10℃	85%SATT	引張強さ MPa	エネルギー -10℃	FATT	
222, 265, 255	-30	670	169, 149, 147	-56	
236, 246, 250	-30	785	124, 178, 142	-57	

85%SATT: 85%延性破面遷移温度, FATT: 破面遷移温度。

図4 開発鋼管の限界座屈ひずみ(単軸圧縮)。

図5 直管の曲げ実験概念図。

す。表2中には現地溶接を想定した溶接部の機械的性質も併せて示した。通常のラインパイプは、 -10°C 前後の環境で使用され、シャルピー試験で50 J以上の吸収エネルギー、落重試験(DWTT)ではほぼ100%延性破面が得られる。したがって、開発したラインパイプも現状のラインパイプと遜色ない特性を有していることが分かる。また、現地円周溶接を模擬した溶接継手においても良好な特性が得られることも確認できた。

(3) 圧縮および曲げ変形時の耐座屈性

図4に、開発ラインパイプの単軸圧縮時の限界座屈ひずみを図3の結果に併せて示す。開発材は既存ラインパイプに比べて高強度であるにもかかわらず、現状の耐震設計基準から求められるひずみに対して1.5倍前後でかつ1%以上の限界座屈ひずみを有している。

さらに、開発材の良好な変形能の確認を、直管の曲げ試験により確認した。曲げ試験の概念図、曲げ座屈試験材の外観ならびに開発材の曲げ座屈特性を図5から図7に示す。試験体は被試験部と袖管および載荷治具から構成され、載荷治具の端部への強制変位入力により曲げ変形を付与した。

図7の実線は曲げ座屈ひずみと n 値の関係についてのFEM解析結果である。曲げ座屈についても軸圧縮座屈と同様に n 値の増加とともに曲げ座屈ひずみが増加する傾向を示している。開発材(F)の曲げ座屈ひずみは4%前後と圧縮

図6 曲げ試験後の外観。

図7 曲げ座屈ひずみに及ぼす加工硬化指数の影響。

時の座屈ひずみに比べて2倍以上の値を有し、曲げ変形時にも良好な変形能を有していることが分かる。

4. ま と め

2相組織を特徴とし、高い加工硬化能を有する開発した耐震ラインパイプは、現行の耐震設計基準に対して1.5倍前後の限界座屈ひずみと、既存ラインパイプと同等の強度靱性と溶接部性能を有している。開発ラインパイプのガスパイプラインへ適用は、従来以上に安全性の高いパイプラインの建設が可能となる。特に、高強度ラインパイプを用いる場合にその効果は大きいと考えられ、国内ガスパイプラインの高圧化の進行とともに、その適用の拡大が期待される。

5. 特 許

特開平09-176734など約30件の特許を出願している。

文 献

- (1) 鈞日本ガス協会“ガスパイプライン耐震設計指針”，(1983)。
- (2) 鈞日本水道協会“水道施設耐震工法指針・解説”，(1997)。
- (3) T. Hüper, S. Endo and N. Ishikawa: ISIJ International, 39(1999), 288.