506 パイプライン用鋼の強度特性におけるひずみ時効性

Strain Aging on Tensile Properties of Line Pipe Steels

正 ○福田 直樹 (東京ガス㈱) 増田 智紀 (東京ガス㈱)

Naoki FUKUDA, Tokyo Gas Co., Ltd., Fundamental Technology Laboratory, 1-16-25, Shibaura, Minato-ku, Tokyo

Tomoki MASUDA, Tokyo Gas Co., Ltd.

Key Words; strain aging, line pipe steel, the Bauschinger effect, work hardening, plastic strain, tensile properties

ひずみ時効, パイプライン用鋼, バウシinger効果, 加工硬化, 塑性ひずみ, 強度特性

1. はじめに

冷間加工により塑性変形を受けた鋼材は, バウシinger効果や加工硬化により強度特性が変化する。さらに, 時間経過に伴い力学的特性が変化するひずみ時効現象が知られている。ひずみ時効の影響のひとつとして, 降伏応力(YS)や降伏比(Y/T)の変化が挙げられ, これらは鋼構造物の変形性能に影響を与える⁽¹⁾との指摘がある。

パイプラインにおいても, 冷間加工により製造される鋼構造物部材があるが, パイプライン用鋼における冷間加工と強度特性に関する材料基礎データが不足している。

パイプライン用鋼を対象とした冷間塑性加工に関しては, いくつか研究例⁽²⁾⁽³⁾があるものの, これまでに強度の異なる鋼材についてバウシinger効果, 加工硬化およびひずみ時効に関して系統的な研究はなされていない。また, ひずみ時効の加速試験方法として, 100℃~250℃で1時間の熱処理(以下, 時効処理)が提案⁽⁴⁾⁽⁵⁾されているが, 加速試験と室温における放置との対応は, これまで十分に検証されていない。さらに, これらはいずれも建築用鋼を対象としたものであり, パイプライン用鋼についての知見はない。

そこで, 本研究では2種類のパイプライン用鋼を対象として, 冷間加工による強度特性の変化を定量的に評価するため, -3%~+3%の圧縮および引張の予ひずみを付与した平板引張試験片を作製し, 予ひずみ付与直後および時効処理後に引張試験を実施した。時効処理条件として, 250℃で1時間(加速試験)と室温で180日間を設定した。

2. 実験方法

2.1. 供試管

供試管として, アメリカ石油協会(API)規格 5L X65, X60鋼管を用いた。X65は制御圧延・制御冷却(TMCP)方式, X60は制御圧延(CR)方式により製造されたラインパイプ用鋼管である。以下, X65材をPipe A, X60材をPipe Bと記す。

表1に供試管の寸法, 表2に化学成分を示す。これら鋼管の母材部の管軸方向に沿って, 図1に示す平板引張試験片を機械加工した。表3中の降伏応力(YS)は0.5%耐力で, 引張強さとともに JIS Z2201:1998 に基づく引張試験より得られた値である。図2にPipe A, Bの応力ひずみ曲線(SSカーブ)を示す。

2.2. 予ひずみの付与

図1に示す引張試験片に, 室温で-3%~+3%の単軸の圧縮または引張の予ひずみを万能試験機(容量 200 kN)を用いて付与した。圧縮の予ひずみを付与する際には, 試験体に座屈防止用のジグを装着した。試験体両面の平行部中央におけるひずみを, 塑性域測定用のひずみゲージにより計測した。なお, ひずみに関して, -は圧縮, +は引張を表す。

2.3. 引張試験

バウシinger効果および加工硬化を定量的に評価するため, 予ひずみ付与直後に引張試験を実施した。

また, ひずみ時効評価の加速試験として, 供試材を250℃で1時間の時効処理を施した後に引張試験を実施した。さらに, 室温におけるひずみ時効を評価するために, -2%, -1%, -0.5%, +1%, +3%の予ひずみを付与した試験片を室温で180日間放置した後に引張試験を実施した。

Table 1 Nominal dimensions of pipes (mm)

Pipe	Outer Diameter	Wall Thickness
A	406.4	13.1
B	609.6	15.1

Table 2 Chemical Compositions of pipes (wt%)

Pipe	C	Si	Mn	P	S
A	0.071	0.24	1.48	0.006	0.001
B	0.12	0.32	1.24	0.012	0.014

Fig. 1 Tensile Specimen

Fig. 2 Stress-strain relationship of pipes

Table 3 Mechanical properties of pipes in the longitudinal direction

Pipe	Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Y/T
A	475.3	540.5	0.88
B	406.3	523.8	0.78

Fig. 3 Stress-strain relationship of Pipe A (prestrained samples)

Fig. 4 Relationship between YS and prestrain

Fig. 5 Relationship between Y/T and prestrain

Table 4 YS and Y/T of base metal and prestrained samples

Pipe	Aging	Base Metal		Prestrained +3%		Prestrained -3%	
		YS	Y/T	YS	Y/T	YS	Y/T
A	-	475	0.88	545	0.99	364	0.70
	250°C	501	0.91	600	0.97	472	0.86
B	-	406	0.78	517	0.95	363	0.70
	250°C	432	0.80	559	0.99	431	0.80

3. 実験結果

3.1. 予ひずみ付与直後

図3に、予ひずみ試験におけるPipe Aの代表的な応力-ひずみ履歴を示す。図3は+3%または-3%の予ひずみ付与時および引張試験時の応力-ひずみ関係である。図4、図5に、予ひずみ試験における予ひずみ量とYS、予ひずみ量とY/Tの関係を示す。表4に、予ひずみ±3%付与後および母材の引張強度特性における時効処理の影響を示す。

図3において、予ひずみ付与時のYSは圧縮側で-490Mpa、引張側で+480Mpaであり、YSのひずみ方向依存性はほとんど無かった。また、予ひずみ付与直後の引張試験のSSカーブ形状において、圧縮側では降伏点が見られず、引張側では降伏点が見られることから、バウシinger効果および加工硬化の影響が確認できる。

図4、図5、表4より、Pipe A、Bに共通な特徴として、予ひずみ-0.5%~+1%においてはYSとY/Tの変化が大きいく、-3%~-0.5%においてYSとY/Tはほぼ一定であることが確認できる。また、Pipe A、Bの相違点として、母材と比較してPipe Aは圧縮側でYSとY/Tの低下が顕著であるのに対し、Pipe Bは引張側でYSとY/Tの上昇が顕著であることが挙げられる。

3.2. ひずみ時効加速試験および室温におけるひずみ時効

図4、図5に、250°Cで1時間の時効処理を施した加速試験から得られた予ひずみ量とYS、予ひずみ量とY/Tの関係を示す。圧縮側および引張側ともに時効処理によるYSの上昇傾向が確認された。特に、圧縮側におけるYS、Y/Tの上昇が顕著であった。また、引張側ではYS、TSともに上昇傾向にあるため、予ひずみ+1%以上でY/Tはほぼ一定であった。

一方、予ひずみ付与後に室温で180日間放置した後の引張試験結果は、Pipe A、Bいずれも、予ひずみ付与直後とほぼ同じ強度レベルであり、降伏応力の変化は観察できなかった。このことから、250°Cで1時間の時効処理条件は、パイプライン用鋼の引張強度特性に関して、少なくとも半年間の室温放置には相当しないことが確認された。

4. まとめ

パイプライン用鋼API 5L X65、X60について、冷間塑性加工による強度特性の変化を定量的に評価した。その結果を以下にまとめる。

- 1) X65 材においてバウシinger効果による降伏応力および降伏比の低下が、X60 材において加工硬化による降伏応力および降伏比の上昇が顕著であった。
- 2) 250°Cで1時間の時効処理により、全体的にYSの上昇傾向が確認された。特に、圧縮側でYS、Y/Tの上昇が顕著であった。
- 3) X65、X60 材は、製法、化学成分ともに異なるものの、いずれも室温ではひずみ時効しにくい鋼材であった。
- 4) 250°Cで1時間の時効処理条件は、パイプライン用鋼の引張強度特性に関して、室温におけるひずみ時効の加速試験としては適当でないことが分かった。

参考文献

- (1) 佐藤・ほか5名、溶接論、3巻、3号、(1985)、589。
- (2) 平、配管技術、増刊号、(1977)、91。
- (3) Williams, D. N., Metallurgical Trans., Vol. 11A(9), (1980)、1629。
- (4) 奥村・ほか3名、JSSC, Vo. 9, No. 89, (1973)、32。
- (5) 藤本・ほか2名、建築論、253号、(1977)、17。