第Ⅱ部 産業界の最近の動向と溶接工学

Ⅲ 構造製作

2. パイプライン・ペンストック

Pipeline, Penstock

川 畑 友 弥*

by KAWABATA Tomoya*

キーワード：パイプライン、ペンストック、水圧鉄管、高強度、座屈、高速延性破壊

2.1 概要

近年のエネルギー需要のさらなる高まりや周辺ビジネスへの旺盛な投資の背景を受け、パイプラインプロジェクトは活況を呈している。図1に世界各地域において計画中のパイプラインプロジェクトの総延長長さを比較して示しているが、特にアジア太平洋地域・北米における計画量の多さが目立つ。

計画中のパイプラインプロジェクトの代表的なものとしては、アラスカガスパイプラインプロジェクト (X100)、“Nord Stream Pipeline” プロジェクト (ロシア～ドイツ；X80 厚肉・高圧力)，“South Stream Pipeline” プロジェクト (ロシア～ブルガリア；高圧力・深海)，“Galsi” プロジェクト (アルジェリア～イタリア；高圧力・深海)，第二西気東輸 (中国；X80・高圧力)，ロシア東シベリアからの石油パイプラインプロジェクトなどが挙げられる。ラインパイプ素材の高強度化とガス圧の高圧力化 (従来

の7-10 MPa から10-20 MPa へ) が明確なトレンドと言える。このような気運の中、X100 及び X120 も国際規格のISO3183 として2007年3月に規格化された。

高強度材・高圧操業の安全性を検証するため、破壊特性評価も盛んに行われるようになってきている。特に、X100 を超える高強度鋼管について基本的な製造・敷設技術が確立したことから、実適用の機運は急速に高まっており、実物大破壊試験 (フルスケールバースト試験) を用いた破壊性能評価が盛んに行われるようになってきている。

また、耐震性の付与の観点から、あるいは、不連続凍土地帯を横切るパイプラインには、夏季の表層部凍土の融解に伴う塑性変形を想定した歪設計 (Strain Based

図1 2008年以降のパイプラインプロジェクト予想¹⁾

図2 中国の電力需要の顕著な伸び²⁾

図3 揚子江上流域での水力発電所計画²⁾

原稿受付 平成20年5月15日

*正 員 住友金属工業(株) Member, Sumitomo Metal Industries, Ltd.

Design)が行われる。このように大変形を許容した設計への適用性を高めるため、耐変形性能に優れた鋼管の開発や、座屈特性・延性破壊発生特性評価が盛んに行われている。ISOPE (International Society of Offshore and Polar Engineers) では2007年から“Strain Based Design (SBD)”のセッションが新設され、IPC (International Pipeline Conference) でも2008年から新設されている。

ペンストック分野では、国内では、電力需要の低迷などにより新規の建設が遅延または中断する傾向にあるものの、中国やインドなどアジア地域における水力発電所建設プロジェクトが活発化している。その多くは高強度鋼適用による設計合理化を指向したものであり、中でも、中国／瀧灘発電所（2007年営業運転開始）、インド／プリア発電所（2008年営業運転開始）を皮切りに強度と溶接性とのバランスに優れた TMCP 鋼板を HT60 まで適用することが一般化してきた。

図2には、近年の中国の著しい電力需要の増加を示している。この電力需要を賄うため、CO₂排出量の少ない水力発電所建設のニーズも高く、2009年に完成予定の世界最大の水力発電所である三峡ダムに匹敵する大型水力発電所の計画も各地で進められている（図3には揚子江上流域の建設計画を示す）。

一方、国内では、2005年の神流川発電所に続き、2007年に HT100 を適用した発電所として小丸川発電所の初号機の営業運転が開始している³⁾。

2.2 技術動向

パイプライン分野では、前節にて記述したように、高圧力操業・高強度鋼適用のトレンドが明確になっているため、安全性を検証するための破壊実験が大規模・高コストでありながら、盛んに行われるようになってきた。表1に最近行われた大型破壊実験を示すが、X100 以上の高強度鋼管のフルバースト試験が少なくとも7体実施されており、興味の高さが窺われる。表2には、パイプラインにおける大規模破壊を防止する為の鋼管必要靱性値を上昇させる要因をまとめている。高強度化による周方向応力の上昇は必要靱性値の顕著な上昇を招くことが判っており、高強度になればなるほど緻密な材料設計が必要になってくる。

耐震性の付与の観点から、あるいは、不連続凍土地帯を横切るパイプラインには、夏季の表層部凍土の融解に伴う塑性変形を想定した歪設計が行われる。大変形下での座屈限界に対する検討が行われている。図4はX80鋼管を対象として実験と整合させた数値計算で求めた圧縮限界歪とD/tの関係にある内圧条件のもとで比較したものである。座屈限界を示す状態を、設計に反映させることが可能な歪にて明らかにしているとともに、鋼管素材（表3）の変形能の影響が大きいことが示されている。また、図5は、数値計算にて求めた異なるX80鋼管の座屈変形開始時における曲げ角度の比較である。Y/Tが小さく、降伏伸びを持たない鋼管（表4）において顕著に曲げ角度が改善していることが示されている。

表1 最近行われた鋼管バースト試験（公表分のみ）

プロジェクト	鋼管 グレード	試験内圧 [MPa]	実施時期
ECSC Program ⁴⁾	X100	12.6, 18.1	1998-2000
ExxonMobil test ⁵⁾	X120	20.85	2000
Advantica's JIP ⁶⁾	X100	13.6, 18.0	2001
DemoPipe Project ⁷⁾	X100	19.3, 22.64	2002-2003

表2 パイプラインにおける大規模破壊を防止する為の、鋼管必要靱性値を上昇させる要因⁸⁾

因子	影響の 大きさ	特徴と方向性
周方向応力	◎	鋼管強度が一定で設計係数（設計条件下における周方向応力／材料の降伏応力）が上昇する場合と、設計係数が一定で鋼管強度が上昇する場合の双方ともに、鋼管必要靱性値を大きく上昇させる。
管径・肉厚	○	過去の知見によれば、大径化・厚肉化ともに鋼管必要靱性値を増加させる傾向にある。特に管径は、き裂後方の管壁を押し広げる力に影響を及ぼしていると言われる。
輸送 ガス成分	◎	メタン以外の重い成分を比較的多く含む場合、僅かな重成分の増加が、ガス減圧曲線の形を大きく変え、鋼管必要靱性値を大きく上昇させる事が知られている。

表3 圧縮限界評価のための供試鋼管⁹⁾

X80 pipes	Tensile properties		
	YS [MPa]	TS [MPa]	Y/T [%]
High-strain pipe	535	696	77
Conventional pipe	552	619	89

表4 圧縮限界評価のための供試鋼管¹⁰⁾

X80 pipes	Tensile properties				
	YS [MPa]	TS [MPa]	Y/T [%]	一様伸び [%]	降伏伸び [%]
Case1	682	712	96	7.2	1.8
Case2	563	712	79	7.7	0

図4 限界歪とD/tの関係⁹⁾

図5 座屈開始時における曲げ角度の比較¹⁰⁾

文 献

- 1) C. E. Smith and L. Koottungal: Global pipeline plans extend, Oil & Gas journal, 2008. 2, pp.46-57.
- 2) NHK解説委員室：アジアを読む 「三峡ダムに見る 中国 エネルギー事情」, 2008. 4, <http://www.nhk.or.jp/kaisetsu-blog/600/7915.html>
- 3) 九州電力：小丸川発電所 初号機の営業運転開始について, 2007年のプレスリリース, http://www1.kyuden.co.jp/press_h070710-1.
- 4) G. Buzzichelli, October, 2000, "Designing against Ductile Fracture Propagation in Very High Strength Steel Gas Pipelines: A Review", paper presented at the CSM/HLP technical meeting, Rome, Italy.
- 5) S. D. Papka, J. H. Stevens, M. L. Macia, D. P. Fairchild and C. W. Petersen, 2003, "Full-Size Testing and Analysis of X120 Linepipe, Symposium on High Performance Materials in Offshore Industry", ISOPE, Honolulu.
- 6) JIP on Fracture Control in High Strength (X100) Steel Pipelines: Data Report for Test2, ADVANTICA TECHNOLOGY, Report Number R4852, 2002.
- 7) G. Demofonti, G. Mannucci, M. Di Biagio, H. G. Hillenbrand and D. Harris, 2004, "Fracture propagation resistance evaluation of X100 TMCP steel pipes for high-pressure gas transportation pipeline using full-scale burst tests", 4th Internal Conference on Pipeline Technology, Ostend, Belgium.
- 8) 牧野：パイプラインにおける高速延性破壊の伝播停止評価法, 溶接学会誌第76巻2号 (2007), pp.114-117.
- 9) N. Suzuki and S. Igi: Compressive Strain Limits of X80 High-Strain Line Pipes, Proceedings of the Sixteenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, Portugal, July 1-6, 2007, pp.3246-3253.
- 10) H. Shitamoto, H. Makino, S. Okaguchi, M. Hamada, N. Takahashi, A. Yamamoto and I. Takeuchi: Evaluation of strain limit of compressive buckling by FE analysis, Proceedings of the Sixteenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, Portugal, July 1-6, 2007, pp.3261-3268.