

パイプライン「設計編」*



本橋 裕之**

Pipeline (Design)*

by MOTOHASHI Hiroyuki**

キーワード 高圧ガスパイプライン, 設計, 周溶接継手, 継手性能, 許容応力度設計, 許容ひずみ設計, 破壊安全性

1. はじめに

天然ガスは石油や石炭に比べ、CO₂の排出が少ない等、環境負荷の少ないエネルギー源である。そのため、近年の地球環境保全への要請の高まりを受け、環境負荷が少ない天然ガスの需要は世界的に拡大している。エネルギー需給の観点からは、近年の米国におけるシェールガスの登場により需給緩和が生じており、今後の世界的なエネルギー需要増加を考慮しても、中長期的に安定調達が可能エネルギー源であると考えられる。

本年6月に経済産業省から発行された、我が国のエネルギー政策の基本方針を定めた「エネルギー基本計画」において、天然ガスは「低炭素社会の早期実現に向けて重要なエネルギー源」として位置付けられており、特に産業部門の燃料転換を中心とした天然ガスシフトの推進が謳われている。これを受けて、同省ガス市場整備課における、低炭素社会におけるガス事業のあり方に関する検討会では、天然ガスパイプラインの整備の意義や具体的課題に関する検討が始められている。このような状況を鑑みると、天然ガスの需要拡大に 대응するためのパイプラインの整備を、今後さらに進めていくことが望まれる。

本稿では、低炭素社会の実現に向けて必要不可欠なエネルギー源である天然ガスの輸送手段の一つであるパイプラインについて、国内の高圧ガスパイプラインの設計の基本的な考え方を紹介する。

2. 製品概要 (紹介)

パイプラインの歴史は古く、1931年にアメリカ合衆国

において建設されたテキサスーシカゴ間およびオクラホマーミネアポリス間を結ぶパイプラインが、天然ガスパイプラインの始まりであるとされている¹⁾。国内においては、欧米に遅れること約30年後の1959年に、大網ー五井天然ガスパイプラインが建設された。その後、1961年に総延長が350 kmに及ぶ、国内初の本格的な高圧ガスパイプラインである東京ラインが、新潟ー東京間に建設された。以後今日までに各地で多くの高圧ガスパイプラインが建設されているものの、国内における高圧ガスパイプラインは、欧米に比べるとその延長は短く、4700 km程度である。

国内における高圧ガスパイプラインの敷設環境は欧米のそれと大きく異なる。欧米では、天然ガス田から消費地近郊までを結ぶことが多いために、郊外や山野といった人口密度の低い地域において、right-of-way (ROW) と呼ばれる幅15~30 m程度のパイプライン専用帯に敷設されることが一般的である。これに対して国内の高圧ガスパイプラインの多くは、比較的都市部の近くに設けられたLNG基地から消費地近郊までを結ぶために、都市部およびその近郊の人口密度の高い地域に敷設されることが多い。そのため、パイプライン専用の土地の入手が困難であることから、道路下に敷設されることが一般的である。代表的な敷設方法である開削工法の場合、①道路掘削、②掘削溝内へのパイプ敷設、③現地周溶接、④非破壊検査、⑤現地塗覆、⑥埋め戻し、といった手順が採られる。欧米では一日に100リングを超える現地周溶接施工が行われることもあるが、国内では施工時に道路における車両の通行を制限する必要があるため、一日に数十 m程度の施工に留まることが多い。

国内の高圧ガスパイプラインには、UOE鋼管、シームレス鋼管、電縫管などの低炭素鋼管が用いられる。口径は最大900 A程度、管厚は最大20 mm程度である。パイプライン用鋼管に要求される重要な機械的特性として、

*原稿受付 平成22年12月20日

**正 員 東京ガス㈱ Member, Tokyo Gas Co., Ltd.

表1 高圧ガスパイプラインの安全性確保の考え方

荷重・外的要因	性能要件	性能要件を確保するための主な取組み			
		材料・設計・工事・検査・試験	維持・運用		
内圧・土圧・輪荷重・風力・雪・温度変化等	・正常なガスの供給	・許容応力度法による構造設計(合成応力 \leq 許容応力) ・耐圧試験, 気密試験	工事監督体制による適切な施工・品質管理	・不等沈下状況の点検	圧力・流量等の二十四時間監視体制
化学的影響		・塗覆層, 電気防食措置による防食設計		・電気防食状況の点検 ・塗覆装, 管体状況の点検 ・内面検査装置による管体検査	
掘削機械等による衝撃(他工事損傷)	・損傷を受けても漏洩しない ・貫通した場合であっても, 大規模漏洩には至らない	・最小管厚設計 ・標識シート, 防護鉄板の設置 ・破壊安全性の検討と評価		・パトロールによる未照会工事発見 ・工事の把握, 協議, 防護措置, 立会巡回等による他工事管理 ・緊急事態発生に備えた緊急措置・復旧措置に係る整備・教育・訓練	
レベル1地震動	・被害がなく, 修理することなく運転に支障がない	・極低サイクル疲労を考慮した構造設計 ・座屈限界を考慮した構造設計		・非常災害発生に備えた緊急措置・復旧措置に係る体制整備・教育・訓練の実施	
レベル2地震動	・変形は生じるが, 漏洩は生じない	・極低サイクル疲労を考慮した構造設計			
液化化側方流動		・終局限界状態を考慮した構造設計			
地表地震断層変位	・大規模漏洩による二次災害防止	・緊急遮断・減圧装置の設置			

破壊靱性, 変形能, 溶接性などが挙げられる。これらの諸特性を得るために, パイプライン用鋼管には低C鋼が使用されるとともに, 圧延ままで所定の特性が実現できるよう制御圧延と加速冷却が利用されている。

3. 溶接構造物としての設計思想

国内の高圧ガスパイプラインは, 前述のように道路下に敷設されることがほとんどである。そのため, 内部ガスによる圧力以外にも, 種々の外力を受ける。表1は, 経済産業省の「ガスパイプライン安全基準検討会」(2001年)において提案された, 都市ガス事業者の高圧ガスパイプラインにおける安全性に対する基本的な考え方である²⁾。材料や設計面の取組みに加え, 検査や維持管理も含めて総合的な取組みを行うことで, 高圧ガスパイプラインの安全性が確保されている。

国内の高圧ガスパイプラインは, 常時荷重として作用する内圧や土圧等に対する外力と, それ以外の外力の双方を考慮した設計がなされる。内圧や土圧などに対しては, 許容応力度法に基づく設計が行われており, その詳細はガス事業法ガス工作物技術基準により性能規定化されている。以下では, それ以外の外力のうち, 高圧ガスパイプラインの安全性に重大な影響を及ぼす他工事損傷と地震時の地盤変位に対して, これまでの主な研究例と設計の考え方について概説する。

3.1 脆性破壊防止に関わる研究と設計

高圧ガスパイプラインの破壊安全性に関わる研究は1950年代に米国で生じた脆性き裂の伝播事例を受けて開始された。バツェル記念研究所では, 1960年代から70年代にかけて米国ガス協会の委託を受け, 数多くの実管を用いた破壊試験を世界に先駆けて実施し, ラインパイプの破壊挙動を把握することが試みられた³⁻⁵⁾。さらに, 脆

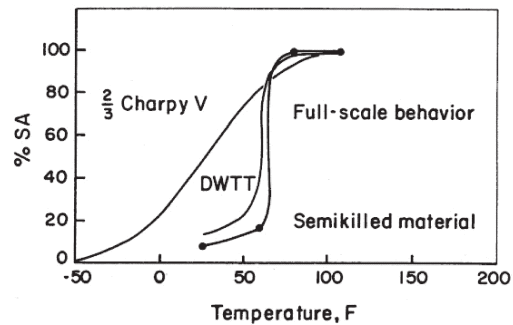
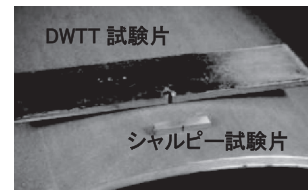


図1 実管バースト試験, シャルピー衝撃試験, DWTT試験の遷移挙動の比較^{5), 6)}

性破壊を防止するための材料仕様を定めるための実験室レベルでの材料試験方法についても研究が行われた^{5), 6)}。その結果, 図1に示すように, シャルピー衝撃試験は, 実管試験の脆性-延性遷移挙動を危険側に評価することが明らかとなり, 新たな試験法として, プレスノッチ DWTT 試験が開発された。一連の試験結果に基づき, プレスノッチ DWTT 試験における延性破面率が, およそ85%以上あれば脆性破壊が生じないと考えられ, その後種々の規格に反映されている。これらの一連の検討や, 近年の製鋼技術の進展により, 高圧ガスパイプラインにおける脆性破壊伝播防止が実現されている。

3.2 延性破壊防止に関わる研究と設計

脆性破壊伝播の問題については, 前述のように一応の解決が図られているものの, 1970年代に不安定な延性き裂が高速伝播する高速延性破壊が確認された。これを受

け、高速延性破壊に関する研究が、脆性破壊と同様バツテル記念研究所を中心に行われた。

Kiefner らは高速延性破壊を評価するための基礎検討として、貫通切欠き付き鋼管の水圧破壊試験を数多く行い、切欠き先端から発生した延性き裂が不安定き裂に遷移する限界を評価した⁷⁾。それらの結果に基づき、Dugdale model に対して、貫通切欠き近傍のふくらみによって生じる曲げ応力を考慮するとともに、工学的な汎用性を考慮して、式(1)で表される限界応力拡大係数とシャルピー衝撃値の実験的相関を用いる等、いくつかの修正に基づき、式(2)が提案された。式(2)を用いることにより、不安定延性破壊防止に必要なシャルピー衝撃値が算定可能である。

$$G_c = \frac{K_c^2}{E} \cong \frac{12C_v}{A_c} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{12C_v \pi E}{A_c 8c\sigma_0^2} = \ln \left\{ \sec \left(\frac{\pi M_t \sigma_h}{2 \sigma_0} \right) \right\} \dots\dots\dots (2)$$

- G_c : ひずみエネルギー解放率 (in-lb/in²)
- K_c : 限界応力拡大係数 (psi-in^{0.5})
- E : 縦弾性係数 (psi)
- C_v : 上部棚シャルピー吸収エネルギー (ft-lb)
- A_c : シャルピー試験片破面の面積 (in²)
- 2c : 貫通切欠きの全長 (in)
- σ₀ : 材料の流動応力 (psi)
- σ_h : 破壊応力 (psi)
- M_t : バルジング係数

低中強度鋼を対象とした数多くの実管試験により、式(2)の有効性が確認されているが、その後の研究により高強度・高靱性鋼管に対しては、式(1)に示す相関が成立せず、不安定延性破壊限界を適切に評価できない場合があることが報告されるとともに、新たな評価式が提案される⁸⁾など、近年も研究が進められている。

次に、高速延性破壊に関する研究について概説する。高速延性破壊の評価手法として広く知られているものとして、バツテル2カーブ法があげられる。これは、ガスの流出に伴う内圧の減圧波の伝播速度曲線と、高速で伝播する延性き裂進展の減速曲線の相互関係を評価することによって、高速延性破壊を防止するために必要なシャルピー衝撃値などの破壊靱性を評価する手法である。式(3)はMaxey らにより実施された実管試験の結果を解釈することにより定められた、不安定な延性き裂の伝播停止条件である⁹⁻¹¹⁾。図2は提案された延性き裂停止条件の有効性を表しており、き裂の伝播/停止が評価できることが示されている⁹⁾。

$$\sigma_a = \frac{2\sigma_0}{3.33\pi} \arccos \left\{ \exp \left[\left(\frac{(12C_v / A_c) \pi E}{24\sigma_0^2 \sqrt{Rt}} \right)^{-1} \right] \right\} \dots\dots (3)$$

- σ_a : 延性き裂の停止応力 (psi)
- R : 管の平均半径 (in)
- t : 管の板厚 (in)

高速延性破壊の評価手法としては、バツテル2カーブ

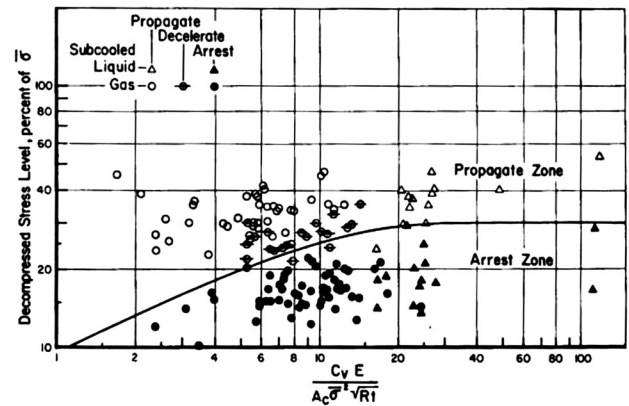


図2 き裂伝播/停止の整理⁹⁾

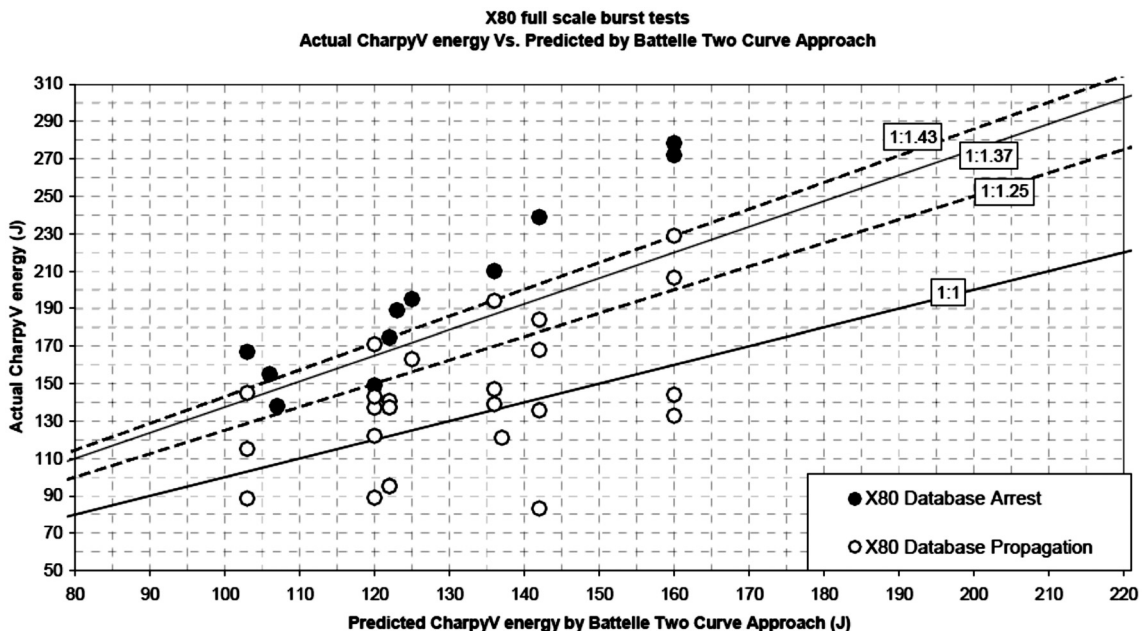


図3 X80 鋼管のバツテル2カーブ法による要求シャルピー衝撃値の推定精度¹⁴⁾

表2 シャルピー吸収エネルギー要求規定の例

基準	必要シャルピー吸収エネルギー (SI 単位)
API 5L	$C_V = 2.67 \times 10^{-4} \sigma_H^{3/2} D^{1/2}$ (X70 以上の鋼材には別式)
ASME B31.8	$C_V = 3.57 \times 10^{-5} \sigma_H^2 R^{1/3} t^{1/3}$ (Battelle Columbus Lab.)
	$C_V = 5.13 \times 10^{-4} \sigma_H^{3/2} R^{1/2}$ (American Iron and Steel Inst.)
	$C_V = 1.23 \times 10^{-3} \sigma_H R/t^{1/2}$ (British Gas Council)
	$C_V = 1.37 \times 10^{-6} \sigma_H^2 R$ (British Steel Corp.)

σ_H : 周方向応力(MPa), D: 外径(mm), R=D/2, t: 管厚(mm)

法以外にも、国内の鉄鋼会社の共同研究委員会で提案された手法 (HLP モデル)¹²⁾や、き裂伝播時の CTOA とシャルピー衝撃値との相関を利用した方法¹³⁾など、いくつかの手法が提案されている。しかしながら、これらの手法はいずれも低中強度鋼を用いた実験結果に基づくものであり、図3に示すように、近年の高強度鋼にはそのまま適用できないことが明らかとなっている¹⁴⁾。そのため、現在もバツェル2カーブ法や HLP モデルの改良等の研究が続けられている。表2にシャルピー吸収エネルギーの要求規定として提案されている代表例を示す。

一方、これまでの実験データに基づく半理論式に頼った手法ではなく、物理的な仮説に基づく計算モデルに関する研究も行われている。例えば Misawa らは鋼管の変形・破壊とガス減圧を連成させた計算モデルを開発している¹⁵⁾。この手法を用いることにより、補正を行うことなく、高強度鋼を含む幅広い材料、口径、ガス種などに適用できることが報告されている。

3.3 日本における耐震設計

地中に敷設される高圧ガスパイプラインにとって、地震は最も大きな脅威の一つである。「ガス工作物の技術上の基準を定める省令」の解釈例 (省令に定める技術的要件を満たすべき技術的内容の具体的な一例) には、大規模地震時の地盤変位に対して安全性を担保するために、(社)日本ガス協会発行の2つの設計指針が示されている。一つは地震動に対して定められた高圧ガス導管耐震設計指針¹⁶⁾ (以下、高圧ガス耐震)、もう一つは地盤の液状化時の側方流動や地盤沈下に対して定められた高圧ガス導管液状化耐震設計指針¹⁷⁾ (以下、液状化耐震)である。高圧ガスパイプラインの設計を行う際には、これらの指針に基づいた照査を行い、その安全性を確認する必要がある。

高圧ガス耐震では、想定地震動として、パイプラインの供用中に1~2回発生する確率を有する地震動であるレベル1、および供用中に発生する確率は低いものの非常に強い地震動であるレベル2の2種類が規定されており、それぞれ表1に示す性能要件が定められている。これらを確保するため、地震動の繰返しを考慮した疲労強度設計が取り入れられるとともに、圧縮変形に対する座屈限界を考慮した構造設計がなされる。レベル1地震動では、ひずみ振幅1%または直管の座屈開始ひずみの小さい方を許容ひずみとしている。式(4)は、理論と実験から構築された知見に安全率を導入して作成された座屈開

始ひずみの評価式であり、管形状 (管の平均直径 D_m および管厚 t) のみの関数としている。

$$\epsilon_{nom cr} = 35(t/D_m) \dots\dots\dots(4)$$

レベル2地震動に対しては、ひずみ振幅3%が許容ひずみとして定められており、座屈を許容している。ただし、直管で座屈するひずみが発生する恐れがある場合、すなわち発生ひずみがレベル1地震動で定めている座屈開始ひずみである式(4)、もしくは実測により求めた座屈開始ひずみを超える場合には、有限要素法等により座屈後にパイプラインに発生するひずみを正しく算定することが必要となる。

なお、周溶接継手に関しては、4章で後述するように、溶接部の強度が鋼管のそれを上回るオーバーマッチングとなるように設計され、かつ非破壊検査により有害欠陥が排除されるために、地震時の地盤変位に伴うひずみは周溶接継手に集中することなく、鋼管に分散し、それ故座屈や破壊は鋼管で生じると考えられている。そのため、これらの耐震設計指針では、主に鋼管を対象に地盤変位に対する耐震性を評価している。

液状化耐震においては、液状化に対して、レベル2地震動の場合と同じ性能要件が定められており、終局限界状態を考慮した構造設計が取り入れられている。液状化耐震は、液状化に伴う地盤の側方流動ならびに地盤沈下に対して、軸圧縮ならびに曲げ変形に対する健全性を評価するものである。想定される地盤変位量に対して生じるパイプラインの変形量を算出し、限界変形能と比較することにより耐震性を照査する。

高圧ガス耐震および液状化耐震のいずれも、その適用範囲は設計係数 (内圧により作用する周方向応力と規格下限降伏応力の比) が0.4以下かつX65グレード以下の材料に限られている。一方、近年諸外国では、パイプラインの効率的な輸送や建設コストの低減を目的として、X80やX100といった高強度鋼管の適用が進められている。高強度鋼管では、加工硬化能が低下する傾向にあるため、従来材料と比較して座屈性能や変形性能が低下することが懸念される。これまで、高強度鋼管を対象に、直管の座屈開始ひずみや曲管の変形性能に及ぼす加工硬化能の影響が検討されており、Y/Tやひずみ硬化指数が重要な材料特性であることが示されている¹⁸⁻²⁰⁾。そのため、国内の高圧ガスパイプラインに高強度鋼管を導入する際には、特に加工硬化能に着目して、座屈開始ひずみや限界変位の算定手法の適用性を検討する必要がある。

4. 溶接継手の特徴と要求性能

高圧ガスパイプラインの健全性を確保する上で、現地周溶接部において安定した品質を得ることが重要である。高圧ガスパイプラインの周溶接継手に対して要求される試験および諸特性の例を表3にまとめる。周溶接継手に求められる性能としては、強度特性、硬さ、破壊靱性などが挙げられるが、統一的な要求性能が存在せず、設計者に委ねられる部分も多くあることから、ここでは考え方の一例を述べる。

表3 溶接継手の評価項目

試験項目	評価部位	特性
継手引張試験	継手	引張強さ
長尺引張試験	継手	破断位置
丸棒引張試験	溶接金属	降伏応力, 引張強さ
表曲げ試験	継手	割れ
裏曲げ試験	継手	割れ
側曲げ試験	継手	割れ
シャルピー衝撃試験	溶接金属, 熱影響部	吸収エネルギー
硬さ試験	継手	ビッカース硬さ
マクロ観察	継手	品質

4.1 品質管理

高圧ガスパイプラインの現地周溶接は、所定の技能を有する溶接士に限られ、また所定の性能を満足できる溶接施工法であることが、事前に確認された方法に則り行うこととなっている。事前確認では、非破壊検査や各種機械試験を行い、所定の品質および機械的特性を有していることを確認する。さらに、現地施工時には、全継手を対象に全周非破壊検査が実施され、割れ等の有害欠陥を排除している。非破壊検査にはX線検査が用いられることが多いが、一部超音波探傷も用いられており、近年では自動超音波探傷の導入も試みられている。非破壊検査の基準は諸外国に比べると極めて厳格であり、高い品質管理が行われている。

4.2 強度特性

パイプラインに作用する主荷重（内圧、土圧等）に対しては、許容応力度法による設計が行われ、周溶接継手と鋼管は弾性範囲内に留まる。そのため、溶接継手の強度特性は鋼管と同等以上であればよいが、大規模地震を想定した場合、3章で述べたように、周溶接継手には弾性範囲を上回る応力が生じうる。そのため周溶接継手には、溶接部へのひずみ集中を避けるために、オーバーマッチングが要求される。この要求性能を確認するために、長尺引張試験による破断位置の確認が行われることが一般的である（図4）。ただし、この試験は溶接継手と鋼管の相対的な強度差により破断位置が決定される。そこで、強度マッチングを確実に評価するため、周溶接継手から溶接金属の丸棒引張試験片を採取して引張試験を行うことで、溶接金属そのものの強度特性を把握し、鋼管のそれと比較を行うことで強度マッチングを評価する方法がとられる場合もある²⁰⁾。

ところで、鋼管は規格下限値を上回る範囲である程度の強度のばらつきを有するために、強度マッチングを検討する際にはこのばらつきを考慮する必要があることが近年指摘されている。例えば、Pertenederら²⁰⁾は溶接部の強度のばらつきの下限値が鋼管の強度のばらつきの上限値を上回るように、またNewburyら²⁰⁾は溶接部の下限値が鋼管の上限値を15%程度上回るように設計する必要があると述べている。周溶接継手の強度マッチングの要求仕様をどのように設定するかは、Pertenederらが指摘しているように設計者に委ねられるものであると思われるが、鋼管の規格下限値を上回るだけではやはり不十分であり、強度のばらつきをある程度考慮する必要があると考えられる。

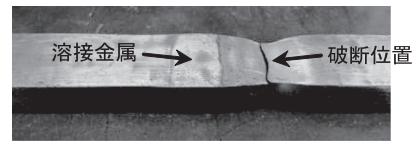


図4 長尺引張試験の例

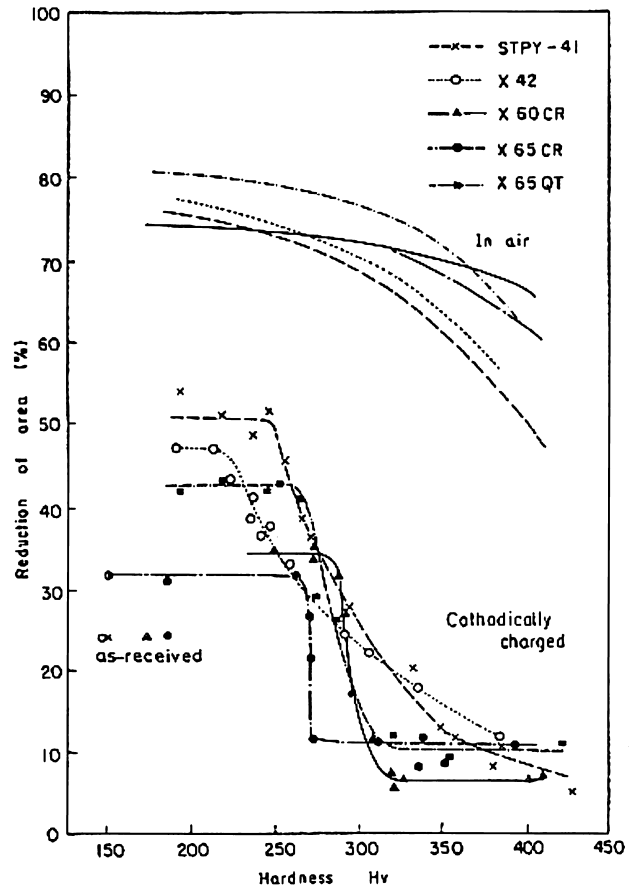


図5 水素応力割れ感受性に及ぼす硬さの影響²⁴⁾

4.3 硬さおよび破壊靱性

土中に埋設される高圧ガスパイプラインは、腐食を防止するために、絶縁性の高い塗覆層の設置と電気防食が併用されており、長年の実績によりその有効性が実証されている。電気防食における防食電流は適切に管理されているものの、仮に電気防食が効きすぎる状態（過防食）となり、かつ塗覆層に局部的な損傷が生じると、鋼表面へ陰極防食電流が流入し、進行したカソード反応によって副成する原子状水素の吸蔵により、水素脆性が生じる危険性がある²⁰⁾。水素応力割れの発生には、①持続的引張応力の存在、②原子状水素の供給、③一定レベル以上の材料強度（硬さ）が不可欠であるとされている²⁰⁾。そのため、水素応力割れを防止するためには、①～③のいずれかを排除することが必要であるが、①および②については完全に排除することは困難であるため、③の対応を図る必要がある。

笠原らは強度レベルの異なる5種類のラインパイプ用鋼管に対して、水素応力割れ感受性を評価した²⁰⁾。その結果、図5に示すように、水素応力割れ感受性を示す強度レベルの指標として、硬さが有効であり、SSRT（低ひずみ速度法）試験により得られる絞りが硬さの上昇に伴い

減少することが示された。絞りの低下が生じる硬さは5種類の鋼管で異なったことから、鋼管の強度レベルに応じて、適切なレベルに硬さを抑えることで、水素応力割れの発生を防止できることを示した。これらの結果に基づき、溶接部を含むパイプライン全体でこのような硬化部が存在しないように、設計・施工が行われている。

ところで、前節で述べたように耐震性の観点からはオーバーマッチングを実現するために高い強度が求められる。一方、水素応力割れ防止の観点からは最高硬さに制限が設けられることから、溶接金属の単純な高強度化を指向することは適切ではなく、これらの相反する要求性能を満たすことが可能な溶接施工が求められる。

溶接継手の破壊靱性に関しては、母材と同程度のシャルピー衝撃値が要求される場合がある。これは、溶接欠陥を起点とした脆性破壊を防止するためと考えられる。実際には、国内では厳格な非破壊検査の適用により破壊の発生点となりうる有害欠陥が排除されているため、脆性破壊の可能性は極めて小さいものとなっている。

4.4 X80 鋼管の現地周溶接継手の性能

一般に高強度鋼ほど溶接が困難となる傾向にある。そこで、現在国内の高圧ガスパイプラインで実用化されている最高強度レベルである X80 鋼管の現地周溶接継手の性能の一例を紹介する。

X80 鋼管を対象に、ガスマタルアーク溶接（以下、GMAW）と被覆アーク溶接（以下、SMAW）により試験溶接を行い、継手の機械的特性を評価した。用いた X80 鋼管の化学成分と機械的特性をそれぞれ表 4、5 に示す。GMAW には X80-A、SMAW には X80-B を用い、入熱量をパラメータとして種々の継手を作製した。

まず、GMAW 溶接継手の性能について述べる。図 6 に溶接継手の硬さ分布の一例を示す。硬さ分布からオーバーマッチングが得られていること、顕著な HAZ 軟化がみられないことが確認できる。図 7 に、溶接金属の強度特性ならびにシャルピー遷移曲線を示す。入熱量の増加に伴い降伏応力、引張強さともに低下しているものの、いずれも今回用いた鋼管 X80-A の強度を上回るオーバーマッチングが得られている。ただし、鋼管の強度のばらつき範囲によっては、入熱量の制限が必要であることが伺える。また、溶接金属のシャルピー遷移温度は -50℃ 程度であり、極めて良好な性能が得られている。これは、図 8 に示すように、溶接金属組織の大部分が微細なアシ

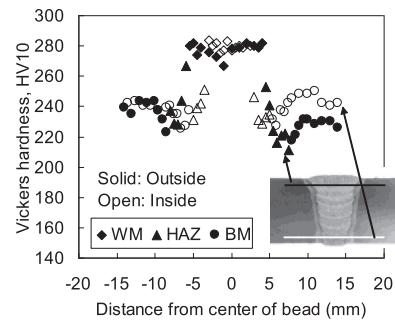
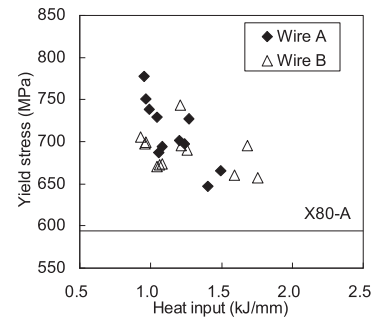
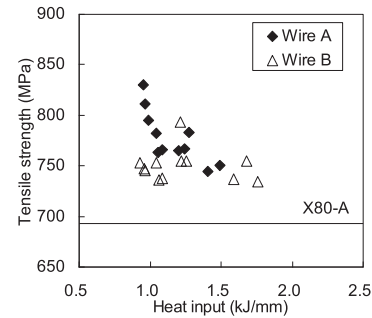


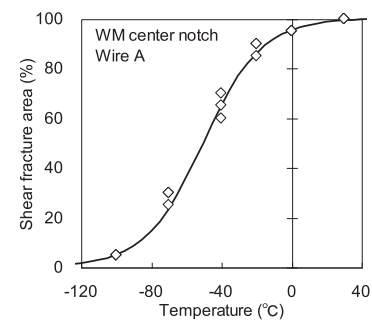
図6 溶接継手の硬さ分布



(a) 降伏応力に及ぼす入熱量の影響



(b) 引張強さに及ぼす入熱量の影響



(c) 溶接金属のシャルピー遷移曲線

図7 GMAW 溶接継手の機械的特性の一例

表4 X80 鋼管の化学成分 (wt%)

鋼管	C	Si	Mn	P	S	Ceq	Pcm
X80-A	0.06	0.25	1.85	0.008	0.002	0.42	0.18
X80-B	0.07	0.24	1.79	0.007	0.002	0.45	0.20

表5 X80 鋼管の機械的特性

鋼管	引張特性(軸方向)			シャルピー 衝撃値 (0°C) (J)
	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	破断伸び (%)	
X80-A	594	693	36.0	269
X80-B	628	713	29.6	172

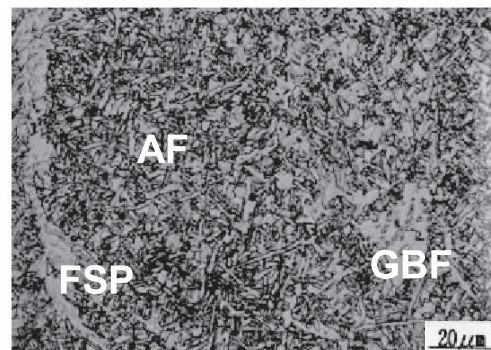


図8 溶接金属のミクロ組織

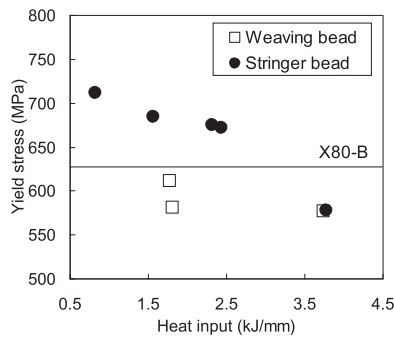


図9 SMAW 溶接金属の降伏応力に及ぼす積層方法の影響

キュラーフェライトから構成されていることによると考えられる。溶接金属組織の同定を行った結果、アシキュラーフェライトは80%程度の分率であり、またラス幅は $1\mu\text{m}$ 程度の微細なものであった。このように、X80鋼管の溶接金属では、オキサイドメタラジーを駆使することにより、高強度と高靱性の両立が実現されている。

次に、SMAW 溶接継手の性能に関して、溶接金属の降伏応力に及ぼす積層方法の影響について調べた結果を示す。国内の高圧ガスパイプラインでは、1層1パスのウィービングビードによる溶接が一般に行われる。これに対して、1層多パスのストリンガービードによる溶接を行った結果を、図9に比較して示す。入熱量が過大な範囲では両者の降伏応力に差が見られないものの、入熱量が比較的小さい範囲では、ストリンガービードによる溶接金属はウィービングビードに比べて著しく高い値を示した。ストリンガービードでは、次パスにおける再熱効果により組織の細粒化が実現できるためと推察される。この結果より、X80鋼管のSMAW溶接では、鋼管の強度レベルによってはストリンガービードの適用が必要な場合があると考えられる。

なお、GMAW, SMAWのいずれの場合も予熱は行っていないが、遅れ割れは発生していないことが確認されている。ISOのテクニカルレポート²⁶⁾に記載の手法に基づき予熱温度の試算を行った結果からも、予熱は不要という結果を得ており、炭素当量がかなり低く抑えられていること、溶接材料の拡散性水素量が低いことにより、高い溶接性を有していることによるものと考えられる。

以上のように、高強度鋼であるX80鋼管に対しても、良好な継手性能が得られることが確認されている。

4.5 許容欠陥寸法に関する検討例

前述のように、周溶接継手の非破壊検査は、欧米に比べ厳格な基準に基づき運用されている。ここでは、非破壊検査の合理化に向けた許容欠陥寸法に関する研究の一例を紹介する。

瀬戸ら²⁷⁾および萱森ら²⁸⁾は、地震動による繰返し負荷に対する許容欠陥寸法について、極低サイクル疲労の観点から検討を行っている。種々の溶接欠陥を有する周溶接継手を作製し、平板状試験片に対してひずみ制御型の極低サイクル疲労試験を行い、疲労寿命、疲労破壊の形態、ならびに疲労き裂伝播速度を調べた。その結果に基づき、溶接欠陥を初期き裂とみなした疲労き裂伝播解析を行い、板厚貫通に至るまでの疲労寿命を算出し、許容欠陥寸法

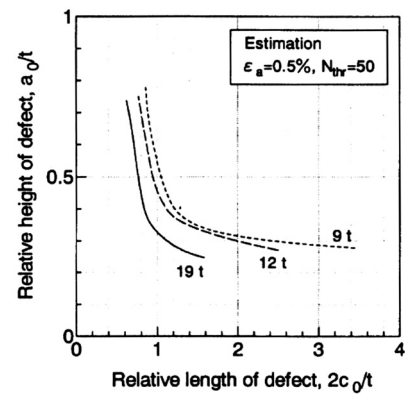


図10 地震動に対する許容欠陥寸法の試算例²⁸⁾

を試算した。板厚に対する比で整理した結果を図10に示す。例えば板厚が19mmの場合、長さ板厚相当、深さ板厚の1/3相当の欠陥が、許容欠陥寸法の一指標として提案されている。

さらに、地震時外力を想定した一方向引張負荷を受けるパイプライン周溶接継手を対象に、表面切欠きを付与した継手の広幅引張試験およびその有限要素解析により、溶接継手のき裂進展駆動力に及ぼす、強度マッチングやHAZ軟化、開先形状などの影響が調べられるとともに²⁹⁾、これら種々の因子の影響を考慮可能な周溶接継手の延性き裂発生限界評価手法が提案されている³⁰⁾。

5. おわりに

低炭素社会の早期実現に向けて、CO₂排出量が少なく、長期的に安定調達可能な天然ガスの需要は今後も増加することが見込まれ、それに伴い天然ガスパイプラインの整備も進められていくものと予想される。パイプライン整備をより効率的に進めていくためには、建設コストの低減が期待できる高強度鋼管の導入が一つの選択肢となりうるが、それに加え現行の設計体系や非破壊検査基準の更なる合理化も不可欠であり、それを実現するための技術開発が今後も重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 財団法人日本ガス協会：日本都市ガス産業史，1997。
- 2) 増田，福田：高圧ガスパイプラインの強度設計，溶接学会誌，74-7，2005，10-13。
- 3) A. R. Duffy: Full-scale Studies, Proc. of Symposium on Line Pipe Research, AGA Catalogue No.L30000, 1965, 43-82.
- 4) A. R. Duffy: Studies of Hydrostatic Test Levels and Defect Behavior, Proc. of Symposium on Line Pipe Research, AGA Catalogue No.L30000, 1965, 139-160.
- 5) R. J. Eiber: Fracture Propagation, Paper I, Proc. of 4th Symposium on Line Pipe Research, AGA Catalogue No.L30075, 1969.
- 6) R. J. Eiber: Correlation of Full-scale Tests with Laboratory Tests, Proc. of Symposium on Line Pipe Research, AGA Catalogue No.L30000, 1965, 83-118.
- 7) J. F. Kiefner, et al.: Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders, ASTM STP 536, 1973, 461-481.
- 8) S. Kawaguchi, et al.: Modified Equation to Predict

- Leak/Rupture Criteria for Axially Through-Wall Notched X80 and X100 Linepipes Having a Higher Charpy Energy, *J. of PVT*, 128, 2006, 572-280.
- 9) W. A. Maxey: Fracture Initiation, Propagation, and Arrest, Paper J, Proc. of Symposium on Line Pipe Research, AGA Catalogue No.L30174, 1974.
 - 10) W. A. Maxey, et al.: Ductile Fracture Initiation, Propagation, and Arrest in Cylindrical Vessels, ASTM STP 514, 1972, 70-81.
 - 11) W. A. Maxey, et al.: Ductile Fracture Arrest in Gas Pipelines, NG-18 Report No.100, AGA Catalogue No.L32176, 1976.
 - 12) E. Sugie, et al: Notch Ductility Requirements of Line Pipes for Arresting Propagating Shear Fracture, *J. of PVT*, 109, 1987, 428-434.
 - 13) 小笠原：高圧ガスパイプラインの不安定延性破壊停止条件の破壊力学による研究, *圧力技術*, 21-3, 1983, 113-119.
 - 14) G. Mannucci, et al.: Control of Ductile Fracture Propagation in X80 Gas Linepipe, Proc. of 5th International Pipeline Technology Conference, 2009, Ostend2009-036.
 - 15) K. Misawa, et al.: A New Model for Dynamic Crack Propagation and Arrest in Gas Pipelines, Proc. of IPC 2010, 8th International Pipeline Conference, 2010, IPC2010-31475.
 - 16) (社)日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針, 2000.
 - 17) (社)日本ガス協会：高圧ガス導管液状化耐震設計指針, 2001.
 - 18) H. Yatabe, et al.: Effect of Material Stress-Strain Behavior and Pipe Geometry on the Deformability of the High-Grade Pipelines, *J. of OMAE*, 126, 2004, 113-119.
 - 19) N. Suzuki and M. Toyoda: Critical Compressive Strain on Linepipes Related to Work-Hardening Parameters, Proc. of the 21st International Conference on OMAE, 2002, OMAE2002-28253.
 - 20) H. Yatabe, et al.: Analytical Study of Appropriate Design for High-Grade Induction Bend Pipes Subjected to Large Ground Deformation, *J. of OMAE*, 126, 2004, 376-383.
 - 21) H. Motohashi, et al.: Application of X80 in Japan - Weldability, Proc. of 4th International Pipeline Technology Conference, 2004, 1099-1116.
 - 22) E. Perteneder, et al.: Service Properties of Modern Welding Consumables Suitable for Girth Welding of Pipelines, Proc. of the International Pipe Dreamer's Conference, 2002, 807-821.
 - 23) B. D. Newbury, et al.: Welding Engineering for High Strain Pipelines, Proc. of 17th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2007, 2996-3000.
 - 24) 笠原, 磯脇：陰極防食下におけるラインパイプ用鋼の挙動, *鉄と鋼*, 67-2, 1981, 148-157.
 - 25) T. P. Groenveld: Hydrogen Stress Cracking, 4th Symposium on Line Pipe Research, 1969, E1-14.
 - 26) ISO/TR17884, "Welding- Comparison of Standardized Methods for the Avoidance of Cold Cracks".
 - 27) 瀬戸ら：溶接きずを有する継手の極低サイクル疲労特性：ガス導管円周溶接部の許容きず寸法の検討, *溶接学会論文集*, 17-1, 1999, 130-138.
 - 28) 萱森ら：溶接欠陥を有する継手の極低サイクル疲労特性に及ぼす板厚の影響, *溶接学会論文集*, 19-4, 2001, 709-716.
 - 29) H. Motohashi, et al.: Effect of Strength Matching and Strain Hardening Capacity on Fracture Performance of X80 Line Pipe Girth Welded Joint Subjected to Uniaxial Tensile Loading, *J. of OMAE*, 129, 2007, 318-326.
 - 30) 本橋, 谷田部：強度不均質を有するパイプライン周溶接部の切欠き底表面からの延性き裂発生限界に関する検討, *溶接学会論文集*, 28-1, 2010, 86-96.