

高圧ガスパイプラインへの 電縫鋼管適用性に関する検討

Study on applicability of HF-ERW pipes for the high-pressure gas pipelines

池田 里恵* Rie IKEDA
日鉄パイプライン(株) 技術本部
技術開発部 開発課 マネジャー

菊池 義和 Yoshikazu KIKUCHI
日鉄パイプライン(株) 技術本部
技術部長

井上 健裕 Takehiro INOUE
新日本製鐵(株)
技術開発本部 鉄鋼研究所
厚板・鋼管・形鋼研究部
破壊力学 総括 主幹研究員(PhD)

抄 録

電縫鋼管製造技術の進歩により、近年の電縫鋼管の品質は高強度・厚肉化にも対応し、国外では高圧ガスパイプラインへの電縫鋼管の使用実績が増えてきている。本稿では、ERW 鋼管を高圧ガスパイプラインに適用する際に、鋼管製造時に生ずる力学的特性、ここでは残留応力が破壊特性に及ぼす影響について検討した結果を紹介する。

Abstract

In these decades, properties of HF-ERW-welded joints have been strongly improved according to the progress in production process of HF-ERW pipes. As a result, HF-ERW pipes have been successfully applied for the high-pressure gas transmission pipelines in foreign countries. In this report, some studies on fracture properties influenced by mechanical properties such as residual stress caused by its production process are discussed considering the application for the high-pressure gas pipelines.

1 緒言

電縫鋼管(ERW 鋼管)は、鋼帯(コイル)を連続的に巻き戻しながら上下および左右の成形ロールで円筒形に成形しながら電気抵抗溶接して製造される^{1) 2)}。鋼管製造工程の概要を参考図に示す。鋼板(プレート)をU形さらにO形プレスで加工して1本ずつ円筒形に成形しサブマージアーク溶接して製造されるUO 鋼管や、鋼塊(ビレット)を加熱しその中心に穿孔機で孔を開け圧延加工して製造されるシームレス鋼管(SML 鋼管)と比較し、ERW 鋼管は製造コストが小さく、比較的安価な鋼管として広く使用されている。最近では、ERW 鋼管の製造技術の進歩により、品質は飛躍的に向上した。製造法の進歩は、X80(API 5L, API:アメリカ石油協会)といった強度レベルの鋼種の製造が可能となり、また、鋼管厚さの製造可能範囲が拡大したことで、国

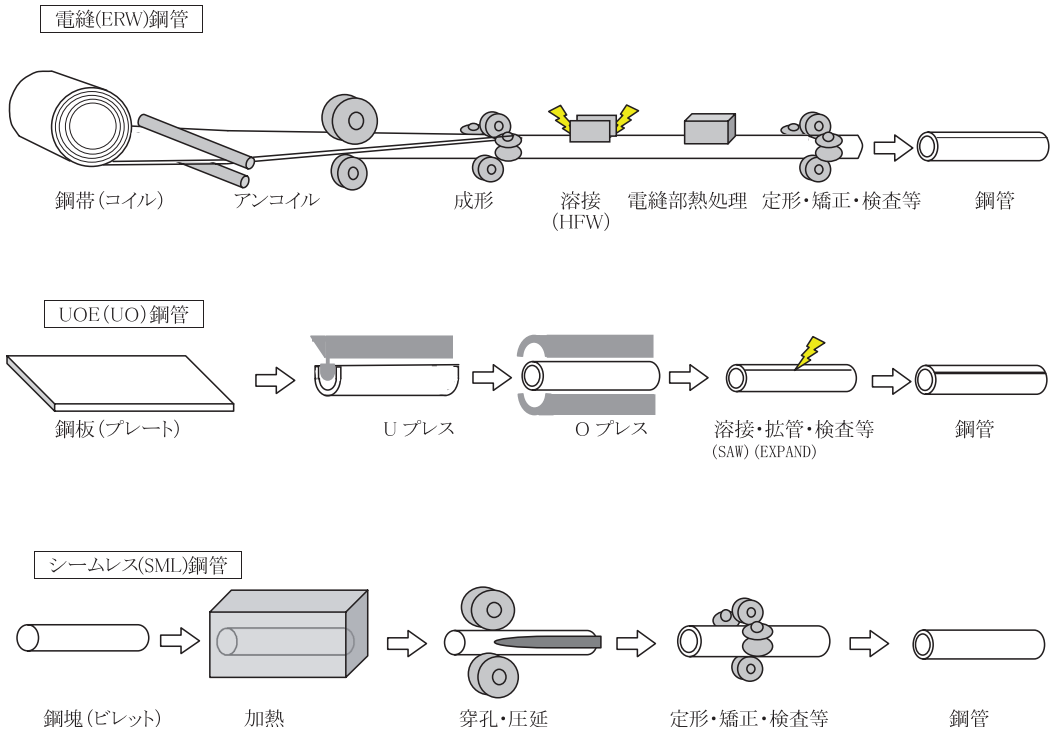
外では高圧ガスパイプラインへの使用実績も増えてきている。日本国内ではERW 鋼管は中圧ガスパイプラインに既に広く使用されているが、高圧への適用は限られている。その理由の一つに、ERW 鋼管の製造時の残留応力がUO 鋼管やSML 鋼管と比較して大きいため、内圧と重畳して高い応力を生じることがあげられる。本稿では、ERW 鋼管を高圧ガスパイプラインに適用する際に、特に供用上留意される課題を述べ、さらに、鋼管の製造プロセスに由来する力学的特性、ここでは残留応力が破壊特性に及ぼす影響について検討した結果を紹介する。

2 ERW 鋼管の特長と課題

ERW 鋼管の使用にあたっての特長と課題を以下に述べる。

(1) ERW 鋼管はコイルから製造されることから

* 〒141-8604 東京都品川区大崎1-5-1 日鉄パイプライン(株)技術本部 Tel: 03-6865-6000(代表)



参考図 鋼管の製造工程

SML 鋼管に比べ管厚が安定している。高圧ガスパイプライン用として最もよく使用されている鋼管規格API 5L(2007)の厚さ公差を表1に示す。製造方法により公差が異なり、ERW 鋼管等の溶接鋼管は±10%、SML 鋼管は+15%～-12.5%であり、公称管厚が同じであれば最小管厚はERW 鋼管のほうが大きくなり設計上も有利となる。寸法精度、特にへん平度(真円度)がSML 鋼管やUO 鋼管より良好で、現場施工性が優れる。

(2) 国内高炉メーカーでは、電縫溶接部の品質について、溶接自動入熱制御、シーム熱処理技術、充実した非破壊検査等を基盤に信頼性を向上させ、高品質のERW 鋼管を製造している。製造実績が評価され、1980年代より国外プロジェクトを中心にERW 鋼管の採用が始まり、近年では海底用にも適用されている³⁾。

(3) 高強度のSML 鋼管の継手は円周溶接継手の溶接熱影響部の強度が母材より下がる傾向がある。円

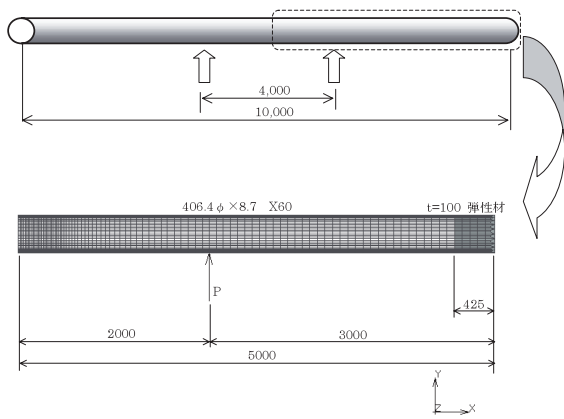
周溶接継手部に鋼管と同等以上の強度が要求される場合があり、その際は、溶接施工法や溶接条件の選定に慎重を期す必要がある。これは鋼管製造過程の熱処理の差異によるもので、ERW 鋼管やUO 鋼管ではこうした傾向は小さい。

(4) 鋼管の残留応力が変形性能に及ぼす影響について、高圧ラインを想定した解析モデル(内圧7MPa(ゲージ圧、以下圧力はゲージ圧表記)、材料規格X60、外径406.4mm)について汎用FEM解析コードMARCによる事前解析検討を実施した。解析手法は高圧ガス導管液状化耐震設計指針⁴⁾に拠った。解析概要を図1に示す。材料弾性域の変形初期に局所的なミゼス応力に影響がみられるものの、変形の進行とともに影響は小さくなり、高圧ガス導管の耐震設計において想定している設計地震動⁵⁾および地盤液状化⁴⁾に対する変形性能に残留応力の影響がないことを確認した。

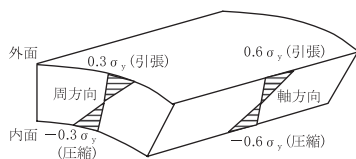
(5) パイプラインとして具備しなければならない破壊特性について、鋼管規格API 5L(PSL 2)では強度レベルや鋼管形状によりシャルピー衝撃試験やDWT試験による靱性評価方法を採用している。バースト特性と環境助長破壊特性については明確になっていない。

表1 API 5L 規格仕様の厚さ公差
Table 1 Tolerances for wall thickness

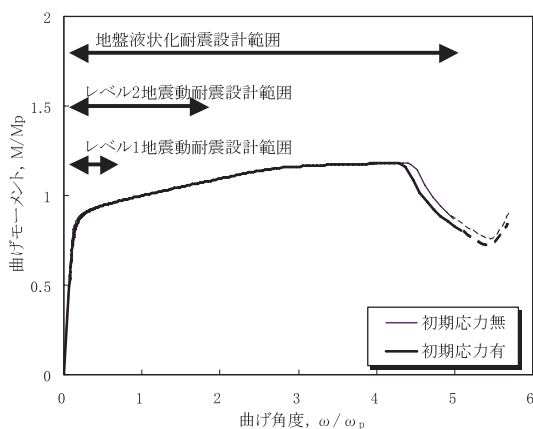
製法	厚さ	公差
溶接鋼管(ERW, UO等)	5mm超~15mm未満	±10%
SML 鋼管	4mm超~25mm未満	+15.0% -12.5%



(a) 解析モデル



(b) 鋼管残留応力(初期応力)の設定



(c) 曲げモーメントと曲げ角度の関係

図1 残留応力の影響検討
Fig. 1 Bending deformability of pipes with residual stress

1) バースト特性

国内では主として他工事の建設機械による偶発的な荷重により、万一、パイプラインに損傷が生じた場合においても大規模破壊しない(ノッチが貫通し、大規模に進展しない)性能を具備していることが要求されるため、安全性を確保する上で鋼管の破壊特性を把握しておくことは重要な課題である。しかし、ERW 鋼管の残留応力が破壊特性に及ぼす影響について調査した事例が少ないのが現状である。

2) 環境助長破壊特性

国内では埋設部の土壌腐食を防ぐために外面ポリ

エチレン被覆鋼管と電気防食を併用している。電鉄軌条横断部や近接部では、鋼管の防食電位が高い箇所が生じ、その箇所の電位を適正範囲にするため、ライン全体の防食電位を下げる対策をとると過防食箇所が生じる。このような過防食箇所において他工事等により被覆が損傷して防食電流が流入した場合、水素が多く発生しやすい環境になり、きずや欠陥があると鋼中に拡散する水素が増え、水素脆化割れの可能性が生じる⁶⁾。国内では水素脆化割れの感受性が低い普通鋼鋼管もしくは硬度上限を規定した高張力鋼管を使用し、さらにパトロールやスーパーコーディンス^{7) 8)}による定期的な被覆損傷箇所調査等、複数の水素脆化割れ防止対策が図られている。しかし、ERW 鋼管の残留応力が水素脆化割れに与える影響の調査事例は殆どない。

上記の課題を踏まえ、本稿では鋼管の残留応力を調査し、バースト特性および環境助長破壊特性について実験により検討を述べる。

3 残留応力調査

ERW 鋼管の残留応力はその製造工程の違いからUO 鋼管やSML 鋼管と異なるといわれている。UO 鋼管とERW 鋼管はともに鋼板を曲げて管状に成形、溶接して製造する。最終形状として真円度を確保するため、UO 鋼管では拡管工程で、ERW 鋼管では縮管工程で、冷間加工する。この最終工程の違いにより、ERW 鋼管では外面側に引張の残留応力が発生するといわれている。ここでは、このERW 鋼管の残留応力について、SML 鋼管と定量的に比較するため、切断法による残留応力測定を行った。測定結果を図2、図3に示す。

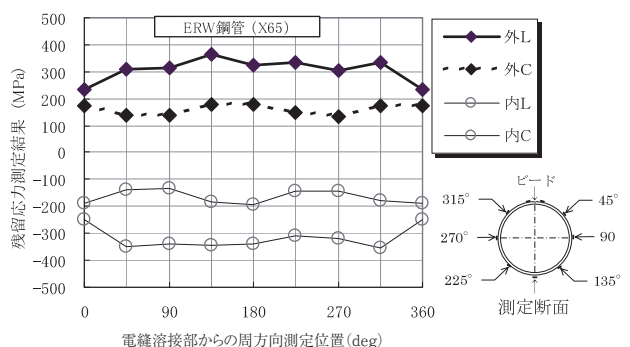


図2 ERW 鋼管の残留応力分布
Fig. 2 Residual stress distribution of HF-ERW pipe used

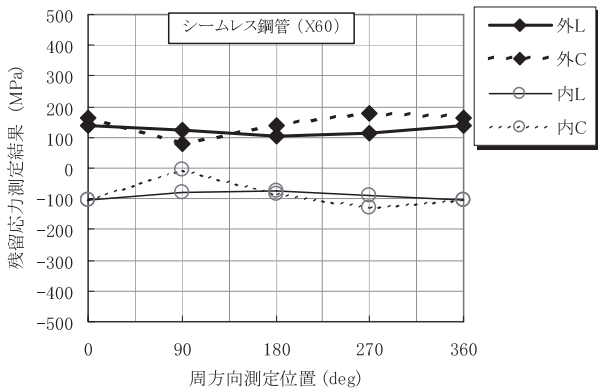


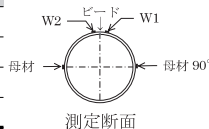
図3 SML鋼管の残留応力分布
Fig. 3 Residual stress distribution of SML pipe used

残留応力はERW鋼管(X65, 外径406.4mm, 管厚12.7mm)では外面引張、内面圧縮で、絶対値がほぼ等しく符号が逆であり、いわゆる板曲げモードの残留応力になっている。また、ERW鋼管の残留応力は軸方向(L方向)にも周方向(C方向)にも外面側引張、内面側圧縮の板曲げモードであった。一方、SML鋼管(X60, 外径406.4mm, 管厚9.5mm)でも内面側が圧縮、外面側が引張の曲げモードであったが、そのピーク値の絶対値は軸方向で3~4倍程度、周方向で1.1~1.5倍程度であり、ERW鋼管の方が大きい。

UO鋼管(X65, 外径609.6mm, 管厚12.7mm)とERW鋼管(X65, 外径609.6mm, 管厚12.7mm)の残留応力比較も行った。結果を表2に示す。ERW鋼管はUO鋼管の4倍程度の残留応力を有することがわかる。

表2 UO鋼管とERW鋼管の残留応力の比較
Table 2 Comparison of residual stress

測定位置	残留応力 (MPa)	
	UO鋼管	ERW鋼管
ビード脇 W1	6	62
ビード脇 W2	2	85
母材90°	13	69
母材270°	19	80



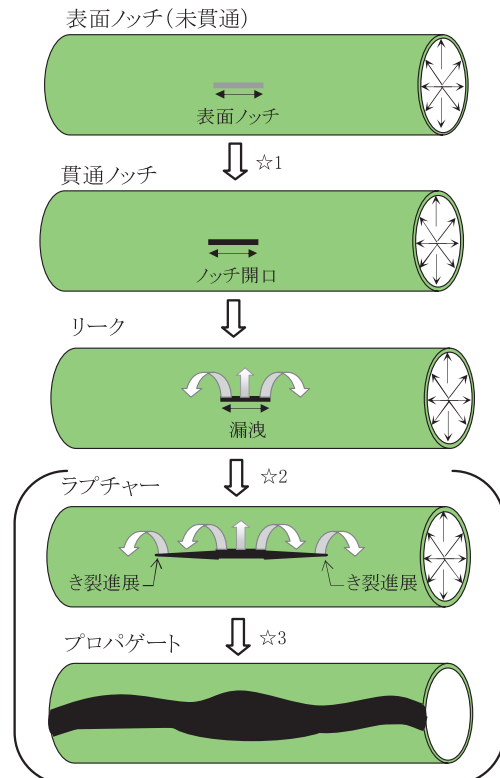
4 破壊特性の検討

4.1. バースト特性

4.1.1. バースト特性の概要

ガスパイプラインは一般に高設計応力下で使用されることから、延性き裂の軸方向伝播特性が重要である。延性変形を伴いながらもき裂が不安定に軸方

向に進展する延性破壊はガスパイプライン特有の破壊現象で、高圧ガスパイプラインの破壊時においてガス圧が抜けにくいことにより発生する。この現象は設計フープ応力と規格最小降伏強度との比である設計係数が0.6~0.87といった高設計係数の国外のパイプラインで注目され、1970年代後半よりパイプライン研究者により研究が進められてきた^{9) 10) 11)}。延性破壊はパイプラインのバースト後の損傷部の形態に応じて、リーク(損傷を受けたノッチの範囲でガスが漏洩する破壊)、ラプチャー(損傷を受けたノッチの端部からき裂が軸方向に小規模進展する破壊)、プロパゲート(き裂が軸方向に数百m伝播する破壊)とよばれる3つの破壊形態(図4)に分けることができる。国内では他工事等によってパイプラインが損傷を受けないよう、パトロール、工事照会、防護鉄板等の国外より高いレベルの安全性の確保を行う一方、万一偶発的な損傷を受けたとしても、き裂伝播が生じないように材料選定し、かつ設計係数を低く抑える等、二重、三重の安



〔注記〕 ☆1, ☆2 は図5に示すクライテリア

☆3 は不安定延性破壊(破壊時にガス圧が抜けにくいことによりき裂が速度 70~350m/sec で 100m オーダーで伝播する状態)

図4 高圧ガスパイプラインの破壊形態
Fig. 4 Fracture appearances for high-pressure gas pipelines

全管理を行っている。

ラプチャーとリークの境界線は、パイプラインの外径と管厚および材料特性等によって変動し、貫通ノッチ水圧試験(例えば¹²⁾)によって求められる。破壊形態の境界線を圧力とノッチ長さの関係について図5に示す。外径と設計圧力が決定されている場合、管厚と材料特性によりリークを確保することが設計方針といえる。本調査ではこの手法に拠り、ERW鋼管の貫通ノッチ水圧試験をすでに実績のあるUO鋼管と比較して実施した。

4.1.2. 貫通ノッチ水圧試験による評価

延性き裂の軸方向伝播特性は、鋼管の貫通ノッチ水圧試験で評価することを米国バットル研究所の研究者が提案しており、多くの実績を持つ手法である。試験に用いた鋼管を表3に、貫通バースト試験方法を図6に、試験体を写真1に示す。

試験結果を表4に、試験前後の状況を写真2～3に示す。き裂進展開始圧力、最大圧力ともにERW

鋼管がUO鋼管より大きな値となっており、ERW鋼管のバースト特性は、ERW鋼管の残留応力が外面側で引張応力となっているにも関わらず、UO鋼管より良好になっている。これは、供試鋼管の強度・靱性がERW鋼管の方がUO鋼管より高かったことに加え、ERW鋼管の残留応力が外面引張内面圧縮でバランスする曲げ応力主体であるため、貫通ノッチ水圧試験のように貫通ノッチとして伝播する場合、内外面でのノッチ長さの差は小さく、残留応力の影響が両表面で打ち消しあい影響が小さいためであると考えられる。

貫通ノッチ水圧試験の破壊圧力については理論的および実験的に種々検討され、Battelle研究所により簡易推定式が提案されている。延性き裂で破壊するガスパイプラインの破壊強度の推定として、長さが短い表面ノッチに対する応力式(式1)と破壊靱性値依存型材料のシャルピー依存式(式2)で示している^{13) 14)}。

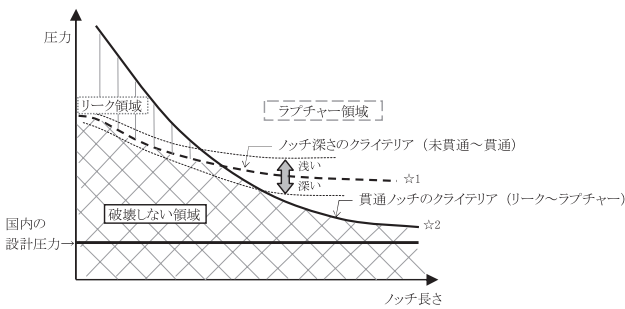


図5 破壊形態の境界線
Fig. 5 Boundary image of leak-rupture for high-pressure gas pipelines

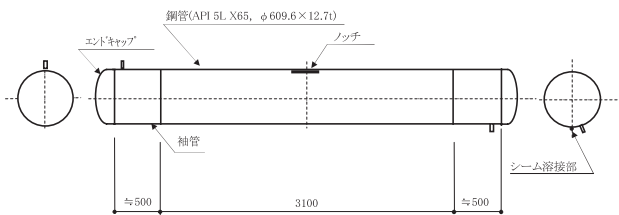


図6 貫通ノッチ水圧試験概要
Fig. 6 Test pipe with notch



写真1 試験体
Photo. 1 Test pipe

表4 貫通ノッチ水圧試験結果
Table 4 Test results

(単位: MPa)

	ノッチ長さ 300mm		ノッチ長さ 500mm	
	ERW	UO	ERW	UO
き裂進展開始圧力	7.15	6.95	4.24	4.07
最大圧力	8.33	7.53	5.02	4.37

表3 貫通ノッチ水圧試験の供試鋼

Table 3 Chemical composition and mechanical properties of steels used

製法	グレード	外径 (mm)	管厚 (mm)	化学成分 (mass%)					機械的性質			
				C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×100	S ×100	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	vE0 (J)
ERW	API 5L X65	609.6	12.7	5.7	26	103	5	1	498	598	40	450
UO				8	29	150	9	2	486	584	36	112



写真2 試験前
Photo. 2 Before test

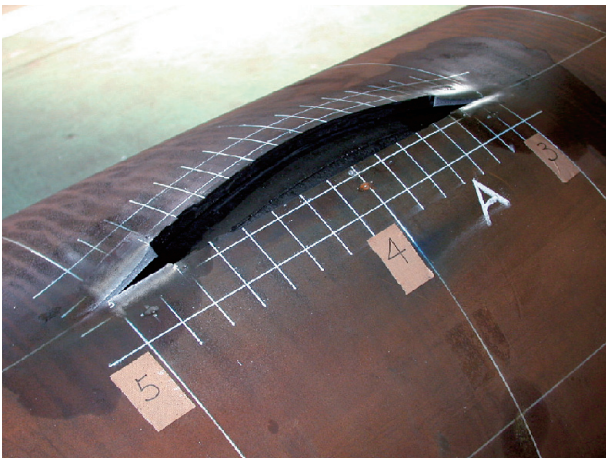


写真3 試験後
Photo. 3 After leak

破壊応力の推定(1)

$$\sigma_h^* = \sigma^* \cdot M^{-1} \quad (式1)$$

ここで、

σ_h^* : 貫通ノッチが内圧により進展するフープ
応力

σ^* : 流動応力

M : フォーリアス係数

$$\left(= \sqrt{1 + 1.61 \left(\frac{c^2}{R^2} \right) \frac{R}{t}} \right)$$

c : ノッチ長さの半分

R : 鋼管の半径

t : 鋼管の管厚

破壊応力の推定(2)

$$\frac{C_v \pi E}{8c\sigma_o^2} = \ln \left(\sec \frac{\pi}{2} \left(\frac{M_t \sigma_h}{\sigma_o} \right) \right) \quad (式2)$$

ここで、

σ_h : 貫通ノッチが内圧により進展する時の
フープ応力

σ_o : 流動応力

C_v : シャルピー吸収エネルギー

A_c : シャルピー衝撃試験 V ノッチ試験片有
効面積

E : ヤング率

M_t : 修正フォーリアス係数

$$\left(= \sqrt{1 + 1.255 \cdot \frac{c^2}{R_t} - 0.0135 \cdot \left(\frac{c^2}{R_t} \right)^2} \right)$$

c : ノッチ長さの半分

R : 鋼管の半径

t : 鋼管の管厚

図7に Battelle 式による破壊応力の推定値を示す。UO 鋼管のバースト圧はノッチ長さが短い場合は応力依存式に、長い場合は C_v 依存式に従っている。これは、UO 鋼管の C_v 値が112Jと低めであったため、靱性値の影響が生じているためと思われる。一方、ERW 鋼管のバースト圧は、ノッチ長さによらず応力依存式で整理できた。これは、ERW 鋼管の C_v 値が高かったためであると考えられるが、この実験事実は、ERW 鋼管のバースト特性が残留応力に影響されないことを示している。

線形破壊力学では、残留応力による K 値はき裂によって解放された部分の残留応力分をき裂面内に作用する外力と置き換えて計算される。したがっ

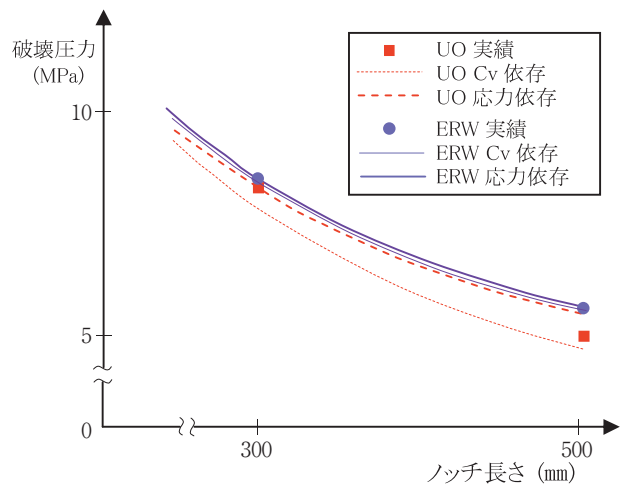


図7 Battelle 式によるバースト応力比較
Fig. 7 Relationship between pressure and notch length

て、鋼管の貫通ノッチを、鋼管の各肉厚位置での2次元ノッチとして考えれば、ERW 鋼管の場合は、外面で引張の残留応力が有ることから、外面での残留応力による K 値を外力による K 値に加算すれば大きな K 値を生ずることになる。しかしながら、実際には内面側の拘束により、外面側の塑性域が制限されるため、内外面の塑性域寸法の差は板厚程度以下にしかならず、したがって内外面の K 値の差も大きくはなりえないと考えられる。さらに、延性破壊の場合は、き裂進展のためには塑性変形が必要であり、内外面でのノッチ長さの差も板厚程度以下になるため、ERW 鋼管のように内外面で残留応力に差が有っても、曲げ応力主体であれば、板厚平均での K 値が支配的に有るため、バースト特性に大きな影響を与えないといえる。すなわち、ERW 鋼管の軸方向の延性破壊特性に残留応力の影響はほとんどなく、リーク、ラプチャー、高速延性破壊特性上 ERW 鋼管の残留応力は問題とならない。

4.2. 環境助長破壊特性

4.2.1. 外面応力腐食割れの再現

環境助長破壊は応力と環境要因が重畳して破壊を生じる現象で、その負荷応力が静的か動的かにより応力腐食割れと腐食疲労に大別される。応力腐食割れには、水素脆化型と経路活性型があり、水素脆化型応力腐食割れでは、水素の拡散・集中に応力の絶対値が効くため、残留応力が影響あるといわれている。また、鋼材への水素の侵入は、電気防食の有無により影響され、過防食の環境下では水素侵入が容易になり、水素脆化型応力腐食割れの防止が重要となってくる。水素脆化型応力腐食割れの発生メカニズムを図8に示す。

土壤中で起きる外面応力腐食割れ再現の試験方法

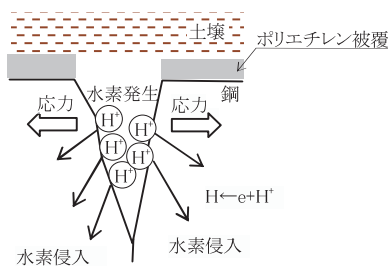


図8 水素脆化型割れ発生概念
Fig. 8 Image of hydrogen embrittlement

は、日本鉄鋼協会鋼管部会 HLP 技術検討会による低 pH 環境における外面応力腐食割れの再現試験の検討方法^{15) 16)}がある。この試験方法に拠れば、代表的な割れは粒内を伝播しており、土壤中の中性から低 pH 環境での応力腐食割れと同等の破壊形態を呈していることが確認されていることから、水素脆化型の応力腐食割れ再現手法として妥当性があると考えられている¹⁷⁾。本調査ではこの手法に拠り、ERW 鋼管の外面応力腐食割れ試験を SML 鋼管と比較して評価した。

4.2.2. 応力腐食割れ試験による評価

(1) 試験方法

応力腐食割れには残留応力が影響するが、一般的に小型の試験片を切り出した時点で、残留応力の多くの部分が解放されてしまう。このため、本研究では2章で測定した残留応力結果をもとに、残留応力に相当する応力を外力に付加して試験条件を設定した。比較のために SML 鋼管について SML 鋼管の残留応力を重畳した試験を ERW 鋼管と同様に実施した。供試部位は鋼管の母材部と電縫溶接部とした。

応力腐食割れでは電気防食の影響が大きいことが知られている。一般的に過防食条件になるほど、鋼材に水素が侵入しやすくなり、応力腐食割れ特性が低下する。土壤中パイプラインの防食電位は、一般的に管対地電位 -770mV vs SCE より卑に設定されている¹⁸⁾。パイプラインでは迷走流入電流による腐食損耗を防止するため、やや過防食条件で供用される環境がある。そのため本実験では、温度・濃度をコントロールして循環させた人工海水中の試験片に、-1000mV vs SCE および -1100mV vs SCE の2レベルの過防食電位を与え安全側の評価(厳しい側の評価)を与えるべく実験を実施した。

試験片は、表5に示す ERW 鋼管と SML 鋼管を供し、鋼管の軸方向から平板引張り試験片を採取した。

試験の一覧を表6に示す。試験状況を写真4に示す。残留応力は2章の図2、図3の測定結果から、応力変動は供用時の最も厳しい内圧変動による応力変化を設定した。試験応力は残留応力と応力変動を考慮して最も厳しい応力条件を選定した。試験応力

表5 応力腐食割れ試験に用いた供試鋼
Table 5 Tensile properties of steels used for SCC test

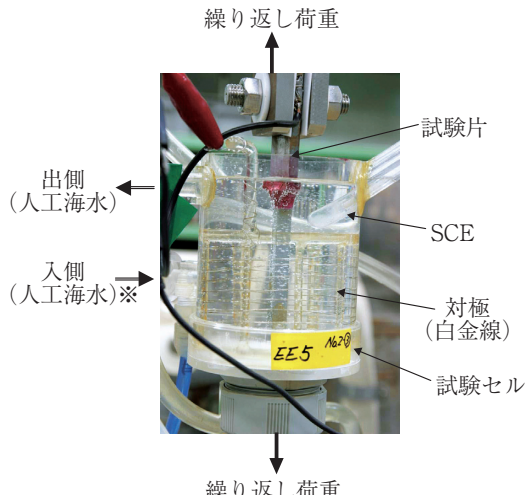
製法	ERW		SML
材質	API 5L X65 PSL2*		API 5L X60 PSL2
外径/管厚	406.4mm/12.7mm		406.4mm/9.5mm
降伏応力 (MPa)	C方向	513.5	C方向 434
	L方向	513	
引張応力 (MPa)	C方向	585	C方向 524
	L方向	574	
伸び (%)	37.5		40

(備考) *印: ISO 3183-3 L415MC (API 5L X65 PSL2 相当品)

表6 応力腐食割れ試験内容
Table 6 Potential conditions for SCC test

製法	ERW				SML	
	-1000		-1100		-1000	
評価方向	L	C	L	C	C	
ノッチ無	母材部	1	-	1	1	1
	電縫溶接部	-	-	-	-	-
ノッチ有	母材部	1	-	1	1	1
	電縫溶接部	1	-	1	1	-

(備考) 表中の数字は試験体数



※試験液: ASTM D1141に準拠した人工海水(低pH希薄塩化物水溶液: 0.122g/l KCl+0.181g/l CaCl₂ · 2H₂O+0.131g/l MgSO₄ · 7H₂O +0.483g/l NaHCO₃水溶液+10%CO₂(通称NS4溶液by Dr. Parkins)), 試験温度25℃

写真4 試験状況
Photo. 4 Typical test cell with a specimen

を降伏強度で規格化して表7と図9に示す。表7の最下段が設定した外力条件であるが、最大で実降伏強度の80%近い高い試験応力となった。試験載荷速度は4 cycle/h、載荷時間は28日とした。

試験片形状とノッチ形状を図10に示す。高変動応力により塑性疲労が起こる応力下での応力腐食割れ試験では、ノッチ先端の水素濃度が鋼中水素濃度よりも局所的に高くなり、ノッチ底で水素起因と考えられるクラックの発生が懸念されるため、複数のノッチを試験片に付与したERW鋼管については、ミルスケールの表面の凸凹による応力集中の影響も確認するために鋼管外面側を黒皮面、鋼管内面側を研削面とした。試験片には最大応力となる位置を含む複数のノッチを付与し、試験後にノッチ底でのクラックの有無を顕微鏡により確認し判定を行った。

表7 応力腐食割れ試験の設定応力
Table 7 Stress conditions for SCC test

製法	ERW		SML	
	外L	外C	外C	
①残留応力*2	(ACYS*3)	0.61	0.31	0.32
②変動応力	(SMYS*4)	0 ⇔ 0.2	0 ⇔ 0.4	0 ⇔ 0.4
③最大応力 (=①+②)	(ACYS*3)	0.78	0.66	0.70

(備考) *1: 外L-外面L方向 外C-外面C方向、*2: 残留応力測定結果、*3: 実降伏強度、*4: 規格最小降伏強度

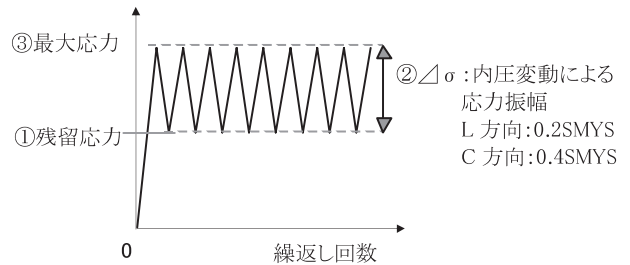


図9 変動応力の設定
Fig. 9 Cyclic stress for SCC test

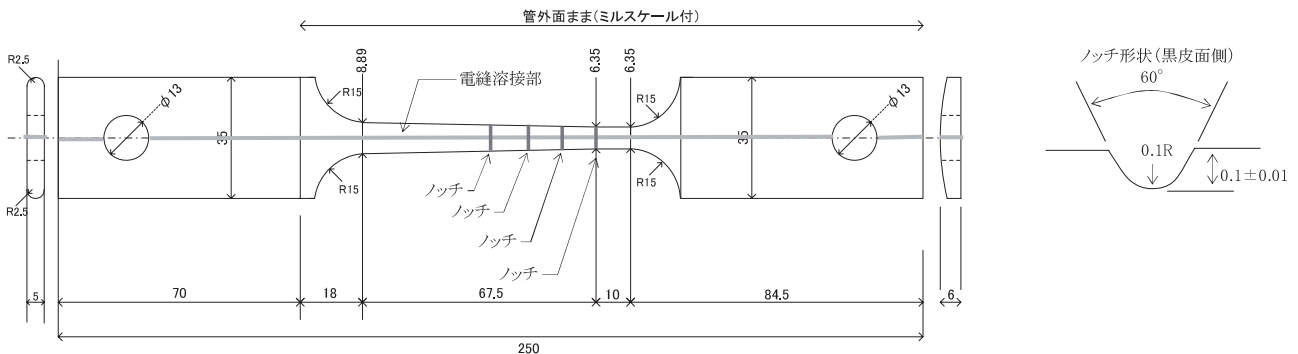


図10 応力腐食割れ試験片
Fig. 10 Dimensions of tapered specimens for SCC test

(2) 試験結果

試験結果を表8に示す。試験では何れの条件でも、SML鋼管、ERW鋼管とも割れは発生せず、ERW鋼管では、-1100mVの過防食環境下でも応力腐食割れは発生しなかった。試験後の試験片観察を写真5に示す。-1100mVの電気防食条件下の試験片では、試験後試験片表面に白色の析出物が厚く付着していた。これは、人工海水中のCa等のイオンが析出してきたもので、試験中にこの析出物により試験片への水素侵入が抑制されてくることが知られている¹⁶⁾。実際のパイプラインでもこのレベルの過防食条件になると、同様の現象が起こることが知られており、この試験条件は過防食電位を与えた安全側の評価であると言える。また、前述の技術検討

会の方法に拠ったことは妥当性がある。

以上のことから、ERW鋼管の電気防食下の応力腐食割れ特性は国内で想定されるパイプラインの使用環境下でも問題なく使用可能な特性を備えているといえる。

5 結言

ERW鋼管の高圧パイプラインへの適用性を調査するため、その製造時の残留応力に着目した検討を行った。残留応力の調査を行い、残留応力が破壊特性に影響する可能性がある、軸方向の延性破壊特性および電気防食下での応力腐食割れ特性についてUO鋼管やSML鋼管と比較して安全性を調査した。

- 1) ERW鋼管の残留応力分布は、軸方向・周方向とも、外面側で引張、内面側で圧縮でほぼ内外面で絶対値の等しい曲げ応力が主体の残留応力であった。
- 2) 軸方向延性破壊特性については、残留応力の影響はなく良好な延性破壊特性を示した。これは、曲げ主体のERW鋼管の残留応力は、板厚全体の特性で決まる軸方向延性破壊特性にほとんど影響しないためと考えられる。
- 3) 過防食電位による電気防食下の応力腐食割れは、想定される厳しい条件の評価でもき裂の発生は確認されなかった。X65以下のERW鋼管では国内で想定される電気防食条件下では応力腐食割れ特性上の問題はないと考えられ、UO鋼管およびSML鋼管と同様の配慮をすればよい。

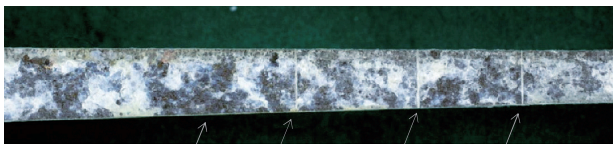
以上のことから、今回評価したERW鋼管はUO鋼管およびSML鋼管と同等の破壊特性を具備しているといえる。なお、ERW鋼管の製造工程や品質管理等は製造メーカーによって異なることに留意されたい。

近年の天然ガス需要の拡大を背景に、国内高炉メーカーは市場ニーズのさらなる高度化等に対応するため、鋼管製造設備の改造や新成形機の設置等によりERW鋼管の品質信頼性のより一層の向上を図っている¹⁹⁾。ERW鋼管のさらなる高品質化が実現さ

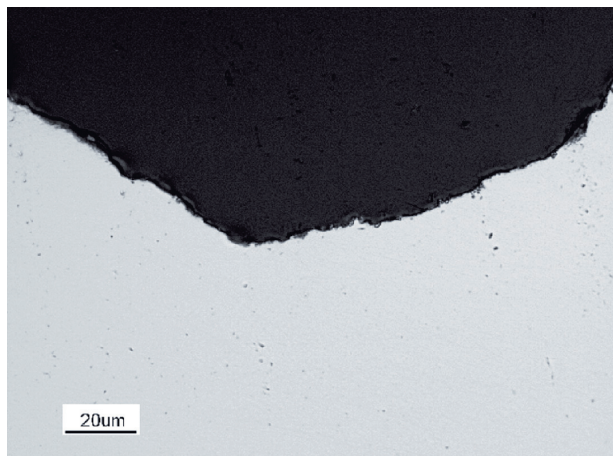
表8 応力腐食割れ試験結果
Table 8 Results for SCC test

製法		ERW				SML
電圧 (mV) vs SCE		-1000		-1100		-1000
評価方向		L	C	L	C	C
ノッチ無	母材部	○	-	○	○	○
	電縫溶接部	-	-	-	-	-
ノッチ有	母材部	○	-	○	○	○
	電縫溶接部	○	-	○	○	-

(備考) ○: SCC 割れなし ×: SCC 割れあり



(1) 試験片テーパ部黒皮面



(2) ノッチ底のSEM観察

写真5 試験後の試験片観察(電縫溶接部, 電位負荷-1100 mV vs SCE)

Photo. 5 Images of surface and bottom of the notch(HF-ERW)

れた際には、当社はあらためて力学的特性を調査していく所存である。本報告がERW鋼管の高圧ガスパイプライン適用に向けての一助となれば幸いである。

最後に、鋼管の貫通ノッチ水圧試験にあたり東京ガス(株)殿にはアドバイスいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 新日本製鐵：新日鐵の鋼管, Cat. No. PC101, (2009. 10)
- 2) Nippon Steel Corporation : NIPPON STEEL PIPE & TUBE, Cat. No. PC316, (2009. 9)
- 3) 赤崎宏雄：鋼管の技術進歩と今後の展望, 新日鉄技報, 第380号(2004), pp. 65-69
- 4) 日本ガス協会：高圧ガス導管液状化耐震設計指針, JGA 指-207-01, 2001
- 5) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針, JGA 指-206-03, 2004
- 6) 朝日均：ラインパイプ用鋼管の水素脆化について, 配管技術(2001. 1), pp. 45-50
- 7) 古賀隆二ほか：埋設パイプラインの防食診断システム(スーパーコーディンス、スーパーコーディンステスラ), 新日鉄エンジニアリング技報, Vol. 1(2010), pp. 66-77
- 8) 菊池義和：埋設パイプラインの防食診断技術(スーパーコーディンス、スーパーコーディンステスラ), 配管技術(2010. 9), pp. 76-82
- 9) Hiroyuki MAKINO et al.: Prediction for Crack Propagation and Arrest of Shear Fracture in Ultra-high Pressure Natural Gas Pipelines, ISIJ Int., Vol. 41(2001), pp. 381-388
- 10) Hiroyuki MAKINO et al.: Natural Gas Decompression Behavior in High Pressure Pipelines, ISIJ Int., Vol. 41(2001), pp. 389-395
- 11) 井上健裕ほか：天然ガス輸送用パイプラインにおける高速延性破壊シミュレーション, 材料とプロセス, Vol. 17(2004. 3), pp. 305-308
- 12) Shinobu Kawaguchi et al.: Modified equation to predict Leak/Rupture criteria for axially through-wall notched X80 and X100 linepipes having a higher charpy energy, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 128(2006), pp. 572-580
- 13) 町田進：延性破壊力学, 日刊工業新聞社(1984)
- 14) Kiefner, J. K. et al.: Progress in Flow Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP 536, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1973), pp. 461-481
- 15) Takahiro Kushida, et al.: Stress-corrosion cracking of high-strength linepipe steels, Pipe Dreamer's Conference (2002), pp. 421-439
- 16) 岡津光浩ほか：高強度ラインパイプにおける外面応力腐食割れに関する検討, CAMP-ISIJ, Vol. 17(2004), pp. 298-301
- 17) 遠藤茂ほか：ラインパイプの腐食損傷と適合材料, 配管・装置・プラント技術(2005), 冬季号, pp. 5-10
- 18) 野中英正ほか：埋設鋼の過防食下での水素誘起割れ, 腐食防食協会, 防食技術, Vol. 37(1988), pp. 614-617
- 19) 谷本道俊ほか：24インチ中径電縫鋼管新成形機の設置, 新日鉄技報, 第380号(2004), pp. 106-110