
厚肉大径ラインパイプ用鋼材の DWTT 実施上の問題点とその対策

Solutions to Problems in Conducting Drop Weight Tear Test of Thick Wall, Large Diameter Line Pipe Steels

中野 善文(Yoshifumi Nakano) 工藤 純一(Jun-ichi Kudo) 船越 督己(Tokushi Funakoshi) 加賀 正夫(Masao Kaga) 亀田 正紀(Masaki Kameda) 伊庭 敬二(Keiji Iba)

要旨：

低温靱性のきわめて高い厚肉大径パイプライン用鋼材の DWTT 実施上の問題を解決するため、試験片に種々の改造を施したことによる効果を調べた結果、次のことがわかった。(1) 試験機能力の不足と被検面積の減少という問題を解決できる唯一の方法は、試験片の減厚である。(2) 任意の厚さ t (mm) の試験片での延性破面遷移温度と基準厚さ (19mm) の試験片でのそれとの差 ΔT (°C) は、遷移温度の基準破面率や材料、減厚方法などに関係なく、 $\Delta T = -225/\sqrt{t} + 52$ で表すことができる。(3) 破壊発生が容易であるように改造した試験片は、いわゆる異常破面発生防止にいくぶん効果があるが、試験片厚さ全体にわたって脆化ビードを置いた場合の防止効果がもっとも大きい。

Synopsis：

In order to solve problems in conducting DWTT of thick wall, large diameter line pipe steels with high toughness at low temperatures, several modifications are made on the specimens. The results obtained are as follows: (1) Reduction of thickness of a test specimen is the only solution to the problems such as the lack of machine capacity and a decrease in observation area. (2) Change in transition temperature ΔT (°C), that is determined as the difference between the shear area transition temperature for the specimen of a given thickness t (mm), and that for the specimen of the "standard" thickness of 19mm (0.75in) can be described by the following formula regardless of the type of material, the method of reducing the thickness and the percentage at which the transition temperature is determined: $T = -225/\sqrt{t} + 52$ (3) Specimens modified so as to facilitate fracture initiation proved some effect in preventing abnormal fracture occurrence, but such preventive effect is greatest when brittle bead is placed through the entire thickness of the specimen.

本文は次のページから閲覧できます。

厚肉大径ラインパイプ用鋼材の DWTT 実施上の問題点とその対策

Solutions to Problems in Conducting Drop Weight Tear Test of Thick Wall, Large Diameter Line Pipe Steels

中 野 善 文*

Yoshifumi Nakano

工 藤 純 一**

Jun-ichi Kudo

船 越 督 已***

Tokushi Funakoshi

加 賀 正 夫****

Masao Kaga

亀 田 正 紀*****

Masaki Kameda

伊 庭 敬 二*****

Keiji Iba

Synopsis:

In order to solve problems in conducting DWTT of thick wall, large diameter line pipe steels with high toughness at low temperatures, several modifications are made on the specimens. The results obtained are as follows:

- (1) Reduction of thickness of a test specimen is the only solution to the problems such as the lack of machine capacity and a decrease in observation area.
- (2) Change in transition temperature ΔT ($^{\circ}\text{C}$), that is determined as the difference between the shear area transition temperature for the specimen of a given thickness t (mm), and that for the specimen of the "standard" thickness of 19mm (0.75in) can be described by the following formula regardless of the type of material, the method of reducing the thickness and the percentage at which the transition temperature is determined: $T = -225/\sqrt{t} + 52$
- (3) Specimens modified so as to facilitate fracture initiation proved some effect in preventing abnormal fracture occurrence, but such preventive effect is greatest when brittle bead is placed through the entire thickness of the specimen.

1. 緒 言

DWTT(Drop weight tear test)により決定されるラインパイプ用鋼材の破面遷移温度は、材料の種類にかかわらず実管における脆性破壊伝播挙動とよい相関関係にある¹⁾ことが知られている。API規格²⁾では、ラインパイプ用鋼材の性能試験

の一部として、厚さ0.75in(19mm)以下の鋼材について原厚試験片によるDWTTの実施が規定されている。一方、近年管径や肉厚が大きいのみならず、低温での靱性がきわめて高いことが要求される極地向ラインパイプの需要が増加しつつあり、これらの中には厚さが0.75in以上のものも多い。このような材料のDWTTをAPI規格に準じて原厚で実施するに際しては、以下のような難題が生

* 技術研究所厚板研究室主任研究員・Ph. D.
*** 技術研究所水島研究室室長・工博
***** 千葉製鉄所管理部検査課掛長

** 技術研究所厚板研究室
**** 千葉製鉄所管理部検査課
***** 千葉製鉄所管理部検査課課長

じている。

- (1) 厚さ 0.75in 以下の材料を対象とする現行 API 規格用の試験機では能力不足である。
- (2) 現行 API 規格試験片は幅(破面長さ方向)が 3in(76.2mm)であるが、破面観察にあたって試験片厚さと同じ厚さをノッチ底および打撃端面から除去した部分を被検面積とするため、1.4in 以上の厚さの試験片では被検面積が実際になくなってしまう。
- (3) 焼入れ焼戻し(QT)材のような靱性のきわめて高い鋼材では、脆性破壊がノッチ底からすぐ発生せず、まず延性破面が少し生じたあとで脆性破面に移行する現象(異常破面と称する)が発生する。

これらの解決策として、現行の DWTT 試験片に Fig. 1 に示すような改造を施すことが考えられる。この中でもっとも実現容易な試験片の減厚については、従来からその影響に関して多くの研究がなされており、延性破面遷移温度(SATT)は試験片厚さに大きく依存する^{1,3-8)}ことが知られている。そこで、減厚法を適用する場合には、あらかじめ減厚試験片での SATT から原厚試験片でのそれを推定する方法を確立しておく必要がある。また減厚をしないで形状を変えた試験片を用いる場合には、それによる吸収エネルギーや SATT への影響を調べておく必要がある。筆者らは、これらの問題について従来行ってきた研究結果の一部をすでに報告⁹⁾している。本報では種々の改造を施した DWTT 試験片によりさらに広範囲な実験を行い、その効果を検討するとともに、結果を統一的に処理して原厚試験片での結果を正しく推定する換算式を求めた経過について報告する。

2. 実験方法

実験に用いた材料は 49~61kg/mm² の降伏応力を有する板厚 19~33mm の 11 種類のラインパイプ用鋼材で、その化学成分および機械的性質を Table 1, 2 に示す。C-6, 7W288 (A-6) および X8118 は 2.5% ないし 3.5% Ni を含有する QT 材であり、他はコントロールド・ローリング(CR)材である。

DWTT はすべて容量 3 000kg・mm の振り子型試験機を用いて実施した。試験片形状を Fig. 2 に示す。タイプ A 試験片で減厚したもの以外はすべて原厚のままで試験を行った。タイプ A 試験片は厚さ以外は API 規格どおりの形状である。減厚はパイプの内面あるいは板の片面のみの機械切削によったが、一部減厚方法の相違の効果を調べるため、板の両面を機械切削したものも試験した。パイプから切出した試験片の中央部はパイプの曲率のままとし、端部を平坦にして試験に供した。また、タイプ A 試験片のスパン長さを 254mm から 270mm に増加したもの(タイプ A')についても試験を行った。

タイプ B および C 試験片は原厚のタイプ A 試験片と同じ形状ではあるが、B 試験片ではノッチ底面脇にアークストライクを置き、また C 試験片はノッチ相当部に溝を造りその溝を脆化ビードで埋めたものとして、ともに脆性破壊発生を容易にした。アークストライクおよび脆化ビード施工条件を Table 3 に示す。

タイプ D およびタイプ E 試験片は、ノッチ長さを API 規格の 0.2in(5mm)より長くし、それぞれ 10mm および 15mm としたものである。またスバ

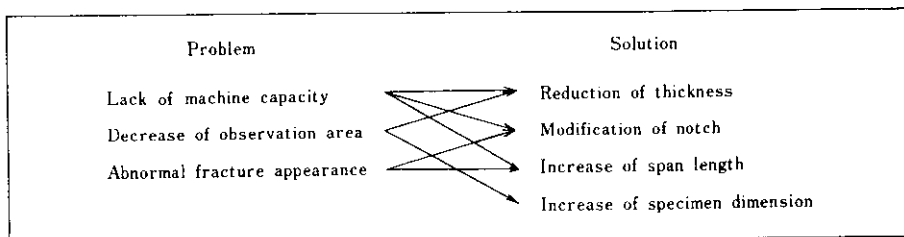


Fig. 1 Expected solutions to problems in conducting DWTT using thick specimens

Table 1 Chemical compositions of specimens

(wt%)

Steel ***	Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Al
X-1*	33	0.05	0.25	1.73	0.015	0.003	—	—	0.20	—	0.060	—	0.033
X-2*	27.4	0.05	0.27	1.75	0.015	0.004	—	—	—	0.142	0.058	—	0.031
X-3*	21.3												
A-5	32	0.06	0.24	1.62	0.020	0.005	0.01	1.13	0.01	0.001	0.051	0.036	0.024
B-7	32	0.05	0.27	1.68	0.014	0.004	0.29	0.30	0.05	0.004	0.049	0.035	0.035
C-6	32	0.07	0.26	1.29	0.010	0.006	0.03	2.51	0.09	0.206	0.003	0.003	0.035
A-6**	32	0.08	0.25	1.06	0.013	0.011	0.03	3.45	0.15	0.190	0.004	0.024	0.039
7W288													
X9368*	32.3	0.07	0.27	1.61	0.015	0.006	0.11	0.32	—	—	0.026	0.063	0.038
X8118*	32.3	0.07	0.26	0.82	0.008	0.005	0.04	3.37	—	0.210	—	0.027	0.025
X7402	26.9	0.06	0.26	1.71	0.015	0.006	0.11	0.30	—	—	0.026	0.059	0.033
X9351*	18.8	0.05	0.24	1.71	0.018	0.006	0.19	0.21	—	—	0.038	0.042	0.027

*: REM was added

**: A-6 is a pipe made of 7W288

***: C-6, 7W288(A-6) and X8118 were quenched and tempered, and others were controlled-rolled

A-5, A-6, B-7 and C-6 are pipes, and others are plates

Table 2 Mechanical properties in transverse direction

Steel *	Tensile test			V-notched Charpy impact test									
	YS (kg/mm ²)	UTS (kg/mm ²)	El. (%)	Absorbed energy (kg·m)									
				−20°C	−25°C	−30°C	−40°C	−45°C	−50°C	−60°C	−65°C	−70°C	−80°C
X-1	49.3	54.5	64	29.8	—	—	29.8	—	—	—	—	—	29.8
X-2	51	59	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
X-3	59	62	47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A-5	49.0	60.1	42	12.0	—	11.5	11.8	—	—	9.8	—	—	8.6
B-7	51.7	61.5	40	9.5	—	8.7	8.6	—	7.6	6.7	—	—	—
C-6	51.7	62.2	47	—	—	—	—	14.2	—	—	12.2	—	—
A-6	55.3	67.6	45	14.6	—	—	14.9	—	—	14.1	—	—	10.7
7W288	54.2	65.9	51	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
X9368	55.3	58.6	54	—	22.0	—	—	17.5	—	—	18.3	—	—
X8118	51.6	63.6	59	—	—	—	—	—	27.4	—	—	26.4	—
X7402	55.4	59.9	49	—	—	16.0	—	—	12.8	—	—	11.4	—
X9351	61.2	63.3	41	—	12.3	—	—	11.9	—	—	—	97.0	—

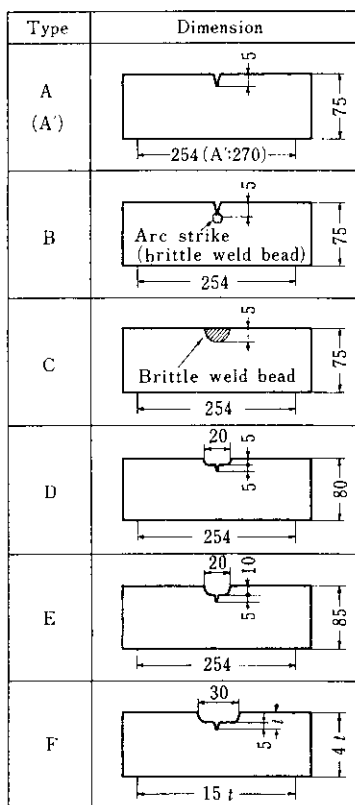


Fig. 2 DWT specimen geometries

ン長さは 254mm とした。次式で明らかなように、ノッチ長さおよびスパン長さを大きくするほど一定荷重に対する静的応力拡大係数 K が大きくなる。すなわち、試験片を破壊するのに必要なエネルギーがより小さくなることが期待される。

$$K = 1.5PZ \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Z = \frac{S\sqrt{a}}{BW^2}Y$$

$$Y = 1.99 - 2.47 \left(\frac{a}{W}\right) + 12.97 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 23.17 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 24.8 \left(\frac{a}{W}\right)^4$$

ここに

P : 荷重 (kg)

S : スパン長さ (mm)

a : ノッチ長さ (mm)

B : 試験片厚さ (mm)

W : 試験片幅 (mm)

タイプ F 試験片は試験片厚さに比例したノッチ

Table 3 Welding conditions

	Specimen	
	Type B	Type C
Welding mode	Arc strike	Manual
Electrode	Murex-Hardex N, 4φ	
Voltage	24V	
Current	170A	
Welding velocity		150mm/min
Welding time	4s	
Heat input		16 000J/cm

長さ、幅、スパン長さを有するもので、(1)式で与えられる静的応力拡大係数が厚さ 19mm のタイプ A 試験片とほぼ同じ値で、かつ(厚さ)² の被検面積を確保できる。

3. 実験結果および考察

3.1 吸収エネルギー

Fig. 3 に原厚 33mm の X-1 および原厚 32.3mm

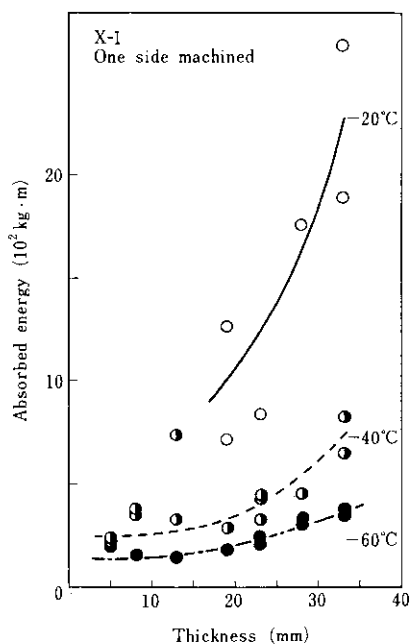


Fig. 3 Effect of thickness reduction on absorbed energy

の X8118 鋼板を例として、片面切削による減厚の吸収エネルギーへの影響を示す。吸収エネルギーは減厚により著しく減少し、たとえば X8118 材および -20°C での X-1 材では 19mm までの減厚により 1/2 以下となっている。

減厚以外の方法で試験片を改造した場合の吸収エネルギーへの影響をまとめて Fig. 4 に示す。エネルギー吸収が大きい試験片で明りょうな変化が観察される。すなわち X8118 材では、脆化ビード (タイプ B, C) およびノッチ長さの増加 (タイプ D, E) により -40°C で約 20% のエネルギー減少をもたらしているが、タイプ F 試験片では吸収エネルギーの減少がない。またタイプ A 試験片でスパン長さを 254mm から 270mm (タイプ A') に増加することによってもエネルギーが大きく減少している。しかしながら、減厚法以外の試験片改造によって減少できる吸収エネルギー量は減厚によるそれよりも格段に小さく、吸収エネルギーの絶対値を減少させて試験を行いやすくするという意味ではあまり有効な方法とはいえない。

試験片形状の改造による吸収エネルギーの減少

の機構は、脆性破壊発生および伝播に要するエネルギーを別個に考えることにより理解できよう。

Table 4 に吸収エネルギーに影響を及ぼす各形状因子を示す。表中、 $B \cdot X$ はリガメントの面積で、これが大きいほど破壊伝播過程において吸収されるエネルギーが大きい。一方、 Z は応力拡大係数を支配し、これが大きいほど破壊発生に要するエネルギーが小さくなる。

このような考察を X8118 材に適用してみると、タイプ A', B, C, D および E 試験片はタイプ A 試験片と $B \cdot X$ 値が同じであるが、 Z 値は大きい。したがってタイプ A 試験片より少ないエネルギーで破断する。一方、タイプ F 試験片が他のどの試験片よりも大きいエネルギーを吸収した事実は、 $B \cdot X$ 値の違いによるものとして説明できる。

Z 値が板厚に反比例し、 $B \cdot X$ 値が板厚に比例することにより、減厚は破壊の発生および伝播の両面で吸収エネルギー減少に寄与するのに対し、他の方法では、たとえば脆化ビードなどにより発生

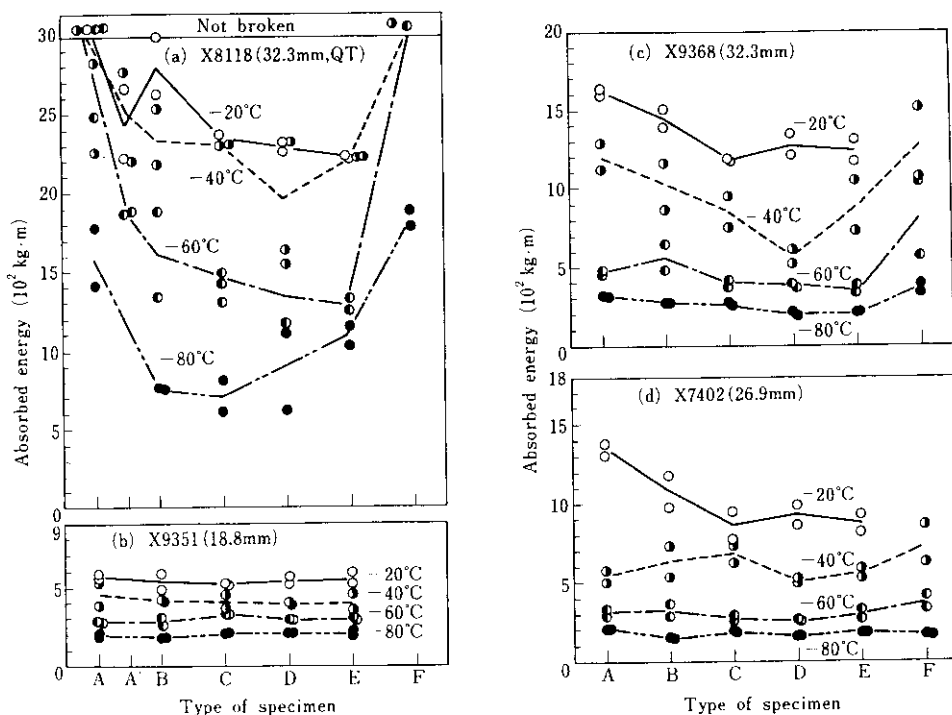
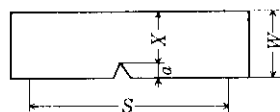


Fig. 4 Effect of specimen modification except thickness reduction on absorbed energy

Table 4 Factors affecting DWTT absorbed energy

Thickness (mm)	Factor	Type of specimen						
		A	A'	B	C	D	E	F
32	a (mm)	5	5	5	5	10	15	32
	W (mm)	75	75	75	75	80	85	128
	S (mm)	254	270	254	254	254	254	480
	$B \cdot X$ (mm ²)	2 240	2 240	2 240	2 240	2 240	2 240	3 072
	Z (mm ^{-3/2})	0.006	0.0065	*	*	0.008	0.008	0.010
27	a (mm)	5	—	5	5	10	15	27
	W (mm)	75	—	75	75	80	80	108
	S (mm)	254	—	254	254	254	254	405
	$B \cdot X$ (mm ²)	1 890	—	1 890	1 890	1 890	1 890	2 187
	Z (mm ^{-3/2})	0.007	—	*	*	0.009	0.009	0.013
19	a (mm)	5	—	5	5	10	15	—
	W (mm)	75	—	75	75	80	80	—
	S (mm)	254	—	254	254	254	254	—
	$B \cdot X$ (mm ²)	1 330	—	1 330	1 330	1 330	1 330	—
	Z (mm ^{-3/2})	0.010	—	*	*	0.013	0.013	—

B : Thickness (mm)
 S : Span length (mm)
 Z : See eq. (1)
 *: Brittle weld bead



X8118 材, -80°C)。したがって, DWTT 試験片を破断させるに要するエネルギーを大幅に減少させるには, 減厚がもっとも有効であると結論づけられる。

3・2 破面遷移温度

各種鋼材の 85% SATT を試験片厚さ t (mm) に対してプロットすると, 7W288 材についてはこれまでに報告^{3,5)}されているように遷移温度と厚さの間に直線関係が見られる。しかし, 他の材料については直線関係がなく, 厚さの増加とともに遷移温度の変化が少なくなる。そこで Fig. 5 に 85% SATT を $1/\sqrt{t}$ に対してプロットした。これまでに報告⁶⁻⁸⁾されているように, 両者の間に直線関係が成立することがわかる。同様の関係は 60% および 40% SATT についても見出される。両面切削により減厚した試験片は片面切削によるものより大きい 85% SATT 値を与えているが, 減厚量が

小さいときには減厚方法の違いによる遷移温度の差が明りょうではない。減厚方法の違いによる遷移温度の差は, 板厚方向の材料の性質の違いに起因しているといえる。

さて, これらの結果から遷移温度に及ぼす材料の違いの影響を除去して, 遷移温度と試験片厚さの間の一般的な関係を抽出することを試みた。すなわち, 任意の厚さ t (mm) の試験片の遷移温度から基準厚さ試験片のそれを引いた値 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ を $1/\sqrt{t}$ と対応させた。基準厚さとしては API 規格の最大板厚である 0.75in (19mm) を採用した。Fig. 6 (a), (b), (c) にそれぞれ 85%, 60% および 40% SATT についてこの関係を示した。図より明らかなように, ΔT と $1/\sqrt{t}$ の関係はある程度のばらつきを許容するなら一つの直線関係で表せることがわかる。その関係は最小 2 乗法により次のように与えられる。

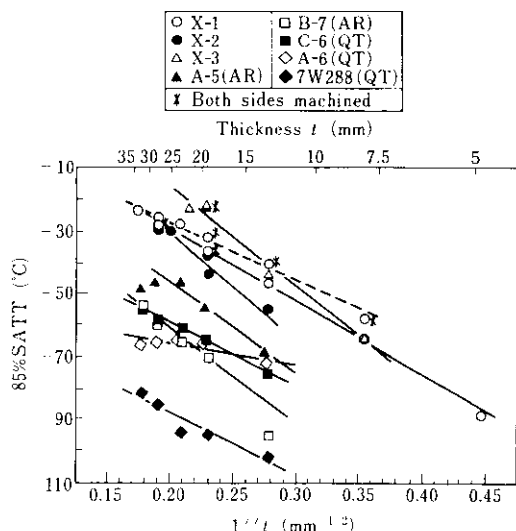


Fig. 5 Relation between 85% SATT and reciprocal square root of specimen thickness t

$$\Delta T_{85\%} = -\frac{235}{\sqrt{t}} + 53 \quad \text{..... (2)}$$

$$\Delta T_{60\%} = -\frac{228}{\sqrt{t}} + 51 \quad \text{..... (3)}$$

$$\Delta T_{40\%} = -\frac{210}{\sqrt{t}} + 47 \quad \text{..... (4)}$$

Fig. 6 (a), (b), (c) の実線はそれぞれ (2), (3), (4) 式の関係を示したもので、その両側の破線は実線から $\pm 5^\circ\text{C}$ のずれを示している。

これらの 3 つの関係式は大きな誤差をもたらすことなく次式に集約することが可能である。

$$\Delta T = -\frac{225}{\sqrt{t}} + 52 \quad \text{..... (5)}$$

したがって材料や遷移温度の基準破面率に影響されることなく、任意の減厚試験片と基準厚み試験片との遷移温度の差を板厚との関係において一義的に決定できる。

Fig. 7 は X-42 から X-70 に及ぶ広範囲のグレードのラインパイプ用鋼材について、従来報告されている 85% SATT のデータ⁸⁾を (5) 式によって整理したものである。この場合にも (5) 式で表される実線は ΔT と $1/\sqrt{t}$ の関係をよく表している。

これとは別に、ある厚さの試験片の延性破面率-

温度曲線から任意の厚さの試験片のそれを求める方法が報告されている¹⁰⁾。この方法に基づいて、X-1 材の 13mm 減厚試験片の結果から種々の厚さの試験片の 85% SATT を推定し、Fig. 6 (a) および Fig. 7 に 1 点鎖線を示す。この 1 点鎖線は 10mm より大きい厚さに対しては (5) 式で表される実線とよく一致しているが、厚さが小さくなるにつれて実験点から大きくはずれる傾向にあり、遷移温度変化の推定に適さなくなる。さらに、 -35°C 以上の温度では、厚さ 13mm の試験片の延性破面率が一定値(100%)となってしまうため、厚さ 25mm 以上の推定延性破面率も計算上は 51.5% のままで変化しなくなってしまう。この種の障害は、薄い試験片の延性破面率に基づいて厚い試験片のそれを

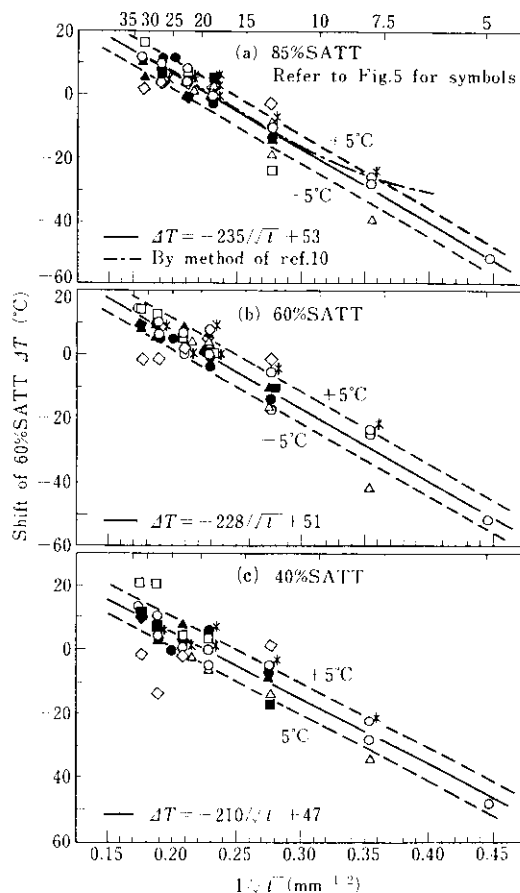


Fig. 6 Relation between shift of SATT (ΔT) and specimen thickness t (standard thickness: 19mm)

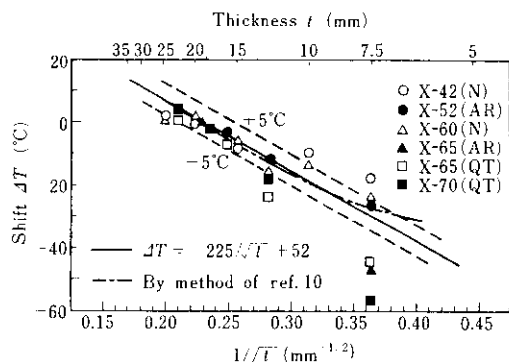


Fig. 7 Relation between shift of 85% SATT and thickness t using data from ref. 8

推定するときには常に起こりうるものである。したがって、Fig. 6 (a) の1点鎖線を求めるために使われた方法は、遷移温度と試験片厚さの関係を求めるための適当な方法とはいえない。

また別の方法として、Fig. 5 に示したような85% SATTと $1/\sqrt{t}$ の関係を表す直線の勾配を各材料の室温における降伏応力に関係づける試みが報告されている⁷⁾。すなわち、85% SATTは次の実験式で与えられる。

$$85\% \text{ SATT} = -\frac{A}{\sqrt{t}} + C \quad \text{..... (6)}$$

$$A = 9.36 \text{YS} - 145 \quad \text{..... (7)}$$

YS: 降伏応力 (kg/mm²)

C: 定数 (°C)

(6)式を5種の鋼材に適用し、遷移温度の変化を推定した。その推定値と実験結果との比較をFig. 8に示す。(7)式による勾配Aを用い、かつ $t=19\text{mm}$ で $\Delta T=0^\circ\text{C}$ となるように引いた1点鎖線は、降伏応力が増大するにつれて実験結果から離れる傾向にあり、実線で示した(5)式に基づく推定ほどにはよい結果をもたらさない。

さて、減厚した試験片では常に十分な被検面積を確保することが可能であり、したがってAPI規格に基づいて破面率を決定することができる。しかし、試験片のタイプおよび破面率評価方法で85% SATTが変化することがないかどうかをつきに調べた。

Fig. 9に試験片タイプによる85% SATTの相違を示す。API法により決定した85% SATTは、

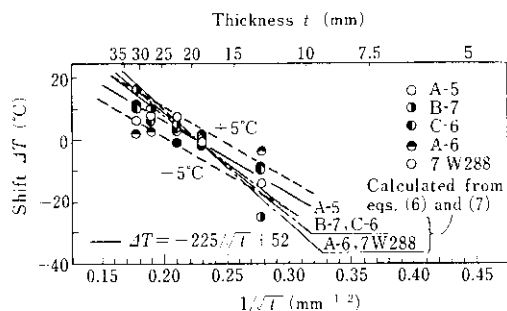


Fig. 8 Relation between shift of 85% SATT and thickness t

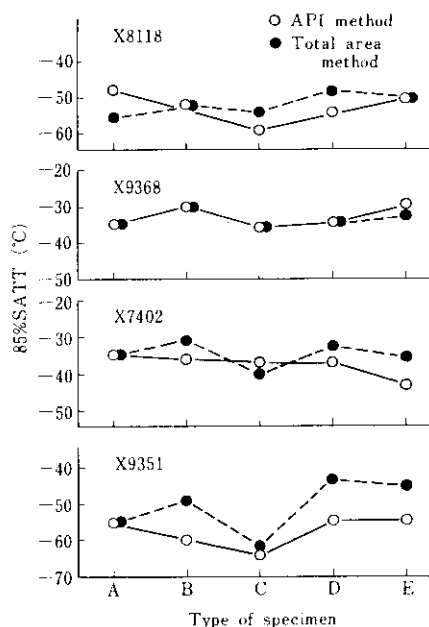


Fig. 9 Relation between 85% SATT and specimen type

試験片タイプにあまり依存せず最大 10°C 程度の相違であった。つぎに破面全体を被検面積として破面率を測定する全破面法により85% SATTを求めてみると、API法によるよりも一般に高い温度を与える傾向にあるが、両者の相違は最大 10°C 程度であり、許容範囲内にあるようである。しかしながら、ノッチ底近傍および打撃端面近傍に大きい塑性変形領域が形成されている⁷⁾ことを考慮すると、破面全体を破面率決定の対象とするよりは、何がしかの量(たとえばAPI規格における試験片

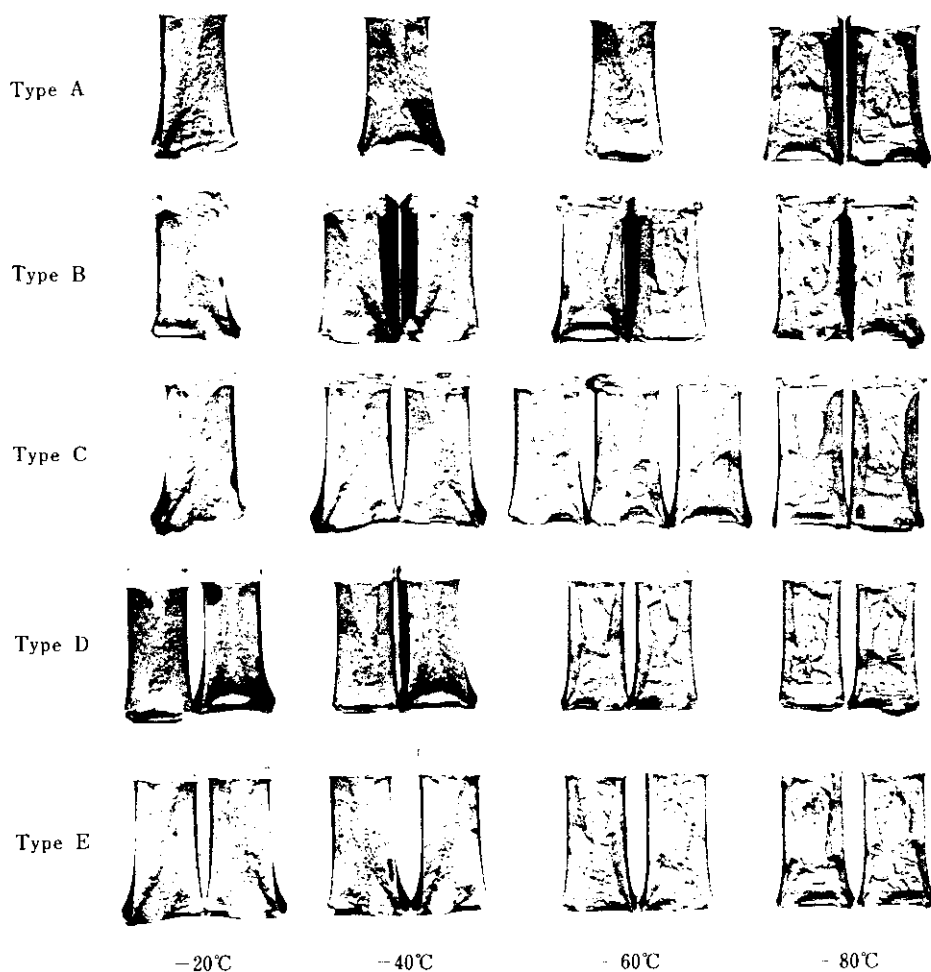


Photo. 1 Fractographs of various types of X8118 steel specimens

厚さ相当長さ)をノッチ底および打撃端面からそれぞれ除去した残りの破面を破面率決定の対象にした方がよいと考えられる。この意味で本研究で確められた減厚試験片での評価法が、厚肉材の試験に際して意義をもつものと考えられる。

3.3 破面形状

Photo. 1 に X8118 材の各種タイプ DWTT 試験片破面を示す。破壊発生を容易にした試験片(タイプ B, C, D および E) はいずれも異常破面発生防止にいくぶん効果があるが、試験片の厚さ全体にわたって置いた Murex-Hardex N の脆化ビード(タイプ C) がもっとも効果が大きいよう

である。

4. 結 言

低温靱性が高い厚肉大径ラインパイプ用鋼材の DWTT 実施にあたって遭遇する技術的問題を解決するため、API 規格試験片に種々の改造を施してその影響を調べた。その結果つぎのことが明らかになった。

(1) 試験片の減厚による吸収エネルギーの低下は、他の試験片改造方法、たとえばノッチ部への脆化ビード施工、あるいは幅やスパン長さの変更などによるよりもはるかに顕著であり、試験機能力の

不足を解決するためには唯一の手段といえる。

(2) 試験片を減厚すると SATT は一般に低下する。この場合、任意の厚さ t (mm) の試験片の SATT と基準厚さ 19mm の試験片のそれとの差 ΔT (°C) は、遷移温度の基準となる延性破面率や、材料、減厚方法などに関係なく、次式で表される一つの直線関係で推定できることを見出した。

$$\Delta T = -\frac{225}{\sqrt{t}} + 52$$

(3) 減厚方法以外の方法による試験片改造は、85% SATT にあまり影響せず、せいぜい 10°C 程度の相違を与えるにすぎなかった。

(4) ノッチ部に脆化ビードを置くなどして破壊発生を容易にした試験片は、いずれも異常破面の防止にいくぶんの効果があったが、ノッチ部の試験片厚さ全体にわたって脆化ビードを置いた場合にその効果がもっとも大きかった。

参 考 文 献

- 1) R. J. Eiber : Symposium on Line Pipe Research, Nov. 1965, (1966), 83 [A. G. A.]
- 2) API RP 5L3, (1969)
- 3) E. H. Brubaker and J. D. Dennison : J. Metals, 17 (1965) 9, 985
- 4) E. B. Norris and R. D. Wylie : Impact Testing of Metals, ASTM STP 466, (1970), 92
- 5) Von H. Hengstenberg and F. Henrichs : Bänder Bleche Rohre, 12 (1971) 5, 208
- 6) C. R. Roper, Jr., K. A. Koschnitzke and R. D. Stout : Welding J., 46 (1967) 6, 254S
- 7) N. Iwasaki, T. Yamaguchi and T. Taira : 17th Mechanical Working and Steel Processing Conference, Pittsburgh, U. S. A., (1975)
- 8) 山口, 岩崎, 東田 : 鉄と鋼, 60 (1974) 4, S213
- 9) Y. Nakano, J. Kudo, T. Funakoshi and M. Kaga : Effect of Thickness on DWTT Shear Area Transition Temperature, Reported to API and Japan API Task Group, (1975)
- 10) 新日本製鉄製品技術研究所 : 日本造船学会溶接研究委員会第 1 分科会資料 No. 1-333-75, (1975)