

## 技術報告

UDC 669.14.018.41-462 : 669.15'74-194.2 : 539.4.019 : 620.162.4

## 寒冷地ガス輸送用大径鋼管の不安定延性破壊試験\*

三好栄次\*\*・田中孝秀\*\*\*・福田 実\*\*

岩永 寛\*\*・岡沢 亨\*\*\*

## Propagating Shear Fracture Test of Large Diameter Gas Transmission Line Pipes for Arctic Grade

Eiji MIYOSHI, Takahide TANAKA, Minoru FUKUDA,  
Hiroshi IWANAGA, and Tooru OKAZAWA

## Synopsis:

So called separations are often observed on the surface of propagating shear fracture of line pipes for arctic grade, which are made of severely controlled-rolled steel plates. In order to investigate the effects of these separations on the propagating shear fracture behavior, two series of tests were conducted. One is the series of full scale burst tests of large diameter pipe lines (200 m in length) highly pressurized by natural gas (Athens Type Test). The other is the short length burst tests of large diameter pipes pressurized by a mixture of N<sub>2</sub> gas and water (West Jefferson Type Test). The latter series of tests was planned to examine the effect of temperature on the propagating shear fracture behavior and to determine whether the toughness parameter for the propagating shear fracture is temperature-dependent or not. The results show that the separations have no influence on the propagating shear fracture speed and that the propagating shear fracture behavior is strongly dependent on the test temperature. The fracture speed increased and the absorbed energy decreased with lowering test temperatures. It is concluded that the toughness parameter for the propagating shear fracture should be temperature dependent and the intercept energy which is independent of temperature cannot be an appropriate criterion for the toughness required to arrest propagating shear fracture.

## 1. 緒 言

北極圏の寒冷地に存する天然ガスを、大口径高圧パイプラインにより長距離輸送をしようといういくつかの計画がある。このパイプラインの安全性に関連して、ガス輸送用パイプラインの破壊の研究、特に propagating shear fracture (不安定延性破壊) と称する特殊な形式の破壊の研究が、問題の焦点となつて<sup>1)</sup>いる。一方寒冷地であるため、低温靱性が必然的に要求される。低温靱性を満足させるために、鋼管の素材としての鋼板は、いわゆるコントロールド・ローリングにより製造される。このコントロールド・ローリングの結果として、衝撃試験の破断面上に異様なたてわれが生じることがあり、これをセパレーション (separation) という。このセパレーションが上記 propagating shear fracture (以下 PSF と

略記する) に及ぼす影響について検討するため、天然ガスを圧入した実物大の鋼管を破壊する試験 (Athens Type Test) を実施した。さらにこの現象の温度効果を求めるため、低温の靱性域での短管による破壊試験 (West Jefferson Type Test) を実施した。前者の試験はバツテル研究所に依頼し、後者の試験は著者らが独自に和歌山製鉄所構内で実施したものである。本報ではこれらの結果をまとめて報告する。

## 2. 不安定延性破壊

PSF は破面が延性型で大きい変形を伴いながら、100 m 以上にも及ぶ亀裂伝播を生じる破壊であつて、高圧ガスパイプライン特有のもので、ガス圧の比較的低い場合は生じない。この問題はバツテル研究所で最もよく研究されており<sup>2)3)</sup>、アメリカガス協会 (AGA) など、

\* 昭和50年6月20日受付 (Received June 20, 1975) (依頼技術報告)。

\*\* 住友金属工業(株)中央技術研究所 工博 (Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagasu-Hondori Amagasaki 660)

\*\*\* 住友金属工業(株)和歌山製鉄所 (Wakayama Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)



Photo. 1. Burst pipelines after the 2nd test.

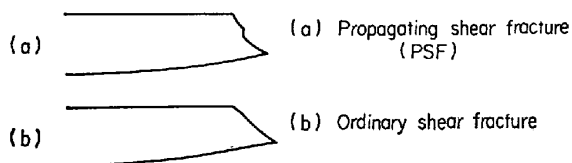


Fig. 1. Comparison of the macroscopic feature of fracture surfaces between (a) PSF and (b) ordinary shear fracture.

ガス関連機関の支援を得て相当数の大規模な実験が行なわれている。これらの試験から判明した特徴を列記すると次のとおりである。

- ① 完全延性域範囲における長大な破壊である。
- ② 亀裂伝播速度は通常 100~350m/sec 程度であり脆性破壊伝播速度 (600m/sec以上) よりかなり遅い。
- ③ ガスパイプライン特有の現象で、かつ大口径ラインで高圧の場合に発生しやすいといわれている。
- ④ 衝撃延性の低い鋼管ほど、高速の破壊伝播を行なうような傾向がみられる。

次に P S F の外観の一例を Photo. 1 に示す。

P S F による破壊状況は全てこの写真にみるごとく、亀裂は管軸方向にまっすぐ走り、エッジが伸延して波状の形状を呈する。またこの破面は通常のせん断破面と異なり Fig. 1 に示すように板厚中央で表面に垂直な部分をもつという特徴あるものである。なおこのようなパイプラインの P S F に関する統一的な理論的見解は現在まだ得られていない。

本報では鋼材のセパレーション<sup>4)</sup>が P S F にどのよう

な影響を及ぼすかを調べた結果を述べる<sup>5)</sup>。しかしながら前述のように P S F そのものの解析が確立していない状況なので、我々の実験結果についても、十分確定的な解析は行ない得なかつた。

### 3. セパレーション

セパレーションの実例を Photo. 2 に示す。上段はシャルピー試験の破面で、板面に平行する面をもつ割れが試片内に 3~5 本生じている。下段は鋼管の内圧破壊試験 (バーストテスト) の破面で、やはり板面に平行な面をもつ長い割れが何本も認められる。

このようなセパレーションは一般にきびしいコントロール・ローリングを施した、延脆遷移温度の低い材料にいちじるしく認められる。同一素材でも圧延条件がゆるい場合には生じないし、またいちじるしいセパレーションを示す鋼板を、 $A_3$  点以上に加熱して熱処理すると全くみられなくなるなどの点から低温圧延材に顕著に生じる結晶選択方位が原因であるという考え方が提出されている<sup>6)</sup>。Fig. 2 に同一素材で、セパレーションを多発するきびしいコントロール・ローリングから、セパレーションを全く生じないゆるい圧延条件まで、圧延条件を変化させた際の、シャルピー遷移曲線の変動状況を模式図で示す。圧延条件がきびしくなつて、セパレーションを多く生じるようになるとともに、遷移温度、特に破面遷移温度が低温側に動く。同時にセパレーション多発材では 100% 延性破面の温度域内でも、温度低下とともに、吸収エネルギーが減少していく傾向が明らかにみられる。

MAXEY<sup>4)</sup>らはかかる遷移曲線の特徴に注目し、セパレーション多発材では 100% 延性破面を示す最低温度にお

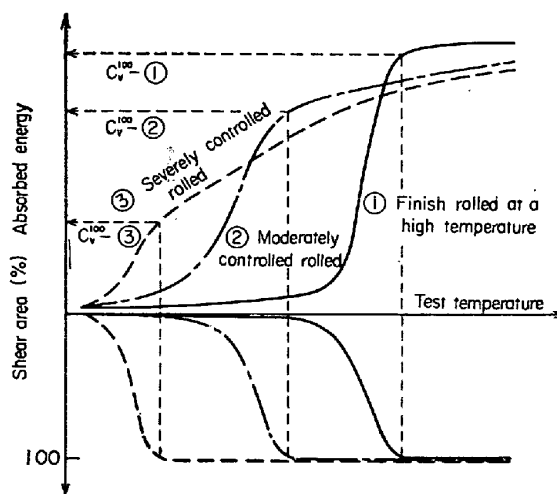


Fig. 2. Schematic explanation on the change of charpy transition curves with the degree of controlled rolling.



Photo. 2. A few examples of separations on fracture surfaces.

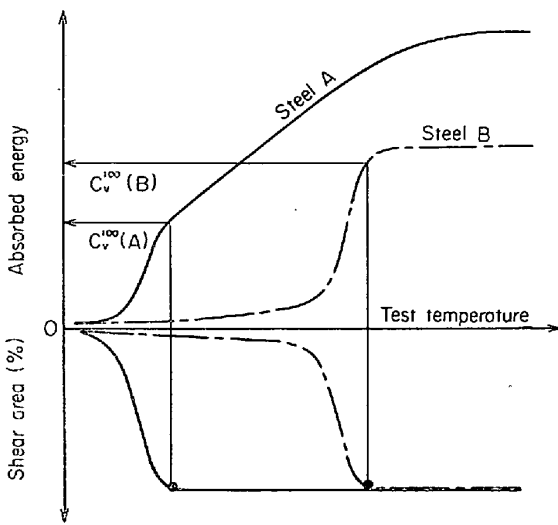


Fig. 3. A typical example suggesting a doubt on  $C_{V}^{100}$  values taken as toughness criterion.

けるシャルピー吸収エネルギー値 ( $C_{V}^{100}$ ) が、その材料の有効衝撃延性で、それ以上の温度増加に基づくエネルギー上昇分は、セパレーションに関連した仮想的な無効な延性値であるという考えを提出した。また  $C_{V}^{100}$  と類似の意味をもち、より厳密な  $C_{\downarrow}$  (Intercept Energy\*) という概念も導入した。しかし上記の考え方には問題が

\* 横軸に吸収エネルギー、縦軸に延性破面率をとつた座標上にシャルピー・フルカーブデータをプロットし延性破面率20~80%間のデータに最も良く適合する直線の延長が延性破面100%に達するときの横軸エネルギー値

多い。それを端的にあらわしたのが Fig. 3 で鋼Bは試験全温度域にわたって、鋼Aよりも吸収エネルギーが低いにもかかわらず、 $C_{\downarrow}$ 、 $C_{V}^{100}$  式の評価法では、すぐれているということになる。そこで果たしてセパレーションの発生が P S F に本当に悪影響があるのかどうか、また  $C_{\downarrow}$ 、 $C_{V}^{100}$  といった評価の仕方が妥当なのかどうかを確認するために、以下の試験を計画実施した。

#### 4. Athens Type 鋼管破壊試験

##### 4.1 試験概要

パッテル研究所アセス(Athens)試験場にある、Fig. 4 に示した全長 202m に及ぶ実験場を使用し、中央の約 100m の試験部位に 1 220 mm  $\phi$   $\times$  15.9 mm t の試験鋼

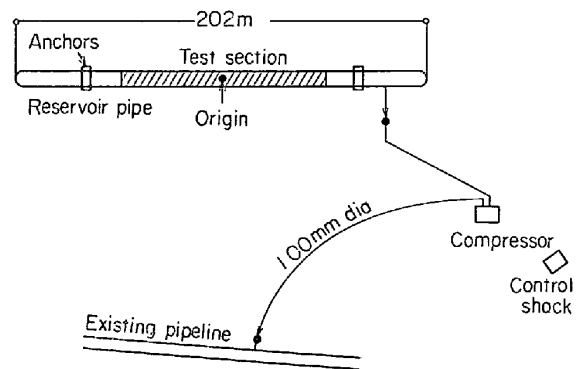


Fig. 4. Arrangement of Athens test site.

管を挿入して、全体の中心から爆薬による延性亀裂を発生せしめ、左右に伝播させた。試験部位の外側に、十分長い同径のレザーバー (reservoir) 管を継いで、減圧波の反射による、試験管の圧力攪乱を防いだ。

特別な圧延スケジュールを用いて、シャルピー遷移曲線が Fig. 2 の②と③のように異なっている以外は、強度、引張延性などにほとんど差のない2種の鋼管を作り、爆破起点の左 (西側) と右 (東側) に配置した。西側の管は、セパレーションが少なく、遷移温度が高く、 $C_{\downarrow}^{100}$ 、 $C_{\downarrow}^{\downarrow}$  も大きいものであり、東側のは逆にセパレーションが多発し、遷移温度が低く、 $C_{\downarrow}^{100}$ 、 $C_{\downarrow}^{\downarrow}$  がきわめて小さいものである。ただし試験温度におけるシャルピー吸収エネルギー値 ( $C_{\downarrow}^{\downarrow}$ ) は両者大差ないようにした。また実管テストで脆性破壊を生じてはいけなかったので、西側の材料もかなり低い遷移温度を必要とし、そのため、若干のセパレーション発生はさけられなかつた。内圧が同一の場合、材料の良否が結果としてあらわれるのは、伝播速度と伝播距離であると考えられるので、爆破により生じ

た延性亀裂の伝播速度と、伝播距離を両側で比較し、P S Fに対するセパレーションの効果を端的に比べるという計画であつた。バーストテストは2回行なつた。

4.2 供試材

(1) 化学組成: Table 1 に供試管のチェック分析値を示す。

(2) 機械的性質: Table 2 に第1回テストの鋼管の機械的性質を示し、Table 3 に第2回テストのそれを示す。ただし  $C_{\downarrow}^{\downarrow}$ 、 $C_{\downarrow}^{100}$ 、 $C_{\downarrow}^{\downarrow}$  などの問題のシャルピー吸収エネルギー値は 4.4 節 Fig. 5, 6 に示す。また Table 2, Table 3 では実際に破壊が貫入した部分に用いた鋼管だけの性質を示してある。

4.3 試験条件

破壊試験の期日及び試験条件を Table 4 に示す。

4.4 試験管配置と破壊進行状況

(1) 第1回試験

Fig. 5 に第1回試験の管配置、各鋼管の衝撃延性値及びバーストテストにおける破壊進行経路を示す。実線に

Table 1. Chemical composition of pipes supplied to the Athens type test.

	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Al	N
Max	0.11	0.33	1.39	0.014	0.007	0.030	0.09	0.028	0.0083
Min	0.11	0.29	1.26	0.012	0.005	0.015	0.06	0.025	0.0055

Table 2. Mechanical properties of the pipes supplied to the 1st Athens type test. (tested in Battell Memorial Institute)

	Pipe number	Tensile test (API)				Charpy test (Full size)		B-DWTT 50% FATT (°C) **
		Yield stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Yield ratio (%)	Elongation (%)	50% FATT (°C)	vEo (kgm)	
East side*	125 A	46.3	55.4	83.6	31.0	- 98	9.2	- 74
	124 B	56.6	64.4	88.0	27.0	- 120	8.0	- 62
West side*	91	56.8	62.9	90.4	33.0	- 45	9.7	- 28
	113	47.8	57.8	82.8	41.0	- 55	11.4	- 23

\* As shown in Fig. 6, cracks propagate both in east and west directions from origin. Pipes arranged in the east side and in the west side are tested at the same time under the same pressure condition.

\*\* 50% fracture appearance transition temperature by battelle drop weight tear test.

Table 3. Mechanical properties of the pipes supplied to the 2nd Athens type test. (tested in BMI)

	Pipe number	Tensile test (API)				Charpy test (Full size)		B-DWTT 50% FATT (°C)
		Yield stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Yield ratio (%)	Elongation (%)	50% FATT (°C)	vEo (kgm)	
West side	125 B	45.2	55.3	81.8	34.5	- 140	7.3	- 82
	130 B	45.4	55.6	81.8	31.5	- 140	6.8	- 77
	111	47.2	56.2	84.0	34.5	- 53	6.5	- 23
East side	110	48.2	57.4	84.0	35.0	- 48	6.8	- 23
	106	48.4	57.6	84.1	34.5	- 65	6.6	- 38

Table 4. Test conditions for both Athens type tests.

	1st Test	2nd Test
Date	Dec. 19, 1972	Feb. 8, 1973
Gas pressure	84 atm (1 220psi)	88 atm (1 290psi)
Hoop stress level	72% of 45.7 kg/mm <sup>2</sup>	76% of 45.7 kg/mm <sup>2</sup>
Test temperature	+8°C	+6°C

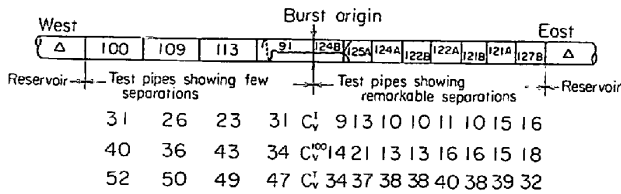


Fig. 5. Pipe arrangement, fracture path and charpy values of the 1st test. (2/3 subsize charpy values are represented in ft-lb unit)

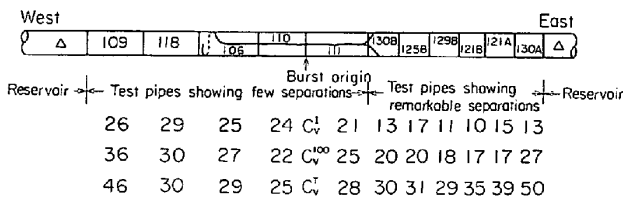


Fig. 6. Pipe arrangement, fracture path and charpy values of the 2nd test. (Charpy values as Fig. 5)

示すように東側のセパレーション多発材は、1本目 124 B と 2本目 125 A の間の周溶接部に周方向の脆性亀裂を生じてここで主亀裂は曲げられ停止した。西側のセパレーションの少ない材料は 1本目 91 の後方で自然停止した。東側は短管、西側は長管であつたため亀裂長さは東側 4.9m、西側は 6.2m である。

(2) 第 2 回試験

Fig. 6 に第 2 回試験の管配置、各鋼管の衝撃エネルギー値及びバーストテストにおける破壊進行経路を示す。実線に示すように、東側の破壊はセパレーションの発生傾向が中位の鋼管 1 本を通りぬけて、2本目 130 B 材との間の、周溶接部分から生じた周方向延性亀裂と合して停止した。この No. 111 材は C<sub>1/2</sub> が長管中では最も低いことからわかるように、他の長管よりはいくらかセパレーションが多かつたものである。西側の破壊は No. 110 材を通りぬけ、2本目の No. 106 材の終端近くまで走つて停止した。亀裂長さは東側が 10.5m、西側は 19.6m であつた。第 2 回テスト後の管の状況は Photo. 1 に示した。

4.5 破壊速度測定結果

各鋼管に 2.1~2.7m ごとに銅線のタイミングワイヤを貼付し、管の破壊に伴う断線で、電気伝導性が急変することを利用した計測法によつて、破壊の進行速度を定めた。Fig. 7 に両テストの破壊速度測定結果をまとめて示す。

図示したようにセパレーション多発材 (...▲...) とそうでない材料の間の破壊速度からみた挙動はほとんど変わらない。また爆破した管の破面の状況、とくにセパレーションの出方の相違を Photo. 3 に示した。10カ所で測定した板厚断面あたりの平均セパレーション数は多発材 (124 B) で 4.4 本、少ない材 (91) で 1.2 本であつた。

5. West Jefferson Type 鋼管破壊試験

5.1 試験概要

破壊速度の温度依存性を明確にするという目的で、一部窒素ガスで加圧した短管を用いる方法により、前節同様の試験を、温度を変えて実施するために、住友金属和歌山製鉄所構内に特設実験場を臨時的に設け、やはり同

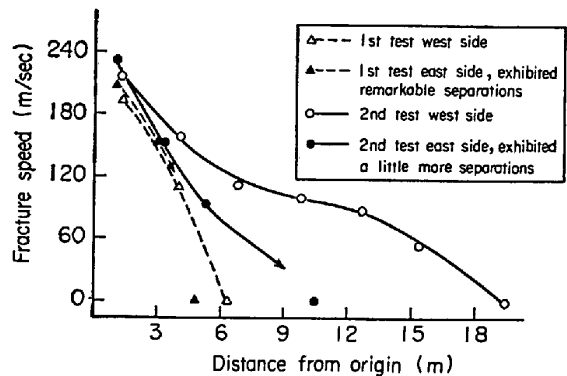
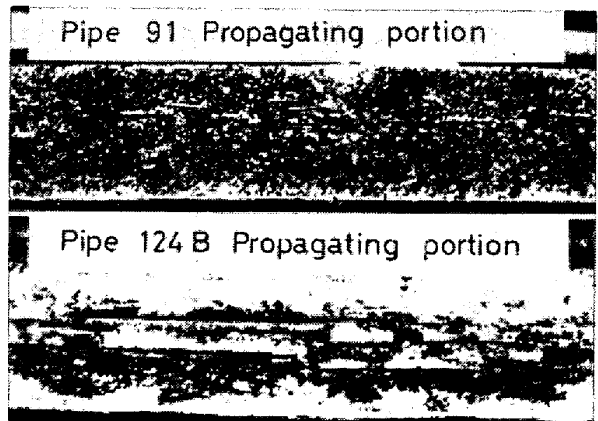


Fig. 7. Measured fracture speed in Athens type tests.



(a) Pipes with a few separations  
(b) Pipes with remarkable separations

Photo. 3. Appearances of fracture surfaces of burst pipes.

一の鋼より圧延法を変えてセパレーションの出方を調整した2種の鋼管を準備した。実験方法の模式図をFig. 8に示す。供試管の寸法は762mmφ×15.9mm tである。管内に全容積の6%の空隙を残して水を入れ、空隙をN<sub>2</sub>ガスで70kg/cm<sup>2</sup>まで加圧したのち、さらに水圧ポンプによりN<sub>2</sub>ガス槽を介して200kg/cm<sup>2</sup>以上に加圧し、あらかじめほぼ管材の降伏強さで延性破壊発生に至ると計算されている深さt/2(板厚の半分)長さ150mmの人工表面切欠きより延性亀裂を左右に走らしめるようにした。亀裂は全て管全長(3m)を直進した。亀裂進路と予想される部分を冷却槽で所定温度まで冷却または昇温し、温度を変えて亀裂の伝播速度を調べた。冷

却槽が置かれた部分の管の裏側には断熱材を貼付して、温度の維持をはかった。試験はセパレーション多発材に関しては、-42~+75°C間5温度5本、セパレーションの少ない材料においては、0, +90°Cの2温度2本行

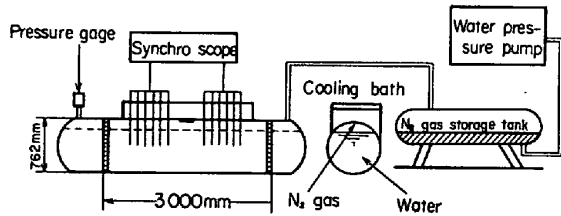


Fig. 8. Schematic diagram of West Jefferson type test procedures.

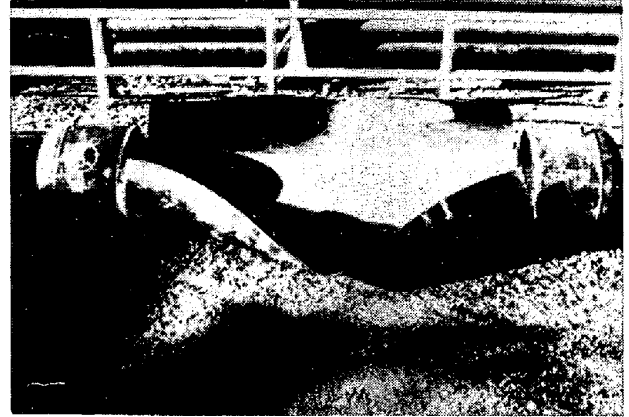


Photo. 4. An example of fractured pipe specimen by West Jefferson type test.

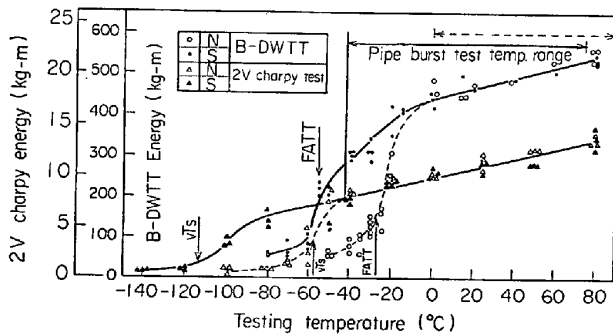


Fig. 9. Transition curves of charpy and B-DWTT absorbed energies for both materials.

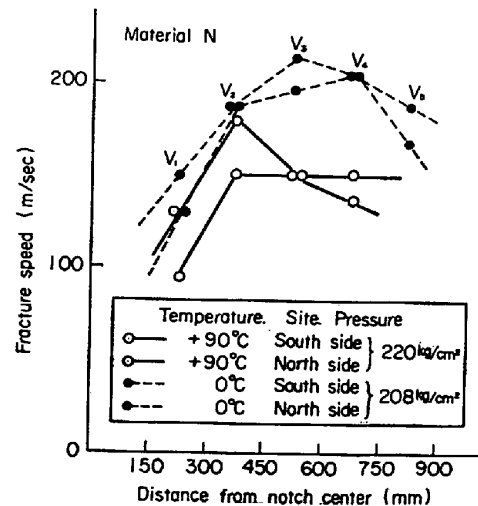


Fig. 10. Examples of measured fracture speed in West Jefferson type test.

Table 5. Chemical composition of supplied pipes to the short length burst tests.

Mark	Separation	C	S	Mn	P	S	Cu	Ni	Nb	V	Al
N	A few	0.11	0.34	1.24	0.018	0.003	0.33	0.20	0.022	0.10	0.038
S	Remarkable	0.12	0.34	1.22	0.018	0.003	0.33	0.20	0.022	0.10	0.038

Table 6. Mechanical properties of pipes for short length burst tests.

Test pipes	Tensile test (API)				Charpy test (Full size)			B-DWTT 50% FATT (°C)
	Yield stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Yield ratio (%)	Elongation (%)	50% FATT (°C)	vEo (kgm)	C <sub>v</sub> <sup>100</sup> (kgm)	
N	52.7	64.5	81.7	35.6	-57	10.0	8.0	-27
S	52.8	64.3	82.1	34.7	-113	10.0	3.9	-55

Table 7. Test results of West Jefferson type test.

Material	Test temperature (°C)	absorbed energy DWTT (kgm)	Charpy absorbed energy (kgm)	Fracture pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Fracture stress (kg/cm <sup>2</sup> )	Mean crack speed $\bar{v}$ (m/sec)
N	90	575	14.2	220	51.7	150
	0	440	10.3	208	48.9	201
S	75	525	13.4	209	49.2	155
	13	423	10.9	218	51.3	211
	0	433	10.3	217	51.0	204
	-32	327	8.6	230	54.1	224
	-42	280	8.1	237	55.7	243

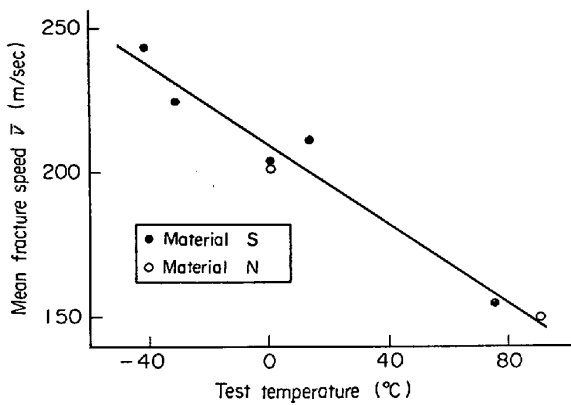


Fig. 11. Mean fracture speed in relation to the test temperature.

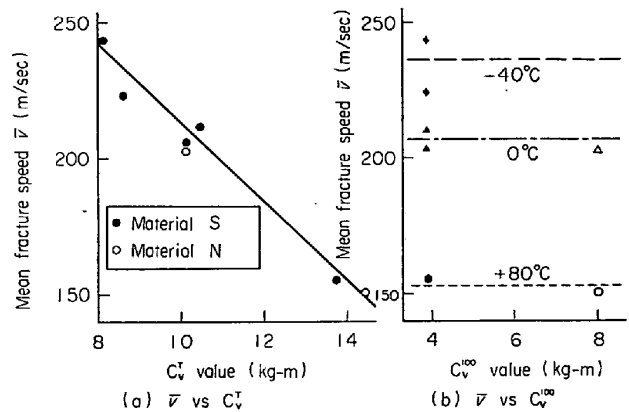


Fig. 12. Mean fracture speed in relation to the two types of charpy values.

なつた。

5.2 供試材

(1) 化学組成 : Table 5 に供試材のチェック分析値を示す。

(2) 機械的性質 : Table 6 に両鋼管材の機械的性質を示す。表示のごとくセパレーションの多発材 S は、 $C_{V}^{100}$  が 3.9 kgm と少ない。管 N は 8.0 kgm で S の  $C_{V}^{100}$  は半分しかない。両鋼材のシャルピーおよび B-DWTT でのエネルギー遷移曲線を Fig. 9 に示す。

5.3 試験結果

短管テストの破壊状況の一例を Photo. 4 に示す。破壊はすべて 3 m の試験鋼管の全長を走りぬけたので、亀裂長さは記録できなかつた。N 材の破壊速度測定結果を Fig. 10 に示す。なお本図で North side, South side とあるのは、破壊発生点の北側及び南側での測定結果である。S 材でも同様な速度-距離関係が得られている。代表破壊速度として、最高速度付近の加重平均速度  $\bar{v} = 1/5 (v_2 + 2v_3 + 2v_4)$  (Fig. 10 参照  $v_3, v_4$  についての係数 2 は  $v_2$  よりウェイトが大きいということを示す程度で特に意味はない) をとり、これを用いて後の議論を行なう。全 7 本のバーストテストの破壊圧力、破壊速度の結果を Table 7 に示す。

平均破壊速度と試験温度との関係を Fig. 11 に、またシャルピー吸収エネルギーとの関係を Fig. 12 に示す。

図示のごとく短管試験でもセパレーションの多少と破壊速度はほとんど無関係で、むしろ試験温度の影響がきわめて顕著である。Fig. 12 にみられるように、破壊速度がシャルピー吸収エネルギーと関係あるとすれば、それは  $C_{V}^{\downarrow}$  値と相関するものであり、MAXEY らのいう  $C_{V}^{100}$  値とは全く相関するものではない。以上 West Jefferson Type Test から、セパレーションと不安定延性破壊挙動との関連については、否定的な結果が得られた。

6. 考 察

(1) セパレーションの影響について

Fig. 7 の Athens Type Test の結果と、Fig. 12 の West Jefferson Type Test の結果はいずれも明らかにセパレーションが PSF にほとんど何の影響もあたえていないことを示している。同時に  $C_{V}^{100}$  値が材料のこの破壊に対する抵抗をあらわす適当なパラメーターでないことも明らかである。ところで PSF では破壊速度  $v_c$  が例えば応力集中係数をかけて丁度破断応力に等しくなる応力に相当する圧力状態の軸方向伝達速度よりも速いか

Table 8. Measured plastic deformation energy of Athens type test.

Pipe No.	Material	Portion	Number of separations	Fracture speed (m/sec)	Plastic deformation energy		Thickness reduction at fracture surface (%)
					Per unit length (kgm/cm)	Per unit area (kgm/cm <sup>2</sup> )	
124 B	Remarkable separations	Propagating part	4.4	230	48.3	30.2	21.8
		Just before arrest	4.4	—	56.4	35.3	23.3
91	A few separations	Propagating part	1.2	212	45.0	28.1	20.3
		Just before arrest	1.2	120	52.3	32.8	21.0

遅いかにより伝播か停止かが定まる。よつて  $v_c$  が大きいことはとりも直さず P S F が停止しにくいことをあらわす。したがつて P S F に対する材料の抵抗性は  $v_c$  の小さくなるようなものほどすぐれており、これからして P S F の停止特性に対してセパレーションが全く関係ないということも結論できる。

(2) 破面近傍の塑性変形エネルギー

バーストテストで破壊した破面近傍の板厚分布を測定することにより、歪分布を求めることができるが、さらに硬さ分布を測定することにより、歪分布と材料の応力-歪関係を用いて、亀裂単位長当たりの破壊時に加えられた塑性変形仕事  $E$  を算定することができる<sup>9)</sup>。実際には周方向に 5 mm おきに領域を分かち  $i$  番目の領域の平均的な板厚歪  $\epsilon_i$  と、硬さ値  $H_i$  を用いて

$$E = 2 \sum_i 5 \times 10 t_i \epsilon_i (\sigma_y + 1/2 \Delta \sigma_i) \\ \approx 100 \sum_i t_i \epsilon_i (\sigma_y + 7/60 \Delta H_i) \dots \dots \dots (1)$$

により算定した。ここに  $t_i$  は  $i$  番目領域の厚さ、 $\sigma_y$  は材料降伏応力、 $\Delta \sigma_i$  は破壊の際の変形による  $i$  番目領域の加工硬化量で  $\Delta H_i$  は十分遠い部分と  $i$  番目の領域の硬さの差である。この方法で計算した Athens Type Test の場合の塑性変形仕事  $E$  を Table 8 に示す。この表からセパレーションの多少は破壊速度、塑性変形エネルギーの両方に無関係であることがわかる。また停止前の減速した位置では  $E$  値が増しており、塑性変形エネルギーが、破壊速度と関連するものであることを暗示している。

7. 結 言

ガス輸送用大径鋼管の不安定延性破壊 (Propagating Shear Fracture) の挙動に及ぼす鋼材のセパレーションの影響を調査する試験を、米国における 200m テストラ

インと和歌山製鉄所内での短管テストの両試験法で行ない次の結果を得た。

- (1) P S F の破壊速度に関しては、セパレーションの影響は全く認められなかつた。
- (2) 破壊の伝播又は停止特性は、速度により決定的に左右されると考えられるので、セパレーションは全破壊挙動に関してもほぼ無関係であろうと推定される。

(3) 不安定延性破壊の破壊速度は、同一材料でも温度により変わる。すなわち温度依存性が強く存することが判明した。

(4) 破壊に伴う塑性変形エネルギーを算定し、塑性変形エネルギーと、速度の間には強い相関がみられることを示した。

なお、本試験の遂行に各種の援助を賜つたバツテル研究所の Mr. EIBER、住友金属工業(株)前専務取締役原田芳氏、及び住友金属工業(株)第二技術開発部長三瀬真作氏、中央研究所長池島俊雄氏及び和歌山製鉄所副所長山崎善雄氏ほか多数の関係者、協力者に深く感謝の意を表したく思います。

文 献

- 1) R. B. SMITH and R. J. EIBER: 4th Symposium on Line Pipe Research, (1969), p. D-18
- 2) W. A. MAXEY, J. F. KIEFNER, R. J. EIBER, and A. R. DUFFY: IGU Conference in Nice (1973).
- 3) W. A. MAXEY, J. F. KIEFNER, R. J. EIBER, and A. R. DUFFY: 5th National Symposium on Fracture Mechanics (1971).
- 4) W. A. MAXEY, R. J. PODLASEK, R. J. EIBER, and A. R. DUFFY: Symposium on crack propagation in pipelines at Newcastle upon Tyne (1974)
- 5) E. MIYOSHI, M. FUKUDA, H. IWANAGA, and T. OKAZAWA: Symposium on crack propagation in pipelines at Newcastle upon Type (1974)