

討28 ラインパイプの高速延性破壊と材料の破壊吸収エネルギーの関係についての考察

住友金属工業(株)中央技術研究所 川口喜昭 ○塚本雅敏

1. 緒言

ガス輸送用ラインパイプの高速延性破壊に対する材料の抵抗は、シャルピー試験をはじめ各種試験の破壊吸収エネルギーで評価される。これは材料を相対的に評価するための実用上の便法であるが、一方では実管の高速延性破壊をエネルギーバランスによって解明しようとする場合<sup>1)2)</sup>、材料の抵抗をエネルギーで評価することは、もっとも単純かつ直接的な手法となり得るものである。しかし材料の破壊吸収エネルギーは、試験片の板厚、形状、応力状態(曲げか引張か)、破壊速度などにきわめて敏感であり、力学的諸条件から独立した材料定数として成立させることがかなり困難である。本報は、ラインパイプの高速延性破壊に対する材料の抵抗を破壊吸収エネルギーで定量的に評価するための問題点を明らかにしようとするものである。

2. 部分ガスバースト試験における破壊吸収エネルギー

ラインパイプの実管での破壊吸収エネルギーを求める方法の一つは、部分ガスバースト試験である<sup>3)</sup>。

図-1に部分ガスバースト試験を模式的に示す。5~15%のガスで実管をバーストさせ、亀裂長さCで停止すると、Cに応じて停止直前の亀裂先端のガス圧P<sub>f</sub>を推定し、また亀裂開口角2βを測定することによって材料の破壊吸収エネルギーE<sub>f</sub>を次式によって求める。

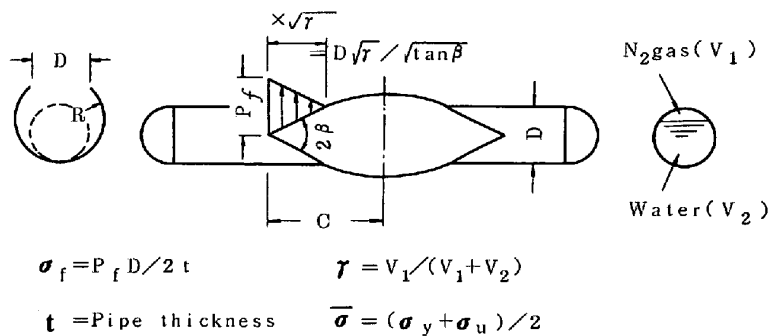


図-1 部分ガスバースト試験の諸元

$$E_f = \frac{1}{2} P_f D^2 \sqrt{\gamma} \sqrt{\tan \beta} - \frac{1}{2} \pi \bar{\sigma} t^2 \left(1 - \frac{D}{2R}\right) \dots\dots\dots (1)$$

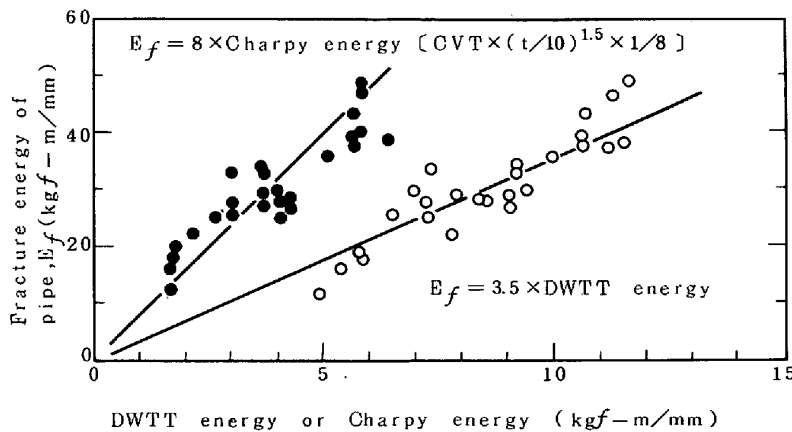


図-2 E<sub>f</sub>とDWTTおよびシャルピーエネルギーの比較

式(1)の第1項はガスが管壁に供給するエネルギー、第2項は管が口を開いたために費される管壁の変形エネルギーである。

このようにして得られた破壊吸収エネルギーE<sub>f</sub>を、DWTTエネルギー、シャルピー吸収エネルギーと比較して図-2に示す。E<sub>f</sub>は10~50 kgf-m/mmの範囲であ

り、板厚をそのまま用いる DWT T エネルギーのほぼ 3.5 倍に及ぶ。シャルピー吸収エネルギーは、 $E_f$  および DWT T エネルギーが板厚をそのまま用いるのに対し、10 mm 厚であるので元の板厚に換算して比較した。吸収エネルギーは板厚の 1.5 乗に比例するという実験式<sup>4)</sup>を用いて比較すると、 $E_f$  はシャルピー吸収エネルギーのほぼ 8 倍に達する。破壊吸収エネルギーの絶対値のこの差は、単純なサイズ効果としてはあまりにも大きく、その原因を明らかにする必要がある。

### 3. 静的曲げ引張試験における破壊吸収エネルギー

破壊吸収エネルギーが応力状態（曲げないしは引張）にどの程度支配されるかを明らかにするために、引張試験機によって曲げと引張とを重畳させた静的破壊試験を実施した。その方法を図-3 に示す。曲げと引張を重畳させるための治具は、荷重点から 500 mm 離れた点で回転し、溶接された試験片に偏心距離  $e$  に応じて曲げと引張とを与える。この方法の特徴は、試験片巾  $W$  の全断面にわたって引張応力しか作用しないことであって、実際のラインパイプの破壊において円周応力が圧縮応力として働くことは考えにくいことを反映させたことである。試験片巾  $W$  は 100 mm、

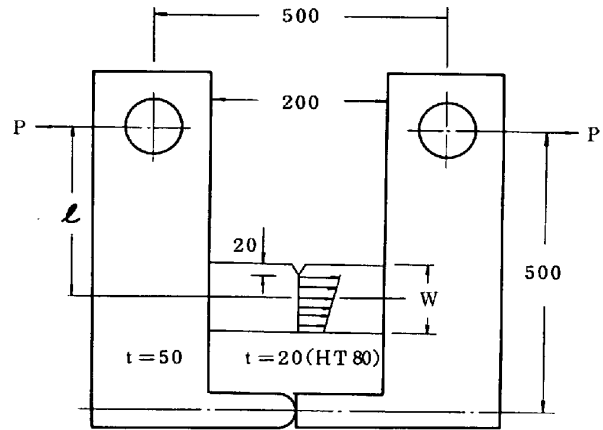


図-3 静的曲げ引張試験の方法

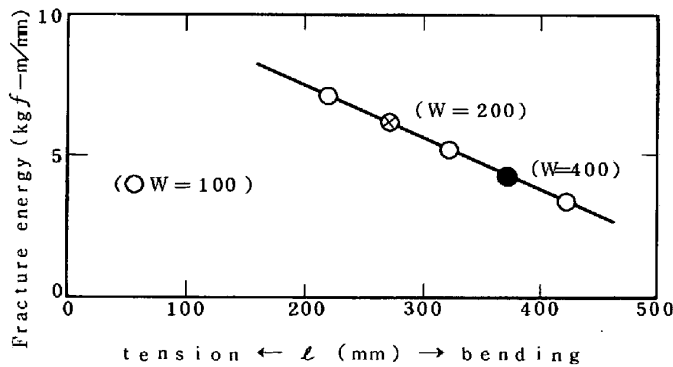


図-4 静的曲げ引張試験の結果

200 mm および 400 mm、偏心距離  $e$  は 225 mm から 425 mm まで変化させ、破壊までの荷重-変位曲線の面積から破壊吸収エネルギーを求めた。その結果を図-4 に示す。破面の単位亀裂長さあたりの破壊吸収エネルギーは、3.4 kgf-m/mm から 7.1 kgf-m/mm まで変化する。偏心距離  $e$  が短くなるにつれて、すなわち曲げの応力状態から引張の応力状態に近づくにつれて、破壊吸収エネルギーは順次増大していく。したがって、実際のラインパイプの部分ガス

バースト試験結果から得られる破壊吸収エネルギーが、DWT T エネルギーの約 3.5 倍、シャルピー吸収エネルギーの約 8 倍もの大きな値となる有力な原因の一つは、実際のラインパイプの破壊における亀裂先端近傍の応力状態が、純曲げ状態で、なおかつ有限の試験片巾できわめて厳しい曲げ応力状態で破壊する DWT T 試験やシャルピー試験とは異なり、ほとんど引張状態に近いことであることが推察されよう。

純曲げ状態における破壊吸収エネルギーが、曲げの厳しさによって変化することは、動的な試験によっても確認されている。図-5 に DWT T 試験の破壊吸収エネルギーに対する試験巾の影響<sup>4)</sup>を示す。標準の試験片巾（切欠を除いた断面長さ 71.1 mm）を減少させてその衝撃破壊吸収エネルギーを破面

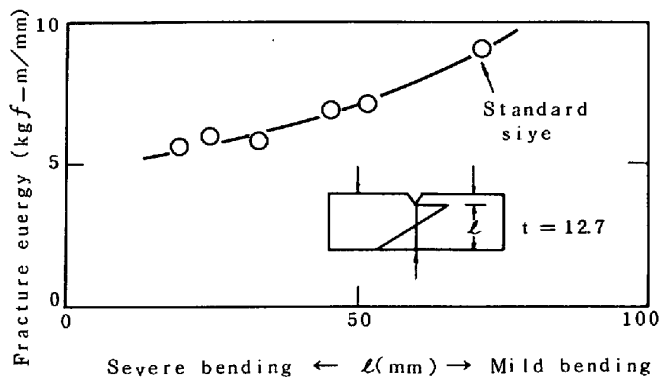


図-5 DWT Tエネルギーの試験片巾による変化<sup>4)</sup>

単位長さあたりで表示すると、その破壊吸収エネルギーは次第に低下してゆく。このことから、DWT Tエネルギーとシャルピー吸収エネルギーとの差は、試験片巾の差に起因する曲げの厳しさの差によることが明らかとなる。しかし、 $E_f$ との差は、純曲げ試験においては破壊に先立って生じる圧縮変形のエネルギーも含まれていることもあって、単なる曲げ応力状態の厳しさの差とみることはできないと考えられる。

#### 4. 静的広巾引張試験における破壊吸収エネルギー

ラインパイプの高速延性破壊における破壊吸収エネルギーは、高速で伝播する延性破壊が亀裂先端にかなり大きな塑性変形を生じさせながら破断に至る過程の単位長さあたりのエネルギーである。したがって本来は、亀裂の進展を測定しながら、単位亀裂長さあたりの破壊吸収エネルギーを求めなければならない。高速で伝播する延性亀裂を再現し、かつその時々刻々のエネルギーを測定することは困難であるので、静的な広巾引張試験で測定することを試みた。試験方法を図-6に示す。1 m巾のディープノッチ試験片を静的に引張りながら、400 mmの切欠から進展する延性亀裂長さを、試験機の荷重を除荷しながら繰返し測定する。

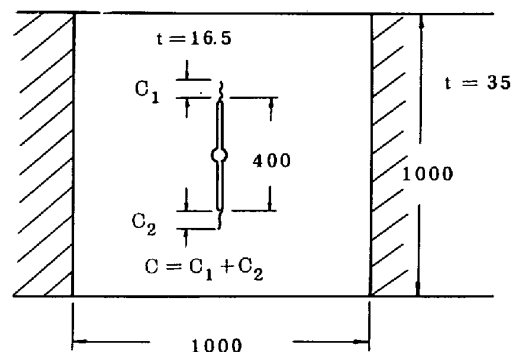


図-6 静的広巾引張試験の方法

試験結果の一例を図-7に示す。試験片は最高荷重に到達後、ゆっくりと亀裂が進展しはじめる。その時点で除荷し、両側の亀裂進展長さ  $C = C_1 + C_2$  を測定する。

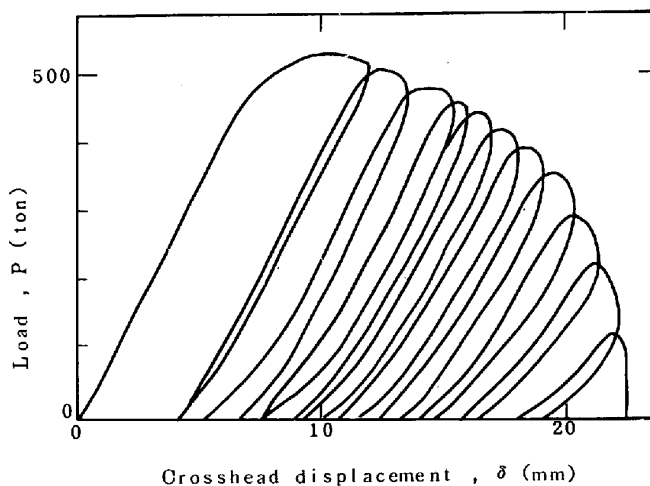


図-7 静的広巾引張試験の荷重-変位曲線

再び負荷し、繰返す。荷重-変位曲線の面積から塑性分の破壊吸収エネルギーを計算し、亀裂長さ  $C$  との関係を求める。

試験結果を図-8に示す。試験片は亀裂を発生する以前にすでに1600 kgf-m程度のエネルギーを吸収している。これは全断面降伏までの塑性変形エネルギーである。ついで亀裂が進展しはじめると、ほぼ直線的に吸収エネルギーは増加する。しかし、亀裂の進展が試験片端に近づくとき、エネルギーの増加はやがて頭打ちの傾向を示すようになる。これは、亀裂先端に生じる塑性歪の集中域が試験片巾の端に到達したことを意味すると考

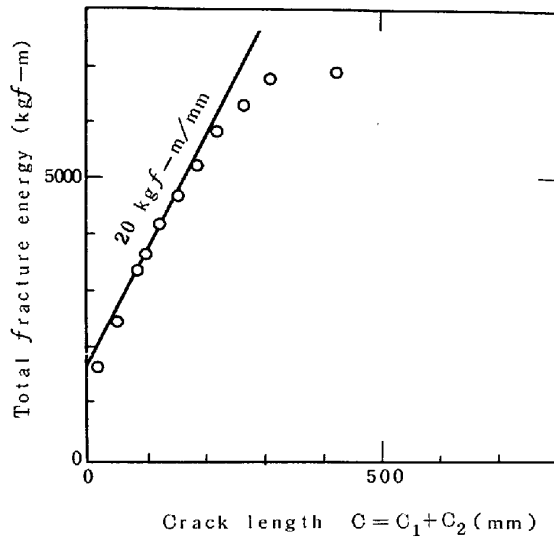


図-8 静的広巾引張試験の破壊吸収エネルギー

えられる。したがってラインパイプの破壊吸収エネルギーに対応するのは直線部分であるが、図-8から明らかのように、その部分の勾配は、ほぼ20 kgf-m/mmという高い値となる。ここで用いた材料は、部分ガスバースト試験で用いたラインパイプ材と同種のものであるが、この値は図-2に示した $E_f$ の値10~50 kgf-mの範囲にあり、 $E_f$ が非現実的な値ではないことを示している。当然ながら、現実のラインパイプの高速延性破壊は動的な現象であり、ここで示した静的な引張試験における値がそのまま採用できるものではない。しかしながら応力状態に関してはかなり近いはずであり、なんらかの方法で動的効果を組入れることによって、この方法は有効な方法になると考えられる。

### 5. 結 言

ラインパイプの高速延性破壊の現象を解明するために、力学的側面と並んで欠くことのできない材質的側面に関して、材料の破壊吸収エネルギーの観点から、必ずしも系統的でない若干の実験結果から考察を行なった。ここで欠落している重要な観点は、破壊吸収エネルギーに対する破断速度の影響であり、今後のこの点に関する研究とあわせて、本報で述べた広い意味での破壊吸収エネルギーに対するサイズ効果が解明されるならば、ラインパイプの高速延性破壊の現象は単純かつ実用的な解明がなされ、材料の進歩にとってもきわめて有用な寄与がなされるものと期待される。

### 引 用 文 献

- 1) W.A.Poynton: Symposium on Crack Propagation in Pipelines, Inst.Gas Engineers, London, (1974), PAPER 14,
- 2) 福田実: 圧力技術, 15(1977)5, P.225.
- 3) 川口喜昭, 塚本雅敏, 住友芳夫, 竹内泉, 山下昭, 奈良好啓: 鉄と鋼投稿中
- 4) 野寄徳彦, 別所清, 住友芳夫, 竹内泉, 山下昭: 住友金属, 33(1981)1, P.28.