

高圧ガスパイプライン用鋼管の高速延性き裂伝播抵抗の計測法開発と
き裂速度依存性に関する考察

Measuring Method of Fast Ductile Fracture Resistance of Steel for High Pressure Gas Pipeline
and Its Dependence on Crack Velocity

学籍番号 60772 今井 康仁
指導教員 粟飯原周二

(平成 20 年 2 月 5 日提出)

Keywords: 延性破壊, J-R 曲線, J 積分, 非線形破壊力学, き裂速度, ガスパイプライン,

1. 緒言

世界が深刻な環境・エネルギー問題に直面する中, 水素社会の実現とエネルギーの安定供給の必要性から, 北東アジア域の域内ガスパイプラインネットワークの構築が提唱されている. 係る技術的問題として高速延性破壊現象に着目し, き裂伝播評価に必要な, 伝播抵抗の評価を行う. またき裂伝播速度と抵抗値の関係について検証する.

2. 抵抗曲線算定式の検討

2.1 理論

大規模降伏状態での抵抗値は J 積分を扱う. J 積分の推移をき裂進展量に対して描いた抵抗曲線を J-R 曲線という.

2.2 J 積分算定式の導出

Garwood[1]は, 切欠付曲げ試験について, き裂成長時の荷重変位曲線下のエネルギーを考え, そこにき裂成長を考慮しない J 積分算定式を適用することで, 次のき裂成長を考慮した J 積分算定式を導出した.

$$J_n = J_{n-1} \frac{W - a_n}{W - a_{n-1}} + \frac{2U_4}{B(W - a_{n-1})} \quad (1)$$

この度これを連続的にみなし J 積分を導く微分方程式を求めた.

$$\frac{dJ}{d\Delta} = -\frac{J}{W - a} \frac{da}{d\Delta} + \frac{2P}{B(W - a)} \quad (2)$$

また, この方法を応用し新たに切欠付引張試験のき裂成長を考慮した J 積分算定式を導出した. き裂進展を考慮しない切欠付引張試験の算定式を同様に適用し, 片側切欠付引張試験の J 積分を導く微分方程式を求めた.

$$\frac{dJ}{d\Delta} = -\frac{J}{W - a} \frac{da}{d\Delta} + \frac{P - (\Delta dP/d\Delta)}{B(W - a)} \quad (3)$$

P を P/2 とすれば両側切欠・中央切欠の引張試験片にも適用できる. 式(2), (3)の算定法を使えば, 荷重変位曲線とき裂長さ・荷重点変位曲線から J-R 曲線を算定できる.

3. 実験

3.1 実験概要

供試材は電縫鋼管(API X65mod.)を平板に加工したものである. 供試材の機械的特性を調べるた

めに常温引張試験とシャルピー衝撃試験とマイクロ組織観察, 低温時の材料特性値から R パラメータ(歪速度温度効果指数)を求めるための低温引張試験, J-R 曲線を描くための静的切欠付引張試験と静的 3 点曲げ試験と動的 3 点曲げ試験(落重試験)を行った. またさらに高速にき裂が伝播する場合の破面の様子を調べるため, 本研究室がノルウェーで行ったバーストテストの試験体を返送し, 本研究に用いた.

3.2 実験結果

引張試験から降伏応力の歪速度依存性が明らかになったほか, 各々の J-R 曲線が得られた. 3 点曲げ試験の J-R 曲線はき裂の安定成長域で概ねプラトーに達することが認められたため, 破壊抵抗値として J プラトー値を採用した. プラトーが出ない結果については該当領域で平均的な値を採用した. 鋼管のバーストの破壊機構は引張なのに抵抗値を曲げ試験の結果から求めることになるが, 引張より曲げの方が J 積分が小さいので安全側に評価していることとなる.

4. 数値計算

より高速にき裂が伝播する際のき裂前方の歪分布を調べるため, HRR の応力場[2]を用いて, き裂伝播速度と J 積分を与えて歪分布を返す数値計算を行った. HRR の応力場はき裂先端で発散するので, き裂前方に特性距離だけ離れた所ま

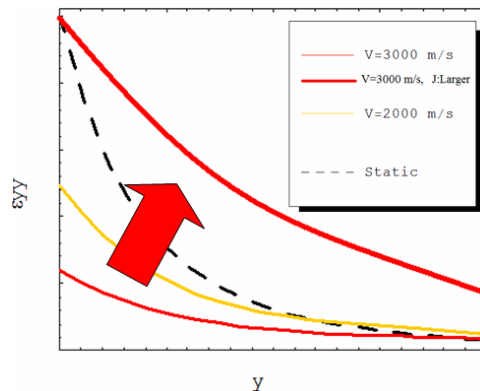


Fig. 1 Crack velocity dependence of plastic deformation.

Table. 1 Crack velocity, J-plateau and J_e for each test .

Test	Crack velocity (m/s)	J-plateau (MPa*m)	J_e (MPa*m)
DW No.4	0.70	2.5±0.3	0.45
DW No.1	3.0	2.5	1.1
DW No.2	4.2	2.1±0.1	0.30
PL No.1	150		18
PL No.2	120		15

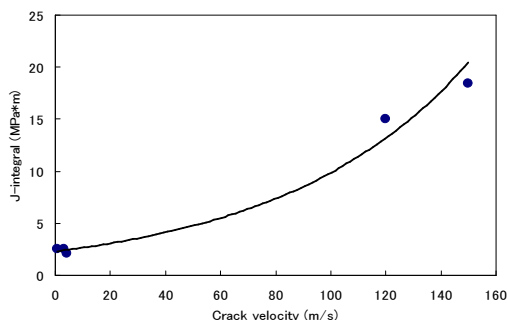


Fig. 2 Crack velocity dependence of J-integral.

で計算領域である。その結果、一定の J 積分のもとでき裂速度を大きくすると塑性変形が小さくなり、一定のき裂速度のもとで J 積分を大きくすると塑性変形が大きくなることが分かった。

5. 考察

5.1 き裂速度と抵抗値・板厚収縮の関係

静的・動的 3 点曲げ試験のき裂速度の範囲では抵抗値との間に明確な相関は見られなかったが、吸収エネルギーとの間には正の相関があった。

数値計算の結果において同じ J 積分のもとでき裂速度が大きいほど塑性変形が小さくなるのは、塑性波の速度が降伏後の接線剛性と密度で決定されき裂速度に依存しないため、き裂速度が大きくても塑性波速度が大きくなり、結果的に塑性波が広く伝達されないからと考えられる。

5.2 板厚収縮と吸収エネルギー

き裂前方を x 、板平面においてこれに直交する方向を y 、板厚方向を z と規定する。動的試験について、き裂近傍の板厚収縮に費やされた歪エネルギーを計算するため、試験片の破面をつき合わせて樹脂に埋め込み研磨して y 方向の板厚分布を測定した。その結果、落重試験よりバーストテストの方が歪が大きく広範囲に分布することが分かった。板厚の歪を y 方向に換算したのも同様である。

数値計算の結果について同じ J 積分のもとでき裂速度が大きいほど塑性変形が小さくなるのだが、実際の破断を考えると、Fig.1 のように $y=0$ で限界歪になるよう歪分布は上方に移動し J

積分は大きくなる。またこのように移動した数値計算の歪分布は先述の板厚計測から求めた結果と対応する。

続いて板厚計測結果を y 方向に換算した歪分布から、引張試験から求めた真応力-真歪線図について積分して歪エネルギー密度を求めた。このとき動的破壊を考慮して、その歪速度での降伏応力となるよう線図全体が比例的に上昇すると仮定した。この降伏応力は先述の R パラメータを用いて求めた。そしてこれを y 方向に積分して塑性変形エネルギー J_e を求めた。このエネルギーはき裂進展に伴う単位破断面積あたりの吸収エネルギーで単位が (MPa*m) で J 積分と同じであることから、J 積分に相当する値であるといえる。

ところが Table.1 に示すように落重試験の J プラトー値と J_e の値はかけ離れている。しかし落重試験の塑性変形は破面近傍に局在化しており計測結果の誤差が大きいと考えられるため、J 積分として落重試験では J プラトー値を、バーストテストでは J_e を採用してする。これとき裂速度から、Fig.2 の J 積分のき裂速度依存性のグラフが描画できる。加えて、き裂速度の上限は塑性波のレイレー波の速度である。降伏後の接線剛性と密度で決定され、計算すると 256 m/s となる。

5.3 き裂速度依存性と破面形状

SEM を用いて破面形状を観察した。静的試験の破面は M 字型をしているのに対し、動的試験のものは 45°破面をしている。静的では曲げより引張の方がよく絞られていたり、ディンプルが大きいことが、J 積分が大きいことに対応している。また静的と動的の比較すると、き裂速度が大きいほどディンプルが細かくなっている。これは高いき裂速度の落重試験の J プラトー値が小さく出ていることに対応している。

6. 結言

1. 延性き裂伝播抵抗の算定法を開発した。荷重変位曲線とき裂長さ-荷重点変位グラフが与えられれば、J-R 曲線を描画できる。
2. 各試験を通して J プラトー値が抵抗値として採用できることを確認した。
3. J 積分が一定でき裂進展速度が大きくなると塑性変形が小さくなるが、破断歪を考慮すると、き裂速度が大きいほど J 積分が大きくなり、歪は広範囲に分布することを示した。
4. 板厚収縮の歪から求めた塑性変形エネルギーを J 積分に相当するものとみなすことで、J 積分のき裂進展速度依存性を示した。

参考文献

- [1] S.J.Garwood, "Effect of Specimen Geometry on Crack Growth Resistance" ASTM STP 677, 1979, pp511-532.
- [2] T.L.Anderson, "FRACTURE MECHANICS Third Edition", (CRC, 2005).