実用講座

パイプラインにおける 高速延性破壊の伝播停止評価法*

牧 野 寛 之**

Evaluating Methods of the Propagating Shear Fracture in Natural Gas Pipeline*

by MAKINO Hiroyuki**

キーワード

天然ガス輸送用パイプライン、高速延性破壊、き裂伝播速度曲線、ガス減圧曲線、き裂伝播シミュレーション

1. はじめに

天然ガス輸送用のパイプライン（以下 PL）には、直径が約 600～1400 mm の大径鋼管が使用される。また幹線の PL では、内圧による円周方向応力が降伏応力の 60% を超える高圧のガスが輸送される場合があるため、圧縮性流体により鋼管内に蓄積されるエネルギーは非常に高いものとなる。このような高圧・大径のガス PL においては、延性破壊でありながら、き裂が約 70 m/sec～350 m/sec の高速で、時として長距離伝播する、いわゆる高速延性破壊の存在が知られている。

ガス PL の高速延性破壊現象が、初めて知られるようになったのは比較的最近のことであり、1960 年代になってからである。それまでは、PL の大規模破壊は脆性破壊に限られ、破面が 100% 延性の場合には、たとえき裂が発生しても、短い距離で伝播停止するものと考えられていた。PL における脆性破壊の事故例報告に刺激され、1950 年代に開始された研究成果は、鋼材の延性・脆性遷移挙動と、各種冶金学的パラメータとの関係というかたちで、広く知られることになった。一方、高速延性破壊現象には、破壊した鋼管からのガス流出挙動と、き裂伝播挙動との相互作用という、より複雑な現象の理解が要求されることとなった。

ガス PL における安全を維持するためには、①機械的損傷・鋼管腐食・地震による地盤変動等に起因する破壊発生原因を予防する、あるいはこれらに対する対策を施す、き裂発生抑制と、②不測の事態における伝播き裂の発生時においても、大規模破壊にならないよう設計をおこなう、き裂伝播の制御が重要である。高速延性破壊の研

究は、上記②の観点から、その現象の解明を目指すものである。

本稿では、天然ガス輸送用 PL における高速延性破壊現象について紹介し、その解明に向けて実施された研究成果である、高速延性破壊き裂伝播停止挙動の評価方法について解説することで実用講座としたい。

2. パイプラインにおける高速延性破壊

図 1 に、PL における高速延性破壊の模式図を示す。PL が破壊すると、鋼管の破壊端より内部ガスが流出する。この時、未破壊部へ向かっては、延性き裂と、ガス減圧波とが同一方向に進展していくこととなる。ある瞬間におけるき裂先端の局所的な減圧波の進行速度が、き裂伝播速度より早ければ、き裂は減速する。逆に、ある瞬間におけるき裂伝播速度の方が、き裂先端の局所的な減圧波の進行速度より早ければ、き裂は加速することとなる。

PL における高速延性破壊の、実物大の破壊試験をフルスケールバースト試験と言う。フルスケールバースト試験では、実際の PL での破壊状況を模擬するため、両端を閉じた長さ 150 m～300 m の実管を土中に埋設し、所定圧力に上昇するまでガスで加圧した後、火薬カッター等により、伝播き裂を発生させる。フルスケールバースト試

図 1 パイプラインにおける高速延性破壊の模式図

*原稿受付 平成18年 12月25日

** 住友金属工業(株)総合技術研究所 Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries Ltd.,

図2 フルスケールバースト試験結果例

試験結果の一例を図2に示す。土中埋設の深さは約1mであるが、破壊時に流出するガスで、鋼管上部の土が吹き飛ばされているのがわかる。本破壊現象において、き裂は管軸方向を直進し、停止直前に管周方向へ伝播方向をかえて停止する。また大規模塑性変形の影響で、長くなったき裂縁が、サインカーブ状に折りたたまれる様な破面を形成しているのが特徴的である。

3. 高速延性破壊現象の評価

PLにおける高速延性破壊現象の評価には、図3中に示すような二本の曲線を用いる。ここで、き裂伝播速度曲線とは、き裂先端圧力とき裂伝播速度との関係を表す曲線であり、ガス減圧曲線とは、破壊時における管内圧力と、その圧力レベルにおけるガス減圧波進行速度との関係を表す曲線である。

輸送するガスの成分、ガスの温度、輸送圧力、鋼管寸法、鋼管強度、鋼管靱性値等の設計要素が与えられた場合、後述する方法で、これら二曲線を推定することが可能である。ある設計条件下において推定された、これら二曲線が十分に離れている場合は、破壊過程における全圧力レベルにおいて、き裂伝播速度がガス減圧波の進行速度より遅いことを意味しており、き裂先端圧力はすみやかに低下し、比較的短距離で伝播停止にいたると解釈できる。逆にき裂伝播速度曲線とガス減圧曲線とが、接するまたは交差する場合、き裂伝播速度とガス減圧波の進行速度が等しいある圧力レベルが、少なくとも一つ存在することを意味しており、なんらかの外乱がない限り、この圧力レベルで平衡を保ちながら、き裂がどこまでも伝播し続けると解釈できる。従って、高速延性破壊における伝播停止挙動の正確な評価は、これら二曲線の推定精度にかかっていると言える。

4. き裂伝播速度曲線

当該破壊現象に対する材料側の抵抗が、工学的にとり扱いやすいシャルピー吸収エネルギーから計算可能な、

図3 高速延性破壊現象の評価図例
(き裂伝播速度曲線とガス減圧曲線との関係)

き裂先端圧力とき裂伝播速度との関係を表した推定式は、米国 Battelle 研究所と日本鉄鋼協会 HLP 委員会より提案されている。米国 Battelle 研究所では、管径 762 mm × 肉厚 9.5 mm で実施したフルスケールバースト試験結果をもとに、下記 (1) 式のき裂伝播速度式を提案している¹⁾。ここで V_c はき裂伝播速度 (m/sec)、 σ_{flow} は材料のフローストレス (MPa)、 σ_y は材料の降伏応力 (MPa)、 R は材料抵抗 (Joules/mm²)、 P_a はき裂先端圧力 (MPa)、 P_d はき裂伝播停止圧力 (MPa)、 t は肉厚 (mm)、 D は管径 (mm)、 E は鋼材の弾性係数 (MPa)、 C_v はフルサイズシャルピーエネルギー (Joules)、 A_c はフルサイズシャルピー試験片のリガメント面積 (mm²) である。

$$V_c = 0.275 \times \frac{\sigma_{flow}}{\sqrt{R}} \times \left(\frac{P_d}{P_a} - 1 \right)^{1/6} \quad (1)$$

$$P_a = \frac{4}{3.33 \times \pi} \times \frac{t}{D} \times \sigma_{flow} \times \cos^{-1} \exp \left(\frac{-10^3 \times \pi \times E \times R}{24 \times \sqrt{Dt} / 2 \times \sigma_{flow}^2} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{flow} = \sigma_y + 68.95 \quad (3)$$

$$R = C_v / A_c \quad (4)$$

一方、日本鉄鋼協会 HLP 委員会では、管径 1219 mm × 肉厚 18.3 mm で実施したフルスケールバースト試験結果をもとに、下記 (5) 式のき裂伝播速度式を提案している²⁾。ここで、 σ_T は材料の引張り強度 (MPa)、 D_p はプレクラック DWTT エネルギー (Joules)、 A_p はプレクラック DWTT 試験片のリガメント面積 (mm²) である。

$$V_c = 0.670 \times \frac{\sigma_{flow}}{\sqrt{R}} \times \left(\frac{P_d}{P_a} - 1 \right)^{0.393} \quad (5)$$

$$P_a = 0.382 \times \frac{t}{D} \times \sigma_{flow} \times \cos^{-1} \exp \left(\frac{-3.81 \times 10^7 \times R}{\sqrt{Dt} \times \sigma_{flow}^2} \right) \quad (6)$$

$$\sigma_{flow} = (\sigma_y + \sigma_T) / 2 \quad (7)$$

$$R = D_p / A_p \quad (8)$$

$$D_p = 3.29 \times t^{1.5} \times C_v^{0.544} \quad (9)$$

上記 Battelle 式、HLP 式ともに、もとにする実験データに近い設計条件下では、精度よい推定を与える。より広範囲への適用に関しては、Battelle 式では高靱性鋼管（シャルピーエネルギー＞100J）の材料抵抗を過大評価する傾向にあり、HLP 式では小径鋼管のき裂伝播速度を過大評価する傾向にある事が指摘されている。

5. ガス減圧曲線

半無限長の鋼管の端部を開放した時、減圧波の先端は音速で鋼管中を移動する。しかし初期圧力の 1/2 レベルの移動速度はそれよりずっと遅れ、管端では初期圧力の約 1/3 が保たれる。理想気体かつ完全断熱変化を仮定した場合の理論解は、次のガス減圧曲線を与える。ここで P_0 は初期圧力、 V_a はガス中における音速、 γ は比熱比である。

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{2 + (\gamma - 1)V / V_a}{\gamma + 1} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} \quad (10)$$

輸送ガス成分が純メタンに近く、かつ輸送圧力が比較的低圧（＜約 10MPa）である場合は、(10) 式でガス減圧曲線を推定することが可能である。しかしながら、輸送ガス成分が純メタン以外の重い成分を多く含む場合は、破壊過程における断熱膨張により、内部ガスが気液二相領域に突入することが原因となり、また輸送圧力が高い場合は、理想気体の仮定から大きくずれることが原因となって、(10) 式の推定精度は悪くなる。

より正確にガス減圧曲線を計算するためには、下記の (11)～(13) 式を解く必要がある。ここで、 $|s|$ は計算過程が等エントロピー変化に沿うものである事を示し、 P は減圧するガスの圧力レベル、 a は音速、 ρ は流体密度、 u は流速、 w は減圧波の進行速度を表す。

$$a^2 = \frac{dP}{d\rho}|_s \quad (11)$$

$$\frac{du}{dP} = \frac{1}{\rho a} \quad (12)$$

$$w = a - u \quad (13)$$

実際の数値計算には、初期条件を $P = P_0$ （破壊開始圧力）で $a = a_0$ 、 $u = 0$ とおき、 P_n 、 ρ_n と P_{n+1} 、 ρ_{n+1} ($P_n > P_{n+1}$) を、初期条件からの等エントロピーラインに沿う連続した点にとる事で、以下の差分式が使用できる。

$$(a_{n+1})^2 = \frac{P_n - P_{n+1}}{\rho_n - \rho_{n+1}} \quad (14)$$

$$u_{n+1} = u_n + \frac{1}{2} \times \frac{P_n - P_{n+1}}{a_{n+1}} \times \left(\frac{1}{\rho_n} + \frac{1}{\rho_{n+1}} \right) \quad (15)$$

$$w = a_{n+1} - u_{n+1} \quad (16)$$

(14)～(16) 式の適用にあたっては、等エントロピーラインに沿ったガスの物性値を、精度よく推定する必要がある。例えば、炭化水素系におけるガス物性値の高精度推定式として有名な、以下に示す BWRS 状態方程式などが使用される。本式において、 p は圧力、 ρ_{mol} はモル密度、 R_G はガス定数、 T は絶対温度である。また A_0 、 B_0 、 C_0 、 D_0 、 E_0 、 a 、 γ 、 a_0 、 b_0 、 c_0 、 d_0 は物質定数である。

$$p = \rho_{mol} R_G T + \left(B_0 R_G T - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4} \right) \rho_{mol}^2 + \left(b_0 R_G T - a_0 - \frac{d_0}{T} \right) \rho_{mol}^3 + \alpha \left(a_0 + \frac{d_0}{T} \right) \rho_{mol}^6 + \frac{c_0 \rho_{mol}^3}{T^2} \left(1 + \gamma \rho_{mol}^2 \right) \exp(-\gamma \rho_{mol}^2) \quad (17)$$

6. 高速延性破壊の伝播停止評価法

き裂伝播速度曲線とガス減圧曲線より、高速延性破壊の伝播停止を評価する方法として最初に提案されたのが、Battelle 研究所による "Go or NoGo Criteria" である³⁾。輸送するガスの成分、ガスの温度、輸送圧力が与えられると、ガス減圧曲線是一本に定まるが、鋼管の寸法と強度が与えられても、き裂伝播速度曲線は鋼管靱性値により図 4 に示すように変化する。そこで本手法では、設計条件下において、ガス減圧曲線と接するき裂伝播速度曲線を与える鋼管靱性値を、鋼管必要靱性値とし、それを超える靱性値ではき裂は比較的短距離で伝播停止し、靱性値がそれ以下であればき裂は伝播し続けると評価する。また Battelle 研究所では、各種設計条件下における、図 4 に示す伝播停止評価法での計算結果（但し輸送ガスは純メタ

図 4 Battelle研究所の "Go or NoGo Criteria" 概念図

図5 HLP委員会のき裂伝播シミュレーション概念図

図6 HLP手法によるき裂伝播シミュレーション結果例 (CSM/ILVA-X80フルスケールバースト試験結果との比較)

ンを仮定)を統計処理することで、下記 (18) 式に示す鋼管必要靱性値の簡便な推定式を与えている。ここで、 σ は周方向応力 (MPa) である。

$$C_v = 3.573 \times 10^{-5} \sigma^2 (Dt/2)^{1/3} \tag{18}$$

一方 HLP 委員会では、両曲線を用いた、き裂伝播シミュレーション手法を開発し、き裂伝播距離に基づく、伝播停止性能評価方法を提案している²⁾。シミュレーションの概念図を図5に示す。本手法では、①き裂先端圧力の情報から、き裂伝播速度曲線を利用して微小時間内のき裂伝播をシミュレートし、②き裂伝播距離の情報から、ガス減圧曲線を利用してき裂先端圧力を更新する。③更新されたき裂先端圧力が、き裂伝播停止圧力を下まわっていれば伝播停止と判断し、それ以外は①に戻る繰り返し計算を、充分小さな時間ステップで実施する。

本手法によるき裂伝播シミュレーションの結果例を、フルスケールバースト試験結果との比較で図6に示す。なお本手法では、き裂伝播シミュレーションの初期値として、初期き裂長さ $L_0 = D$ 、初期き裂長さに達するまでの時間 $T_0 = D/Va$ とすることで、き裂後方がまだ完全には開ききらずに、効果的にガスが抜け出せない初期状態の影響を考慮している。ここで D は管径、 Va はガス中に

表1 パイプラインにおける大規模破壊を防止する為の、鋼管必要靱性値を上昇させる要因

因子	影響の大きさ	特徴と方向性
周方向応力	◎	鋼管強度が一定で設計係数（設計条件下における周方向応力／材料の降伏応力）が上昇する場合と、設計係数が一定で鋼管強度が上昇する場合の双方ともに、鋼管必要靱性値を大きく上昇させる。
管径・肉厚	○	過去の知見によれば、大径化・厚肉化ともに鋼管必要靱性値を増加させる傾向にある。特に管径は、き裂後方の管壁を押し広げる力に影響を及ぼしていると言われる。
輸送ガス成分	◎	メタン以外の重い成分を比較的多く含む場合、僅かな重成分の増加が、ガス減圧曲線の形を大きく変え、鋼管必要靱性値を大きく上昇させる事が知られている。

における音速である。任意の許容き裂伝播長さに対する鋼管必要靱性値を計算可能なところが、本手法の特徴である。

7. おわりに

本稿では、天然ガス輸送用 PL における高速延性破壊現象について紹介し、高速延性破壊き裂伝播停止挙動の評価方法について解説した。図4または図5に示す評価手法の概念は、さほど複雑なものではないが、PL の設計条件によっては、き裂伝播速度曲線やガス減圧曲線の高精度推定に、困難を伴うケースも多い。この点については、本研究分野における、今後のさらなる発展に期待したい。最後に、PL における大規模破壊を防止する為の、鋼管必要靱性値を上昇させる要因について、表1にまとめることで、本講座の締めくくりとしたい。

本研究分野について、より詳しい内容の理解を望まれる方は、例えば以下の文献等を参考にしていきたい。

参 考 文 献

1) R.J. Eiber, T.A. Bubenik and W.A. Maxey, "Final Report on Fracture Control Technology for Natural Gas Pipelines", BATTELLE, Columbus, (1993).
2) H. Makino, T. Kubo, T. Shiwaku, S. Endo, T. Inoue, Y. Kawaguchi, Y. Matsumoto and S. Machida: "Prediction for Crack Propagation and Arrest of Shear Fracture in Ultra-high Pressure Natural Gas Pipelines", ISIJ International, 41 (2001), pp.381-388.
3) A.B. Rothwell, "Fracture Propagation Control for Gas Pipelines - Past, Present and Future", 3rd International Pipeline Technology, Volume I, Belgium, (2000), pp.387-405.