

平成 19 年度卒業論文要旨

(東京大学工学部 システム創成学科 環境・エネルギー・システムコース)

ガス減圧と動的破壊現象を連成した高圧ガスピープライン

高速延性き裂伝播シミュレーションモデルの開発

Development of Simulation Model for Ductile Crack Propagation in High-Pressure Gas Pipelines Coupling Gas-Decompression and Dynamic Fracture

学籍番号 60807 三澤 慧
指導教員 粟飯原周二

(平成 20 年 2 月 5 日提出)

Keywords: パイプライン, 延性破壊, 減圧曲線, 連成モデル, 破壊力学

1. 序論

地球温暖化緩和のためエネルギー資源を従来の石炭および石油から、それより二酸化炭素の排出が少ない天然ガスや、将来的には二酸化炭素を排出しない水素ガスに移行することが提案されている。これら気体エネルギー資源の大規模輸送にはパイプラインが最も経済的である[1]が、水素ガスピープラインの安全性設計基準は未確定である。一般にパイプラインの安全性として、破損しない上に万が一き裂が生じた時も即座に停止することが求められている。だが既存の安全性評価手法で減圧挙動とき裂挙動の双方を動的に連成したものはない。そこで本研究ではパイプにき裂が生じた際のガス減圧挙動とき裂伝播挙動を動的に連成したシミュレーションモデルを構築し、バーストテスト結果の再現とパイプライン材料に必要な韌性値の提言を行うことを目的とする。

2. モデル構築

2.1 ガス減圧モデル

圧縮性流体力学における未知数は圧力 p 、流速 u 、密度 ρ 、温度 T の 4 個である。パイプ内のガス減圧挙動を軸方向のみの 1 次元流れとみなして、き裂からの漏出を考慮した場合の構成方程式は以下の 4 式となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A) + \dot{m} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ \frac{p}{\rho^\gamma} &= \text{const} \\ \frac{p}{T^{\gamma-1}} &= \text{const} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで ψ はこのときの半径変化、 γ は気体の比熱比、 R は気体定数、 A はパイプの断面積である。なおパイプは円形を保ったまま変形し、その時周方向の長さの変化が無視できるとした。またき裂から漏出する流れ \dot{m} はチョークしているとし、また状態変化はすべて等エントロピ的であると仮定した。よってき裂形状とき裂伝播速度が既知で

あればこの方程式を解くことができ圧力分布が求まる。

2.2 き裂伝播モデル

パイプ軸方向に ξ 軸をとり、 $\xi = 0$ がき裂先端とともにき裂伝播速度 V で進展する座標系において、き裂の伝播によって半径が r から $r + \psi(\xi)$ に変化したとする。パイプにかかる力として軸力 N と周方向の曲げモーメント M のみを考え、仮想仕事の原理を用いて方程式系を構築すると、以下の微分方程式が導かれる。

$$\begin{aligned} r^2 \left(\frac{\pi^2}{8} - \frac{2}{\pi} \right) N''(\xi) - \frac{1}{r} M(\xi) - rp(\xi) \\ + \rho_p h V^2 r \left(\frac{\pi^2}{3} \right) \psi''(\xi) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

これに応力歪曲線として指数硬化則を用いると、 $\psi(\xi)$ に関する 4 階の微分方程式となる。境界条件は Dugdale モデルを用いて設定した。またき裂進展時のエネルギー収支を考えると、ガスがパイプになす仕事 W 、歪エネルギー U 、運動エネルギー E_k の間に次式が成立する。

$$\frac{dW}{d\xi} - \frac{dU}{d\xi} - \frac{dE_k}{d\xi} - h \frac{K_R^2}{E} = 0 \quad (3)$$

ここで h はパイプ厚、 K_R はき裂伝播抵抗値、 E はヤング率である。この方程式の解となるき裂伝播速度 V をセカント法により求める。以上より、圧力分布と境界条件の設定に用いるき裂伝播抵抗値 K_R を定めると、き裂伝播速度 V とき裂形状 ψ が求まる。

2.3 連成モデル

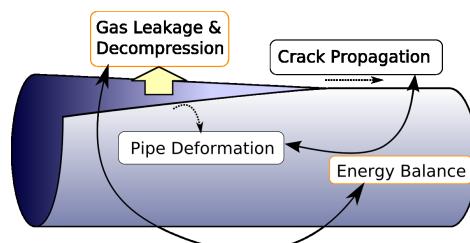


Fig. 1 Overview of coupled model

Table. 1 Parameters for simulation (air 12MPa)

Pipe Length	60 m
Specific Heat Ratio	1.402
Gas Constant	322.9 J/kg·K
Initial Pressure	12 MPa
Temperature	285 K
Initial Crack Length	0.50 m
Resistance	400 MPa \sqrt{m} (< 8m) 640 MPa \sqrt{m} (\geq 8m)

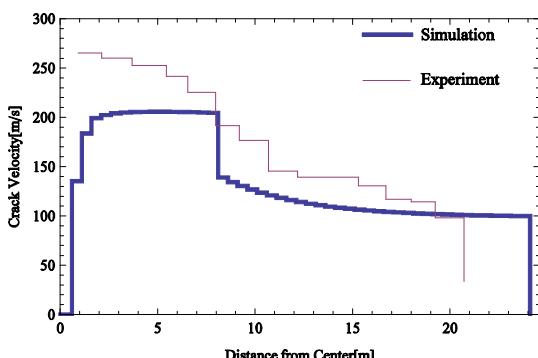


Fig. 2 Result of crack velocity (air 12MPa)

ガス減圧モデルによって求まる圧力分布を用いてき裂伝播モデルを解き、き裂伝播速度とき裂形状を求める。次にそのき裂が一定速度で進むとして、ガス減圧モデルを用いて一定距離を進むまでの圧力分布を計算する。これを交互に繰り返すことによって減圧挙動とき裂伝播を解く(Fig. 1)。

なお、き裂伝播速度が小さくなるとリングオフを生じてき裂伝播が停止する。そこでき裂伝播停止条件として、き裂伝播速度が 100 m/s 以下となった場合それ以上き裂が進展しないとした。

3. 計算結果と実験結果の比較

まずガス減圧モデルとき裂伝播モデルの各々を単独で解いた。ガス減圧モデルでは空気パイプラインバーストテストの結果[4]および研究室でノルウェーSINTEF と共同で行った水素、メタンガスパイプラインバーストテストの結果を精度よく再現することができた。またき裂伝播モデルではエネルギー収支の計算を行うことによって実際のき裂伝播挙動と整合する結果を得た。

そこで連成モデルを用いて、空気パイプラインバーストテストの再現を試みた。計算に用いたパラメータの値は Table 1 に示し、その結果とき裂伝播速度は Fig. 2 となった。実際のバーストテストではき裂は約 21m 伝播して停止したが、シミュレーション結果においてき裂は 26.1m 伝播して停止した。き裂の停止が再現されたほか、パイプ中央より 8m の点からパイプの韌性が高くなることによってき裂伝播速度が低下する様子

も再現できた。水素およびメタンガスについては、4 本のバーストテスト結果ではき裂伝播距離はいずれも 1 m 前後であったものの、シミュレーション結果においてき裂は全く伝播しない結果となつた。

4. 考察

シミュレーション結果は空気バーストテストの結果をよく再現しており、また水素およびメタンガスの場合も定常・長距離伝播をしない点でモデルは実際の現象に整合しているといえる。

そこで水素およびメタンの場合について、き裂伝播速度およびき裂伝播距離に与える諸パラメータの影響を調べ、またき裂が伝播しないために必要な韌性値を求めた。これらの考察より、大規模輸送に用いられる高圧・大径・高強度パイプには設計係数を小さく抑え、板厚を大きくし、また高韌性を併せ持つことが求められることがいえる。またいずれの場合においても水素パイプラインの必要韌性値はメタンの場合のそれよりも低い結果となつた。

5. 結論

本研究においてガス減圧とき裂伝播を連成したシミュレーションモデルを開発した。ガスの減圧挙動やき裂伝播速度の履歴は実験結果とよく一致しており、パイプラインの高速延性き裂伝播による破壊現象の評価に対してこのモデルが有効であるといえる。

また諸パラメータのき裂伝播速度と必要韌性値に与える影響を調べた結果から、水素パイプラインの安全性設計基準は天然ガスパイプラインと同等でよいこと、また今後のパイプライン材料開発においては高強度とともに高韌性の材料開発を目指す必要があることがわかった。

問題点としては、き裂発生初期のモデル化が不十分であることと、定常伝播を仮定するき裂伝播モデルではき裂伝播停止を再現できないことがあげられる。今後はこれらの問題点を解決するとともにより多くの実験結果との整合性を確認し、モデルの適用範囲拡張と水素脆化の影響を考慮することが考えられる。

参考文献

- [1] Matt. Ringer, *Analysis of H₂ pipelines and other H₂ storage and delivery systems*, (5th International Pipeline Conference, 2004).
- [2] 松尾一泰, 「圧縮性流体力学」, 1994.
- [3] L. B. Freund, D. M. Parks, and J. R. Rice. *Running ductile fracture in a pressurized line pipe*, (In *Mechanics of Crack Growth*. Elsevier Applied Science, 1988).
- [4] E. Sugie, H. Kaji, T. Taira, et. al., *Shear fracture arrestability of controlled rolled steel X70 line pipe by full-scale burst test*, (Journal of Energy Resources Technology, Vol. 106, pp. 55–62, 1984).