

実験及びFEM解析に基づく

高圧ガスパイプライン高速延性破壊の数値シミュレーション

Numerical Simulation of Unstable Ductile Fracture in High Pressure Gas Pipelines

Based on Experiments and Finite Element Analyses

学籍番号 03120901 宮本九里矢

指導教員 栗飯原周二

(平成 26 年 2 月 6 日提出)

Keywords: パイプライン、破壊力学、高速延性破壊、Dugdale モデル、亀裂先端開口角(CTOA)

### 1. 序論

地球温暖化への対応や発展途上国の発展に伴い世界の天然ガスの供給量は増加傾向にあり[1], その輸送を担うパイプラインの信頼性は天然ガスの経済性を左右する重要な要素である. また CCS 用の CO<sub>2</sub> パイプラインや水素社会実現のための H<sub>2</sub> パイプラインにも対応できるガスパイプラインの信頼性評価手法が求められている. しかし, パイプラインの破壊形態の一つである高速延性亀裂伝播現象に対する既存の評価モデルは低強度の天然ガスパイプを用いた実験式で構築されたものであるため, 高圧化や鋼材の高強度化に伴い実験と整合しない例が増加しており[2], CO<sub>2</sub> や H<sub>2</sub> に対して適用することは困難である.

本研究は, 本研究室で開発された UT-Model [3] をもとに, 既存の高速延性亀裂伝播評価モデルに比べ適用範囲が広く, 計算時間の短いモデルを開発し, 信頼性の高い数値モデルを確立することを目的とした. UT-Model は塑性変形を伴う亀裂先端の動的効果および破壊条件の評価が課題で, これらを実験と弾塑性 FEM 解析によって分析した. 亀裂前方の塑性変形のモデル化には Dugdale モデルを応用し, 破壊条件として亀裂先端開口角(CTOA: Crack Tip Opening Angle)による破壊条件を採用して, モデル化を行った.

### 2. CTOA に関する実験

#### 2.1 実験目的と方法

本研究では落重試験 (動的三点曲げ試験)を本学構内で行い, 既存実験と合わせて亀裂伝播時の材料の限界 CTOA( $\alpha_c$ )を Fig.1 のように計測した. 現在靱性値(亀裂欠陥に対する抵抗値)として広く用いられている吸収エネルギー  $E_p$  (J)から  $\alpha_c$  (Degree)推定する式[3]の適用可能性の検証を行った.

#### 2.2 実験結果

Fig.2 に実験結果を示す.  $E_p$  から得られる予測値と  $\alpha_c$  の実測値はよく一致しており,  $E_p$  から予測される  $\alpha_c$  の妥当性が確認できた.

### 3. 弾塑性 FEM

#### 3.1 解析目的と手法

局所破壊パラメータである局所歪  $\epsilon_{xc}$  および亀裂先端の動的効果と CTOA の関係性の抽出を目的として弾塑性 FEM 解析を行った. Fig.3 の通りに要素を分割し, 上方に一定の変位速度  $V_y$  で引張り, 節点力解放法によって亀裂を一定の速度  $V_c$  で強制的に伝播させた.

#### 3.2 解析結果

FEM 解析の結果, 亀裂前方 1mm の局所歪  $\epsilon_{xc}$  と CTOA には亀裂速度  $V_c$  に依存しない関係式である  $\alpha = 40 \cdot \epsilon_{xc}$  [Degree]が成立し, CTOA 破壊条件の妥当性を示すことができた. また, 亀裂速度  $V_c$  に応じて塑性変形を伴う亀裂先端の動的効果によって Fig.3 のように CTOA は減少することが確認でき, その減少率を定式化することができた.

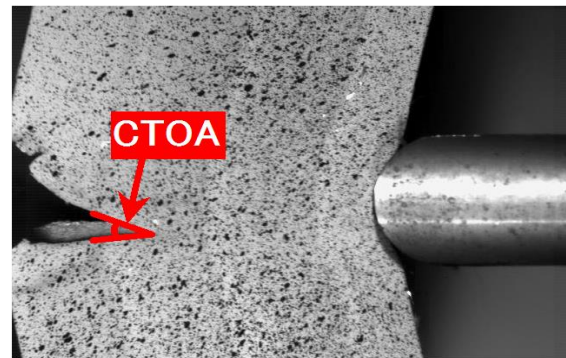


Fig. 1 Measurement of CTOA @ DWTT

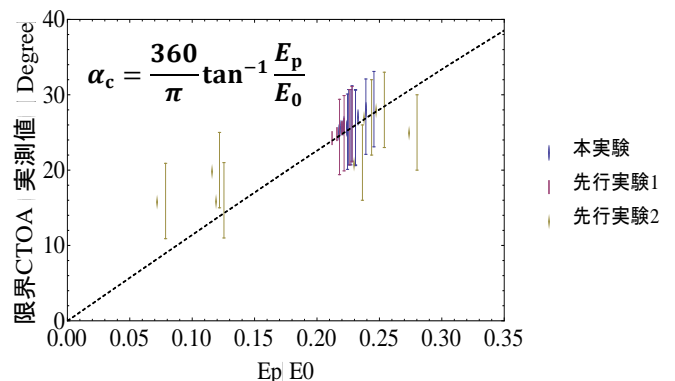


Fig. 2 Relationship between DWTT Absorbed Energy and critical CTOA

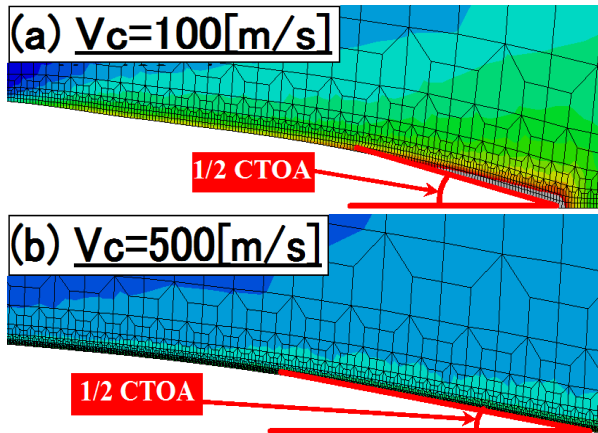


Fig. 3 FEM Analysis of Dynamic Crack Propagation

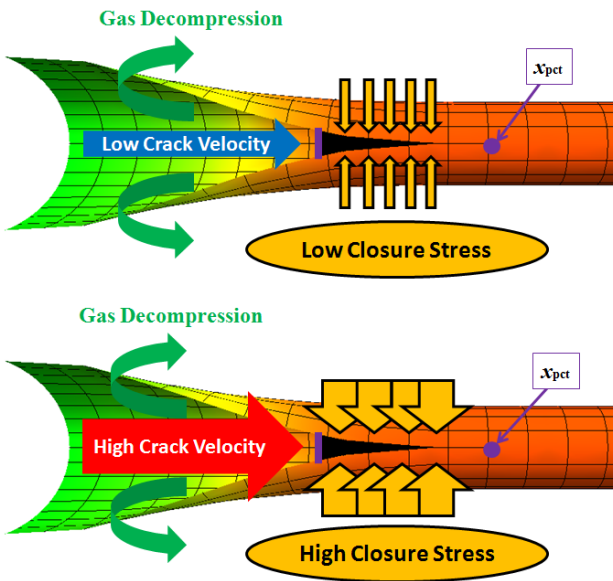


Fig.4 UT Dugdale-Model

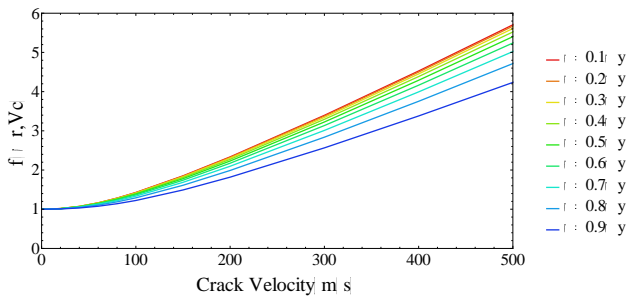


Fig.5 Closure Stress Function

#### 4. モデル構築: UT Dugdale-Model

新たに提案する UT Dugdale-Model(Fig.4)は, Dugdale モデルを応用し, 亀裂前方の塑性域に閉口応力 $\sigma_{closure}$ を加えたときに亀裂先端の特異性が消失するような塑性域長さ $x_{pct}$ を求める. また, パイプの変形挙動をパイプの形状関数 $\psi$ を仮定し仮想仕事の原理の一次元有限差分を用いることで解き, 一方で亀裂開口部からのガスの漏出 $\dot{m}$ による減圧を流体の質量保存則および運動量保存則の一次元有限差分で逐次的に解くことで, 亀

裂伝播とガス減圧の連成現象をモデル化した. 破壊条件は開口変位 $2v_{rct}$ を CTOA( $\alpha_{UTDugdale}$ )に変換し, 2章の $E_p$ によって求められる $\alpha_c$ との比較によって判定する. なお, FEM 解析で判明したように亀裂速度 $V_c$ に対してCTOAは減少することから,  $\alpha_{UTDugdale}$ も同様に亀裂速度によって小さくなるように閉口応力 $\sigma_{closure}$ を亀裂速度 $V_c$ に対して増加させる関数とした(Fig.5). 関数形は負荷応力の降伏応力に対する比 $\sigma_r$ によって定まる.

#### 5. 再現解析

構築したモデルの整合性を検証するため, 天然ガスおよび CO<sub>2</sub> パイプラインのバーストテストについて再現解析を行った(Fig.6). とともに定常時の亀裂速度履歴を再現しでき, CO<sub>2</sub>の場合では亀裂停止位置まで再現できた(Fig.7).

#### 6. 結論

再現解析を通じて UT Dugdale-Model の既存モデルに対する優位性を示した. 動的効果と CTOA の更なる解析および複数ある亀裂停止挙動のメカニズムの解明等による亀裂発生および停止時の挙動まで含めた再現性が今後の課題である.

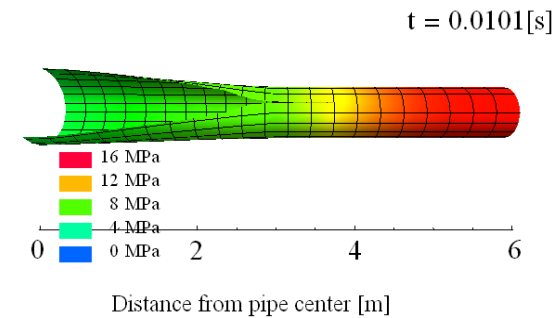


Fig.6 Calculation by UT Dugdale-Model

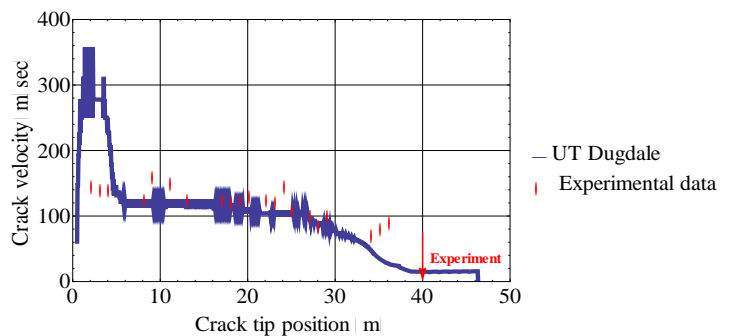


Fig. 7 Calculation Result: CO2 Burst Test @XX2012(1-E)

#### 参考文献

[1] IEA. Key world energy statistics, 2013.  
 [2] H.Makino, I.Takeuchi, and R.Higuchi. Fracture propagation and arrest in high-pressure gas transmission pipeline by ultra high strength line pipes . September 2008.  
 [3] 三澤慧, 修士論文, 東京大学(2009年).  
 [4] Andrea Fonzo, Andrea Meleddu, Giuseppe Demofonti, et al..Ductile fracture control for high strength steel pipelines. IPC06 September 2006.