

## 高速延性破壊に対する高精度評価技術の開発と、 超高強度 X100 鋼管におけるき裂伝播停止性能の証明

住友金属工業(株) 牧野 寛之 竹内 泉 天野 利彦

### 1 はじめに

近年における天然ガス需要の増加により、パイプラインの高圧高効率輸送と建設コスト低減を可能にする、超高強度鋼管 (API 規格 X100 以上) に寄せられる期待は非常に大きい。これら鋼管の幹線パイプラインへの適用にあたっては、構造体としての健全性の立証が必要である。とりわけ、高速延性破壊による大規模災害を防止する為に必要な鋼管性能については、適用前に明らかにされなければならない。しかしながら、これら超高強度鋼管におけるき裂伝播停止性能を、従来手法で評価するのは困難である事が判明している。

以上を背景として、超高強度鋼管を使用した実物大破壊試験 (フルスケールバースト試験) の実施による、き裂伝播停止性能の確認が、近年多数おこなわれてきた。しかしながらこれら試験では、明瞭な、短距離き裂伝播停止に成功した例はなく、超高強度鋼管本体におけるき裂伝播停止性能は充分ではなく、幹線パイプラインへの適用にあたっては、クラックアレスターの使用が必須であると言われている。

### 2 パイプラインにおける高速延性破壊

天然ガス輸送用のパイプラインには、延性破壊でありながら、き裂が約 100m/sec ~ 400m/sec の高速で、時として長距離伝播する危険性を有した、高速延性破壊 (図 1 参照) の存在が知られている。その現象の解明には、き裂先端圧力とき裂伝播速度との関係を表す「き裂伝播速度曲線」と、管内圧力とガス減圧波進行速度との関係を表す「ガス減圧曲線」の、高精度推定が要求される。

ガス減圧曲線は、半無限長の鋼管の端部を解放した時の断熱膨張による、鋼管内部の圧力変化を解く事により推定される。また、き裂伝播速度曲線の推定式には、米国 Battelle 研究所より提案された Battelle 式と、日本鉄鋼協会 HLP 技術検討会より提案された HLP 式とが存在する。両式共に半実験式であり、それぞれの式構築に際して、もとにした実験データに近い条件下では、精度よい推定を与えるが、その適用範囲は限られている。

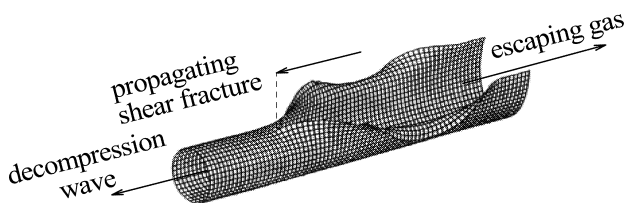


図 1 パイプラインにおける高速延性破壊の模式図

### 3 高精度評価技術開発の概要

著者らは、超高強度鋼管 X100, X120 を用いた全フルスケールバースト試験結果を解析し、その予測精度に影響を与える各種因子の信頼性を詳細に調査した。その結果、① 超高強度鋼管を使用した高圧領域においても、ガス減圧曲線の推定精度は比較的高い事、② 高靱性鋼管における材料抵抗の指標として、シャルピーエネルギーよりも DWTT エネルギーの方が優れている事、③ Battelle 式、HLP 式共に、き裂伝播速度の推定精度に、明らかな鋼管サイズ依存性が存在する事が、判明した。

上記の調査結果を反映させ、新しいき裂伝播速度式 (Sumitomo's crack velocity curve) を提案し、それを用いたき裂伝播シミュレーション手法 (Sumitomo modified HLP method) を開発した。また、これらによる評価精度が、従来手法より大幅に優れている事を確認した。新しく提案したき裂伝播速度式における推定精度の、従来式との比較を図 2 に示す。新しく提案した式の特徴は、従来式の中では、限られた実験データに合わせ込んだ定数であった 3 箇所を、鋼管サイズ (管径と肉厚) の関数で与えられる変数に変え、なおかつ、従来式それぞれが、その式構築に際してもとにした実験データの範囲においては、それぞれの式に漸近する形とした事である。

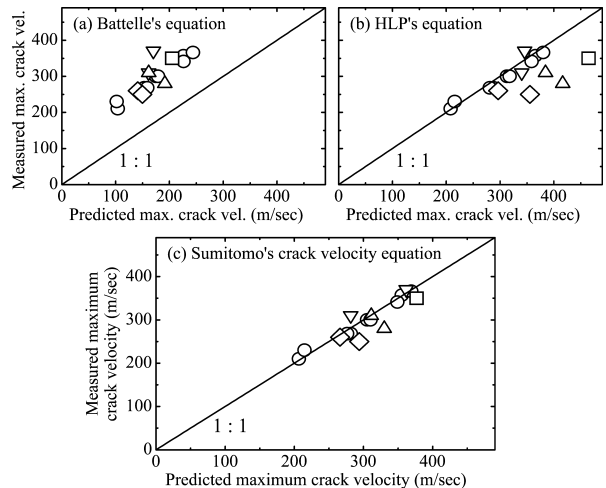


図 2 き裂伝播速度の推定精度比較

### 4 き裂伝播シミュレーション技術による評価例

図 3 に、今回開発したき裂伝播シミュレーション技術による評価例を示す。これは“1st DemoPipe Test”と呼ばれる、き裂が試験鋼管の全長にわたり伝播した、X100 鋼管使用のフルスケールバースト試験を対象としたもの

であり、試験における、実際の鋼管の靱性値配列を図3(b)に、き裂伝播挙動の実測値とシミュレーション結果との比較を図3(c)に示す。シミュレーション結果は、実測値と良く一致している事がわかる。また、鋼管の靱性値配列を変化させて、それがき裂伝播停止挙動に与える影響を評価した結果を、図3(d)、(e)に示す。

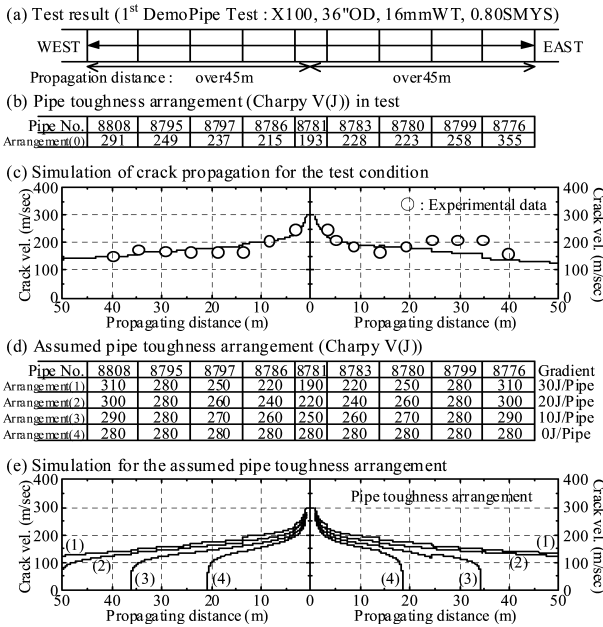


図3 鋼管の靱性値配列がき裂伝播挙動に与える影響

過去に実施された全てのフルスケールバースト試験では、中央から端に向かって鋼管の靱性値が徐々に上昇する、漸増型靱性値配列を採用し、き裂伝播停止鋼管のエネルギーで、高速延性破壊を停止させる為に必要な鋼管靱性値を評価している。一方、著者らは、シミュレーション結果に基づく考察より、以下の見解を得た。

- ① 試験におけるき裂伝播停止鋼管のエネルギーは、鋼管の靱性値配列、すなわちき裂の伝播履歴に影響される。
- ② 試験における従来型の漸増型靱性値配列では、鋼管本体のき裂伝播停止性能を、過小評価する傾向にある。
- ③ 適切な試験条件を選択した、平坦型靱性値配列の試験を実施する事で、超高強度 X100 鋼管でも充分なき裂伝播停止性能を有している事を、証明可能である。

5 X100 鋼管におけるき裂伝播停止性能の証明

第4章に記した、本技術による評価より得た見解をもとに、世界で初めて、平坦型靱性値配列による X100 フルスケールバースト試験を、計画し実施した。

本試験は、2008年3月12日に、イタリア・サルディニア島の CSM テストサイトで実施した。試験圧力は、設計係数(周方向応力/降伏応力の材料規格値) 76.8% 相当の約 22MPa であり、過去実施された試験の中でも、最高レベルの試験圧力である。その他試験条件に際立った特徴はないが、ただ平坦型靱性値配列であるという点、過去実施の全ての試験と異なる、最大の特徴である。

試験後における鋼管の写真を図4に、また試験結果を、き裂伝播挙動の実測値と予測値との比較で図5に示す。図5(c)に示す様に、試験におけるき裂伝播停止挙動は、本き裂伝播シミュレーション技術による、事前の予測結果と良く一致していた。また今回、X100 鋼管使用のフルスケールバースト試験で、世界で初めて、両側共に短距離でのき裂伝播停止が観測された事で、超高強度 X100 鋼管本体におけるき裂伝播停止性能の証明に成功した。

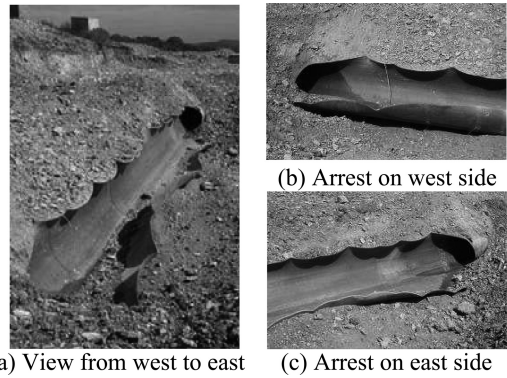


図4 フルスケールバースト試験後の鋼管写真

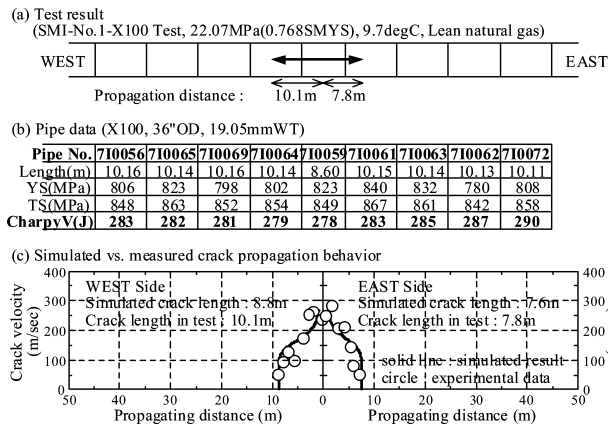


図5 フルスケールバースト試験結果

6 む す び

今回の試験結果は、超高強度 X100 鋼管でも、鋼管本体での充分なき裂伝播停止性能を有する、クラックアラスタなしのパイプラインが実現可能である事を意味しており、超高強度鋼管を使用した幹線パイプライン実用化への大きな推進力となる事が期待される。

参 考 文 献

1) H. Makino, I. Takeuchi, 2010, "Full Scale Burst Test of High Strength Line Pipe-Part 2: Fracture Arrestability of Gas Transmission Pipeline by X100 Line Pipe", International Seminar on Application of High Strength Line Pipe 2010, Xi'an, China.

【問合せ先】 住友金属工業(株) 総合技術研究所  
〒660-0891 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8  
TEL: 06-6489-5733, FAX: 06-6489-5794  
E-mail: makino-hry@sumitomometals.co.jp