

実験および数値解析による陸上・海底パイプライン高速延性亀裂停止性能評価

37-166345 細江貴大
指導教員 柴沼一樹 准教授

I. 研究背景・目的

近年、天然ガス需要の増加を契機としてパイプラインの重要性が高まっている。特に海底パイプラインは、高効率のエネルギー輸送が可能であるといった利点を持っており、その利用拡大が見込まれる。しかしながら、ガスパイプラインにおける破壊に対する既存の安全性設計基準は十分とはいえない。中でも亀裂が 100m/s 以上で伝播し大規模破壊をもたらす高速延性亀裂伝播現象に対する安全性は、経験式に基づき構築されたモデルにより評価されているのが現状であり、手法の信頼性に疑問が残る。海底パイプラインに関しては経験式の基礎となるバースト試験が数例しかないことから、その傾向は特に顕著である。

こうした背景から本研究では、パイプラインの高速延性亀裂停止性能について、鋼管バースト試験により大気中・水中での違いを比較するとともに、数値モデルを構築し様々な条件下での定量的な評価を実施することを目的とする。鋼管バースト試験では、対照的な条件下で試験を実施することにより水中での亀裂の止まりやすさを明確に示す。また数値モデルに関しては、高い汎用性、計算効率、および信頼性を持つモデルを提案する。最終的には、海底パイプライン高速延性破壊に関わる諸因子の影響評価を行い、安全性設計に寄与することを目指している。

II. 鋼管バースト試験

鋼管は、水中においては大気中と比べて高い亀裂停止性能を有するようになると考えられるが、大気中と水中での明確な差を示した実験例はない。そこで本研究では、鋼管の露出環境(バックフィル状態)のみを変化させたバースト試験を実施することで、水中鋼管の亀裂停止性能評価を行った。

バースト試験では、表面切り欠きを加工した鋼管を昇圧して破裂させ、高速延性亀裂を発生させた。鋼管の材料特性は Table 1 に示す通りである。なお σ_{YS} は降伏応力を、 σ_{TS} は引張強さを表している(ともに公称値)。全長はともに 5.0m、水中試験の水深は約 2.0m であり、その他の試験条件は Table 2 に示す通りである。本実験ではクラックゲージ、圧力変換器により動的測定を行い、またバースト時の亀裂先端開口角(Crack Tip Opening Angle: CTOA)および水中でのバブル成長の撮影を目的として、高速度カメラを設置した。

Table 1 Test steels

Steel	Pipe diameter [mm]	Thickness [mm]	σ_{YS} [MPa]	σ_{TS} [MPa]
X	318.5	8.5	375	444
Y	355.6	9.5	368	440

Table 2 Test conditions

Test	Steel	Notch length	Notch depth	Gas
		[mm]	[mm]	
1	X	300	2.65	N ₂
2	Y	300	4.00	N ₂

試験時の試験体温度および初期圧力を Table 3 に示す。ここで、大気中試験、水中試験をそれぞれ A, W と表記している。Fig. 1 に試験後の試験体の様子を示す。Test 2-W 以外の試験では亀裂は軸方向に伝播して停止した。Test 2-W では片側(北側)は伝播開始直後から亀裂が逸れ始めたが、もう片側(南側)では軸方向に伝播して停止直前で周方向に逸れていた。

Table 3 Temperature and initial pressure

Test	Temperature [°C]	Initial pressure p_0 [MPa]	
		Prospected	Measured
1	A	16.5	17.2
	W	16.5	19.6
2	A	14.1	16.5
	W	14.1	15.9

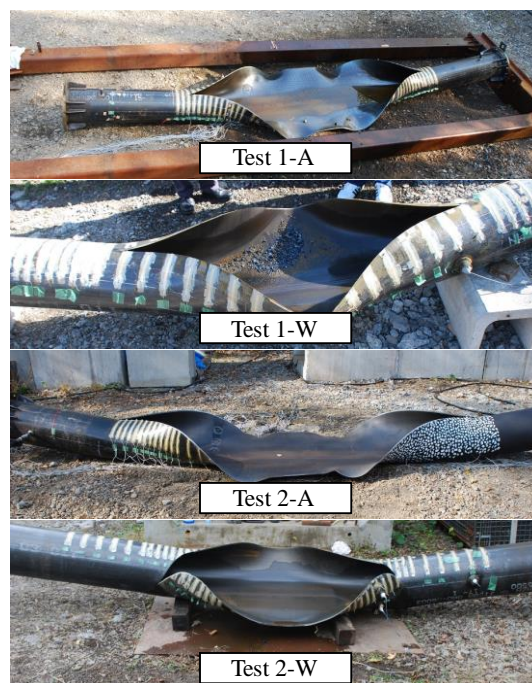


Fig. 1 Fracture appearance

Fig. 2 に亀裂先端位置の履歴を示す。水中試験では大気中試験に比べて大幅に亀裂速度が低く、亀裂停止位置が短くなっている。この結果は水中鋼管の亀裂停止性能の高さ、つまりは海底パイプラインの高速延性破壊に対する高い安全性を示唆しているといえる。

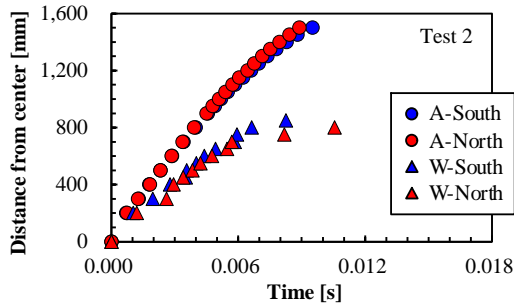
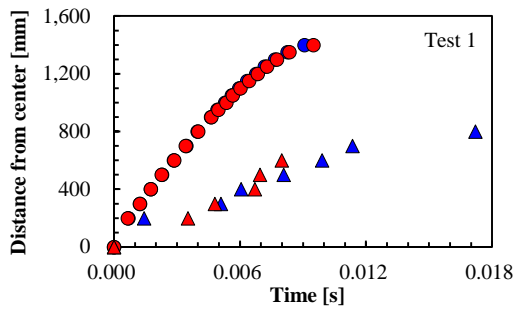


Fig. 2 Time histories of crack tip position

次に、圧力変換器により計測した管軸方向各位置の動的圧力の履歴を Fig. 3 に示す。Test 1, 2 ともに水中試験において減圧が遅れているが、これは水中で漏出ガスにより形成されるバブルの内圧が大気圧よりも高かったことによるものと考えられる。減圧の遅れは、内圧が駆動力となる高速延性破壊においては危険側の因子であると考えられるが、それにもかかわらず亀裂は水中の方が早期に停止しており、水中鋼管の亀裂停止性能の高さを示すものとなっているといえる。

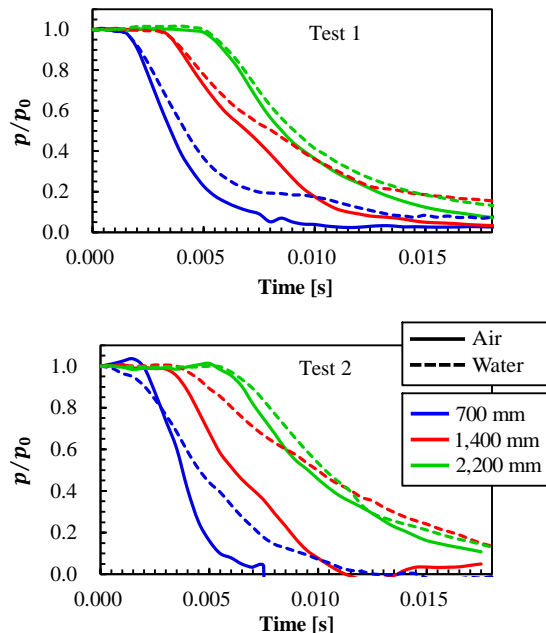


Fig. 3 Time histories of internal pressure

最後に、Test 2-A において撮影した高速度カメラ画像を Fig. 4 に、この画像から取得した CTOA を Fig. 5 に示す。この CTOA と材料試験 (Drop Weight Tear Test: DWTT) で取得した CTOA の関係を、後述する数値モデルに組み込んでいる。

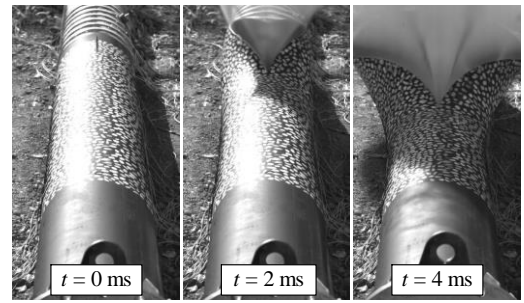


Fig. 4 High-speed camera image

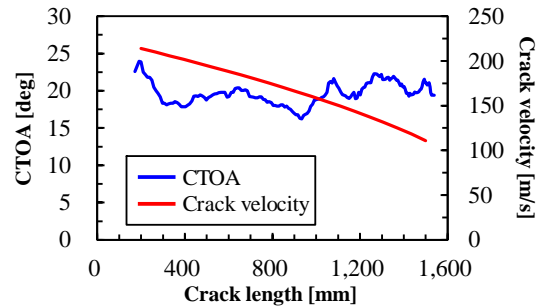


Fig. 5 CTOA during crack propagation

III. 数値モデル構築

本研究で構築する数値モデルは、UT Model¹⁾および UT offshore Model²⁾を基礎としている。UT Model は 1 次元有限差分法に基づいた完全力学モデルであり、陸上パイプラインの亀裂停止性能を短時間で定量的に評価可能である点に特徴を持つ。UT offshore Model は UT Model を基礎として海底パイプラインへと適用性を拡大したモデルである。その際、(i)バブル形成によるガス漏出の抑制、(ii)周囲の水の付加質量効果によるパイプ変形抑制、(iii)静水圧によるパイプ変形抑制、という海底特有の効果を組み込んでいる。(i)は亀裂を進展しやすく、(ii)および(iii)は進展しにくくすることから、それぞれ危険因子、安全因子といえることができる。UT Model では、(a)パイプ変形、(b)ガス減圧、(c)亀裂進展、の 3 つが、UT offshore Model ではそれに加えて、(d)バブル成長、がサブモデルとして定式化されており、それらを交互に解くことでパイプラインにおける亀裂伝播挙動を評価する。破壊条件としては、亀裂速度に依存した亀裂伝播抵抗を考慮した動的なエネルギー収支が採用されている。

本研究では、これらのモデルにおける主な課題として、(1)破壊条件、(2)降伏条件、(3)連成性、の 3 点を挙げ、それぞれについてより実現象に即したモデル化を行うこととした。(1)については、延性破壊を支配していると考えられる亀裂先端の局所的なひずみとの間に一定の対応関係があると考えられる CTOA を用いて、破壊条件を構築することとした。その実装においては、CTOA 破壊条件を用いた高速延性破壊評価モデルである UT CTOA Model³⁾の考え方を導入し、亀裂先端に Dugdale 塑性域を仮定して式(1)を亀裂進展判定条件とした：

$$\alpha > \alpha_{c,pipe} \quad (1)$$

ここで α は亀裂先端の開口角 (CTOA)、 $\alpha_{c,pipe}$ はパイプにおける限界 CTOA であり、UT CTOA Model³⁾では落

重試験 (Drop Weight Tear Test: DWTT) における吸収エネルギーから一意に決定されるとしている。しかし本研究では、パイプにおける局所ひずみと CTOA の関係性を再度整理し限界 CTOA 値の算出方法を再検討することを考え、鋼管弾塑性 FEM 解析を実施した。その結果、局所ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ と CTOA の関係は、亀裂速度や負荷条件、強度、管厚にはよらないものの、管径には依存性を持つという結果が得られ、この依存性を次式の通りに仮定した:

$$\alpha(D, \bar{\epsilon}_p) = aD^n \bar{\epsilon}_p^m + b \quad (2)$$

ここで、 D は管径であり、定数 a , n , m , b はフィッティングによりそれぞれ $a = 219.61$, $n = -0.279$, $m = 0.826$, $b = 1.151$ と求めた。ただし、 α の単位は [deg], D の単位は [mm] である。これは限界局所ひずみ $\bar{\epsilon}_{p,c}$ と限界 CTOA ($\alpha_{c,pipe}$) の関係と考えることもできるため、モデル上では上式により管径に依存した限界 CTOA を算出することとした。ただし、この式を用いるためには材料試験から限界局所ひずみ $\bar{\epsilon}_{p,c}$ を算出しなければならない。そこで、前述したバースト試験 Test 2-A において実測した CTOA ($\alpha_{c0,pipe}$) と試験材 Y の DWTT において測定された CTOA ($\alpha_{c0,DWTT}$) の比から、 $\bar{\epsilon}_{p,c}$ と DWTT における限界 CTOA ($\alpha_{c,DWTT}$) の関係を次式の通り仮定し、 $\alpha_{c,DWTT}$ から $\bar{\epsilon}_{p,c}$ を算出することとした:

$$\alpha_{c,DWTT}(\bar{\epsilon}_{p,c}) = \alpha_{c,pipe}(D_0, \bar{\epsilon}_{p,c}) \times \frac{\alpha_{c0,DWTT}}{\alpha_{c0,pipe}} \quad (3)$$

ここで D_0 は Test 2 において使用されたパイプの径であり、 $\alpha_{c0,DWTT} \cong 18.6\text{deg}$, $\alpha_{c0,pipe} \cong 19.7\text{deg}$ である。このようにして算出された $\bar{\epsilon}_{p,c}$ より式(2)の関係を用いて鋼管における限界 CTOA ($\alpha_{c,pipe}$) を取得する。以上の流れを Fig. 6 に示す。

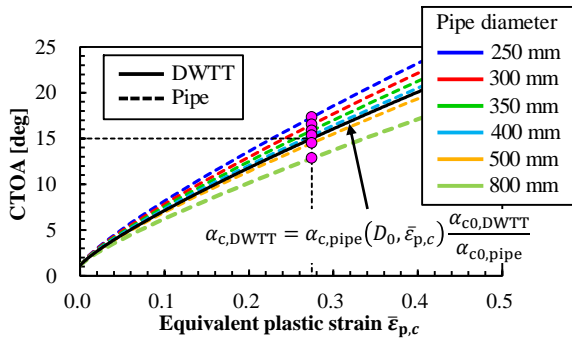


Fig. 6 Calculation of $\alpha_{c,pipe}$ from DWTT

(1)以外の修正点についても簡潔に示す。(2)降伏条件は、UT Model / UT offshore Model ではパイプ壁にはたらく引張力、せん断力、曲げモーメントがそれぞれ独立に降伏するとしていることを指す。これは実際よりも降伏が起きにくい状態を仮定していることになり、パイプの変形量が過小に算出されてしまう可能性が高い。そこで本研究では、引張力とせん断力について相当応力を考慮した降伏応力を与えることで、より降伏が起きやすい、実現象に近い条件へと修正した。また(3)連成性については、双方向弱連成モデルである UT Model / UT offshore Model では、より複雑な実現象における連成性を十分に考慮できていない可能性があったことから、パイプ変形、ガス減圧、およびバブル成長 (海底モデルのみ) の支配方程式を同時に解き、そのう

えで亀裂進展判定を行う新たな連成解析モデルを構築した。このモデルの模式図を Fig. 7 に、計算フローを Fig. 8 に示す。

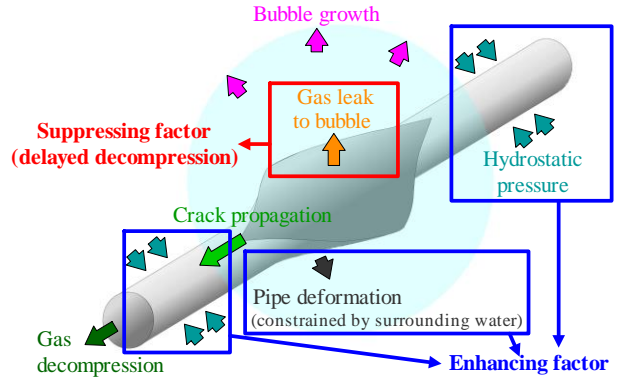


Fig. 7 Overview of the proposed model

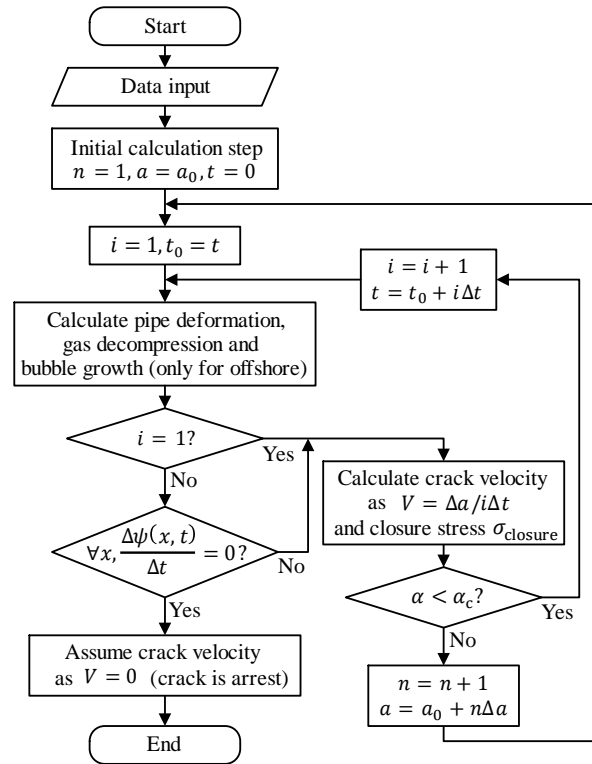


Fig. 8 Calculation flow of the proposed model

IV. 数値モデル妥当性検証

構築したモデルの妥当性検証を行うため、上述した Test 1, 2 および C.S.M による海底フルスケールバースト試験 (水深 30m, 外径 914.4mm, 管厚 20.5mm) ⁴⁾ の再現計算を実施した。その結果例を Fig. 9, Fig. 10 および Fig. 11 に示す。構築した数値モデルは大気中・水中における亀裂伝播挙動の違いおよびバブル成長挙動を再現し、また海底における実大規模パイプラインにおける高速延性破壊も評価可能であることが示された。なお凡例の S は South を、N は North を表している。また Test 2 におけるバブル径は、高速度カメラ画像より算出したものである。

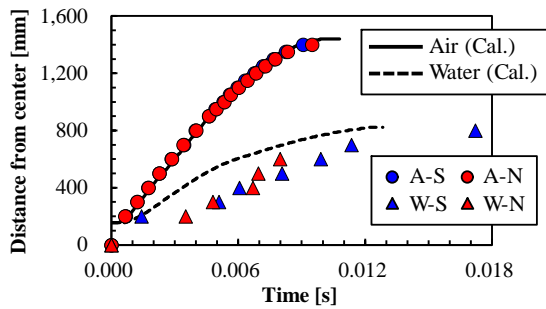


Fig. 9 Comparison of crack histories (Test 1)

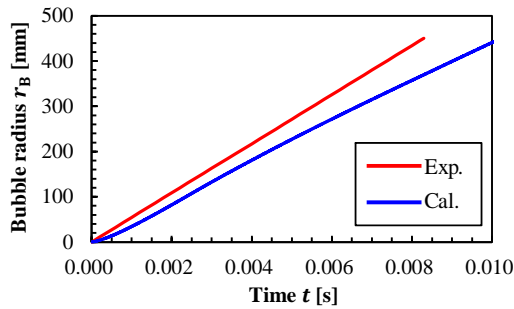


Fig. 10 Comparison of bubble radius at 0 m (Test 2)

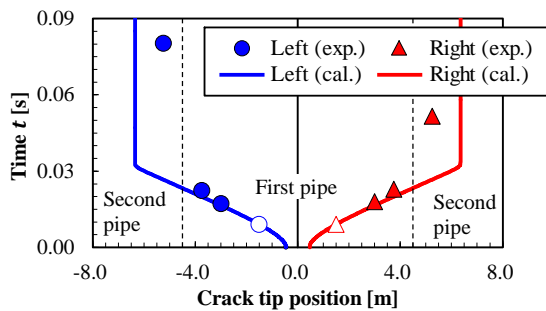


Fig. 11 Comparison of crack histories (C.S.M⁴)

V. パラメータスタディ

構築した数値モデルを用いて、水深に関するパラメータスタディを実施した。計算条件は上述したC.S.Mによるバースト試験⁴⁾におけるものから水深のみを変化させた(0m, 10m, 100m, 1,000m)。パラメータスタディの計算結果をFig. 12に示す。これより、水深が深くなるほどパイプラインの亀裂停止性能は向上することが示された。水深の増加は、付加質量および静水圧の効果を増大させる一方で、ガス漏出の遅れにより内圧が高いまま保持されることにもつながるが、Fig. 12の結果は、水深が増加するにつれ前者、つまり安全因子がより支配的になることを示しているといえる。

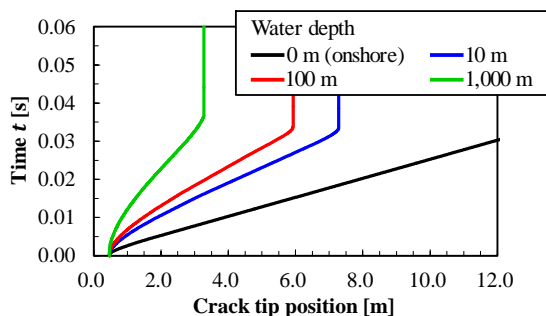


Fig. 12 Results of parameter study about water depth

Fig. 13に水深を10mおよび1,000mとした場合の計算結果について、3次的に可視化した図を示す。水深が増加するとバブル成長が抑制されてパイプ内部の圧力が高く保たれる一方、付加質量および静水圧の効果でパイプ変形が抑制され亀裂が進展しにくくなる様子がわかる。

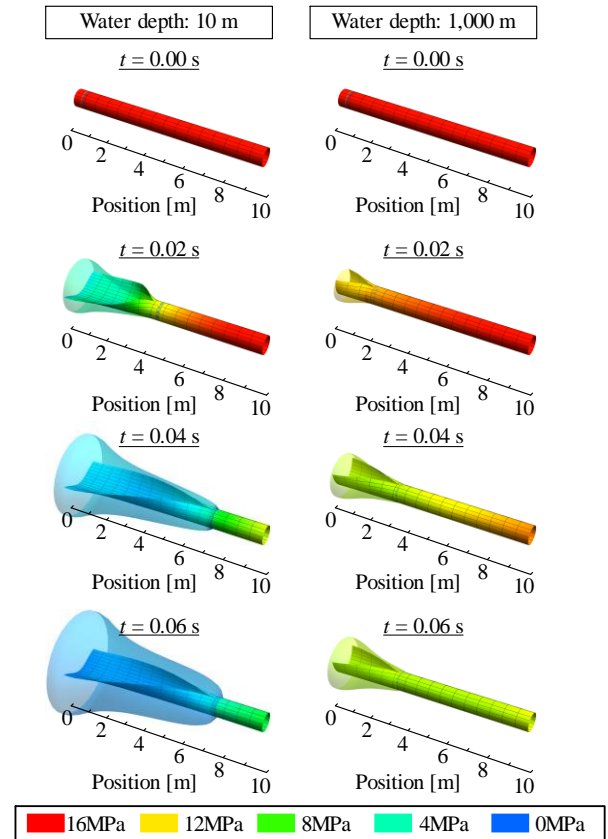


Fig. 13 3D view of the calculation result

VI. 結論

本研究では、パイプラインにおける高速延性破壊を対象として、実験および数値解析により亀裂進展挙動の評価を行った。特に海底パイプラインについて、バースト試験による亀裂停止性能評価を行い、さらに構築した数値モデルを用いて定量的な評価が可能であることを示した。パラメータスタディの結果、水深が増加するほどパイプラインは高い亀裂停止性能評価を有するようになることが示された。本研究の成果は、今後利用がさらに拡大していくであろうパイプラインの安全性設計における利用可能性を十分持つものであるといえる。

参考文献

- 1) H. Nakai, K. Shibamura, S. Aihara, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.162, pp.179-192, 2016.
- 2) K. Shibamura, T. Hosoe, H. Nakai, A. Morita, S. Aihara, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.178, pp.126-147, 2017.
- 3) K. Miyamoto, H. Nakai, K. Shibamura, S. Aihara, *25th International Ocean and Polar Engineering Conference*, pp.154-161, 2015.
- 4) G. Demofonti, A. Maresca, G. Buzzichelli, *Applied Mechanics Reviews*, Vol.41, pp.85-95, 1988.