

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 中居 寛明

本論文は、海底パイプライン不安定延性破壊防止設計のための数値モデル開発の研究に関するものである。本論文は 7 章から構成されるもので、以下に各章の要旨を述べる。

まず、第 1 章では、研究の背景と目的が記述されている。世界的なエネルギー需要の増大により天然ガスの生産と輸送が拡大し、天然ガス輸送パイプラインの建設が世界的に拡大している。特に、長距離を輸送するためには海底パイプラインの適用が増加し、近年では 1,200km を超える長距離海底パイプラインも建設されている。一方、高圧ガスパイプラインの信頼性設計においては不安定延性破壊を防止することが最も重要な課題の一つであり、陸上パイプラインについては各種の評価・設計手法が確立されている。しかしながら、海底パイプラインについては評価手法が確立されておらず、陸上パイプラインの手法をそのまま適用されるなど、合理的な設計がなされていないこと、その理由として、実大試験が困難である上に現象が複雑であることが指摘された。本研究は海底パイプライン不安定延性破壊の評価手法を確立することにある。

第 2 章では、本研究の基盤となる基礎理論が述べられている。まず、天然ガスなどを対象とする圧縮性気体の一次元流れ、チョーク流れの基礎式が提示された。続いて、海底パイプライン破裂時に生成するバブルに関するバブル動力学の方程式が提示された。続いて、パイプの塑性変形に関する大変形下における変位-歪関係式が提示された。

第 3 章では、本研究の基となる高圧ガスパイプライン不安定延性破壊の数値モデルについて、その詳細が説明されるとともに、海底パイプライン特有の現象をモデル化する手法について記述された。本モデルは、パイプ変形モデル、減圧モデル、バブル成長モデル、き裂伝播モデル、の各モデルから構成されるものであり、それらの詳細が記述されている。パイプ変形モデルにおいては、パイプ壁の運動に伴う周囲の水の運動によって発生する運動エネルギーを考慮して付加質量を与える定式化が提案された。減圧モデルとバブル成長モデルでは、パイプのき裂から外部に動的に漏出するガスの挙動について定式化が提案

された。海底パイプラインではガス漏出が周囲の水によって抑制され、バブルを形成するため、パイプからのガス漏出とバブル成長を平行して解く必要性があり、その定式化が提案された。き裂伝播モデルでは、エネルギーバランスによりき裂伝播速度を計算するための定式化が示された。最後に、各モデルを統合したモデルにより、海底パイプラインのき裂伝播、ガス減圧、バブル形成を連成問題として数値的に解くことができることが計算例によって示された。

第 4 章では、水中破裂試験について記述されている。前章で提案された減圧モデルはパイプ内のガス流れと水中のバブル形成が関与する複雑な現象であり、モデルの妥当性を検証するために水中破裂試験が実施された。本試験では、アルミニウム製のパイプに表面切欠きを導入し、内圧により所定長さのき裂を瞬時に生成させ、その後のパイプ内減圧とバブル成長を動的に観察するものである。試験は 2 体実施され、両者ともに動的計測を行うことができた。特に、高速度カメラによるバブル成長の動的観察は極めて貴重なものである。前章の減圧・バブル成長モデルを本実験に適用して計算した結果、パイプ内減圧、及び、バブル成長の両挙動が実用上十分な精度で再現できることが確認され、本減圧・バブル成長モデルの妥当性が検証された。

第 5 章では、数少ない実大海底パイプラインバーストテストの公知データに対して本モデルを適用した結果について記述されている。減圧挙動、及び、き裂伝播・停止の両挙動が実用上十分な精度で再現できることが確認され、本モデル全体の妥当性が検証された。

第 6 章では、実大海底パイプラインを対象として、本モデルを適用し、不安定延性破壊挙動に及ぼす水深、パイプ厚さ、パイプ径、パイプ強度、パイプ靱性の影響について定量的な評価が行われた。特に、水深はき裂伝播挙動に大きな影響を及ぼし、水深が数 10m 以上になるとき裂伝播が大きく抑制される結果が示された。比較的浅い水深で水の効果が大きいことは、減圧を遅延させる効果よりも付加質量の効果が大きいことを示すものである。

第 7 章では、本研究の総括が記述されている。最後に、今後の課題が記述されている。

以上、要旨を述べたとおり、本研究で海底パイプライン不安定延性破壊の挙動を再現する数値モデルが開発され、その有効性が実証された。パイプの変形、き裂伝播、パイプ内ガス減圧、水中のバブル成長など多くの因子が関与する複雑な現象を考慮した初めてのモデルであり、新規性・独創性が極めて高い。さらに、将来、本モデルが発展して海底パイプラインの信頼性設計に適用されることを想定すると、工業的にも極めて価値の高いものである。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。