

鋼製パイプラインの変形限界評価方法に関する研究

学位論文内容の要旨

石油・ガス・水道などのパイプラインは高度に発達した現代社会の生活を支える重要な輸送システムである。パイプラインは地球環境保全やエネルギー輸送の効率化の観点からも今後ますます重要な輸送手段となりうる。ライフラインと言われるガス、上下水道などの公益的パイプラインは、需要者が一般市民であることから構造的に安全であることは勿論、安定供給を前提にしたシステム構築が要求されてきた。

本研究で主として取り上げる高圧ガスパイプラインは、都市ガスの輸送導管あるいは発電所間のエネルギー輸送管路であり、長距離、高圧、埋設を主とする幹線ラインという特徴を有している。したがって、高圧ガスパイプラインは常時負荷されている荷重だけでなく、大規模地震、地盤変状等の自然災害に対しても十分な安全性を維持する構造強度を必要としており、それを具現化する耐震設計は構造設計における重要な地位を占めている。

石油パイプライン技術基準を初めとする埋設管路の各種耐震設計基準・指針は、いずれも応答変位法に基づいて管に発生する応力またはひずみを評価し、その耐震安全性を照査している。しかしながら、1978年に発生した宮城県沖地震を初め、ここ数十年間に国内で発生した地震による埋設管路の被害は、応答変位法が前提としている地盤震動による超過管ひずみが管路破壊の原因と理解するよりも、地盤の永久変位や液状化地盤での側方流動による大規模な地盤変状によって管路が塑性変形しているものと考えの方が理解しやすい事例が見受けられる。

大規模地震による地盤の液状化が発生する場合に備えて、鋼材の弾性域だけでなく、塑性域までも設計範囲に取り込む動きが構造設計分野で高まっている。こうした鋼材の延性を積極的に評価した構造設計においては、鋼管の変形限界、すなわち破壊発生を限界基準とし、変形量を許容値とした設計を行なうことが考えられる。破壊評価という観点からは応力拡大係数 K 値、 J 値、き裂開口変位 $CTOD$ などの破壊力学パラメータが考案されているが、これらはある有限な欠陥が存在していることを前提に、そこからのき裂進展の有無の判定に用いられてきた。したがって、これらのパラメータは、その欠陥が破壊に至るか、もしくは欠陥の進展履歴を調査する上では有用であるが、欠陥が認識されない構造物の変形限界（破壊発生）を捉えるものではない。また、従来は最大荷重や最大抵抗モーメント点をはるかに超えた構造の変形限界（破壊発生）を把握するには、実管もしくはその縮小モデルでの破壊実験、形状を単純化し

た試験片による確認など経験的評価が主流であった。

本研究では鋼製パイプラインの中でも変形が相対的に集中する曲り管について従来の研究対象にはなかった屈服後の変形限界強度の評価・予測方法について主に論じた。材料、形状・寸法の異なる複数の鋼製曲管の面内曲げ破壊実験を実施し、実管の変形限界を確認するとともに実験を模擬する弾塑性大変形有限要素解析を実施した。鋼材の破壊評価は応力もしくはひずみの単独パラメータで表現することは困難であり、ここでは主応力、平均応力、相当塑性ひずみの3パラメータを用いて材料の変形限界評価面を材料試験から設定し、前述の弾塑性大変形解析の結果を利用する変形限界評価・予測方法を考案した。実験で確認された変形量とき裂発生位置との対応や既往研究の鋼材の破壊評価方法との比較を通して、新たに考案した評価方法の優位性を示した。

本論文は以下のように全6章により構成されている。

第1章の緒言では本論文の総括的な序論として、研究の背景について概説するとともに、鋼製パイプラインの損傷要因と過去の損傷事例を紹介した。

第2章の鋼製パイプラインの設計と安全性評価では、第1章で取り上げたパイプラインの損傷形態に対する従来の設計や安全性評価に関する手法について記した。従来の強度評価方法では不十分な研究課題を示し、その課題を解決するための手順を説明するとともに本研究の意義を明確にした。

第3章の鋼製パイプラインの大変形挙動および破壊特性では、鋼製曲り管を対象に最大抵抗モーメント点をはるかに超えた領域における破壊の形態を実管実験によって明らかにし、実験を模擬した数値解析を合わせて実施して破壊に至るまでの発生ひずみの傾向や変形限界を解析的に示した。

第4章の鋼製パイプライン材料の破壊挙動では、実管実験と同グレードの材料を用いて形状・寸法の異なる切欠付き丸棒引張試験を複数実施し、変形限界評価に必要な基本データの蓄積を行なった。同一材料でも応力・ひずみ履歴の異なる場合には破壊発生点における延性強度が変化する傾向とその定量化について示した。

第5章の鋼製パイプラインの変形限界強度では、第4章の材料の破壊挙動で得られた結果を用いて鋼管の大変形状態における破壊挙動を予測・評価する条件式を導出し、実管実験で生じた破壊の位置や破壊に至るまでの変形量について定量的な評価を行なった。

第6章の結論では、本研究で得られた結果を総括するとともに、鋼製パイプラインの変形限界強度の今後の展望や課題についてまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	佐々木 一 彰
副 査	教 授	野 口 徹
副 査	教 授	小 林 幸 徳
副 査	助教授	加 藤 博 之

学 位 論 文 題 名

鋼製パイプラインの変形限界評価方法に関する研究

高度に発達した現代社会の生活を支える重要なライフラインである石油・ガス・上下水道などのパイプラインには、構造的な安全性は勿論のこと、安定供給を前提にしたシステム構築が要求されている。本研究で主として取り上げている高圧ガスパイプラインは、都市ガスの輸送導管あるいは発電所間のエネルギー輸送管路であり、長距離・高圧・埋設を主とする幹線ラインという特徴を有している。したがって、常時負荷されている内圧荷重だけでなく、大規模地震や地盤変状等の自然災害に対しても十分な安全性を維持する構造強度を必要としており、それを具現化する耐震設計は構造設計における重要な位置を占めている。

破壊評価という観点からは応力拡大係数 K 値、 J 積分値、き裂開口変位 $CTOD$ 値などの破壊力学パラメータが考案されているが、これらは有限な寸法の欠陥が存在していることを前提に、そこからのき裂進展の判定に用いられている。したがって、これらのパラメータは、その欠陥が破壊に至るか、もしくは欠陥の進展履歴を調査する上では有用であるが、欠陥が認識されない構造物の変形限界や破壊条件を捉えるものではない。また、最大荷重や最大抵抗モーメント点を大きく超える荷重を受ける構造の変形限界を把握するには、実管もしくはその縮小モデルでの破壊実験、形状を単純化した試験片による確認など経験的評価が現在のところ主流となっている。しかし、大規模地震に起因する地盤の液状化や地盤変状によるパイプラインの大きな変形をも考慮に入れる必要性が生じ、鋼材の弾性域だけでなく、塑性域までも設計範囲に取り込む動きが構造設計分野で高まっている。その一方法として、鋼管の破壊に至る限界変形量を基準値とした設計を行なうことが考えられている。

本研究では、鋼製パイプラインの中でも変形が相対的に集中する曲り管を対象に、従来の研究対象にはなかった降伏後の変形限界強度の評価・予測方法を主に論じている。材料、形状・寸法の異なる複数の鋼製曲管の面内曲げ破壊実験を実施し、実管の変形限界を確認するとともに実験を模擬する弾塑性大変形有限要素解析を実施し

た。鋼材の破壊評価法として、まず、主応力・平均応力・相当塑性ひずみの3パラメータを用いて材料の変形限界評価面を材料試験から設定し、この実験結果と弾塑性大変形有限要素解析の結果とを併用する変形限界評価・予測方法を提案した。本研究での評価結果を従来の破壊評価方法に基づく結果と比較し、提案した評価方法の優位性を示している。

本論文は以下のように全6章により構成されている。

第1章では本論文の総括的な序論として、研究の背景について概説するとともに、鋼製パイプラインの損傷要因と過去の損傷事例を紹介した。

第2章では、第1章で取り上げたパイプラインの損傷形態に対する従来の設計や安全性評価に関する手法について記した。従来の強度評価方法では不十分な研究課題を示し、その課題を解決するための手順を説明するとともに本研究の意義を明確にした。

第3章では、鋼製曲り管を対象に最大抵抗モーメント点を超える荷重領域における破壊の形態を実管実験によって明らかにし、実験を模擬した数値解析を合わせて実施して破壊に至るまでの発生ひずみの傾向や変形限界を解析的に示した。

第4章では、実管実験と同グレードの材料を用いて形状・寸法の異なる切欠付き丸棒引張試験を複数実施し、変形限界評価に必要な基本データの蓄積を行なった。同一材料でも、応力・ひずみ履歴が異なる場合には、破壊発生点における延性強度が変化することを明らかにし、その傾向と定量化について示した。

第5章では、第4章の材料の破壊挙動で得られた結果を用いて鋼管の大変形状態における破壊挙動を予測・評価する条件式を導出し、実管実験で生じた破壊の位置や破壊に至るまでの変形量について定量的な評価を行なった。

第6章では、本研究で得られた結果を総括するとともに、鋼製パイプラインの変形限界強度の今後の展望や課題についてまとめている。

これを要するに、著者は、鋼製パイプラインの変形限界に対する新たな評価法を提案し、既往研究による評価との比較を通して提案した評価法の優位性を示すなど、機械工学、特に鋼製パイプラインの安全性評価技術の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学 博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。