

博士論文（要約）

非線形有限要素解析を活用した
高圧ガスパイプラインの
構造健全性評価手法に関する研究

三津谷 維基

ガスパイプラインネットワークを用いエネルギーセキュリティの向上とエネルギーコストの極小化を図るための方向性として、「更なる高圧化による輸送効率の向上」・「設計および運用自由度の向上」・「新たな被害形態に対する評価手法の整備」の3つが挙げられる。

本論では、上記各項目の実現に資する研究課題を、力学的現象の類似性から、「地震動による軸圧縮座屈」、「液状化時の地盤変位に伴う曲げ破断」、「他工事損傷等に起因する大規模な内圧破壊」、の3つに分類した。これらは塑性変形・座屈・平滑部での破断・き裂の伝播といった、非線形あるいは動的な現象であるため、有限要素解析を用いることでより現象に対する理解が進み、より合理的な設計や維持管理が可能となると期待される。

このような背景のもと、非線形有限要素解析を活用した高圧ガスパイプラインの構造健全性評価手法に関する研究に取り組んだ。本研究で得られた成果を以下に総括する。

第2章では、2007年の中越沖地震にて初めて顕在化した小口径管の長柱座屈を対象とした評価手法を提案した。

- ・ 降伏棚を有せず降伏開始直後から連続的な硬化が生じる Round-house 型の材料を対象とした座屈開始ひずみの算定式を提案した。これは、Timoschenko により提案された弾性床上梁の式をベースとし、材料特性の非線形性を考慮するための接線弾性係数理論等による修正を加えたものである。
- ・ この算定式によると、口径が小さくなるほど長柱座屈時の座屈開始ひずみは小さくなる。これに対し、提灯座屈時の座屈開始ひずみは口径が小さくなるほど大きくなる。この傾向は、既往地震で見られた実被害と整合することを確認した。これらのことから、小口径管では、提灯座屈に比べ長柱座屈の方が懸念すべきモードであることを明確にした。
- ・ 降伏棚を有する Luders elongation 型については、有限要素解析により座屈開始ひずみを算定し、口径が大きくとも弾性限界で座屈が生じるという結果を得た。これは、これまでの大規模地震で長柱座屈が頻発していないという経験的事実に反する。
- ・ 長柱座屈に至る変形の過程で、周辺地盤と鋼管の相対変位が逆転することにより、座屈変形の進行を抑制する効果が働く。この効果を加味することができるサブモデリング手法を提案した。本手法を用いることで、Luders elongation 型であっても口径が大きいほど耐震性に優れることを示すと共に、大規模な地震が作用した場合でも微小な変形レベルに留まることを示した。

第3章では、高圧ガスパイプラインを対象とした供用適性評価手法構築の一環として、

外面減肉を有する鋼管の繰り返し地震荷重に対する耐震性の評価手法を提案した。

- ・ 繰り返しの変形挙動を有限要素解析で再現するにあたり、移動硬化成分の基礎的特性についての検討を実施した。振幅の異なる低サイクル疲労試験から得られた移動硬化成分は互いに平行であった。また、互いに平行な移動硬化成分を材料特性として定義した場合、得られる応力-ひずみ応答は同一であった。つまり、低サイクル疲労試験時の振幅は、得られる移動硬化成分に本質的に影響を与えない。
- ・ 減肉を有する鋼管に、地震動を想定した繰り返し負荷を与える試験を実施した。これにより、膨らんで数サイクル後に座屈（不安定変形）に至る場合と、へこんで極低サイクル疲労破壊に至る場合の2つのモードが存在することを明らかとした。
- ・ 上記2つのモードの内、膨らんで座屈に至る場合を主な対象とした検討を実施した。低サイクル疲労試験から取得した移動硬化特性と、一方向引張時の応力-ひずみ関係と移動硬化成分の差異で定義した等方硬化特性を用いることで、耐震性を表す指標である座屈に至る繰り返し数が再現可能な手法を構築した。これにより、多種多様な減肉寸法を有する鋼管の座屈に至る繰り返し数の算定が可能となった。
- ・ 本手法を減肉を有する様々な鋼管に適用し、それぞれについて座屈に至る繰り返し数の算定を行った。これらの結果から X65 グレードの鋼管を対象とした座屈に至る繰り返し数の回帰式を得た。この式は、座屈に至る繰り返し数が一方向圧縮時の座屈開始ひずみとの相関を有すること、ならびに、一方向圧縮時の座屈開始ひずみが減肉による断面欠損率との相関を有することに基づいている。

第4章および第5章では、地盤液状化に対する評価手法の高度化の一環として、曲げ変形時の引張側破断に係わる検討を実施した。第4章では高周波バンド鋼管の外曲げ変形を、第5章では高設計係数下で運用される直管の曲げ変形を対象とした。

- ・ 高周波バンド鋼管の外曲げ試験、ならびに、高設計係数下で運用される直管の曲げ試験を実施し、いずれも、曲げ圧縮側で局部座屈が生じ、その反対側の曲げ引張側で破断が生じた。破断部の断面を確認したところ、いずれも板厚の局所的な減少、すなわち、ネッキングを伴うことを確認した。
- ・ 一様伸び以降の応力-ひずみ関係、および、降伏曲面を材料試験により取得し、これを有限要素解析の入力条件として与えることで、引張側破断の発現のみならず、破断に至るまでの変形量が精度良く再現できることを示した。また、引張側破断が生じる際には局所的な板厚の減少が急激に進行するため、材料そのものの破壊限界は構造としての破断限界に大きな影響は与えず、材料の変形特性が構造としての破断限界を支配することを示した。
- ・ 今回試験に供した材料の降伏曲面は、いずれも Mises の降伏曲面よりも内側であった。

すなわち、Mises を仮定した場合よりも低い二軸応力レベルで変形が進行する材料特性であった。また、圧延過程に起因する丸棒引張試験片の断面扁平が顕著であるほど、降伏曲面の Mises からのずれが大きい傾向にあった。

- 様々な応力-ひずみ関係を仮定し、高設計係数下で運用される直管が破断に至る限界曲げ角度の算定を行った。その結果、限界曲げ角度は降伏比よりも一様伸びに依存するという結果を得た。
- 高設計係数下で運用される直管が破断に至る限界曲げ角度 ω_{cr} を、座屈開始までの曲げ角度 ω_{cr1} と、座屈開始から破断までの曲げ角度 ω_{cr2} の和として表すことで、板厚・内圧・設計係数・材料強度の4つの因子が限界曲げ角度 ω_{cr} に与える影響を説明した。座屈開始までの曲げ角度 ω_{cr1} は概ね板厚で整理され、座屈開始から破断までの曲げ角度 ω_{cr2} は概ね設計係数で整理された。

第6章では、非線形有限要素解析を活用していくための基礎的知見として、パイプライン鋼における一様伸び以降の真応力-真ひずみ関係に関する検討を実施した。

- 多数のパイプライン鋼を対象とした丸棒引張試験を実施し、試験中に生じる直径およびくびれ部における曲率半径の変化から、それぞれの材料における一様伸び以降の真応力-真ひずみ関係を取得した。
- Hollomon (指数則)、Ludwic, Swift, Ramberg-Osgood の4種類の関数形が一様伸び以降の真応力-真ひずみ関係を近似しうるかを検討した。その結果、Hollomon や Ramberg-Osgood よりも、Ludwic や Swift の方が近似誤差が小さく、一様伸び以降の真応力-真ひずみ関係を記述するに適していることを示した。
- 一様伸び以前の真応力-真ひずみ関係を用いて一様伸び以降への外挿を行った場合に生じる誤差について検討した。その結果、真ひずみが1.0までの領域における真応力の誤差は、Swift では10.8%、Ramberg-Osgood では13.7%程度であった。
- 引張試験にて一般に取得される、降伏応力・引張強さ・一様伸び、の3つの材料特性値のみを用いて、一様伸び以降の真応力-真ひずみ関係を記述する回帰式を提案した。真ひずみが1.0の時点における真応力の誤差は、4.0%程度であった。この式は、Swift の関数中の係数を回帰的に定めたものであり、一様伸び時に最大応力となる条件により n と α が一様伸び uEL を介して関連づけられること、ならびに、 n と降伏応力 YS の間に相関関係が見られたことに基づくものである。

第7章では、大規模脆性破壊防止のための検討として、鋼管をき裂が伝播する際の動的な応力拡大係数の算定や、拡張有限要素法を用いたき裂蛇行メカニズムの解明を行った。

- 直線状にき裂が伝播する場合を仮定し、定変位を受ける帯板と、内圧を受けるパイプ

について動的な応力拡大係数の算定を行った。その結果、帯板については既存の理論解と一致する解が得られ、き裂伝播速度の増加に対し応力拡大係数は単調に減少した。一定内圧を受けるパイプでは応力拡大係数の速度依存性は複雑な挙動を呈したが、これは開口部内面が受ける内圧により生じる曲げ負荷により説明ができる。き裂伝播速度が小さい場合には、静的な場合と同じく内圧により開口部内面を押し広げる効果がそのままき裂先端に作用するため応力拡大係数は増加する。伝播速度が中程度である場合には、曲げ負荷によりき裂先端の前方に生じる圧縮場中にき裂が位置するため、応力拡大係数は低下する。これより伝播速度が大きい場合には曲げ負荷がき裂先端に作用するより前にき裂が前方に伝播する事から、帯板の場合と同じ解となる。

- 開口部からのガスの流出に伴う減圧を加味した場合には、き裂の伝播速度に応じて異なる結果が得られた。き裂伝播速度が 400 m/s の場合には、一定内圧を仮定した場合よりも応力拡大係数は小さな値となったのに対し、500 m/s の場合には、一定内圧を仮定した場合と同じ値となった。これらは、ガスの減圧波が伝わる速度である音速と、き裂伝播速度の大小関係により説明ができる。
- 鋼管を脆性き裂が伝播する際に見られるき裂蛇行のメカニズム解明のため、拡張有限要素法を用いた現象の再現を行った。予備的検討として、二軸負荷を受ける平板でのき裂伝播経路を算定し、既往の試験結果と同じく二軸応力によりき裂が逸れるという解を得た。これにより手法の有効性を確認した。本手法を鋼管に適用し、鋼管で見られる脆性き裂の蛇行挙動を数値解析上で再現することができた。管軸方向に直進していたき裂が管周方向に逸れるのは、開口部内面に作用する内圧が曲げ応力場を形成し、これにより管周方向への圧縮応力が生じるためである。管周方向に逸れたき裂の向きが管軸方向に戻るのは、開口部の延長線上に生じる管軸方向に引張の応力場と釣り合いをとるために、開口部延長線上側部に圧縮の応力場が形成されるためと考えられる。

以上