

報告番号	乙 第 7367 号
------	------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 局部変形を有する鋼管パイプラインの地震時の変形特性に関する研究

(Study on Seismic Deformation of Locally deformed Steel Pipes)

氏 名 菅沼 淳

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、局部変形（デント）を有する鋼管パイプラインに、地震時を想定した大きな外力が载荷された場合にどのような変形を生じるかを研究した成果をまとめたものである。鋼管パイプラインに建設重機からの衝撃や地盤沈下などによってデントが形成された場合、健全な状態に比べて強度や変形性能が低下することになるが、デントの状態によってどの程度低下するかを解析により算出し、耐震性を検討している。

第1章では、はじめにデントの定義、デントの存在で想定されるリスクを提示し、研究の背景を説明した。次に、デントを有する鋼管パイプラインの耐荷重に関する既往の研究の動向と現状をレビューし、本研究の位置づけや目的を明確にした。

第2章では、デントが形成された鋼管の実管を使用した軸圧縮座屈実験の内容と、有限要素解析による実験結果の再現状況を示した上で、部分的にデントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈解析モデルの作成方法および軸圧縮座屈特性の評価方法について、妥当性と合わせて説明した。実管実験では、日本産業規格準拠の鋼管（管径 400mm）と、米国石油協会規格準拠の鋼管（管径 600mm）の2種類で実験を実施した。いずれも、都市ガス事業者にて供用中の都市ガス導管で発見され、デントが形成された部分を切り取って、供試体として使用している。

次に、実験結果を再現できる有限要素解析モデルの作成を試みた。解析モデルの作成にあたり、デントが形成された部分の残留ひずみの影響に着目し、上記の実験結果に対し、それぞれ残留ひずみの無いモデルと残留ひずみを考慮したモデルの2通りを用意して実験結果の再現を試みた。解析の結果、両方のモデルとも実験結果を十分精度よく再現できた。実際

の鋼管パイプライン運用現場でデントが発見された際、修繕や取り替えの判断を迅速に行う必要があることを考慮し、以降の研究では、解析時間が少なくてすむ残留ひずみの無い解析モデルを用いてパラメータスタディを実施することを決定した。

次に、パラメータスタディに用いる解析モデルの長さを検討した。地中に長大に埋設されている鋼管パイプラインの局所にデントが形成された場合の挙動を再現でき、かつ解析計算が高負荷となり過ぎず、現実的に計算可能なモデルの長さを見極めるためである。検討にあたり、鋼管杭の耐震設計の考え方を参考にし、理論上十分に長いと見なせる解析モデル長さを Chang の方法を適用して算出した。そして、理論上十分に長い解析モデル（長さ 52D、D は管径を表す）の他、長さ 20D、長さ 10D の解析モデルで軸圧縮解析結果を比較した。結果として、長さ 52D および 20D の解析結果（ひずみの分布）には差がなかったが、10D の解析結果はひずみの分布が異なる結果となったため、パラメータスタディに用いる解析モデルの長さは 20D と決定した。その上で、デント部の集中座屈の影響を受けない位置（すなわち、十分に長い鋼管パイプラインとしての軸圧縮座屈特性を判断できる位置）をデントから 8D 離れた場所に定め、荷重が最大の時のデントから 8D 離れた位置での軸圧縮ひずみを局部座屈開始ひずみとして定義した。

第 3 章では、第 2 章で作成した解析モデルを使用して、都市ガスパイプラインの形成に使用されている鋼管を対象として、デントの形状、深さ、運用圧力（内圧）や埋設条件の考慮などを組み合わせた軸圧縮座屈解析パラメータスタディの結果を行った結果を紹介した。対象として、日本産業規格準拠の鋼管（管径 400mm）と、米国石油協会規格準拠の鋼管（管径 400mm）の 2 種類を選定した。

最初に、想定するデントの形状について分類した。鋼管パイプラインの敷設環境およびデントが形成される過程を勘案し、線状デントと面状デントに分類した。この形状の選定は、第 2 章に示した供用中の都市ガス導管で発見されたデントの形状に基づいている。

次に、デントの深さを設定した。海外の報告書では、パイプラインの補修の要否の判断基準の 1 つとしてデントの深さを設けており、深さが管径の 10% を超えるケースは速やかに補修が行われると定められている。裏を返すと、深さが 10% を超えないデントが形成されている場合、速やかな補修がなされず、鋼管パイプラインの運用が継続される可能性がある。よって、運用が継続される鋼管パイプラインの条件として、デントの深さの最大値を管径比 10% として、3%、6% と段階的に定めた。そしてデントの深さ別に軸圧縮解析を行い、局部座屈開始ひずみを求めた。デントが深いほど鋼管パイプラインに生じる局部座屈開始ひずみが小さくなり、座屈に至りやすいことが判明した。

他のパラメータとして、鋼管パイプラインの実際の運用状況を考えた内部圧力を設定した。また、実際に埋設されている環境から土圧および地盤ばねを設定した。それぞれ、考慮・未考慮の違いによる局部座屈開始ひずみを算出した。解析の結果、内部圧力の有無による局部座屈開始ひずみの違いはごくわずかであることが判明した。一方、土圧および地盤ばねを考慮することで、局部座屈開始ひずみは向上する、すなわち座屈しにくくなるこ

とが判明した。また、内部圧力と土圧および地盤ばねを同時に考慮すると、それぞれ別々に考慮した場合に確認できた局部座屈開始ひずみの足し合わせ以上に局部座屈開始ひずみが向上する「相乗効果」も確認された。

最後に、面状デントと線状デントの違いによって軸圧縮座屈解析結果を考察すると、デント深さが同じ場合、常に線状デントの方が局部座屈開始ひずみが小さい結果となった。線状デントを有する鋼管パイプラインの方が、面状デントを有するものよりも軸圧縮座屈への耐性が低くなる傾向が強く現れている。

第4章では、デントを有する鋼管パイプラインの実管を使用した曲げによる局部座屈実験の内容と、有限要素解析による実験結果の再現状況について示した。そして、曲げによる局部座屈に関する今後の研究課題を示した。

実験は、日本産業規格準拠の鋼管（管径 200mm）を使用し、(1) 健全管曲げ (2) デント管腹側曲げ (3) デント管側方側曲げ の3通りの実験を行った。鋼管パイプラインが曲げ変形を受ける状況として、液状化による地盤の側方流動や沈下を想定した。その際に地盤が変位する方向と、鋼管パイプライン上にデントが形成され得る位置の関係を検討して、上記

(2) (3) の曲げ方向を決定した。曲げモーメントが最大となる曲げ治具の変位を超え、4倍程度の変位となるまで実験を続けた。実験結果は、(1) と (3) が最大曲げモーメントまではほぼ同じ挙動をした。(3) は曲げ角度が 15deg.を超えたところでデントが曲げ荷重に対する抵抗となり、荷重が下がらずに供試体が曲げ治具と共にねじれ始め、35deg.を超えたところで実験装置の一部が破壊したため、実験を終了した。(2) は、曲げ荷重およびひずみがデント部に集中し、(1) や (3) に比べて小さい曲げモーメントで曲げ座屈が始まった。

(1) ~ (3) いずれも、実験装置の限界まで曲げ変形を与えても管体の亀裂などは生じなかった。

次に、実験結果を再現できる有限要素解析モデルの作成を試みた。第2章と同様の考え方で、実験 (2) と (3) はデントが形成された部分の残留ひずみの影響について着目し、残留ひずみの無いモデルと考慮したモデルの2通りを用意して実験結果の再現を試みた。残留ひずみを考慮したモデルの方が実験結果を精度よく再現でき、第2章とは異なる結果となった。この理由は、デント部がひずみ硬化しており、硬化した部分を曲げ変形させるためには硬化前より大きな荷重が必要となることが発現したためであると考えられる。

今後の研究課題として、上述の定性的な考察からさらに進め、デント部の再変形挙動を解明すること、実験と解析、パラメータスタディを積み重ね、鋼管パイプラインの曲げによる局部座屈に対する耐震性を解明していくことを挙げている。

第5章では、第3章で示した軸圧縮座屈パラメータスタディの結果を、鋼管パイプラインの耐震性の検討方法に照らして、耐震性を判定した。まず、耐震性の検討を進める上での基本的知識として、パイプラインの耐震性検討の考え方や手法について紹介し、本論文で採用する耐震性の判定の考え方を示した。その上で、第3章で得た結果について、具体的に耐震性を判定した。なお、耐震性判定の対象として第3章で示した日本産業規格準拠の鋼管と、

米国石油協会規格準拠の鋼管の2種類の結果に加え、米国石油協会規格準拠の鋼管2種類(管径 600mm) についても第3章と同様な有限要素解析を追加で実施した上で、それぞれの鋼管について、実際の敷設環境(運用圧力(内圧)や埋設条件)を考慮した場合での耐震性を判定した。地震時に鋼管パイプラインに発生し得るひずみと、局部座屈開始ひずみの大小の比較を行うことで耐震性を判定した。前者が後者を下回れば耐震性を有することになる。

結果として、レベル1地震動に対してはすべての鋼管で耐震性を有していた。レベル2地震動に対しては、日本産業規格準拠の鋼管はデント深さが3%を超えた場合、米国石油協会規格準拠の鋼管の一つはデント深さが6%を超えた場合で、かつ一部の軟弱地盤に埋設されている場合には耐震性の要求水準を満足しないという結果となった。

第6章では本論文の結論を整理し、今後取り組むべき課題を明確にするとともに、研究の将来展望を述べた。