

外-21-23

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

Study on Large Deformation Behavior of Buried  
Pipelines with Elbows Subjected to  
Permanent Ground Deformation  
永久地盤変位に対する曲管を有する埋設  
パイプラインの大変形挙動に関する研究

申 請 者

吉崎 浩司

Koji Yoshizaki

2001年12月



理 2702 ( 3357 )

社会基盤であるガス、水道、電気、通信などのシステムは、総括してライフラインと呼ばれており、人々の生活を定常的に支えている。そのライフラインの中でも、地中に埋設されるガスや水道などのパイプラインは、周囲の地盤に拘束されているため、地震時の地盤の動きに大きな影響を受け、場合によりライフラインとしての機能を損失する可能性もある。従って、地震発生時にもライフラインとしての機能を果たし、また最悪でも二次災害を引き起こさないためには、埋設パイプラインの建設および維持管理において、地震時に想定される影響を十分考慮に入れることが肝要である。

過去に都市近郊にて発生した比較的大規模な地震を振り返ってみると、地震の揺れそのものだけではなく、幅数百メートルの地盤が一方向に数メートル変位する「永久地盤変位 (PGD: Permanent Ground Deformation)」によって、埋設構造物に甚大な被害が生じたことが報告されている。特に1964年新潟地震や1971年サンフェルナンド地震、1983年日本海中部地震、1994年ノースリッジ地震、1995年兵庫県南部地震などでは、傾斜地盤や護岸部において、地盤の液化化による側方流動などの永久地盤変位の影響を受け、ガスや水道などの埋設パイプラインに多くの被害が発生した。また、それらの被害の多くは、老朽化により強度の低下した継手部に発生し、比較的新しい溶接鋼管は高い耐震性を示したが、その中でたわみやすい曲管部において大きな変形や被害が見られた。従って、永久地盤変位が予想される箇所での溶接鋼管の設計及び維持管理には、曲管部の大変形特性を考慮に入れた評価手法が必要であるが、既存の耐震設計指針においては永久地盤変位が考慮されておらず、また最新知見においても、溶接鋼管の大変形特性を考慮した評価手法は研究途上である。そのため、パイプラインの極限状態までの大変形特性を考慮に入れた、新しい評価手法の確立が望まれている。

そこで本論文では、たわみ性が高く変形や被害が見られた曲管部について極限状態までの耐震強度を実験的に検討した上で、永久地盤変位を受けた時の曲管部を有する溶接鋼管について、変形性能を最大限活かした耐震性評価手法を提案した。

本論文は7章から構成される。

第1章は序論であり、埋設パイプラインに関して地震時に考慮すべき事項を述べ、埋設パイプラインの変形性能を最大限活かした耐震設計・維持管理の必要性を論じた上で、本論文の目的および構成を述べた。

第2章では、これまで日本やアメリカ、およびその他の国で過去に発生した大規模地震において、液化化による側方流動、地滑り、断層地盤変位など、数十cmから数mの残留変位量を有する大規模地盤変位の影響による埋設パイプラインの被害状況を概観した。種々の埋設パイプラインにおいて過去の地震時の永久地盤変位により被害が多いのは老朽化した継手部であり、溶接鋼管は高い耐震性を示したが、たわみやすい曲管部では大きな変形や被害が見られた。そこで、曲管部

の変形挙動を評価する手法について、現行の耐震設計指針や最新の研究成果を概観した。3%程度のひずみを限界値とする現行の設計指針では、曲管部の漏洩や破壊など極限状態までの大変形挙動を評価することは困難である。また曲管の変形挙動について実験的な検討を実施した研究もあるが、ひずみ計測は数%にとどまっているものがほとんどである。従って、永久地盤変位に対する、埋設パイプラインの極限状態までの大変形特性を考慮に入れた耐震性を評価するためには、実験による定量的な評価に基づく新たな評価手法が必要であることを述べた。

第3章では、溶接鋼管のうち、たわみ性が高く過去の地震時に変形や被害が生じている曲管部について、極限状態までの大変形特性を評価する実験について述べた。口径、内圧、中心角度をパラメータとした様々な曲管部に対して、面内曲げ実験を実施し、内曲げ方向には曲管部の両端が接触するまで、外曲げ方向には座屈や破壊が生じるまで変形させ、曲げ角度、曲げモーメント、局所ひずみ、断面偏平を測定することにより大変形特性を明らかにした。その結果、内曲げについては、すべての曲管において、極限までの曲げにより30%以上の局所ひずみが発生した場合にも漏洩の発生が見られなかった。それに対し外曲げについては、口径、内圧、および中心角により変形挙動が異なり、曲管部中央に座屈変形が発生し載荷装置の荷重限界時点では漏洩が発生しなかった場合と、曲管と直管の接合部のうち一方の溶接線近傍の直管母材部に引張破断が生じて漏洩に到った場合があったが、いずれの場合にも、発生した局所ひずみは30%もしくはそれ以上であった。また、地震時の側方流動などの永久地盤変位は動的に発生すると考えられるため、動的荷重が作用した場合のパイプラインの変形挙動、つまりパイプライン用鋼材におけるひずみ速度依存性について、高速引張試験を実施して評価した。その結果、永久地盤変位発生時に想定されるひずみ速度の範囲では、引張強度、伸び共に、準静的載荷による結果とほぼ同等もしくは若干大きくなる傾向が見られ、準静的に実施した曲げ変形実験は動的載荷時の変形挙動の評価としても妥当であることを述べた。

第4章では、曲管部の大変形特性を評価する手法を確立することを目的として、FEM (有限要素法) 解析の適用性について検討した。埋設パイプラインの設計時に弾性範囲内の変形挙動を評価する際には、一般的に応力集中係数やたわみ係数を考慮に入れた梁要素が用いられるが、断面偏平や局部変形が大きい曲管部の塑性変形挙動を再現することは困難であるため、板状の要素であるシェル要素を用いたモデルを用いて、前述の曲管部の曲げ変形実験の解析を実施した。その結果、曲げ変形実験における曲げモーメント、30%程度の局所ひずみ、内曲げ時の偏平挙動、外曲げ時のひずみ集中、口径や内圧による変形挙動の違いなどについても精度良く再現できることを検証した。更に、解析モデルにおける要素分割方法について感度解析を実施し、標準的な解析モデルを設定した。

第5章では、曲管部を有し、埋設環境にある長いパイプラインに対して、永久地盤変位の影響を直接入力することができ、かつ限界状態までの大変形特性を評価することができる解析モデルを提案した。そのモデルは、変形が大きい曲管部周辺にはシェル要素、さほど変形が大きい直管部分には梁要素を用いたハイブリッド型のモデルである。パイプラインは、永久地盤変位により地盤から力を受けるが、地盤と管の相互作用であるその地盤拘束力は、管の軸方向、軸直角方向に離散化した非線形のばね要素を用いてモデル化した。更に、提案した解析モデルの妥当性を検証するために、曲管を有する埋設パイプラインに対して永久地盤変位を作用させた実規模実験を実施した。実験は、90度の曲管を一つ有するL字型のパイプラインを、幅8.7m、60トンの砂を用いた地盤に埋設し、その一部である幅6mの地盤をクレーンにより1m水平方向に変位させる実験である。その結果、提案した解析モデルにより、永久地盤変位を受けた曲管を有する埋設パイプラインに発生する大変形挙動を精度良く評価できることを検証した。なお、砂地盤と管の相互作用について過去に実施された実験的検討のほとんどが乾燥砂を用いた検討であるが、実際にパイプラインが埋設される環境では湿潤砂であることも多いため、部分飽和土を用いた実験も実施し、含水比による挙動の違いも検討した。その結果、適切な修正係数を用いることにより、提案した解析モデルが部分飽和土に対しても有効であることを検証した。

第6章では、前章にて提案した解析モデルを用いて、永久地盤変位を受けたときの曲管部を有する埋設パイプラインの大変形挙動について、ある一つの形状のパイプラインを例に取り、永久地盤変位の幅、分布形状及び変位の方向、曲管部の中心角がパイプラインの大変形挙動に及ぼす影響について解析的に検討した。その結果、曲管部に発生するひずみ量は、永久地盤変位の幅が一定値以上になると分布形状によらず一定になること、また永久地盤変位の方向が曲管に対して対称になったときに曲管のひずみが最大となることが分かった。更に、それらの傾向を踏まえ、提案した解析モデルを用いて耐震性を向上させるための手段について解析的に検討した。その結果、曲管部のみの板厚を大きくしても耐震性は向上しないが、実験にて破壊を生じた曲管部近傍の直管の板厚を大きくすることにより、発生ひずみが大きく軽減された。また、曲率半径の大きい曲管を用いることでひずみは軽減されるが、板厚の大きい直管を用いることにより同様のひずみ軽減効果が得られ、局所的な耐震補強が可能であることが示唆された。

最後に第7章では、本論文にて得られた成果や知見について総括し、結論を記述した。