

京都大学	博士 (工学)	氏名	FARZAD TALEBI
論文題目	STUDY ON BEHAVIOR OF BURIED PIPELINES SUBJECTED TO EARTHQUAKE FAULT MOVEMENT BY ANALYTICAL, NUMERICAL AND EXPERIMENTAL APPROACHES (解析的・数值的・実験的アプローチに基づいた断層変位による地下埋設管の挙動に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>断層変位を受ける地下埋設管の挙動解析については、これまでの研究により多くの有用な知見が得られているが、管軸および管軸直交方向の地盤と管路の相互作用、および管路の幾何学的非線形による軸力の変動等に関する検討は、線形範囲においてさえ適切に考慮されているとは言い難い。したがって、これらの影響を考慮した方程式を提案し、周辺地盤と管路との軸方向および軸直角方向の非線形相互作用の影響を可能な限り正確に組み込んだ解析的解法の開発が急務である。この問題点を解決できる包括的な解析的解法を確立し、それを地下埋設管の設計ガイドライン等に資するものにするには、まず断層を横切って埋設されるような地下埋設管の挙動を評価し、地盤と管路の相互作用および地下埋設管の強度に関する諸条件と有効なパラメータとを抽出するとともに、実際の実験結果に照らし合わせてその有効性を確認する必要がある。</p> <p>このような背景の下に、以下に本研究で行ったこと、および得られた成果を各章ごとに示す。</p> <p>第 1 章では、論文の背景および過去の研究とその問題点を概説し、本研究の目的と論文構成について述べた。そして、特にライフラインに被害を与えた歴史地震と 2017 年のイラン・サーポールーザハブ地震におけるライフラインシステムの被害調査結果について報告した。2017 年 12 月 24 日から 28 日まで、JSCE の共同チームによる迅速な調査に同行し、地下埋設管を中心としたライフラインシステムと構造物被害についてその原因を考察するとともに、調査で得られた成果を述べた。</p> <p>第 2 章では、既往の地震断層運動の影響を受けた埋設管の研究に用いられている FEM ベースの実験的および解析的手法に関する文献のレビューを行っている。</p> <p>第 3 章では、横ずれ断層と交差する横断管路において、地下埋設管性能に及ぼす軸方向の地盤と管路の相互作用の影響評価を行った。横ずれ断層における管軸方向の地盤と管路の相互作用による埋設管の挙動の変化を FEM で解析し、軸力と管軸方向の地盤と管路の相互作用と埋設管の挙動との関係を検討した。FEM 解析により、管軸方向の地盤と管路の相互作用および地下埋設管の軸力が地下埋設管に及ぼす影響を調査し、管軸方向の地盤と管路の相互作用ばねに関係する有効なパラメータを導出した。これは、特に弾性範囲内での解析に有用である。FEM ベースの解析の検証のため、横ずれ断層と直交する埋設管のケースに対して、弾性床土上の梁理論に基づく既存の解析的解法との比較を行った。さらに、永久変位を受けた地下埋設管の力-変位関係に対する鋼管材料の非線形性の影響について検討を行った。この FEM 解析は、大きく変位した横ずれ断層と交差する鋼製埋設管の非線形性を評価するために行った。鋼管材料の非線形性の影響をより深く理解するために、弾性管路材料についても、さまざまな断層角度に対して非線形性を有する地盤と管路の相互作用を適用して解析を行った。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	FARZAD TALEBI
------	---------	----	---------------

第 4 章では、横ずれ断層運動を受ける埋設管の問題に対し、軸力を考慮した新たな線形支配方程式とそれに対応する解を提示した。この支配方程式では、線形の軸方向の地盤と管路の相互作用、摩擦による軸力項、および支配方程式内の幾何学的非線形効果によって生じる軸力を考慮している。まず、線形軸方向の地盤と管路の相互作用項、軸力項、および幾何学的非線形性に起因する軸力を、閉形式の解として導出した。次に、横ずれ断層を横断する埋設管の新しい支配方程式を導いて対応する解法手順を提示し、FEM モデルで検証した。最後に、新しい支配方程式と検証済みの FEM モデルの結果を比較し、新しい解析方法により、線形解析の解析的解法の精度が大幅に向上することを確認した。ただし、本章では、管軸方向および管軸直交方向の地盤と管路の相互作用の非線形性は、支配方程式では考慮されていないが、次章以降でこれらの非線形性の影響を取り入れている。

第 5 章では、完全弾塑性復元力特性を有する管軸方向の地盤と管路の相互作用と弾塑性の管軸直交方向相互作用、および対応するこれまでの解法を含む新しい統合的な支配方程式を提案した。ここには、埋設管のすべりの影響、管軸直交方向の土の弾塑性復元力特性、および管路の幾何学的非線形効果が含まれている。弾塑性床上の梁としての検討に際しては、地下埋設管全体の伸長に対応する支配方程式を提案し、非線形支配微分方程式内に管軸直交方向に対応する弾塑性相互作用ばねを導入した。最後に、非線形支配方程式の解析手順を改良し、この解析解の結果を検証済みの FEM モデルを使用して詳細に検証した。導入された方法論は、過去の研究結果を大幅に改善し、解析法の適用範囲を大変形にまで拡張できることを示した。

第 6 章では、FEM モデリングアプローチの適用範囲と、断層を横切る埋設管の損傷基準を評価するために、3次元ソリッド要素とシェル要素を用いた非線形 FEM モデリングアプローチと 3次元非線形ビームスプリングモデリングアプローチを考え、それらの適用範囲と相互比較を行った。さらに、管路の地震時挙動と損傷の基準（引張破壊、局部座屈、楕円化断面歪みなど）を、3次元非線形 FEM 解析によって評価した。これらの解析には、地盤材料、管路材料、接触面、および幾何学的非線形を含むすべての非線形性を考慮している。

第 7 章では、これまでの数値解析手法の検証のための実物大実験について述べている。断層を跨ぐ地下埋設管の問題に関する解析手法と FEM ベースの研究を紹介した後、横ずれ断層に直交して埋設された水道配水用 HDPE (High Density Polyethylene) 管を対象に、実物大の管路を埋設した土槽実験を行った。断層に直交する形で土槽に埋設された HDPE 管に対して、アクチュエータで土槽に双方向変位を与える形で載荷を行った。相対密度を変えた 2 種類の砂質土の土槽に対してそれぞれ実験を行い、その結果を 3次元 FEM 解析結果と比較した。さらに、90度の横ずれでの埋め込み HDPE 管に対する重要なパラメータの影響を調べ、HDPE 管の変形性能評価と数値解析の検証、および水道配水用 HDPE 管の耐震設計手法を改善するための方策を検討した。

第 8 章では、本研究の結果を要約し、結論を述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、断層変位を受ける地下埋設管の問題を、地震現地調査、解析的安定性解析、数値 FE ベースの解析、実物大の実験について、包括的な観点から研究を行ったものである。本研究で行ったこと、および得られた成果は以下のとおりである。

(1) 2017年のイラン・サーポールザハブ地震によるライフラインシステムの被害調査を行った結果、地中埋設管が広範囲にわたり損傷を受けたことがわかった。これらライフライン被害は、地震後の被災地の復旧を大きく妨げたことから、断層運動による大きな揺れと変位を受けた地下埋設管の耐震解析が重要な課題であることを確認した。

(2) 断層変位を受ける地下埋設管の挙動解析については、管軸および管軸直交方向の地盤と管路の相互作用、および管路の幾何学的非線形による軸力の変動等に関する検討は、線形範囲においてさえ適切に考慮されているとは言えない。そのため、まず有限要素解析によって、横ずれ断層を横断する管路に対して、管軸方向の地盤と管路の相互作用が埋設管の性能に及ぼす影響評価を行った。さらに、大変形を受けた地中埋設管の幾何学的非線形性、および材料非線形の影響によって生じる管軸方向の力を導出した。

(3) 前述の手順に基づき、横ずれ断層運動を受ける埋設管の問題に対し、軸力を考慮した新たな線形支配方程式とそれに対応する解を提示した。さらに、完全弾塑性復元力特性を有する管軸方向の地盤と管路の相互作用と、弾塑性の管軸直交方向相互作用、およびこれまでの解法を統合した新たな支配方程式を提案した。ここでは、埋設管のすべりの影響、管軸直交方向の土の弾塑性復元力特性、および管路の幾何学的非線形効果を含んでおり、本方法が、これまでの研究結果を大幅に改善し、解析法の適用範囲を大変形にまで拡張できることを示した。

(5) 断層による管路の変形問題について、3次元ソリッド-シェル非線形 FEM モデリングアプローチと 3次元非線形ビーム-スプリングモデリングアプローチの比較検討を行った。その結果、断層を横切る埋設管の損傷基準を評価するためのモデリングアプローチと適用範囲が明らかになった。

(6) 最後に、横ずれ断層に直交して埋設された水道配水用 HDPE (High Density Polyethylene) 管を対象に、実大管路を埋設した土槽実験を行った。並行して、3次元 FE モデルを作成し、埋設 HDPE パイプラインの挙動を詳細に調査した。その結果、小口径 HDPE パイプが、横ずれ断層運動に対して優れた耐震性を備えていることが分かった。

以上より、本論文は地盤や管路材料の非線形性を考慮した地下埋設管に対する解析的、数値的、実験的アプローチに基づき、地下埋設管の設計ガイドライン等に資する一連の耐震性評価手法を提示することに関して、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年7月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

氏名	FARZAD TALEBI
----	---------------

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

