

氏 名	佐 藤 紘 志
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 60 年 6 月 12 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 42 年 3 月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	埋設管路の弾塑性解析とその応用に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 佐武 正雄 東北大学教授 倉西 茂 東北大学教授 尾坂 芳夫 東北大学教授 柳沢 栄司

論 文 内 容 要 旨

埋設管路の地震時における安全性を確保し、配管システムとしての信頼性を高めるためには、配管系を構成する各要素の地震時挙動を明らかにし、その耐震性に影響する重要因子について正しい評価を行わなければならない。このような埋設管路の耐震性評価の目的は、既設の配管系に対する安全性の評価とともに、新設の配管系に対する耐震設計法の確立という二つの面をもっている。この目的を達成するためには、管体材料の力学的特性を正しく認識するとともに、過去の震害記録からの教訓を生かしつつ、相互作用をもつ埋設管路-地盤系の立場から地震応答解析法の確立を図ることが必要である。

地中に埋設された管路の地震時挙動においては、これまでの研究からその慣性による運動は無視できる程度であって、主として周辺地盤の変形に支配されることが明らかにされている。したがって、埋設管路-地盤系の地震応答解析にあたっては、一般には系を支配する動的平衡方程式から慣性項や減衰項の影響を無視して復元力項についてのみ考慮されることが多い。すなわち、管と地盤との間の相互作用としては、地震時の地盤の変形が地盤の拘束力に係わるばねを介して管に静的に作用するという、いわゆる“応答変位法”の考え方が用いられる。

このことから、石油パイプライン技術基準などでは地盤を表層と基盤の 2 層系で単純化し、基盤に作用する地震動によって生ずる表層地盤の変化による地盤のひずみから管に発生する応力やひずみを算定することとしている。これらの基準では、管体および地盤の拘束ともに弾性的に取り扱わ

れている。しかし、最近制定されたガス導管耐震設計指針では、地盤の影響をすべりを考慮して弾塑性的に取り扱うとともに、管体に対する評価基準として、初めて許容ひずみの概念が採用され、高圧ガス導管に対して許容ひずみ1%を基準とするよう規定している。

埋設管路の耐震設計基準における考え方が許容応力度に関する規定から許容ひずみへ、さらに管体の弾性範囲を越えた塑性ひずみまで許すようになってきたことは注目すべき傾向である。その理由はいくつか考えられるが、その一つは管体材料の高品質化とともに、耐用期間中に1、2度の大地震に対して、管体の塑性域での応答を有効に利用しようという考え方によるものと思われる。

設計面では、このように管体の塑性変形を容認する方向に向っているが、解析面ではこれを考慮した埋設管路―地盤系の弾塑性解析法がいまだ確立されていない現状である。

本研究は、以上のような埋設管路に関する耐震設計基準の変遷や研究の現状から、線形計画法を利用した管体の塑性変形まで考慮できる効率的な埋設管路―地盤系の弾塑性解析法の開発と、各種条件下における埋設管路の地震時挙動の考察を目的に行ったものである。

本論文は全体として8章にまとめた。

まず、第1章では本研究の背景と目的および本論文の構成をのべた。

第2章では、本研究のねらいや対象を明確にすることを目的として現在用いられている埋設管について、その種類や力学的性質およびこれまでの地震における被害の特徴などを整理し、埋設管路―地盤系の耐震性評価に関連する事項を抽出した。また、従来の研究や耐震設計基準の流れとともに現行の耐震設計法の概要についても述べた。

第3章では、埋設管路―地盤系の応答解析に必要な構造系および地盤による拘束の影響のモデル化について整理するとともに、強制地盤変位を受ける埋設管路―地盤系の弾塑性解析法を線形計画法(LP)を用いて定式化した。すなわち、まず直線管路に対しては理論構成に明快な応力法による解析法を提示し、次に曲り部を含んだ複雑な平面管路系の解析のために、数値計算に効率的な変形法に基づく弾塑性解析法を構成した。

本解析手法の主な特長を挙げれば次のようになる。

1) LPを利用した弾塑性増分解析は、ある要素が降伏したのち次の要素が降伏するまでの地盤変位増分 $\Delta\alpha$ を最大にすることを目的関数としているので、埋設管路―地盤系の降伏過程を効率よく追跡できる。

2) 本法では、釣り合い条件、適合条件とともに管体の降伏条件および塑性流れ条件を加えているので、管体の軸ひずみや部材端回転角を塑性域まで正しく評価でき、したがって、管体の塑性ひずみを基準とした最近の耐震設計指針への有用な資料を提供できる。

3) 本法によれば、管路系にある基準の地盤変位分布を与えたときの管路系の降伏過程を、基準の地盤変位に対する倍率を表わすパラメータ α (地盤変位係数)によって追跡できるので、設計地盤変位に対する解析とともに系全体の耐震限界の評価が可能である。

第4章では、第3章で定式化した解析手法を利用して、管軸方向に地盤変形(正弦波状の縦波)を受ける直線埋設管路の弾塑性解析を行い、既存の設計指針との比較を行うとともに、両端に継手をもつ管路の解析を行って、継手剛性の影響などについて考察し、さらに両端が異種構造物に固定

されているようなより実際的な問題についても検討した。

その結果、埋設管路—地盤系には地盤ばねのみの降伏によって系全体の限界状態に達する場合と、一部地盤ばねが降伏しても系全体としては管体の降伏によって限界状態に達する場合の2種類の限界状態があることが判明した。さらに、管路の端部が異種構造物に固定されているような場合には、地震時に大きな塑性ひずみが生ずる可能性のあること、また管体要素の降伏の進行によりそれまで降伏して一定の摩擦力を保っていた地盤ばねに除荷という特異な現象の起こることが認められた。ここでの解析には、地盤ばねや入力地盤変位として標準的なもののみを用いたが、この範囲では、一様な地盤に埋設された直線管路ではかなりの大地震を想定しても管体を破損させるようなひずみは生じないといえる（従来の震害傾向とも一致している）。このことは、実際の埋設管路—地盤系では地盤変位がある程度以上大きくなると管と地盤との間にはすべりが生じ、地盤の拘束力は一定となり、管体の応力（またはひずみ）はそれ以上増加しないという、前述のような限界状態が存在することに对应している。

第5章では、同じく第3章で提案した解析手法を用いて、より複雑な管路として曲り部をもつ平面管路が斜め方向から入射するS波を受ける場合の応答解析を行い、軸ひずみや部材端回転角に対する管種、管径の影響を考察し、併せて波動伝播に伴う地盤変位の繰り返しの影響などおよび入力地震動や地盤ばねに関するパラメータの変化が管路の挙動におよぼす影響を検討した。

その結果、平面埋設管路の弾塑性挙動は、一般に、1) 管軸方向の地盤ばねの降伏から始まり、2) 管軸直角方向の地盤ばねの降伏へ、さらに3) 管体の固定端部、曲り部または直線部での降伏へと進んでいくことが確認された。特に、管体の降伏については管径の大きい管路では、固定端部のほかに曲り部付近など曲げモーメントの卓越する部分で降伏が起り、一方、管径の小さい場合には軸力の卓越する直線部での降伏が進むことが認められた。これらの結果より、第4章で扱ったような直線管路と異なり、曲り部をもつような平面管路の場合、卓越する地震波の波長と管路の形状との関係によっては、地盤変位振幅数 cm 程度でも管体に降伏が生ずることなど、従来からも定性的には指摘されている曲り部や固定部での震害の傾向を説明できている。また本法によれば、従来あまり考慮されていなかった降伏断面に発生する塑性回転角の定量的な評価が可能となった。

第6章では、まず1978年宮城県沖地震や1983年日本海中部地震などで被害の見られた地盤条件の急変部に埋設された直線および平面管路の地震時挙動を考察するため、過去の震害データなどを参考に、泉市南光台地区をモデル化した地盤を対象とした地震応答解析を行い、その結果や既往の研究成果から地盤急変部における地盤変位分布を設定した。次に、それらの地盤変位分布を用いて埋設管路—地盤系の応答解析を行い、管径の影響、曲り部での挙動、地盤変位の繰り返しの影響などについて考察した。

その結果、(1)地盤急変部の管体要素に軸ひずみが集中することや管径が大きい程曲り部における部材端回転角が大きくなること、(2)繰り返し地盤変位を受けるときの曲り部付近の変形状態から、管路系に加えられた地盤変位を、管径の極めて小さいSGP40 A では直管部の軸方向変形で吸収し、管径の大きいSGP200 A では、管体の軸方向の強度が増大するので曲り部の変形で吸収していることなど、先の日本海中部地震での小口径鋼管の被害状況を説明するいくつかの資料が得られた。

第7章では、本研究の成果の実際問題への応用として、第3章で定式化した弾塑性解析法が埋設管路の耐震設計の中で果たす役割について考察した。

その結果、許容ひずみを基準とする最近の耐震設計のもとでは、管体を弾性範囲内でのみ扱う従来の解析法は、大きな地盤変位入力に対して管体に発生するひずみを過少に評価するので、許容ひずみにもとづく設計の場合許容値を小さくするなどの配慮を必要とするが、本研究で構成した弾塑性解析手法は大地震時における挙動解析や許容ひずみ設計に対しても有効に使用できることがわかった。

最後に、第8章では本論文の各章で得られた結果および今後の問題点を述べた。

審査結果の要旨

埋設管路は地震被害をうけると、市民生活に大きい影響を与えることが注目され、その耐震性の向上が急がれている。埋設管路の耐震性を評価するためには、その変形挙動を正しく算定することが必要であるが、管体の塑性化や管体と地盤の間のすべりまでを考慮した一般的解析法は未だ確立されていないのが現状である。

本論文はこの点に着目して、埋設管路の弾塑性解析の定式化を提示するとともに、その解析法を応用して、埋設管路の耐震性について検討したもので、全編8章からなる。

第1章は序論である。

第2章は、多種類の埋設管について、その力学的性質を整理するとともに、近年の地震で注目された埋設管の震害の特徴を明らかにし、また耐震設計法の変遷について考察している。

第3章は本論文の中心で、埋設管路の弾塑性解析の定式化について述べている。すなわち、管体および地盤拘束のいずれについても弾塑性を考慮した管路のモデル化を行い、マトリックス記法による一般的な関係式を導き、降伏の判定や塑性化の進行には、地盤変位増分を目的関数として線形計画法を応用する手法を提示している。この定式化は、一般性が高いばかりでなく、塑性化の進行を地盤変位パラメータによって追跡し、管路の降伏過程の挙動を解明できる点ですぐれている。

第4章では、直線管路について、地震を想定して正弦波状の軸方向変位をうける場合を解析し、継手間隔と波長との関係によって、極限状態に二つの形式があることや、最大ひずみの位置と値などの変化について述べている。

第5章では、曲がり部をもつ管路についての解析例を示し、入射角の影響などを調べている。また、直線管路の場合に比較して、降伏の発生順序が異なり、同じ地盤変位に対してはるかに大きいひずみを生じること、大きい管径の場合には曲げモーメントが卓越する部分で降伏が発生することなどを明らかにしている。

第6章では、丘陵造成地のように、盛土と切土とが交錯する地盤や、基盤に傾斜部をもつ地盤に埋設された管路について解析し、考察を行っている。解析の結果は、実際に多発している震害の特徴をよく説明するものであり、また、このような地盤では、通常の弾性解析によるひずみの評価が不適切であることなどの重要な知見を示している。

第7章では、本解析法を耐震設計に応用する場合の位置付け、適用性について説明している。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、複雑な力学的性質をもつ埋設管路について、弾塑性解析の定式化を行い、耐震性の評価への応用を示したもので、土木工学ならびに耐震工学に寄与するところが少なくない。よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。