

氏 名	すず きの のぶ ひさ 鈴 木 信 久
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 7 年 1 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 50 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	地盤の永久変位を考慮した埋設パイプラインの耐震設計に 関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 柳澤 栄司 東北大学教授 藤原 稔 東北大学教授 柴田 明德 東北大学助教授 風間 基樹

論 文 内 容 要 旨

関東地震（1923年）の貴重な被害経験を踏まえ、ライフライン施設に含まれる一部の重要構造物については、耐震性を考慮した設計・施工が行われてきたが、施設全体を一つのシステムとした地震災害時の問題は十分に検討されていなかった。しかし、新潟地震（1964年）によって発生した液状化とそれに伴う地盤変状のため、新潟市内をはじめとするライフライン供給システムを構成する埋設管が甚大な被害を受けたことを背景として、埋設管の耐震問題が注目されるようになってきた。

その後、宮城県沖地震（1978年）および日本海中部地震（1983年）によるライフライン施設の被害が広く社会的な注目を浴びたこともあり、ライフライン供給システムの耐震問題は、都市の地震防災上、中心的な課題として検討されるようになってきた。最近では、ロマ・プリエタ地震（1989年）およびノースリッジ地震（1994年）が近代的な都市機能を備えた市街地を襲い、ライフライン施設に甚大な被害を与えたことは記憶に新しいところである。この被害によって我々は、先進国の近代的な都市における地震防災上の最大の問題が「老朽化したライフライン」であることを改めて認識させられた。

本論文では、ライフライン供給システムにおける埋設パイプラインの耐震強度検討および液状化に伴う地盤の永久変位に対する耐震設計法の提案を第一の目的としている。さらに、これらの研究成果に基づいて、埋設パイプラインの耐震性を照査して耐震上の問題点を指摘するとともに、効果的な耐震性向上対策を提示することを第二の目的としている。したがって、本論文の主要課題とし

て、以下の7項目を設定している。

- ① 埋設管の耐震設計における問題点と研究の現状
- ② 液状化および地盤変状と埋設管被害の関係
- ③ 溶接鋼管（直管および曲管）の耐震強度
- ④ 液状化に伴う地盤の永久変位および管と地盤の相互作用
- ⑤ 一様ひずみ場における供給ネットワークの耐震解析式
- ⑥ 地盤の永久変位分布を考慮した幹線パイプラインの耐震解析式
- ⑦ 耐震解析式による埋設管の耐震性照査と耐震性向上対策

研究の第一段階では、既往の地震によって発生した埋設管の地震被害を調査分析し、鋼管（直管および曲管）の耐震強度を実験的に検討した。

埋設管の地震被害を分析した結果、平均被害率（件/km）は最大加速度にしたがって増加し、たとえば古いねずみ銑鉄管の場合には、最大地表加速度310galにおける平均被害率（0.25件/km）は年間漏水事故発生率に等しいことを明らかにした。また、液状化地域における平均被害率は非液状化地域よりも高く、震源域における平均被害率は最大加速度が大きい割に小さくなっていることを明らかにした。

単純な軸圧縮力を受ける直管の局部座屈強度は、ガス導管耐震設計指針に規定されている設計式で安全側に計算されるが、繰り返し軸変形を受ける直管の局部座屈強度は低下し、単純な軸圧縮では座屈しないひずみ振幅でも局部座屈が発生することを見出した。また、先行した地震によって初期変形が残留している曲管の残存疲労強度を推定するため、曲管の低サイクル疲労強度を回転率（曲管の曲げ変形角度/曲管の中心角）の関数で表し、簡単な形式の疲労強度推定式を提案した。

研究の第二段階では、既往の地震によって発生した地盤の永久変位分布を分析し、液状化した地盤と埋設管の相互作用を実験的に調べた。

既往の地震による地盤の永久変位分布の分析では、新潟地震（1964年）による新潟駅前地区、日本海中部地震（1983年）による能代市内地区で発生した永久変位ベクトルを基礎データとし、地表面の永久変位分布（変位幅と変位量）を詳細に調べた。この結果に基づいて、地表面における永久変位分布は3種類の基本的な変位分布モデルで近似することを提案し、この変位分布モデルの代表寸法（分布幅と変位量）を多数測定することにより変位幅と変位量の関係を表す包絡線関数を提案した。

液状化した地盤によって埋設管に作用する外力は、過剰間隙水圧比の上昇とともに減少し、完全液状化状態では、飽和状態の地盤における地盤反力の $1/10 \sim 1/100$ となることを示した。さらに、管の変位速度が地盤の反力特製に及ぼす影響を調べた結果、地盤反力係数は変位速度に従って減少し、最大地盤反力は変位速度とともに増加し、降伏変位も変位速度とともに増加する傾向があることを明らかにした。

研究の第三段階では、地盤の永久変位分布（側方変位分布）を埋設パイプラインの耐震性検討に取り込むため、供給ネットワークと幹線パイプラインについて耐震解析式を誘導した。

供給ネットワークについては、ネットワーク全体を直管、曲管、T分岐管および十字分岐管の4種類の基本要素に離散化して、一様ひずみ場における解析解を提案している。一方、幹線パイプラインに関しては、地盤の永久変位を分布関数（分布幅と変位置）で与えて、直管モデルおよび曲管モデルの耐震解析式を提案している。

埋設パイプラインの非線形変形を詳細に解析することは、大型コンピュータと汎用構造解析プログラムを駆使することが可能となった現在でも、モデル化を適切にすることと、計算結果を的確に吟味することが要求されるため、一般的には、それらの使用範囲がまだ制約されていると考えるべきである。本論文で誘導した耐震解析式は、パーソナルコンピュータで使用可能であり、簡単なモデル化で、大型コンピュータと同程度の精度で解析結果を短時間のうちに得られることを最大の特徴としている。このような性能を持った耐震解析プログラムが広く実用化されれば、この研究における最大の目的を達成したと言える。

研究の最終段階では、研究の第三段階で誘導した耐震解析式に基づいて、供給ネットワークと幹線パイプラインの代表的なモデルについて耐震性を検証し、必要に応じて埋設管の変形性能に関する耐震性向上対策の例を示した。

供給ネットワークにおける直管の耐震性を照査した結果、溶接鋼管は局部座屈および長柱座屈に対しては十分な耐震性を有していることを示した。しかし、ねじ継手やメカニカル継手で接続されている継手形式の埋設管の耐震性には問題があり、継手強度の改良や継手性能の改善が必要である。たとえばメカニカル継手に関しては、想定する側方変位によって継手部分に発生する軸変形量を超える変形性能を継手に付与することによって、耐震性能を飛躍的に向上させることができることを示した。

供給ネットワークにおける曲管の耐震性を照査した結果、 11.25° 曲管と 22.5° 曲管の耐震性が低く、 45° 曲管の耐震性もこれらに次いで低いことを指摘した。これに対し、 90° 曲管はフレキシビリティに富むために耐震性ももっとも高いことを指摘した。したがって、既往の被害調査で報告されているように、 45° 曲管と 22.5° 曲管に被害が集中している事実は、被害発生地点の地盤変位が特に大きかったためではなく、中心角が小さい曲管の耐震性が低いために、これらが選択的に被害を受けていたことを力学的に説明した。また、 11.25° 曲管はさらに耐震性が低いものの、地震被害は報告されていないようである。これは偶然、 11.25° 曲管が被害領域に埋設されていなかったためである。曲管の耐震対策として最も有効な方法は、曲げ半径の増加による撓み性の付与と管厚の増加による剛性増加を併用することであることを明らかにした。

また、供給ネットワーク内におけるフィッティング類の軸剛性や曲げ剛性は本管よりも小さいため、埋設管の変形がこれらに集中する傾向があることを示した。したがって、埋設管の地震被害はこのようなフィッティング類に集中することも、既往の地震被害の一般的傾向と一致するものである。したがって、フィッティング類の軸剛性および曲げ剛性を本管の10%程度とすることによって、

フィッティング類に変形が集中することを回避し、このような地震被害を軽減することが可能となる。理想的には、本管よりも高い剛性を付与することであるが、10%程度の剛性増加でも十分対策効果が期待できることを明らかにした。

真っ直ぐな幹線パイプラインの軸方向に側方変位分布を入力した場合、パイプに発生する軸ひずみは局部座屈ひずみおよび長柱座屈ひずみよりも小さいため、一般的には直線パイプラインの耐震性は高いものと考えられることを示した。また、軸直角方向に分布する側方変位を入力した場合でも、パイプに発生する軸ひずみは局部座屈ひずみよりも小さいため、一般的には耐震性が優れており、耐震性の問題がないことを示した。しかし、地盤が液状化することによって、直線パイプラインが大きな浮力によって曲げ変形を受ける場合、道路面への影響を極小化するためにも、必要に応じて部分的な地盤改良などによる浮上防止対策が必要となることを指摘した。

また、曲管を含む幹線パイプラインについては、平面的に分布する側方変位を作用させて耐震性を照査した結果、90°曲管の耐震性が最も低くなる傾向があることを示した。このような傾向は、供給ネットワークの解析結果と全く異なったものであるために注意を要するが、液状化した地盤においては、中心角に関係なく全ての曲管に関して耐震性が問題となることを明らかにした。このような場合、曲管の耐震性向上対策としては、供給ネットワークの曲管と同様、曲げ半径の増加と管厚の増加を併用することが効果的であることを明らかにした。

審査結果の要旨

都市ガスなどのライフラインの耐震設計は、施設に含まれる一部の重要構造物については十分な検討がなされているが、供給施設である埋設パイプラインについては、まだ確立された耐震設計方法がない。本論文は、過去において地震時に発生した被害を分析して地盤の変形入力パターンを考察することにより、埋設鋼管の耐震性を評価する方法を提案したもので、全編8章よりなる。

第1章は、序論であり、研究の背景と目的を述べている。

第2章では、代表的な既往の地震によって発生した埋設管の地震被害について被害要因および被害状況を分析し、地盤条件と被害の関係を考察している。埋設管の被害のうち、特に液状化にともなう地盤変状によるものに着目し、埋設管の管種、管径、継手種別ごとに被害の特徴を定量的に示している。

第3章は、都市ガスなどに使用されている鋼管の耐震強度を把握するために、埋設管の繰返し載荷試験を行った結果について述べたものである。直管については、座屈発生回数を軸ひずみ振幅と管厚比の関数として求める実験式を、また、曲管については低サイクル疲労強度を求める疲労設計線図を提案している。これは、新たな重要な知見である。

第4章では、埋設管の耐震設計に必要な地盤の永久変位量の算定方法と液状化した地盤の反力特性について述べている。液状化による地盤の永久変位については、まだ確立された算定手法がないため、ここでは既往の地震により発生した地盤の永久変位の最大値を用いて、管体に地盤の強制変位として与える設計方法を提案している。

第5章は、現行の耐震設計指針では規定されていない、供給ネットワークの耐震設計に必要な、管路網要素の変形解析を行ったものである。管路網を構成する直管、曲管および分岐管などの個々の要素について、一様ひずみ場および一様曲率場での変形解析を行い、簡便な耐震解析式を求めている。これは、有用な知見である。

第6章では、地盤の永久変位に対する幹線パイプラインの耐震解析式を導出している。ここでは、第4章で定義した地盤の永久変位に対する直管および曲管の変形解析を行い、耐震解析式を求めている。

第7章は、埋設管の耐震解析手法を示したものである。供給パイプラインに用いられる比較的小さい管径の埋設管と幹線パイプラインの用いられる比較的大きな埋設管の両者について損傷確率を求め、既往の地震における埋設管被害との対応を行い、その妥当性を検証している。

第8章は、結論である。

以上要するに本論文は、埋設パイプラインを幹線とネットワークに分類して耐震性を評価する方法を新たに提示したものであり、土木工学および耐震工学の進展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。