

氏名	鞆田 顕章
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 787 号
学位授与年月日	平成 22 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	摩擦支持構造物の簡易耐震設計法に関する研究
論文審査委員	委員長 准教授 渡邊 鉄也 委員 教授 佐藤 勇一 委員 教授 田中基八郎 委員 教授 水野 毅

論文の内容の要旨

近年、産業施設において非線形特性の振動エネルギー散逸効果を利用した耐震構造や免震構造が注目されている。その中でも、摩擦現象を利用したものは、系の固有周期が変化しないことに加え、しゅう動時の地震エネルギー散逸効果を有することから、施設全体の耐震性が向上する。過去には、配管系について配管と架構間の接触面における摩擦現象を利用した地震応答低減効果が注目された。また、最近では、摩擦支承型免震構造を導入した一般建造物が見られるようになった。この免震構造は、免震による構造物の非共振効果に加え、摩擦の地震エネルギー散逸効果による構造物の応答低減が期待できる。さらに、本構造の地震応答低減効果によって、施設全体の耐震強度を上げる必要が無くなるため、建設コストの低減を図ることが可能となる。しかし、今日までに、産業施設の耐震対策に摩擦支承型免震構造が導入された例はさほど多くはない。その理由として、免震構造や架構といった支持構造物の上部に設置される建屋・機器類が一般家屋と比べ多種多様であること、摩擦系の地震応答特性が複雑であることの 2 点が挙げられる。

摩擦系の地震応答特性は、しゅう動面の摩擦力や系の固有振動数、入力地震波の周波数特性に依存する。そのため、摩擦系の地震応答推定にはスティックスリップを考慮した計算を行う必要がある。さらに、産業施設においては支持構造物上に機器類を設置することが多く、地震時に支持系—機器系間の連成振動による機器系の損傷が懸念される。しかし、多自由度系の時刻歴応答計算は、解析に時間及びコストを要するため、非線形性を有する構造物は設計者側から敬遠される。よって、多自由度摩擦系の地震応答推定には、何らかの簡易的な方法が必要となる。

ここで、産業施設に対する各種耐震設計指針では、多自由度線形系の地震応答を簡易に推定する手段として床応答スペクトルを用いたモード解析法を適用することが可能である。この方法は、予め用意された 1 自由度線形系の基準応答倍率を用いて各次の応答を推定し、適切なモード合成法を用いて簡易的に各質点の応答を算出するものである。しかし、多自由度摩擦系の場合、以下の問題点によりモード解析法の実機適用が困難である。

- ・1自由度摩擦系の基準応答倍率が用意されていない。
- ・多自由度線形系では、比例減衰系と非比例減衰系の2種に分類される。非比例減衰系の場合、モード分離時のモード減衰比の導出は複素固有値解析を行う必要があるため、即座に算出できない。
- ・摩擦力項のモード分離時に各次の摩擦力が非連成化できない。

そこで、本研究では、上述の問題点を解決し、2自由度摩擦系における地震応答の簡易推定法を提案することを目的とした。なお、本推定手法は高圧ガス設備等耐震設計指針で適用出来るように考慮されている。本研究で得られた結果を以下に述べる。

- (1) 高圧ガス設備等耐震設計指針の基準応答倍率を参考にして、模擬地震波を作成した。さらに、この模擬地震波を用いて時刻歴応答解析を行い、耐震設計用摩擦系応答スペクトルを作成した。提案したスペクトルにより、1自由度摩擦系の地震応答を簡易推定することが可能となった。
- (2) 2自由度摩擦系のモード解析に関して、モード減衰比の簡易推定、摩擦力ベクトルの非連成化手法の検討を行った。その結果、複素固有値から算出される非比例減衰系のモード減衰比を、比例減衰系におけるモード減衰比の曲線の接線で近似することができた。さらに、質量比0.1以下の2自由度摩擦系において、運動方程式を近似的にモード分離、非連成化することができた。
- (3) 2自由度摩擦系のモード解析法及び摩擦による応答低減効果を実験的に検証するため、簡易振動モデルの製作及び基礎励振による振動実験を実施した。その結果、1次の共振点付近において応答低減効果があることが実証された。また、入力周波数3.0及び4.0 Hzにおいて、本研究で提案した摩擦力ベクトルの非連成化手法を用いた時刻歴モード解析の結果は、実機による振動試験結果と良好に一致することが明らかとなった。
- (4) 2自由度摩擦系における地震応答の簡易推定法について検討を行った。本手法は、各モードの加速度応答倍率を耐震設計用摩擦系応答スペクトルから推定し、二乗和平方根（SRSS）法により2質点の加速度応答倍率を求めるものである。提案した簡易推定法の適用可能範囲を適用可能表及び適用可能マップの形式で表示した。さらに、加速度応答倍率の推定手順を示し、耐震設計時の指針とすることができた。

以上の結果より、高圧ガス設備等耐震設計指針で定められている多自由度線形系に対する地震応答の簡易計算法と同様の手順で、2自由度摩擦系の加速度応答倍率を求める方法を確立することができた。本研究で提案した推定法を利用することで、産業施設への摩擦支承型免震構造や摩擦支持構造物の普及率向上が期待できるものと考えられる。

論文の審査結果の要旨

本論文の審査委員会は2010年1月27日に論文発表会を開催した。その発表を含めて学位論文の審査を行った。研究の概要は以下のとおりである。

近年、大規模な地震が多発しており、一般家屋もさることながら産業施設内構造物の被害も多く報告されている。産業施設内構造物は2次的な災害が懸念されるため、一般家屋とは異なる耐震設計基準が定められている。産業施設内構造物の耐震設計では、線形系が主体とされているが、摩擦、衝突、弾塑性などの非線形特性は、振動エネルギーを散逸するため、応答低減効果があることがわかっている。そこで、産業施設において非線形特性の振動エネルギー散逸効果を利用した耐震構造や免震構造が注目されてきている。その中でも、摩擦現象を利用したものは、系の固有周期が変化しないことに加え、しゅう動時の地震エネルギー散逸効果を有することから、施設全体の耐震性が向上する。摩擦系の地震応答特性は、しゅう動面の摩擦力や系の固有振動数、入力地震波の周波数特性に依存する。そのため、摩擦系の地震応答推定にはスティックスリップを考慮した計算を行う必要がある。さらに、産業施設においては支持構造物上に機器類を設置することが多く、地震時に支持系－機器系間の連成振動による機器系の損傷が懸念される。しかし、連成系の時刻歴応答計算は、時間及びコストを要するため、非線形性を有する構造物の設計は困難である。産業施設に対する各種耐震設計指針では、線形系の地震応答を簡易に推定する手段として床応答スペクトルを用いたモード解析法が用いられている。この方法は、1自由度線形系の基準応答倍率を用いて各次の応答を推定し、適切なモード合成法を用いて簡易的に応答を算出するものである。しかし、摩擦が介在する連成系の場合には、基準応答倍率が無い、あるいは、摩擦系のモード分離ができないため、モード解析法の実機適用が困難である。本論文では、2自由度摩擦系における地震応答の簡易推定法を提案し、高圧ガス設備等耐震設計指針に適用できるようにしている。

本論文は、以下の8章から構成されている。

第1章は緒論であり、産業施設内構造物の地震被害を踏まえて、本論文の目的及び耐震設計における位置づけを述べている。

第2章は、現行の耐震設計指針の説明であり、高圧ガス設備等耐震設計指針を例にとり、構造物の地震応答計算方法を述べている。

第3章では、1自由度摩擦系の地震応答特性を扱っている。まず、線形系における実地震波を入力波とした地震応答解析結果と現行の耐震設計用応答スペクトルを比較し、系の固有周期が2秒以上の長周期領域では耐震設計用応答スペクトルの再設定が必要であることを説明している。次に、高圧ガス設備等耐震設計指針の基準スペクトルを基に、固有周期2秒以上を応答速度一定とする長周期対応型応答スペクトルを提案している。1自由度摩擦系の地震応答計算においては、摩擦部のしゅう動停止、開始条件の説明及び摩擦力のパラメータ α （摩擦力／慣性力）の定義を行っている。最後に、実地震波32波を用いた1自由度摩擦系の時刻歴応答解析を行った後、得られた結果から加速度応答スペクトルを作成し、 α 、固有周期、地震波の周波数特性による応答低減効果の違いについて述べている。

第4章は、1自由度摩擦系の耐震設計用摩擦系応答スペクトルを提案し、最大応答の推定を行っている。

スペクトルの提案を行うにあたって、長周期対応型応答スペクトルに即した模擬地震波（第1～4種地盤対応）の作成が必要となる。本章では、まず正弦波の重ね合わせによる模擬地震波の生成手順の説明を行い、各地盤に対応した模擬地震波の生成結果を示している。次に、この地震波を用いて1自由度摩擦系の時刻歴応答解析を行い、 α が0～0.5の範囲で加速度応答スペクトルを示している。さらに、得られたスペクトルから包絡線を作成し、これを耐震設計用摩擦系応答スペクトルとして提案している。このスペクトルは、現在の耐震指針に適用できるものとなっており、1自由度摩擦系の地震応答推定を簡易的に行うことが可能であることを明らかにしている。

第5章では、基礎—支持系間に摩擦を有する2自由度系のモード解析手法に関して検討を行っている。高圧ガス設備等耐震設計指針では、多自由度系の地震応答推定にモード解析法を用いている。しかし、粘性減衰および摩擦減衰を有する多自由度系の場合、モード分離時に減衰力項、摩擦力項が非連成化されないため、モード解析を行うことができない。そこで、本章では、減衰力項に関しては各次のモード減衰比を求める推定式を提案している。摩擦力項に関してはモード行列内の要素の値を比較して、2質点の質量比が微小の場合では片方のモードの摩擦力を0と近似することが可能であることを示している。さらに、モード分離した2つの1自由度系の時刻歴応答解析結果をモード合成し、得られた各質点の加速度波形と2自由度摩擦系の時刻歴応答解析結果を比較し、時刻歴応答解析結果に対する時刻歴モード解析法の結果が誤差10%以下であれば、2自由度摩擦系に対してモード解析法を適用することが可能であることを示している。最後に、2質点の固有振動数比を横軸に、質量比を縦軸にとり、時刻歴モード解析法の誤差10%以内の範囲を示している。

第6章は、第5章で提案した2自由度摩擦系のモード解析法を実験的に検証している。質量比0.1程度の2自由度摩擦系の簡易振動モデルを製作し、基礎を正弦波加振することにより2質点の応答加速度を計測している。実験結果と2自由度摩擦系の時刻歴応答解析による結果を比較し、摩擦による応答低減効果及びモード解析法の実機適用性を述べている。

第7章では、提案した耐震設計用摩擦系応答スペクトル及びモード解析法を用いて、2自由度摩擦系の地震応答の簡易推定法を提案している。本研究では、各次の加速度応答倍率を耐震設計用摩擦系応答スペクトルにより推定し、2乗和平方根（SRSS）法を適用してモード合成を行い、2質点の加速度応答倍率を算出している。そして、本推定法により算出した結果と模擬地震波及び実地震波を用いた時刻歴応答解析結果を比較し、推定値の妥当性を検証している。さらに、提案した簡易推定法の適用可能範囲を示している。最後に、加速度応答倍率の推定手順及び推定例を示し、耐震設計時の指針として用いることが可能であることを述べている。

第8章は第3章から第7章までを要約したものであり、本研究で得られた成果を述べるとともに、今後の展望を述べている。

以上のように、本研究は摩擦を有する産業施設内構造物の簡易耐震設計法を確立しており、耐震設計指針に導入可能となっている。本論文に関して、第一著者として査読付き学術論文3編、国際会議講演論文2編が掲載されている。よって、本学位論文審査会は、本論文が博士（工学）の学位にふさわしいものであると判断する。