

氏名	NEPAL SANDHYA
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工乙第256号
学位授与年月日	令和2年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	Base isolation system with negative stiffness for displacement mitigation under long-period and near-fault ground motions (負剛性ばねを利用した変位抑制効果を有する免震システム)
論文審査委員	委員長 教授 齊藤 正人 委員 教授 松本 泰尚 委員 教授 牧 剛史 委員 准教授 内村 太郎

論文の内容の要旨

Base isolation system with variable negative stiffness has been proposed for displacement mitigation of the base-isolated objects or target objects such as sensitive instruments, critical computer servers, and furnitures. Performance of proposed isolation system is investigated by varying the negative stiffness using different functions (such as power functions, elliptical function and exponential function) in terms of the displacement response of the isolated objects. Equation of motions is formulated for varying the performance of base isolation system subjected to near-fault and long-period ground motions. The parametric study is conducted and an optimal order of the various parameters of different functions satisfying the allowable limits of both the displacement and acceleration responses in practical use is proposed. From the numerical simulation, it is concluded that varying the stiffness with high-order power, elliptical and exponential functions mitigates the displacement response effectively. However, negative stiffness itself is unstable so varying negative stiffness is complicated as compared to varying positive stiffness.

Hence, this research also proposed base isolation system with the negative-variable positive mechanical unit for displacement mitigation of the base-isolation objects or the target objects. The proposed device can also be used for the retrofitting of the existing isolation system without moving isolated object under service. It consists of Negative-Positive springs unit (NP unit) arranged in parallel with positive spring and a damper. The NP unit accelerates the change in the stiffness of the isolation system where the stiffness of the positive springs varies linearly in terms of the displacement response of the isolated objects. An optimal range of damping values and slope satisfying the allowable limits of both displacement and acceleration when subjected to near-fault and long-period ground motion is proposed. The numerical analysis shows that the increase in damping of the system and the slope of the linear function is effective in reducing the displacement responses whereas the acceleration response to near-fault ground motions tends to increase appreciably with an increase in the damping.

The maximum displacement of the isolated object decreases by almost 30% and more than 70% when subjected to near-fault and long period ground motions respectively. The results show that the achieved maximum absolute acceleration of the base isolated object with the proposed model is less than 2.5 m/s^2 while the maximum relative displacement less than 0.3m for both types of earthquake ground motions. Moreover, all the springs comprising the system are elastic linear so, it does not have any residual displacement after an earthquake.

In this study to realize the variable positive spring of NP unit of the proposed base isolation system, systems with discontinuous stiffness-displacement (K-D) relationship are considered for varying the stiffness of positive spring. From the numerical analysis, it is found that the system with discontinuous K-D relationship comprising at least three springs in parallel (as a positive spring) shows both the displacement and the acceleration responses within the allowable limits under near-fault and long-period ground motions.

論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、令和2年2月10日に論文発表会を開催し、論文内容の発表に続いて質疑と論文内容の審査を行なった。以下に審査結果を要約する。

1995年に発生した兵庫県南部地震では、構造物の損傷や倒壊に加えて屋内の設備や什器等の移動や転倒により多くの人的被害を拡大させた。当該地震以降、地震対策として従来の耐震設計法の見直しに加え、地震動によって生じるエネルギーを散逸させる制震デバイスの開発や慣性力を抑制する免震装置の開発と導入が進められてきた。一方、国内外では今世紀に入り兵庫県南部地震の加速度振幅を遥かに凌ぐ地震動を幾度も観測しており、更なる地震対策の改善が喫緊の課題となっている。特に、震源から数百キロメートルも離れた場所で観測される長周期地震動は、高層ビルなどの長周期構造物に及ぼす新たな作用として問題視されている。

本論文の研究対象となる免震構造とは、地震から保護する対象物を柔らかい部材で支持させることで構造系全体を長周期化させたものである。振動論の原理により、入力地震動の周期成分よりも構造系の固有周期が優に長い場合には、免震対象物の質量効果が支持部の復元力効果よりも卓越することで、対象物はあたかも入力面から遮断された状態となり応答加速度は著しく低減する。これを免震効果と呼び、近年では建物や重要機器の地震対策として広く利用されている。

一般に、免震構造は断層近傍で観測される地震動に対し、顕著な加速度応答の抑制効果を発揮することが様々な研究により検証されている。一方で長周期化された免震構造は上述した長周期地震動に対して共振現象が励起される危険性が報告されている。長周期地震動に対して免震構造が共振すると、過大な変位が発生し免震装置の許容変位量を超す可能性が高く、装置が損傷するリスクや保護対象物が転倒するなどの危険性がある。実際に、2011年の東北地方太平洋沖地震では免震装置上の通信機器が転倒するなどの被害が報告されている。現在、高い確率でその発生が予測されている東海地震や南海地震では、震源から離れた広い範囲で長周期地震動の発生が予測されている。そのため、すでに免震対策が施されている構造物や重要機器類への新たな対策が必要不可欠である。

本論文では、従来の免震構造に付加的な外部装置を付与することで、免震装置のレトロフィットを行う方策について研究を行ったものである。すでに普及している免震装置を回収し過大な変位に対応した免震装置に置換することは、経済性や事業継続性の観点からも難しい。また、建物周辺や屋内設備周辺には免震装置の許容変位に即したクリアランスが設けられており、装置の許容変位のみを増やすことでは対応できない場合が多いのが実情である。そのため、従来の免震装置に付加的な装置を取り付けることで長周期地震動にも対応できる免震装置のレトロフィットが望まれる。本研究では、剛性の調整機構として利用価値が高まっている負剛性ばねを用い、断層近傍地震動と長周期地震動の双方に対応可能な対策方法を検討している。本論文の前半では、従来型の免震装置に多様な可変性を持たせた負剛性ばねを取り付けて、免震効果と長周期地震動に対する共振現象の抑制効果について解析的検討を行っている。また、付加的な外部装置としての具体的な構成とその要素諸元が免震構造の応答に及ぼす影響について評価している。本論文の後半では、提案手法の実現可能性に向けた近似モデルによる動的解析を行い、その適用性を評価している。本論文は5章から構成される。

本論文の第1章では、国内外における免震装置の研究開発状況についての調査結果を示している。断層近傍地震動のように短周期成分が卓越する地震動に対して、従来型の免震装置に加えて近年のアクティブ、セミアクティブ制御による可変ばねを用いた装置の特徴について説明している。また負剛性ばねを利用した免

震装置についての詳細を述べている。加えて長周期地震動に対する高層ビルなどの長周期構造物に対する応答抑制手法についてレビューすると同時に、断層近傍地震動と長周期地震動を同時に制御する免震装置の研究が少ないことを示し、本研究の位置づけと目的を詳説している。

第2章では、従来型の免震装置に可変性を有する負剛性ばねを付加的に取り付けた解析モデルを構築し、時刻歴応答解析によって免震効果と応答変位の抑制効果について評価している。可変性に関しては、冪関数、楕円関数、指数関数を仮定している。各可変性を有する免震構造の地震応答特性を分析した結果、免震対象物の変位増加に応じて剛性を低減させることで免震効果が高まること、また特定の冪関数において断層近傍地震動と長周期地震動の双方で従来型の免震構造よりも免震効果と共振現象の回避が可能となることが判明している。その理由として、小変位時の剛性を従来よりも高く設定することによって、長周期地震動に対する免震構造の共振現象が回避できること、また変位増加に伴い負剛性ばね効果を増大させたことによって、免震構造の長周期化が進み免震効果を効果的に発揮できることを示している。この発想は、従来から提案されている過大变位領域で剛性を増加させる手法とは著しく異なる考え方であり、極めて斬新かつ合理的である。

続く3章では、従来の免震装置をレトロフィットするための付加的な外部装置に関する具体的な構成が考案されている。本研究では、従来の免震装置に付加する外部装置の剛性を短周期側に設定し、変位増加に伴い正ばねを減少させることで免震構造の固有周期を低減させることを可能としている。また、可変可能な負剛性ばねという仮想機構を、定剛性負ばねと可変剛性正ばねとの直列機構の実現可能な装置として置換するなど、多くの新しい提案がなされている。本章では、考案した構成要素となる正ばね、可変正ばね、負剛性ばね、ダンパーに関するパラメトリックスタディを実施し、外部装置としての力学的安定性を条件として付与した上で、それぞれの要素が免震構造に及ぼす影響についての定量的な評価を行い最適値の検討を行っている。また、観測地震動と想定地震動に対する応答評価に加えて、多様なサイクロイドパルスによる応答特性について評価を行い、地動入力に対するより一般的な応答特性を明らかにしている。一連の解析によって、従来の免震効果との同等性を確保しながら、変位抑制効果を著しく向上させることに成功している。更に4章では、上記の提案装置に関する実現可能性を検討している。機械式ばねによるパッシブ制御を想定した段階的剛性可変を仮定し、その応答特性について考察を加えている。最後の第5章では本論文の成果と提案を結論付けている。

以上のように、断層近傍地震動と長周期地震動の双方に対応可能な免震装置の考案とその成果は先駆的かつ独創的であり、大変重要な成果が得られたといえる。また、これらの成果は将来の実務的研究に向けて極めて重要な示唆を与えている。なお、研究成果は、第一著者として学術論文誌 *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* (accepted)、国際会議論文集 25th International Congress on Sound and Vibration (2018) に掲載されている。さらに、本研究で考案した免震装置の発明者の一人として、埼玉大学から特許申請（特開 2019-163799、特願 2018-51224）されている。

以上のことから、当学位論文審査委員会は、本論文が博士（学術）の学位に相応しい内容であると判断した。