

氏名（本籍） <sup>すぎ</sup>杉 <sup>もと</sup>本 <sup>こう</sup>浩 <sup>いち</sup>一（静岡県）  
学位の種類 博士（工学）  
学位記番号 乙第 1136 号  
学位授与の日付 2022 年 3 月 19 日  
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当  
学位論文題目 **大振幅の長周期地震動に対する高性能免震建物の地震応答に関する研究**

論文審査委員 （主査）教授 永野 正行  
教授 衣笠 秀行 教授 兼松 学  
教授 木村 吉郎 教授 伊藤 拓海

## 論文内容の要旨

免震構造は、建物の重量を支持しつつ、水平方向には柔らかく変形する構造要素を建物基礎部に設置することで建物を地震動から絶縁する構造形式である。1995 年の兵庫県南部地震において、震央から約 35km 離れた位置にある WEST ビルの上部構造内に生じる水平加速度が、地表面加速度の 3 分の 1 以下になるという観測記録が得られ、日本において免震構造の効果が実証される結果となった。これ以降、免震構造はその有効性が認知され、広く普及することとなる。免震構造は、構造材料と建物高さによりある程度決定される建物の振動特性を、免震装置によって比較的自由に制御することを可能としている。建物の 1 次固有周期を 3 秒以上と長周期化させることで、一般的な地震動において卓越する 1 秒以下の短周期を避け、上部構造の応答を低減させるのが免震構造の大きな特徴である。この免震構造の特徴から、比較的中低層建物である市庁舎や病院などの重要建築物から、集合住宅やオフィス、商業施設を含む複合施設等の超高層建物にまで幅広く活用される構造である。

一方で、周期数秒以上の長周期成分を有する地震波が大規模平野などの堆積層が厚く発達した場所に達すると、長周期成分の揺れの増大と数分間にも及ぶ継続時間の伸長を伴う、いわゆる長周期長時間地震動が生じた。2003 年十勝沖地震の際に、苫小牧市を中心に数多くの石油タンクにスロッシングが発生し、大きな被害があった。この地震以来、超高層建築物や免震建物など長周期構造物の設計用入力地震動として長周期地震動を検討することの必要性が広く認識された。また、2011 年東北地方太平洋沖地震では、震源から遠く離れた首都圏の超高層建物が 10 分以上も大きく揺れ続けるという事態が起こった。近い将来にその発生が懸念されている南海トラフ地震や相模トラフ地震においても、長周期かつ大振幅

な巨大地震の発生により、免震建物や超高層建築物などの長周期構造物が共振し大きく揺れるとともに、長時間にわたる繰り返しの揺れにより建物の損傷が進行することが懸念される。さらには 2016 年熊本地震では、3 秒～4 秒の長周期パルス波が観測されており、特に益城町や西原村にて観測された地震波においては、免震建物の免震層変位は 1m を大きく超える場合も想定され、免震建物の擁壁への衝突の危険が示唆された。十分な免震クリアランスが確保できる条件であり、かつ 1m を超える変形に対応可能な支承やダンパーを揃えることが可能であれば、免震層の大変形にも対応可能である。しかしながら、既存の免震部材を用いた一般的な免震建物の免震クリアランスの多くは 50cm～60cm であり、擁壁衝突による上部構造の被害も想定される。これらの背景を考慮して BCP の観点から、安全性や耐震余裕度を高めた免震建物が求められている。

現在の免震建物の性能としては、JSCA が規定する最高ランクの免震特級であってもレベル 2 相当の地震に対しては軽微な被害を認めており、層間変形角の目安は 1/200 程度、応答加速度の目安は 200cm/s<sup>2</sup> 程度である。また、既存の免震建物の免震層クリアランスは 50cm～60cm の建物が大半を占めることから、長周期地震動が発生した際には擁壁との衝突への対策も考える必要がある。変位と加速度はトレードオフ関係であることから、単純な免震層変形の抑制は、上部構造の応答加速度や層間変形角の増大を招くことになる。上部構造の応答加速度増大は構造的な被害だけではなく、室内にある家具の転倒の危険も想定される。そこで中低層建物の場合、応答加速度の増加を抑えながら免震層変位を低減することが求められ、超高層建物の場合、2 次や 3 次の高次モードが卓越する可能性もあることから、高次の振動を抑えつつ建物全体の応答加速度の増加を抑え、免震層変形の低減が求められる。すなわち、中低層免震建物に対しては、免震層の加速度増加抑制と変形の低減が求められ、超高層免震建物に対しては、免震層の応答だけでなく、上部構造物の高次振動モードを抑えることによる、応答加速度と層間変形角を低減させ、室内や非構造部材にも被害が及ばない高性能免震建物の構築を目指すことが課題となっている。

既往の研究では、中低層免震建物に対しては上部構造の応答値を大きく増加させずに免震層変形を低減できる装置開発は様々な形で行われているが、実建物への適用は多くなく、汎用化までは至っていない。また超高層建物に対して、上部構造物の高次モードを抑制し、その応答を従来免震構造の半分程度に低減する免震架構の実現には至っていない。

以上のような現状を踏まえ、本研究では中低層免震建物に対して慣性質量ダンパーを用いた免震構造について提案する。また、超高層免震建物に対してはコア貫通複層免震架構を新たに提案し、上部構造物の応答加速度を全層にわたり 100cm/s<sup>2</sup> 以下とする、従来の免震架構の半分以下を目指す。また層間変形角は、非構造部材も損傷がないレベルである 1/400 以下を全層にわたり目指す。これらの数値は高次モードを抑えなければ達成できないレベルである。また免震層変形は 400mm 以下とし、これは積層ゴムのせん断変形 200% 以下である。さらにレベル 2 を超える地震動に対しても従来の免震よりも応答低減が確認でき、安全に設計できるレベルを目指す。

本論文によって、大振幅、長周期地震動に対して、中低層～超高層の免震建物の応答を低減可能な高性能免震構造を提案する。

第 1 章では、まず本研究の背景を述べ、続いて免震構造に関する既往の研究について整理する。本研究は、大振幅な長周期地震動に対する高性能免震構造に関する研究であるため、免震層変形を抑制する技術や、大振幅を許容する技術、高性能な免震架構に焦点を当てて整理を行う。

第 2 章では、中低層免震建物には慣性質量ダンパーを用いた免震構造を提案し、超高層免震建物には、新たに筆者が考案したコア貫通型複層免震（以下、提案架構）の適用を提案する。提案架構は、1つの架構内に複数の免震層を有し、建物全層を貫通するコア部の直下にも免震層を有する免震架構である。まずは慣性質量ダンパーを概説し、免震建物に使用する効果について示す。既往の研究より、慣性質量ダンパーによる入力低減効果や周期伸長効果からオイルダンパーのみを使用する場合よりも変位を抑制することが可能となる周期帯があることが知られているが、地震動の卓越周期と建物周期の関係によっては、慣性質量ダンパーの特性上加速度応答が増大する。そこで慣性質量ダンパーに直列ばねを接続することで、高振動数側の加速度上昇の増加を抑制できることを伝達関数から示す。また、慣性質量ダンパーにリリーフ機構を付加することにより、巨大地震にも効果があることを、1質点系モデルを用いた時刻歴応答解析から示す。

次に提案架構を 2 質点系モデルに置換し、その共振曲線や複素固有値解析を用いて、その振動特性を示す。また提案架構の効果的な免震諸元の範囲についても示す。一方で、提案架構はコア下免震層の変形が通常の免震層の約 2 倍となる特徴を持つことから、提案架構の実現には、大振幅に対応可能なオイルダンパーの開発が不可欠である事にも言及する。

第 3 章では、第 2 章で提案した慣性質量ダンパー+直列ばねの効果を検証するために、小型の慣性質量ダンパーを製作し、直列ばねと接続した振動台実験について示す。また実験結果を模擬する解析モデルを構築する。次にリリーフ機構付き実大慣性質量ダンパーを製作して単体加振試験を行い、その振動特性を把握する。振動特性とは、慣性質量や減衰性能、作動摩擦力であり、それぞれの振動数依存性や温度依存性について定式化して示す。この実大慣性質量ダンパーにはリリーフ機構が備わっているため、リリーフ後の振動特性まで把握し、力学モデルを構築する。構築した力学モデルを用いて、中低層免震建物を対象とした多質点系の時刻歴応答解析により免震建物への効果を示す。

第 4 章では、第 2 章で示した提案架構を実現可能とするために必要な大振幅オイルダンパーシステムの開発について示すとともに、提案架構へ設置した場合の応答低減効果について示す。本ダンパーシステムは既製品の免震用オイルダンパーを用いて直列に接続し、各オイルダンパーの変形を揃える「変位調整機構」を並列に接続することにより、振幅と速度を従来オイルダンパーの 2 倍にできるものである。実大試験体を製作し、水平 2 方向の加力実験を行った結果、想定通り既製品ダンパーの変位と速度を 2 倍にでき、かつ変位調整機構により各オイルダンパーの変位が揃うことを確認した。また、2 方向に対応可能であり、単体のオイルダンパー性能に変化がないことを確認した。本オイルダンパーを用い、第 2 章で示した提案架構の効果がある免震諸元の範囲内にて設計した超高層建物を対象に、時刻歴応答解析を行い、レベル 2 に基準化した地震動に対して目標とする性能を達成することを確認した。また、レベル 2 を超える地震動に対しても従来の 2 層免震架構より大幅な応

答低減を確認できることを示した。大振幅オイルダンパーシステムと提案架構により、超高層免震建物は、従来の免震構造と比較して応答値を半分以下とする高性能な免震架構の実現が可能となった。

第5章では、本論文の結論として、大振幅長周期地震動に対して免震建物の応答を低減させる対策と効果について総括するとともに、今後の課題と展望について述べた。

本論文は、中低層免震建物から超高層免震建物までのあらゆる免震建物に適用可能な高性能免震建物を提案した。さらに実現化させるために必要な装置開発まで示しており、大振幅長周期地震に対する免震建物等の設計にとって有益な知見となり得る。

## 論文審査の結果の要旨

免震構造は建物の固有周期を長周期化させることで、上部構造の応答を低減させる構造であり、比較的中低層建物である市庁舎や病院などの重要建築物から、集合住宅やオフィス、商業施設を含む複合施設等の超高層建物にまで幅広く活用されている。

一方で、近い将来に発生が懸念されている南海トラフ沿いの地震や相模トラフ沿いの地震において、大振幅の長周期地震動の発生により、免震建物や超高層建物などの長周期構造物が共振し大きく揺れるとともに、長時間にわたる繰り返しの揺れにより建物の損傷が進行することが懸念される。2016年熊本地震の本震(M<sub>j</sub>7.3)の西原村で観測された地震動を免震建物に入力する場合、その免震層変形は1mを大きく超える場合も想定され、免震建物の擁壁への衝突の危険性が示唆された。これらの背景を考慮して事業継続計画(BCP)の観点から、安全性や耐震余裕度を高めた免震建物が求められている。

現在の免震建物の性能として、日本建築構造技術者協会(JSCA)が規定する最高ランクの免震特級であってもレベル2相当の地震に対して軽微な被害を認めており、上部構造の層間変形角は1/200程度、応答加速度は200cm/s<sup>2</sup>程度が目安である。また、大振幅の長周期地震動が発生した際には擁壁との衝突への対策も考える必要がある。変位と加速度はトレードオフ関係であり、単純な免震層変位の抑制は、上部構造の加速度や層間変形角の増大を招く。そこで中低層建物の場合、応答加速度の増加を抑えながら免震層変位を低減することが求められ、超高層建物の場合は、高次振動を抑えて建物全体の応答加速度の増加を抑えつつ、免震層変形の低減が求められている。

以上のような現状を踏まえ、本研究では中低層建物に対して、慣性質量ダンパーを用いた免震構造について提案する。また、超高層建物に対しては、免震特級よりワンランク上(レベル2に対して無被害であり、レベル2を超える地震動に対しても安全に設計できるレベル)の高性能な免震架構を提案する。

第1章では、本研究の背景と免震構造に関する既往の研究について整理する。

第2章では、中低層建物には慣性質量ダンパーを用いた免震構造を提案し、超高層建物には、新たに筆者が考案したコア貫通型複層免震(以下、提案架構)を提案する。提

案架構は、複数の免震層を有し、建物全層を貫通するコア部の直下にも免震層を有する免震架構である。まずは慣性質量ダンパーの機構を示し、直列にばねを接続することによる更なる応答低減効果について伝達関数から示す。さらにリリーフ機構付き慣性質量ダンパーの効果について1質点系モデルを用いた時刻歴応答解析から示す。

次に提案架構を2質点系モデルに置換し、共振曲線や複素固有値解析を用いて、その振動特性を示し、効果的な免震諸元の範囲についても示す。一方で、コア下免震層の変形が通常免震層の約2倍となることから、提案架構には、大振幅に対応可能なオイルダンパーの開発が不可欠である事にも言及する。

第3章では、小型の慣性質量ダンパーを製作し、直列ばねと接続した振動台実験について示す。次にリリーフ機構付き実大慣性質量ダンパーを製作して単体加振試験を行い、その振動特性を把握する。振動特性とは、慣性質量や減衰性能、作動摩擦力であり、それぞれの振動数依存性や温度依存性について定式化して示し、力学モデルを構築する。構築した力学モデルを用いて、中低層免震建物を対象とした多質点系時刻歴応答解析により免震建物への応答低減効果を示す。

第4章では、提案架構に必要な大振幅オイルダンパーシステムの開発について示すとともに、提案架構へ設置した場合の応答低減効果について示す。本ダンパーシステムの実大試験体を製作し、水平2方向の加力実験を行い、その性能を確認する。本オイルダンパーを用い、第2章で示した提案架構の免震諸元で設計した超高層建物を対象に時刻歴応答解析を行い、従来の2層免震架構より大幅な応答低減を確認できることを示した。

第5章では、本論文の結論として、大振幅の長周期地震動に対して免震建物の応答を低減させる対策と効果について総括するとともに、今後の課題と展望について述べた。

本論文では、中低層建物から超高層建物までのあらゆる免震建物に適用可能な高性能免震構造を提案しており、想定を超える大振幅の長周期地震動に対する応答低減効果を含む振動特性を解明した点が大きな特徴である。さらにこれを実現化させるために必要な装置開発まで行っており、本論文で得られた研究成果は、大振幅の長周期地震動に対する免震建物等の耐震設計法の構築に大きく貢献するものである。

理工学研究科、工学研究科の各専門の審査員5名で委員会を組織し、さらに専門分野に精通するオブザーバ1名を加え、計3回の本審査会を通して厳密な審査を行った結果、本論文は博士(工学)の学位論文として十分価値あるものと認められた。